

2 Eje 31

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN ROBOT  
CONTROLADO POR UN MICROPROCESADOR

REPORTE DE SEMINARIO

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

PRESENTAN:

Edmund García Galindo  
Nemesio E. Maza Vallejos  
Mordejai Zvi Retchkiman K.  
Carlos E. Thomé Ortiz

México, D.F.

1982



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.

# INDICE

## CAPITULO I

Introducción . . . . .	1
1. Planteamiento del problema . . . . .	1
2. Motivación del problema . . . . .	3
3. Solución al problema . . . . .	5
4. Historia y datos interesantes . . . . .	6
4.1 Historia	
4.2 Definición de robot y leyes de robótica	
4.3 Areas de aplicación	
4.4 Analogía entre el ser humano y el robot, y trabajos similares	
4.5 Futuro	
5. Referencias . . . . .	13

## CAPITULO II

Mecánica . . . . .	15
1. Estructura base . . . . .	15
2. Elementos de desplazamiento . . . . .	18
2.1 Sistema de tracción	
2.2 Sistema de dirección	
3. Montaje del sistema de percepción . . . . .	31
3.1 Sensores ultrasónicos	
3.2 Sensores de contacto	
4. Montaje de los circuitos . . . . .	38
5. Comentarios . . . . .	38

### CAPITULO III

Hardware . . . . .	42
1. Sistemas de interfase . . . . .	42
2. Sistema de Percepción . . . . .	43
2.1. Sistema de percepción a distancia	
2.1.1 Funcionamiento	
2.1.2 Emisión	
2.1.3 Recepción	
2.1.4 Sincronización	
2.1.5 Canal de recepción	
2.1.6 Generación de aviso de recepción	
2.2. Sistema de percepción por choque	
3. Sistema de desplazamiento . . . . .	62
3.1. Funcionamiento	
3.2. Determinación de los elementos del cir- cuito de conmutación.	
3.3. Control de dirección.	

### CAPITULO IV

Software . . . . .	70
1. Software . . . . .	70
2. Programas del sistema . . . . .	74
2.1. Programa principal	
2.2. Subrutina Centro	
2.3. Subrutina Delay I, II	
2.4. Interrupción.	
3. Referencias . . . . .	89
4. Listado de los programas . . . . .	90
Apéndice A . . . . .	94
Apéndice D . . . . .	107
Apéndice C . . . . .	114

## PREFACIO.

El presente trabajo es el reporte del seminario de tesis "Diseño y Construcción de un Robot controlado por un Microprocesador", integrado esencialmente, por tres partes, que son:

La parte Mecánica

La parte Electrónica

La parte de Software

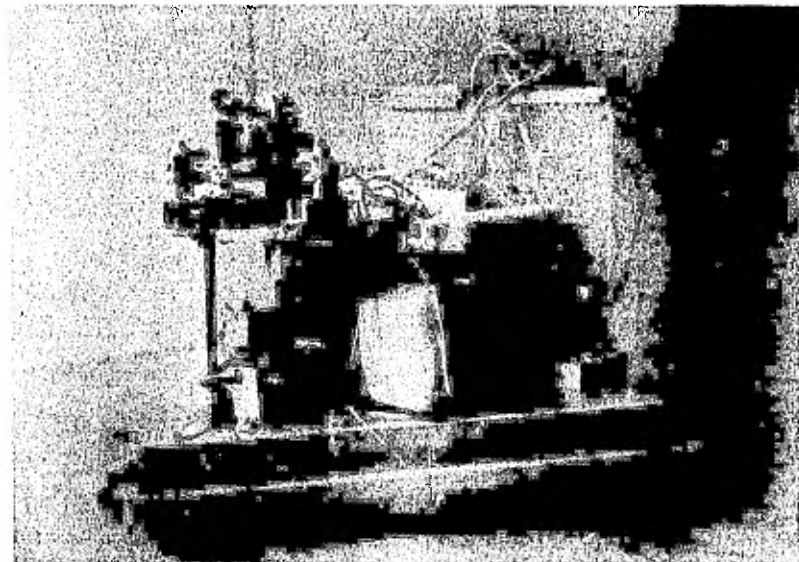
Como su nombre lo dice, la parte mecánica está relacionada con el diseño y la construcción de los elementos que le dan forma y movimiento al Robot.

La parte correspondiente a la electrónica consta del diseño, selección y construcción de los circuitos electrónicos - del Robot que le permiten relacionarse con el mundo exterior - detectando obstáculos e informando al microprocesador tanto de la presencia o ausencia de éstos, como de la dirección que sigue el Robot en ese momento.

La tercera parte, que es la correspondiente al software del sistema, comprende todos los programas y subrutinas que - permiten al Robot comportarse de una manera "inteligente", ya que mediante éstos es capaz de interpretar las señales del exterior provenientes de los sensores y circuitos electrónicos y proporcionar las señales de control correspondientes a los motores.

En la introducción se presenta el planteamiento del problema y se le dá solución. En seguida se mencionan los datos históricos, la definición del concepto de Robot, algunos Robots existentes y las analogías entre el ser humano y el Robot.

Nuestro más sincero agradecimiento a todas las personas que de alguna manera contribuyeron en la elaboración del presente trabajo y en especial al Ingeniero Roberto Macías Pérez, - Coordinador del Area de Electrónica, al Ingeniero Andrés Ruiz Mijares, Jefe de la Sección de Enseñanza de los Laboratorios - de Ingeniería Mecánica y al Ingeniero Antonio Salvá Calleja, - Jefe del Departamento de Control, por habernos asesorado y facilitado el equipo e instalaciones a su cargo.



## CAPITULO I

### INTRODUCCION

1.- Planteamiento del Problema. Se procederá a plantear el problema en dos formas distintas :

i) De manera no rigurosa podemos plantear el problema de la siguiente forma: Se desea construir un sistema - que en forma independiente, ie : Sin ayuda del exterior, sea capaz de moverse en una determinada región cualquiera, evitando obstáculos. Para esto el sistema tendrá únicamente información local y con ésta tendrá que definir sus siguientes movimientos en forma global.

ii) Desde un punto de vista riguroso el problema se puede definir de la siguiente manera: Dado el sistema, éste estará definido si conocemos sus coordenadas, para todo instante de tiempo, por tanto definimos un vector  $r \in R$ , (donde  $R$  es el espacio de trabajo del sistema que para nosotros será igual a  $R \times R$ ), que define la posición del sistema y que es función de las coordenadas de movimiento del sistema ie :

$$r = F(x, y) \dots \dots \dots (1).$$

Se define un conjunto  $G_a$  de movimientos permitidos si -



se satisfacen las siguientes condiciones :

- 1.- Todos los correspondientes  $(x, y)$  satisfacen (1) para todo  $t$ .
- ii.-  $(x, y) \notin p \subset R$ , donde  $p$  es una región contenida por obstáculos.

Con la restricción de que  $G_a$  sea estacionario, más no conocido de antemano, dado al menos un movimiento permisible en  $G_a$ , (al cual definiremos como estado del sistema), y dado un  $(x, y)_0$ , estado inicial tal que  $F(x, y)_0 \in G_a$ , queremos generar una ley de tiempo que satisfaga las siguientes condiciones :

- i).  $\| F(x, y)_0 - F(x, y) \| < E \forall t > t_*$ , donde  $E$  es el error permitido,  $\| \cdot \|$  es la norma de un vector y  $t_* = t(E, (x, y)_0, (x, y))$  es un instante de tiempo finito.
- ii)  $F(x, y) \in G_a \forall t \geq t_*$
- iii).  $F(x, y)$  sea  $\gamma$  veces diferenciable, siendo  $\gamma$  el orden de la dinámica del sistema, (esta condición nos asegura la misma regularidad en (1) y la dinámica del sistema).

Para esto se tendrá la información dada por las siguientes ecuaciones :

Sea  $\Sigma = \bar{G}_a$  (zona prohibida) y  $(\tilde{x}, \tilde{y})$  un punto  $\in \Sigma$ ,

si  $\|(\tilde{x}, \tilde{y}) - (x, y)\| \leq \delta \Rightarrow \theta(x, y) = 1$  donde  $\delta$  es la precisión de los sensores.

$\|(\tilde{x}, \tilde{y}) - (x, y)\| > \delta \Rightarrow \theta(x, y) = 0$  y  $\theta : \mathbb{R}^2 - \mathbb{Z}$

Este planteamiento (I) gráficamente se verá de la forma que se presenta en la figura 1.1.

Como se observa en el planteamiento dado por (ii), se supuso dado el sistema, sin embargo la mayor parte, (si no es que todo) del problema fué el diseño y la construcción de éste.

## 2.- Motivación del problema :

La motivación inicial que nos inclinó a la selección de este tema fué el empleo de un microprocesador ( $\mu p$ ). Nosotros queríamos realizar un trabajo en base a un  $\mu p$  debido a la gran importancia que este dispositivo ha tomado, gracias a su extensa aplicación en diversos campos, independientemente de su bajo costo y gran versatilidad.

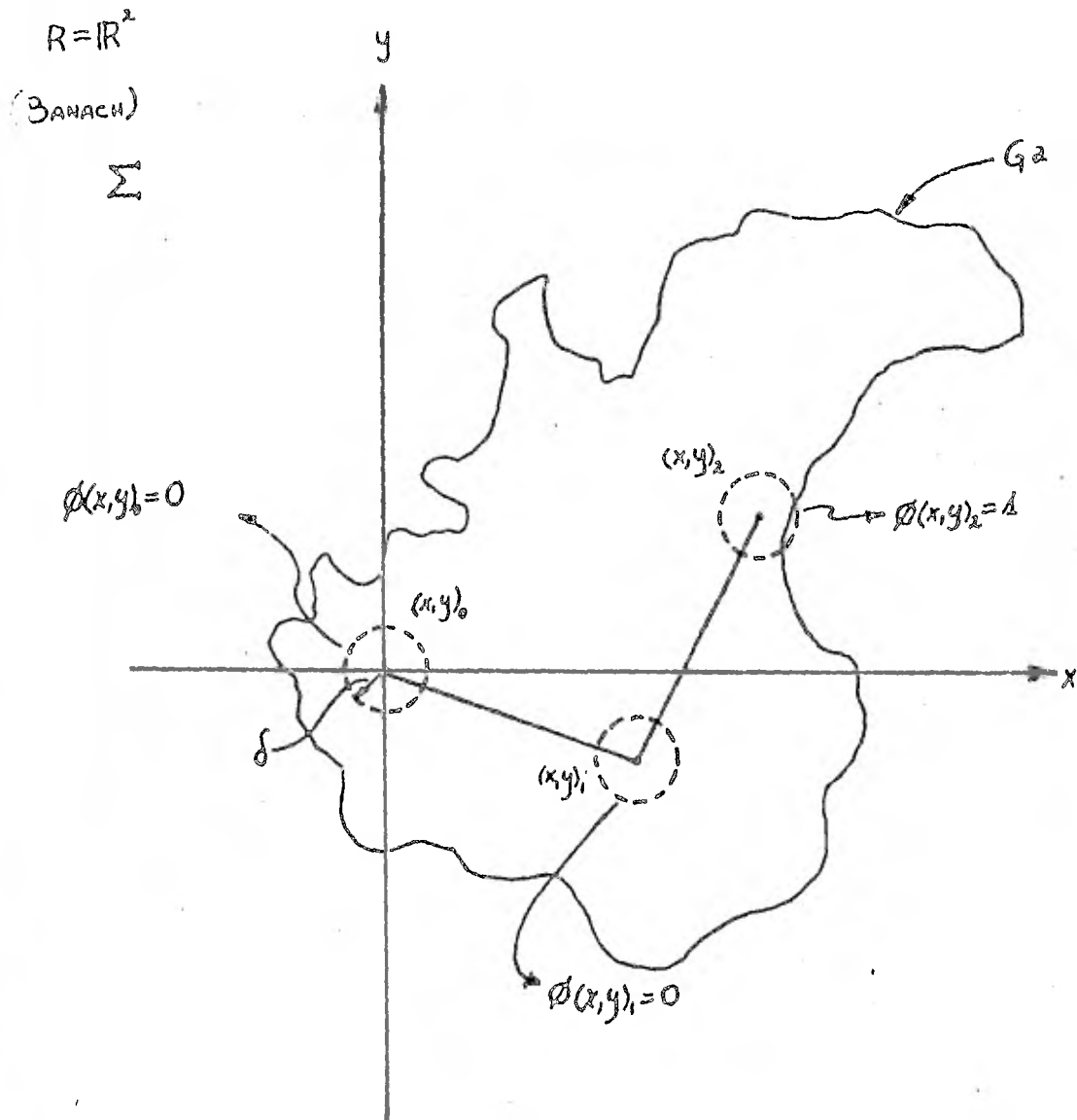


Figura 1.1 Planteamiento del Problema.

La idea inicial era realizar un control con el  $\mu p$ ; al presentarse la posibilidad de conjuntar estos dos elementos en un tema de vanguardia, tal y como es la robótica, decidimos en frentar el problema.

### 3.- Solución al problema.

En forma general la idea consistió en la construcción de un vehículo en forma triangular con dos ruedas traseras y una - delantera. La rueda trasera de la derecha está conectada, por medio de un sistema mecánico, a un motor que se encarga de la - tracción, al igual que la rueda delantera lo está a un motor de dirección.

El sistema recopila información del medio ambiente que lo rodea por medio de un circuito ultrasónico o de "visión" y de - un circuito de contacto o "táctil". Dicha información es procesada por una serie de circuitos electrónicos con el fin de ha - cerla compatible a los requerimientos del  $\mu p$  (interfaces). Con esta información el  $\mu p$  regula la operación de los motores (de tracción y de dirección), de tal forma que el obstáculo detectado sea evitado. Con el fin de conocer el ángulo de giro - del motor de dirección existe un disco óptico interfaceado al -  $\mu p$ . La alimentación total del sistema está dada por dos acumuladores de 6 volts.

Como se puede observar para poder resolver el problema to

tal había primeramente que resolver tres problemas: el mecánico, el electrónico (hardware) y el de programación (software). Aunque cada uno presenta un problema por sí mismo, el verdadero reto fué cuando se tuvo que interconectar todo el sistema y hacerlo funcionar como un conjunto.

#### 4.- Historia y datos interesantes.

##### 4.1 Historia (II)

(1950) Se utilizan en E.U.A., los robots en el manejo de combustible nuclear.

El neurólogo británico Gray Walter trabaja con tortugas electrónicas.

(1955-1956) Se utilizan en E.U.A., robots para la exploración submarina.

(1960) La armada de los E.U.A., junto con la General Electric intentan construir vehículos bípedos.

(1976) E.U.A., lanza el Vikingo, robot completamente equipado para realizar investigaciones en el planeta rojo.

(1978) Hasta esta fecha, Japón ha gastado dos billones de dólares en robótica.

Alemania, Francia y la U.R.S.S., se desarrollan ampliamente en el tema.

Renault destina dos millones de dólares al año para investigación sobre el tema.

Congreso sobre Robótica en Florida con la asistencia de cincuenta académicos y expertos del Gobierno Estadounidense.

(1980) En E.U.A., al menos doce personas han diseñado sus propios robots.

Unimation Inc. "Connecticut" produce 40 robots unimate y 15 pumas por mes.

Cincinnati Milacron gana en un año 32 millones de dólares y abre una nueva planta en Carolina del Sur.

(1981) Los gastos en robótica a nivel mundial están distribuidos de la siguiente manera : Japón (47 000), E.U.A., (38 000), Alemania Federal (6 000), Polonia (720) - Suecia (600), Francia (200), resto del mundo (748).

El Voyager (robot espacial) llega a Saturno.

E.U.A., produce 1 500 unidades por año con ventas por 90 millones de dólares.

MIT y HARVARD apoyan la fundación de AUTOMATIX con 6 millones de dólares.

El Columbia (nave espacial con manipulador "robot") realiza sus primeros viajes.

4.2 Definición de robot y leyes de robótica. (II.b, III)

Aunque todavía no existe una única definición, pudiendo cada uno presentar la suya, las siguientes son de las más aceptadas según diversos expertos en el tema:

- Mecanismo fijo o móvil con la agilidad de manipular objetos externos bajo el constante control de algún tipo de inteligencia.
- Aparato electromecánico que realiza una o varias funciones específicamente humanas.

Leyes de Robótica :

- I. Nuestras creaciones no deben perjudicar o destruir el medio ambiente que las rodea incluyendo cohabitantes vivos, paredes, muebles, contaminación del aire, niveles de radiación, etc.
- II. Nuestras creaciones no deben ser autodestructivas a menos que se viole la ley No. I.
- III. Debemos diseñar con instinto de sobrevivencia, entendiéndose por éste el funcionamiento continuo.

#### 4.3 Areas de Aplicación. (II, IV)

Las principales áreas inmediatas de aplicación son :

- a) mantenimiento de reactores nucleares y manejo de combustible.
- b) estaciones marítimas, exploración de petróleo, producción de minerales metálicos;
- c) operaciones espaciales, ensamblado de estaciones espaciales, rescate de vehículos submarinos a grandes profundidades;
- d) prótesis, microcirugía (requiere gran precisión);
- e) industria en la cual se reduzca el peligro al personal humano en áreas como doblado, manejo de químico, etc.

Como ejemplos concretos de robots que están destinados a tareas específicas tenemos los siguientes :

PRAGMA A 3000 : Arma válvulas de compresoras a partir de las doce partes que la componen.

UNIMATE : Hacen moldes de cerámica para la fabricación de aspas de turbina.

T<sup>3</sup> (Cincinnati) : Fabrica componentes metálicos para el avión F = 16.



2015G (Unimation) : Introduce varillas de tungsteno en un horno de  $T = 1788^{\circ} C$ .

MARK II (Unimation) : Elimina burbujas de aire que pudieran quedar en el Hg del interior de un termómetro.

UNIMATE : Robot granjero que despluma pollos y esquila ovejas.

MITSHUBISHI : Separa diferentes tipos de peces de un conjunto.

Como se observa, las áreas de aplicación son tantas como imaginación exista para adaptar los robots a los diferentes trabajos.

4.4 Analogía entre el ser humano y el robot (construido por nosotros), y trabajos similares al nuestro :

<u>COMPONENTE HUMANO</u>	<u>COMPONENTE DEL ROBOT</u>	<u>FUNCIONES EN EL ROBOT</u>
Ojos	(Circuito ultrasónico) Transmisor y receptor ultrasónico.	Informar la presencia de algún obstáculo en la vecindad del sistema.
Huesos	Estructura.	Soportar el peso del cuerpo.
Cuerpo	Todo el sistema	Darle determinada estética.
Nervios y Arterias	Cables de conexión	Comunicar diferentes partes del cuerpo entre sí.
Yemas de los dedos de las manos	(Circuito de contacto) sensores de contacto.	Si es que existe alguna distracción, y por cierto motivo los ojos no cumplieran su función, la yema de los dedos nos darán esa información.
Corazón	Acumuladores	Darle vida.
Cerebro	$\mu p$	Dadas ciertas excitaciones externas responder a ellas en forma lógica.

Como trabajos similares únicamente mencionaremos algunos existentes y daremos las referencias correspondientes (V), sin profundizar en ellos. (El lector interesado puede hacerlo por su propia cuenta). En los E.U.A., en agosto de 1978, dos estudiantes de la Universidad de Rice construyeron un robot capaz de buscar luz mediante un ojo y utilizaron una PDP-11 y un  $\mu p$  Z80.

En Japón en 1981 tres miembros del Mechanical Engineering Lab. construyen un mecanismo de transporte siendo el control - realizado con un  $\mu p$  CMOS.

#### 4.5 Futuro.

El futuro es promisorio sobre todo si tomamos en cuenta las grandes ventajas que los robots traerán debido a su gran - precisión y confiabilidad, tendiendo a sustituir al hombre en diversos tipos de trabajo.

Dentro de los proyectos a futuro, uno de los más interesantes es el de un banco de datos general al cual puedan acudir los robots y de acuerdo al tipo de trabajo que vayan a reali - zar, cargar el programa correspondiente, ampliándose el campo de aplicación de éstos en forma considerable.

Se habla también de los robots caseros, mismos que se en - cargarán del control completo del hogar, así como de los robots en el campo de la medicina, ya que en un futuro no muy lejano, será posible intercambiar miembros por manipuladores en gente inválida y realizar operaciones en áreas antes de imposible - acceso al ser humano.

5. REFERENCIAS :

- I.- Control of Robot Manipulador with obstacle avoidance under little information about the environment.  
A. A Petrov, I. M. Sirota.  
Institute of Control Sciences, Moscow, USSR.  
Reprints : Control Science and Technology for the progress of Society, Vol. XIV.
- II a.- Conclusions on the NSF Robotics Workshop.  
Profr. D. Tesar.  
Mechanical Engineering, University of Florida.  
Proceedings on the National Science Foundation.
- II b.- La Invasión de los Robots.  
Información Científica y Tecnológica.  
CONACYT.
- III.- Design your own android.  
Martin Bradley Weinstein.  
January 80, Byte.
- IV.- Manufacturing.  
I. Industrial Control.  
Joel Fagenbaum.  
January 81 - IEEE SPECTRUM.

V a.- On Building a light-seeking Robot Mechanism.

Stephen Allen and Tony Rossetti.

August 1978, Byte

V b.- The control and application of "OMNI - Directional Vehicle  
(ODV)".

T. Arai, E. Nakaro, S. Hashino and Y. Tamanga.

Mechanical Engineering Lab. .

Reprints : Control Science and Technology for the progress  
of Society Vol. XIV.

CAPITULO II

MECANICA

Los componentes que constituyen la parte mecánica del robot, son :

- 1.- Estructura Base
- 2.- Elementos de Desplazamiento
- 3.- Montaje del Sistema de Percepción
- 4.- Montaje de los Circuitos

1.- Estructura Base

Esta estructura deberá servir para soportar el peso de todos los elementos necesarios para el funcionamiento del robot.

Con el objeto de facilitar tanto el diseño como la movilidad, se le dió al robot una forma triangular apoyado en tres - ruedas: una de tracción, una de soporte y una de dirección. Con una sola rueda de dirección, se evita el tener que hacer - acoplamiento y se disminuye la resistencia al giro, lo cual re- dunda en ahorro de energía. Por otra parte, la forma triangu - lar evita en muchos casos los choques frontales, ya que al cam- nar hacia el frente, la probabilidad de que el choque sea late - ral es mucho mayor que si tuviera un lado frontal plano. Para lograr una buena estabilidad, así como una adecuada distribu - ción del peso, se decidió que el triángulo fuera equilátero.

En cuanto a las dimensiones, 15 pulgadas (38.1 cm.) proporcionan un área suficiente ( $97.43 \text{ in}^2$  ó  $628.57 \text{ cm}^2$ ) para contener los demás elementos, es decir, la microcomputadora, baterías, sensores, motores y circuitería. Además, es conveniente que el tamaño sea relativamente pequeño, ya que así podrá moverse con mayor libertad dentro de espacios reducidos, como son pasillos estrechos, huecos de puertas, y, en general, obstáculos que estén demasiado cercanos entre sí.

El peso del robot se estimó en unos 20 kg. considerando las baterías, motores y elementos mecánicos que constituyen el grueso del peso, y pensando que pudiera excederse lo estimado, se tomó un margen de seguridad; esto es, se consideró de unos 30 Kg. (66.14 lb). Para soportar este peso, se construyó un chasis formado por dos barras paralelas de lámina de acero de sección rectangular, que están unidas por el eje de tracción y por una lámina de aluminio que constituye la base que sostiene el resto de los componentes. Esta base tiene forma de prisma triangular, de manera que las caras laterales cubren parcialmente las ruedas (ver figura 1.1)

El acomodo final de la microcomputadora y de los circuitos se logró mediante estructuras de madera, que tienen las ventajas, de ser eléctricamente aislantes, fáciles de manejar y económicas, lo que permite, en caso de ser necesario, ajustar y modificar la distribución de los circuitos de un modo fácil y barato.

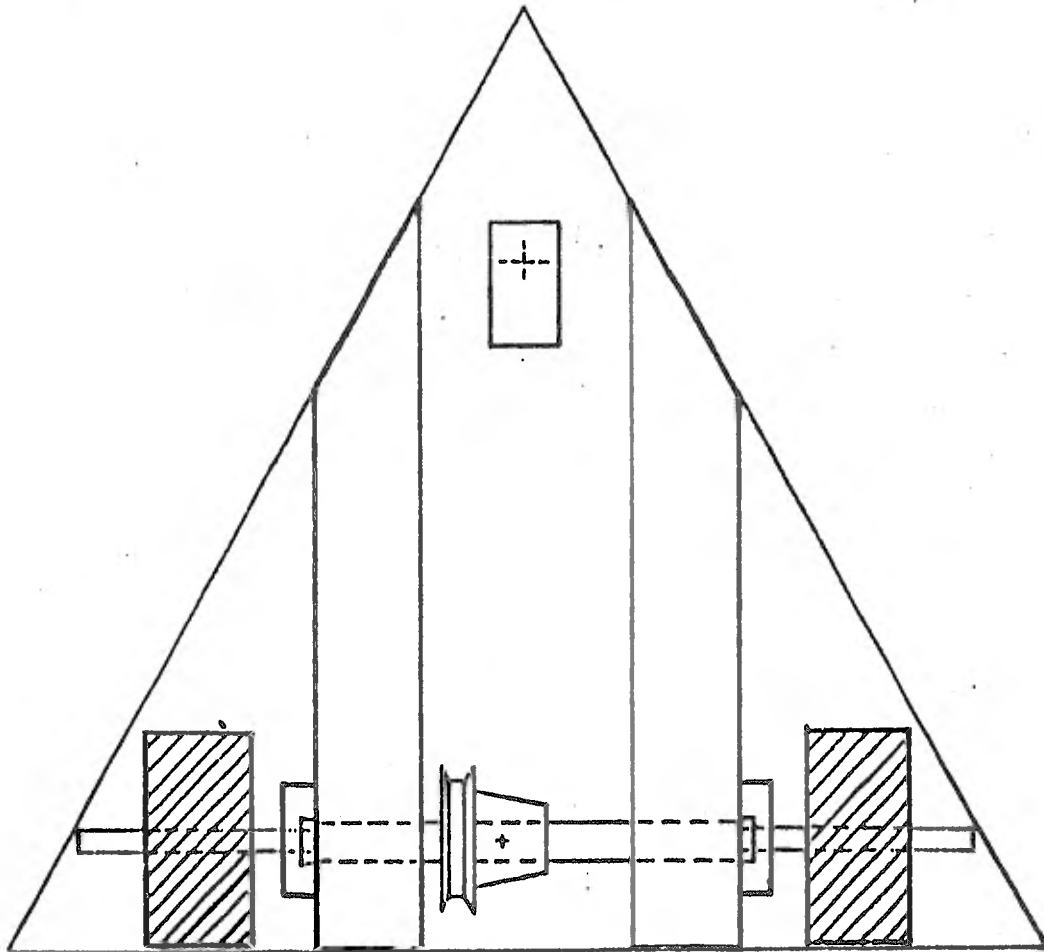


Figura 1.1. Vista superior de la estructura base.



## 2.- Elementos de desplazamiento.

Podemos subdividir a los elementos de desplazamiento en dos partes: Tracción y Dirección.

### 2.1.- Sistema de Tracción.

Para la tracción se utiliza un motor de C.D. que impulsa a un eje de tracción (que es el mismo que une las barras del chasis) el que a su vez comunica movimiento a la rueda.

Para simplicidad de diseño, se decidió utilizar una velocidad fija de avance, la cual se escogió de 0.5 Km/h, ya que resulta convenientemente lenta para dar tiempo a que se efectúen varias operaciones de sensado antes de que el robot llegue a chocar con un obstáculo. El diámetro de las ruedas se escogió de 3" (7.62 cm) para que, sin ser demasiado grandes, permitan al robot desplazarse sobre alfombras, así como pasar por encima de obstáculos pequeños tales como desniveles del piso, bordillos pequeños, etc.

Una vez decididos la velocidad de desplazamiento y el diámetro de las ruedas, se procedió a efectuar los cálculos de resistencia a la rodadura, los que se consignan a continuación.

### Resistencia a la Rodadura.

Teóricamente, si se tiene una superficie rígida en la cual se encuentra una rueda rígida y ésta soporta una carga vertical, por pequeña que sea la fuerza "F" aplicada horizontalmente en el centro de la rueda, ésta rodará sobre la superficie. Sin embargo, en realidad se encuentra una fuerza de fricción dependiendo del tipo de material y radio de la rueda al deformarse la superficie de contacto.

Si llamamos "W" a la carga vertical, la presión entre la rueda y la superficie se encuentra distribuida en el área de contacto, la reacción "R" pasa por el punto "B" como lo muestra la figura 2.1.

La distancia entre los puntos "A" y "B" se llama coeficiente de resistencia a la rodadura "a". Suponiendo que el robot se desplace sobre un terreno lodoso, el valor del coeficiente "a" es aproximadamente 0.2 centímetros (ver tabla 2.1).

Tomando momentos con respecto al punto "B", se tiene:

$$\Sigma M_B = W_r (\overline{AB}) - F(\overline{OA}) = 0$$

$$\overline{AB} = a = 0.2 \text{ cm.}$$

$$\overline{OA} = r \quad \text{radio} = 3.81 \text{ cm.}$$

$$\Sigma M_B = W (a) - F (r) = 0$$

$$F = R = \frac{W (a)}{r} = \frac{15(0.2)}{3.81} = 0.78 \text{ Kg.}$$

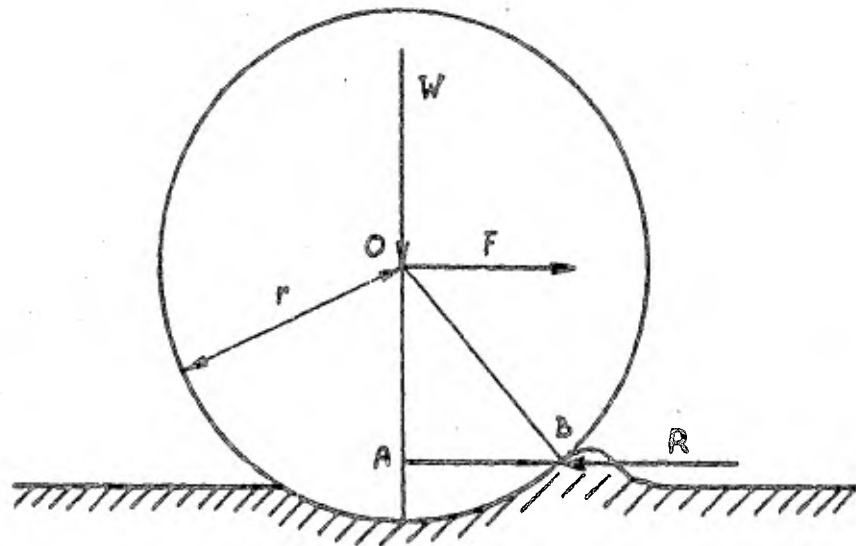


Figura 2.1 Resistencia a la Rodadura.

**COEFICIENTE DE LA RESISTENCIA A LA RODADURA**

(Según Coulomb y Goodman)

	a (centímetros)
Guayaco sobre roble .....	0.0495
Olmo sobre roble .....	0.0830
Acero sobre acero .....	0.0177 a 0.0381
Acero sobre madera .....	0.1524 a 0.2540
Acero sobre carretera de macadam .....	0.1270 a 0.51
Acero sobre terreno blando .....	7.62 a 12.7
Llantas neumáticas sobre buena carretera .....	0.051 a 0.056
Llantas neumáticas sobre camino enlodado .....	0.1016 a 0.1524
Llantas de caucho macizo sobre buena carretera ..	0.1016
Llantas de caucho macizo sobre camino enlodado ...	0.2286 a 0.2794

Nota: Tomado de "Mecánica Analítica para Ingenieros". Seely y  
 Ensign. Unión Tipográfica Editorial Hispano-Americana. 1977  
 México.

Tabla 2.1

Con el dato de resistencia a la rodadura obtenido, y despreciando la fricción de los baleros, puede determinarse el par motor mínimo necesario para mantener el robot en movimiento:

$$T_{\text{mín}} = 2f_r \times r = 2(0.78) \times 3.81 = 5.94 \text{ Kg} \cdot \text{cm}$$

El motor utilizado es un motor de 6 V C.D. de limpiaparabrisas con motoreductor interconstruido que proporciona un par motor de 19.8 Kg · cm, y gira a 47 r.p.m. en vacío.

El eje de tracción está montado en las barras del chasis por medio de dos rodamientos de bolas metidos a presión en cajas de aluminio que a su vez están atornilladas a las barras (Fig. 2.2) El eje se apoya en dos ruedas, una de las cuales es la de tracción ; esta rueda queda fija al eje por medio de un prisionero (Fig. 2.3), en tanto que la otra está detenida por chavetas para evitar que se desplace. Las ruedas son de hule con buje central de bronce, y tienen 3" (7.62 cm) de diámetro y  $1 \frac{1}{2}$  " (3.81 cm) de ancho. En la parte central del eje está montada una polea de aluminio fijada mediante un prisionero allen, acoplada al motor por medio de una banda de hule de sección trapezoidal.

El motor de tracción está montado en una lámina de acero de forma trapezoidal mediante cinco tornillos. Esta lámina, a su vez, está montada en la cara interior de la barra izquierda del chasis mediante dos tornillos, uno fijo y otro que puede deslizarse a lo largo de una ranura hecha en la lámina. Esta

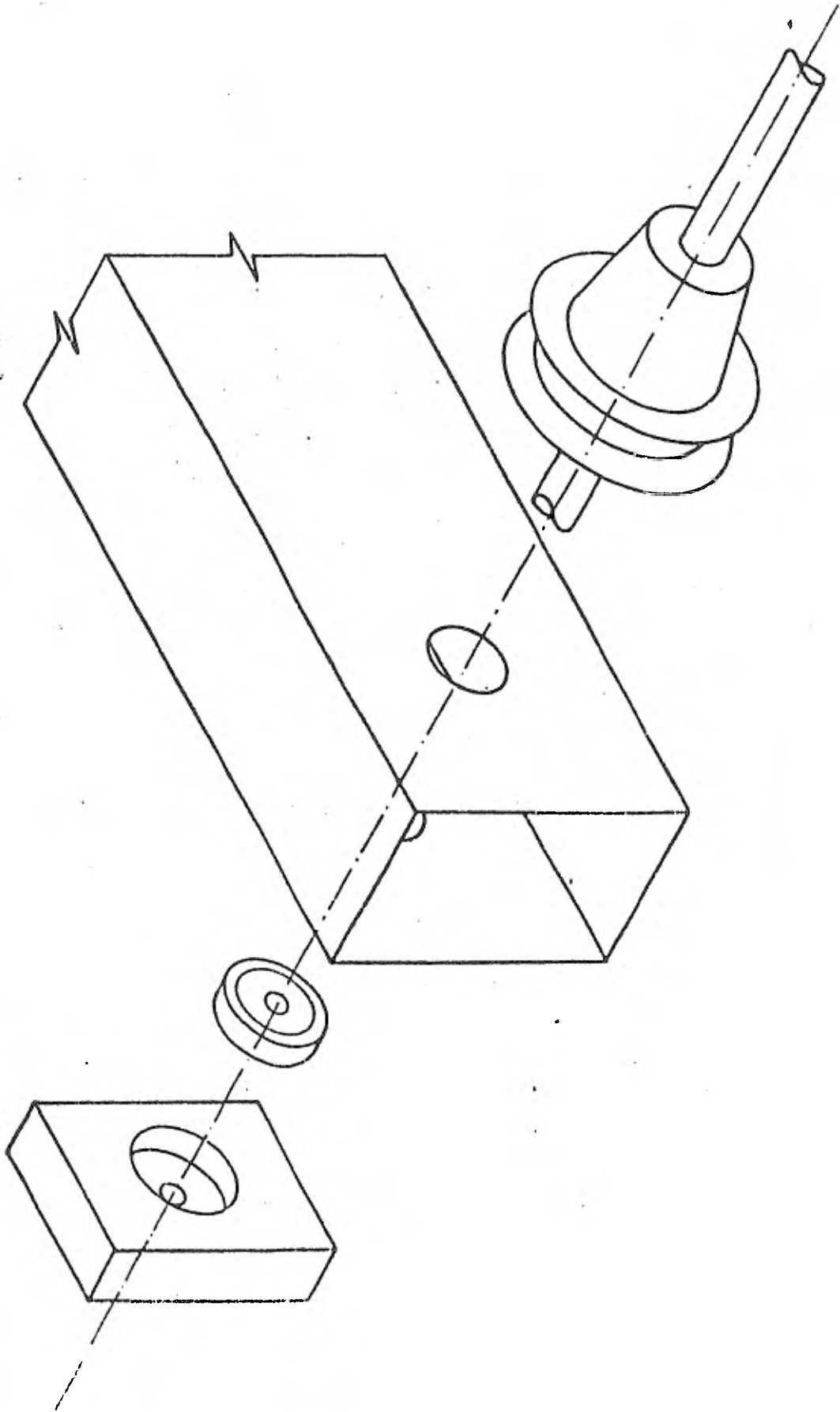


Figura 2.2 Detalle del eje de tracción.

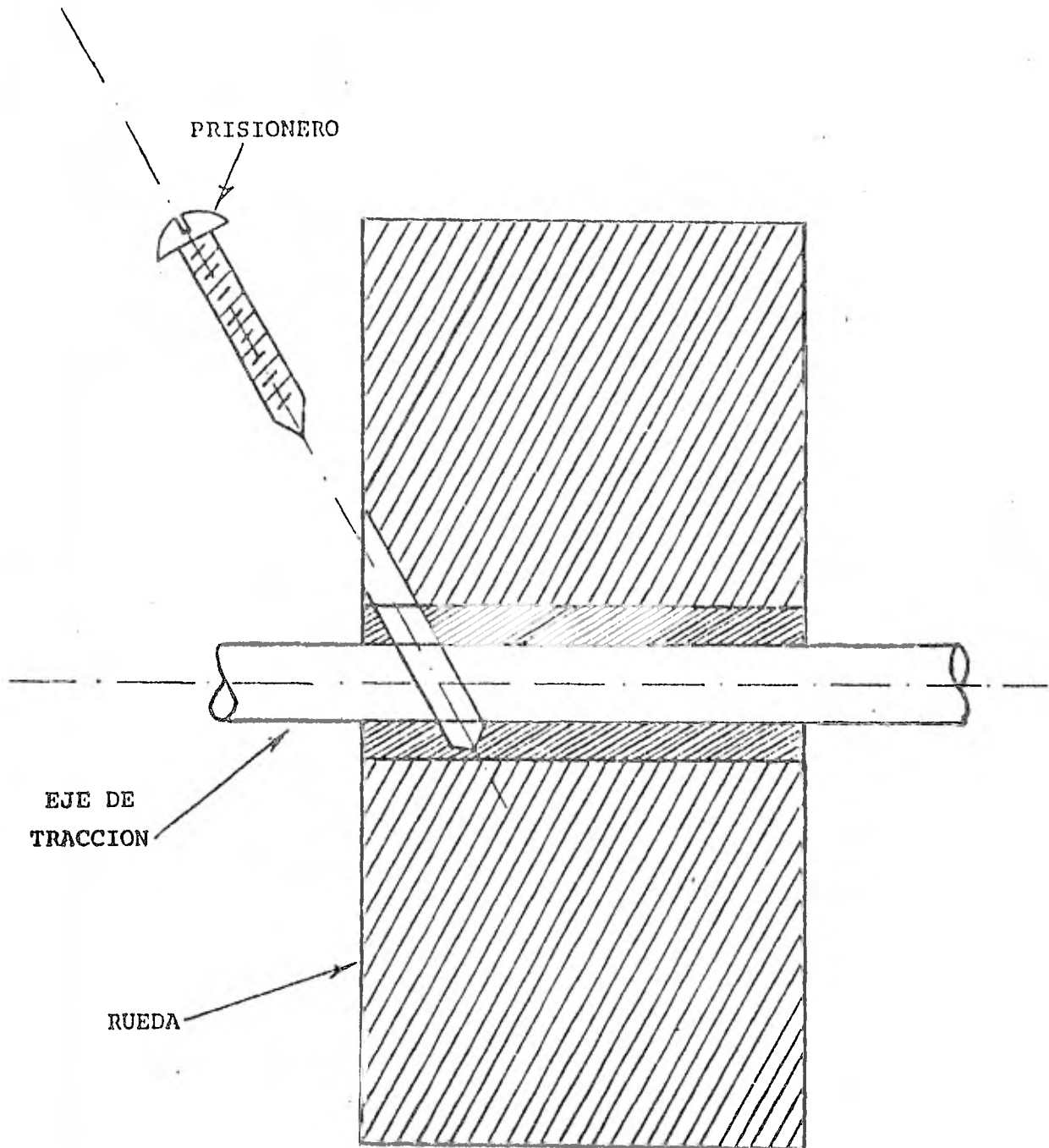


Fig. 2.3. Detalle de fijación de la rueda de tracción.

ranura permite que la lámina pueda tener un pequeño movimiento giratorio alrededor del tornillo fijo, con lo que se logra tensar apropiadamente la banda (Fig. 2.4). Con la polea del mo - tor y la polea del eje se obtiene una reducción de 1:0.711, - de modo que la velocidad del robot es de aproximadamente 12.2 cm/seg. ó 0.44 Km/h, que es una velocidad muy cercana a la - del diseño.

## 2.2 Sistema de Dirección.

El tercer punto de apoyo del chasis está dado por la rueda de dirección. Esta rueda es de hule embalada y se encuen - tra montada en una pieza de lámina de aluminio en forma de "U" (Fig. 2.5)

En la parte central de esta pieza se encuentra su eje, - que le permitirá girar para gobernar la dirección. Este eje - es un tornillo de 5/32" (3.97 mm) de diámetro, y está sujeto a la pieza de montaje de la rueda mediante tuerca y rondana de - presión. El tornillo está montado en dos baleros y sujeto me - diante tuerca y contratuerca para evitar el deslizamiento del conjunto al dar la vuelta; la contratuerca es, en sí, la polea que transmite el movimiento a la rueda de dirección. Los bale - ros que sostienen al eje están metidos a presión en un bloque de aluminio, sostenido de la lámina que constituye la base me - diante cuatro tornillos.

El motor de pasos originalmente pensado hubo de sustituir



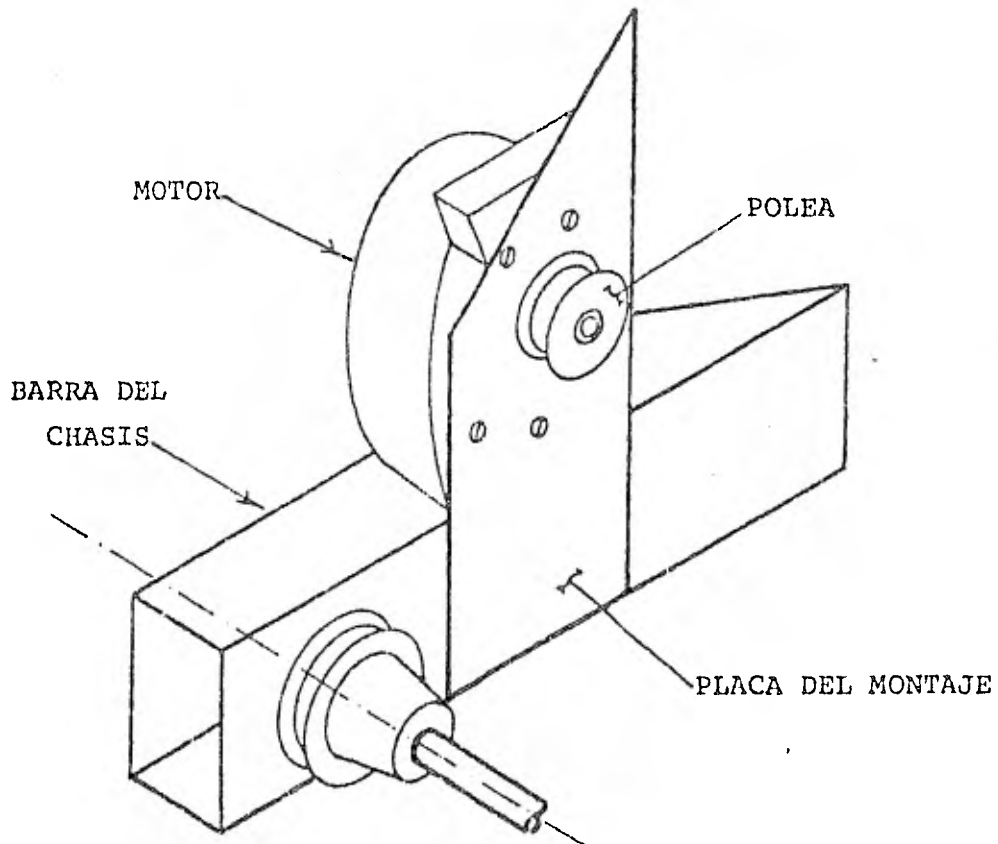


Fig. 2.4. Montaje del Motor de Tracción.

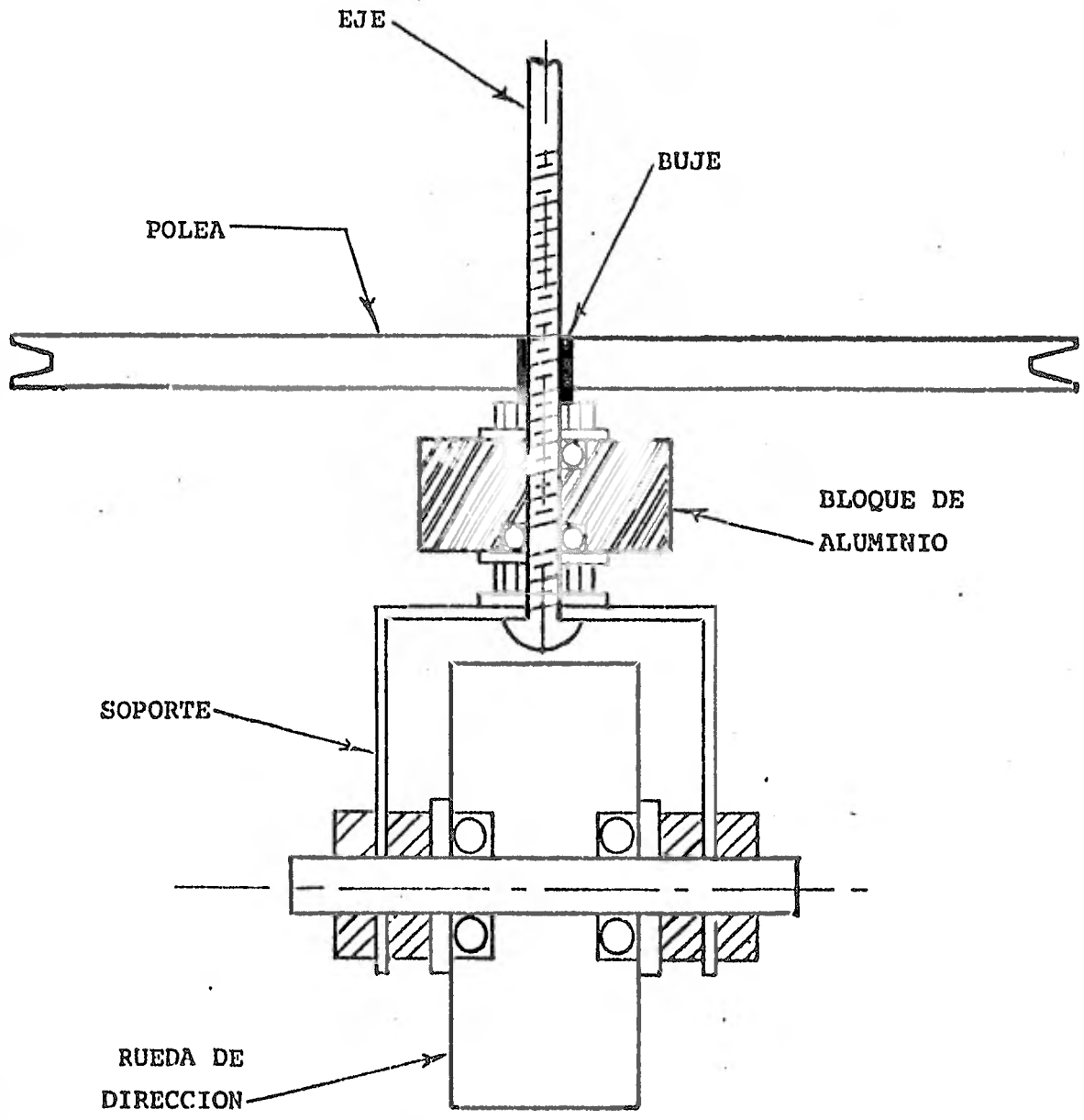


Figura 2.5. Vista frontal de la rueda de dirección (corte).

írse por motor de C.D. Sin embargo, se encontró que los pequeños motores de C.D. trabajan a velocidades nominales de 1000 r.p.m. y superiores, siendo que para el movimiento de la rueda de dirección se necesitan aproximadamente 20 r.p.m. (es decir, una vuelta en unos 3 seg). Para resolver este problema, se construyó una reducción por medio de 5 poleas torneadas en bronce, tres de las cuales son dobles, que proporcionan una reducción de velocidad de 75.25:1. Las reducciones son 3.5:1, 3:1, 3:1 y 2.5:1.

Para optimizar el espacio, se montó el conjunto en dos ejes de acero, uno de los cuales está atornillado a la lámina del chasis, y el otro al eje vertical de la rueda de dirección (Figs. 2.6 y 2.7). La polea que transmite el movimiento al eje de dirección está montada en un buje de acero de 1/4" (6.35 mm) de diámetro, metido a presión en el bronce. La parte interior de dicho buje tiene cuerda para atornillarse y constituir la contratuerca. En la parte superior del mismo tornillo está atornillado otro buje, que funge como eje para una polea intermedia de la reducción. La parte superior del buje está unida mediante un cople flexible al mecanismo que proporciona información acerca de la posición que ocupa la rueda de dirección.

Este mecanismo consta de un bastidor de madera en forma de "C" que alberga 3 pares optoelectrónicos y dos anillos de bronce que sostienen el eje de un disco codificado, que es quien proporciona la información de la posición actual de la dirección. Todo el conjunto está montado en una pieza triangular de

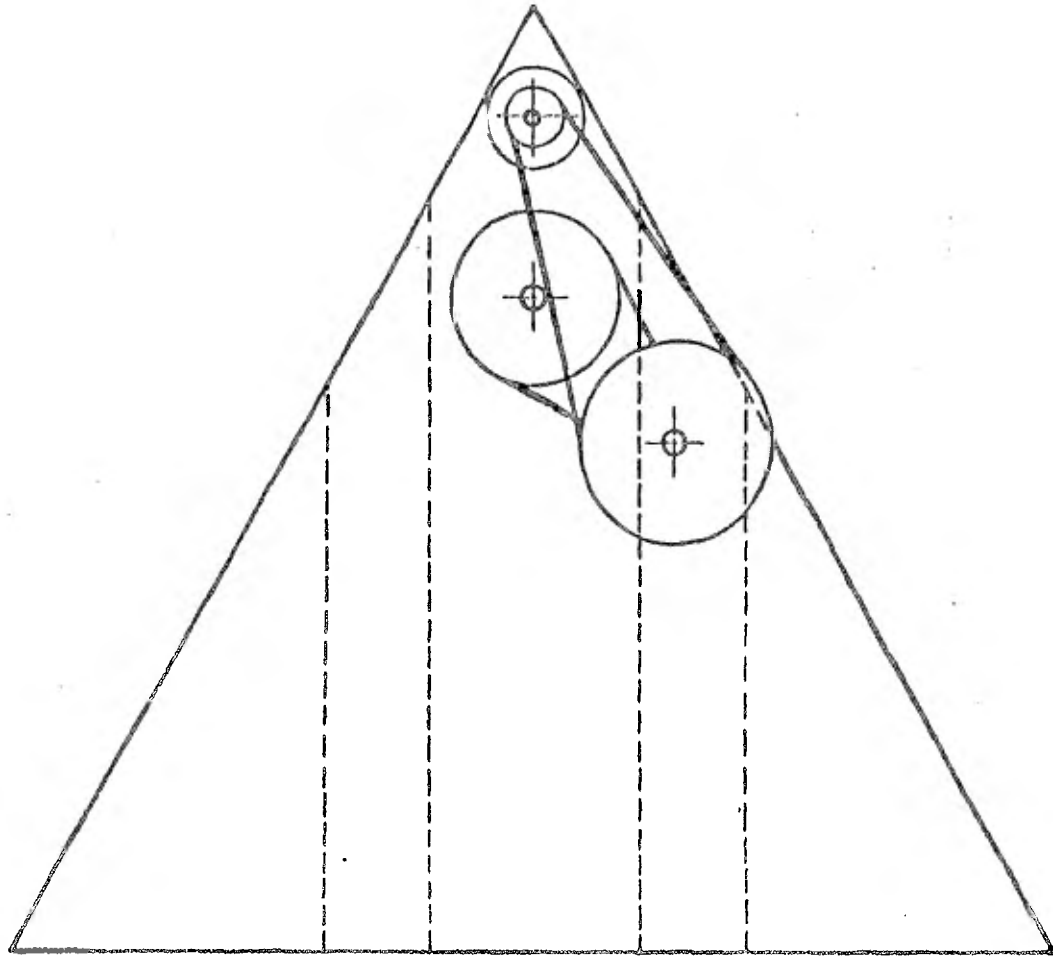


Figura 2.6. Localización de las poleas del sistema de dirección.  
(vista de planta).

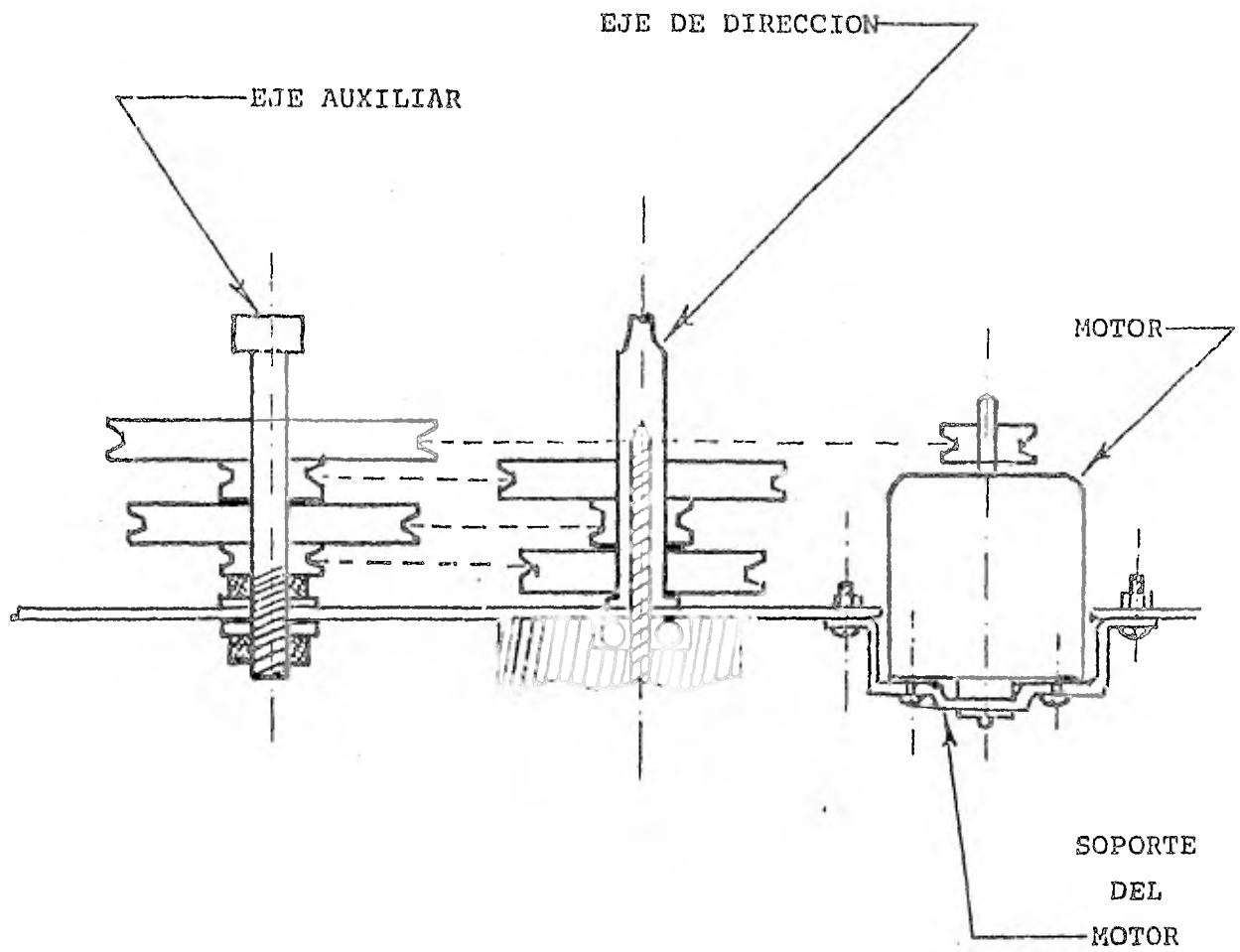


Fig. 2.7. Conjunto de poleas del sistema de dirección  
(corte)

lámina de aluminio mediante un tornillo, y esta pieza está atornillada a la base (Fig. 2.8). Por último el motor de dirección está montado en la parte frontal de la base del móvil, sujeto por tornillos.

### 3.- Montaje del Sistema de Percepción.

#### 3.1.- Sensores ultrasónicos.

Los sensores ultrasónicos se encuentran en la parte superior y al centro del robot, de modo que no sean estorbados por el resto de los componentes.

El sistema consta de un emisor ultrasónico que se hace girar por medio de un motor de C.D. mediante transmisión directa a una polea de bronce que proporciona una reducción de velocidad adecuada (87 r.p.m.). (Fig. 3.1)

Tanto el motor como la polea están fijos a un soporte de lámina de acero apoyado en el soporte del motor de tracción, por una parte, y a un perfil de aluminio sección "C", por la otra. El acoplamiento entre el eje del motor y la polea se logra mediante un resorte, y para lograr una transmisión efectiva, la polea está provista de una banda de hule. En la parte superior de la polea se encuentra un disco que proporciona información acerca de la posición del emisor y al mismo tiempo da cabida tanto al circuito de generación de señal ultrasónica como al emisor mismo.

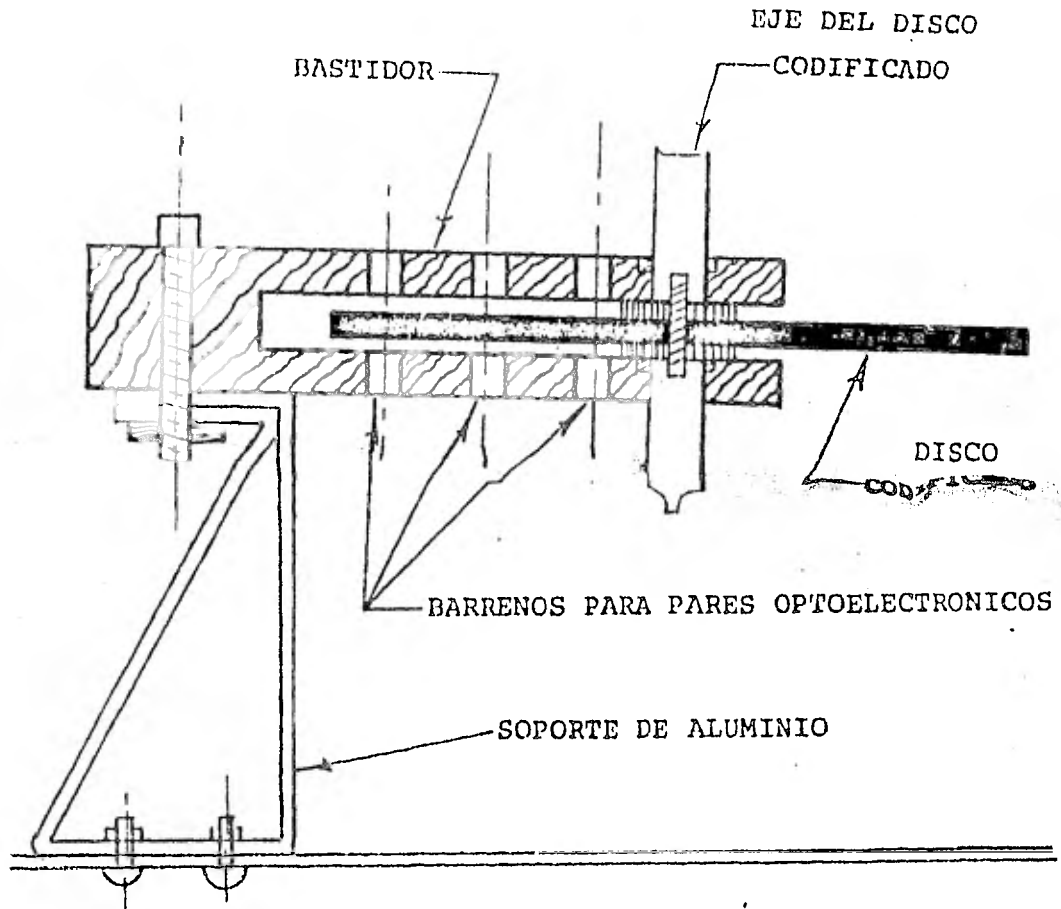


Figura 2.8. Sistema de información de la posición actual de la rueda de dirección.

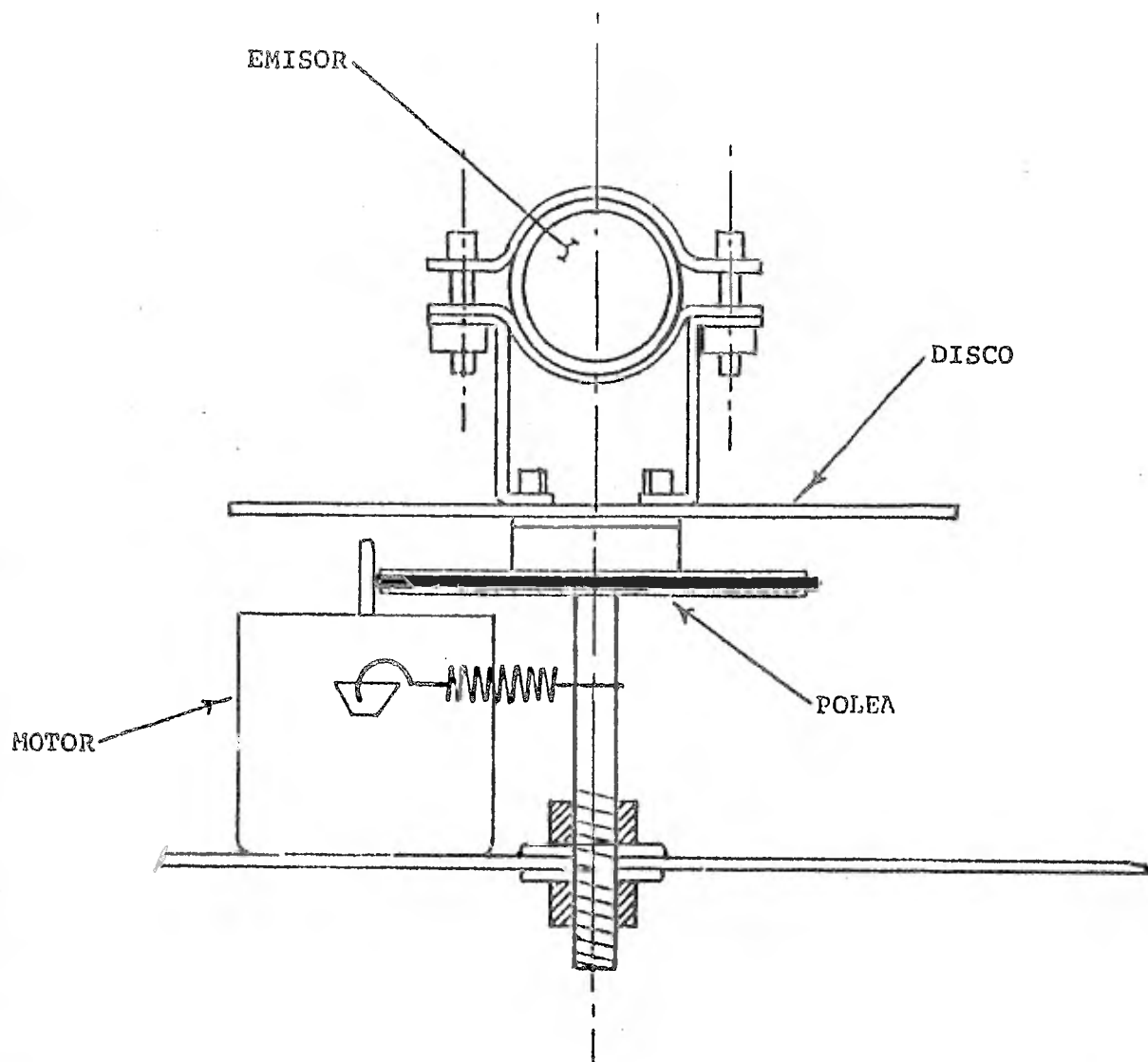


Figura 3.1. Emisor giratorio (vista frontal).



Los receptores están montados en un sector circular de madera (270°) mediante abrazaderas de aluminio de modo que están dirigidos hacia el frente y hacia los lados del móvil (Fig. 3.2). Por último, se montaron sobre los receptores, pequeños bastidores de madera en forma de "C" que dan cabida a un par optoelectrónico cada uno. Para poder montarlos se utilizó una abrazadera de aluminio montada sobre el respectivo receptor y a través de ésta un tornillo que sostiene al bastidor (Fig. 3.3).

### 3.2.- Sensores de Contacto.

Los sensores mecánicos prevén la falla del sistema de detección ultrasónica. Estos se accionan cuando el robot choca con algún obstáculo.

Se tienen dos sensores, cada uno de los cuales consta de un microswitch montado en una barra de aluminio de sección "C" paralela al costado del robot, que está sostenida por dos barras de torsión mediante las que se logra que, después de ser accionado el microswitch, la barra regrese a su lugar para subsiguientes choques.

Las barras de aluminio tienen forma de una "L" abierta (120°) de modo que la parte más corta sobresale por el frente de la base y queda perpendicular a la dirección de avance del robot. De esta manera, si chocara de frente, el choque será sentido por cualquiera de los dos sensores (Fig. 3.4).

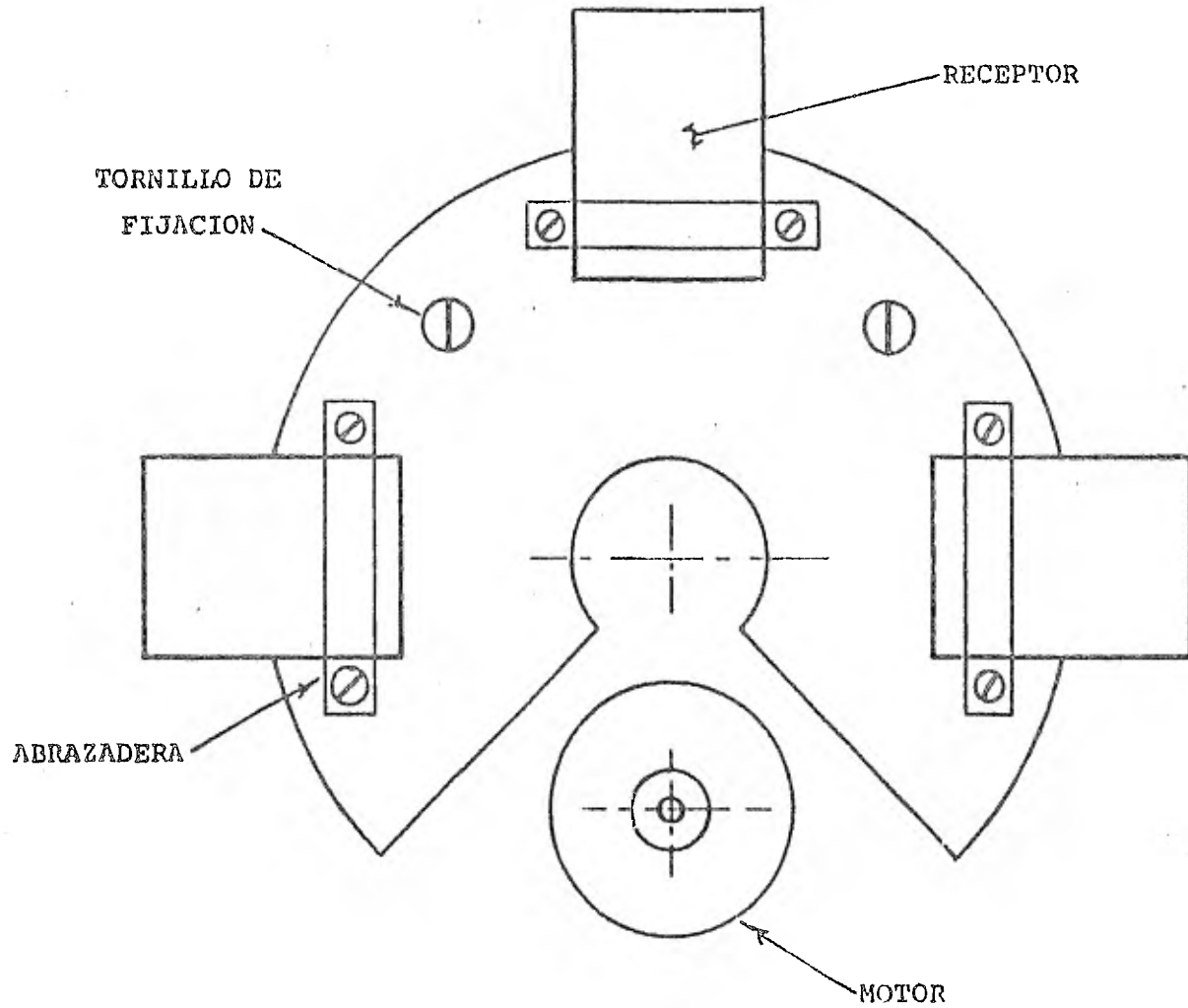


Fig. 3.2. Diagrama de localización de los receptores ultrasónicos (vista de planta).

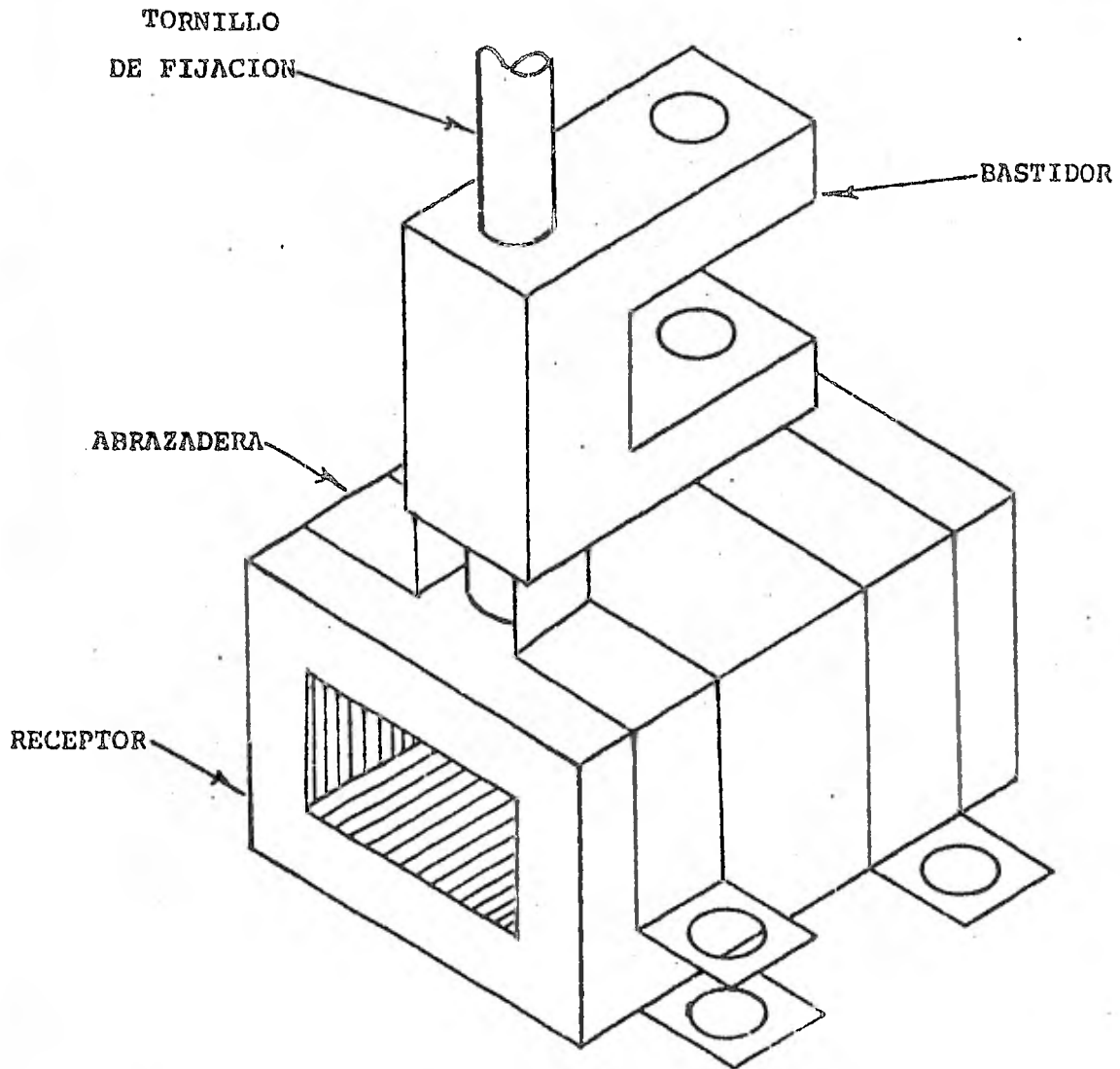


Fig. 3.3. Montaje de los receptores ultrasónicos y los pares optoelectrónicos.

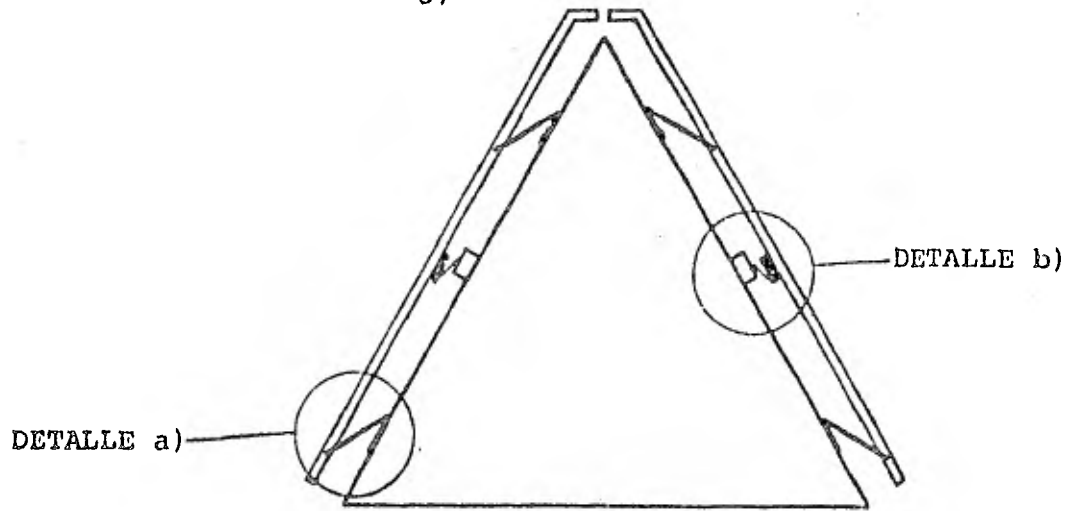


Figura 3.4. Sensores de contacto (vista de planta).

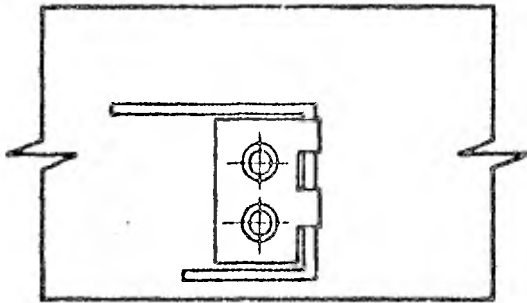
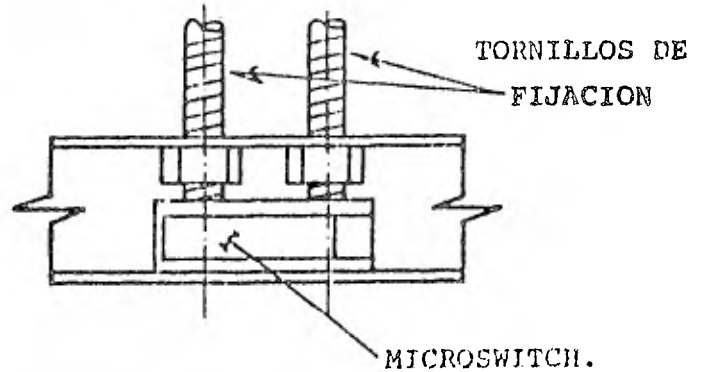


Figura 3.4 a). Detalle de Montaje de la barra de torsión.

Fig. 3.4. b) Detalle de montaje de los microswitchs.



#### 4.- Montaje de los Circuitos.

Para montar las 4 tarjetas de circuitos, así como la microcomputadora, se utilizaron dos listones de madera ranurados, de modo que las tarjetas encajen en las ranuras de la madera (Fig. 4.1). Los listones están sujetos a la barra del chasis y a la base de aluminio mediante tornillos.

En la parte posterior del robot se encuentran dos disipadores de calor para los transistores que manejan al motor de tracción. Estos disipadores se montaron aislados de la base de aluminio mediante gomas y tornillos (Fig. 4.2).

#### 5.- Comentarios.

Durante el proceso de construcción, el robot sufrió diversos cambios, Originalmente se pensó en utilizar ruedas motorizadas para el sistema de tracción, las cuales consisten en una rueda directamente acoplada a un motor de C.D. Asimismo, se pensó en usar un motor de pasos acoplado a la rueda de dirección mediante engranes, dado que este tipo de motor puede ser controlado directamente por el microprocesador por medio de señales digitales.

Sin embargo, tanto las ruedas motorizadas como los motores de pasos son prácticamente inexistentes en el mercado nacional por lo que se diseñó el chasis de la estructura base y se utilizaron poleas para los sistemas de tracción y dirección.

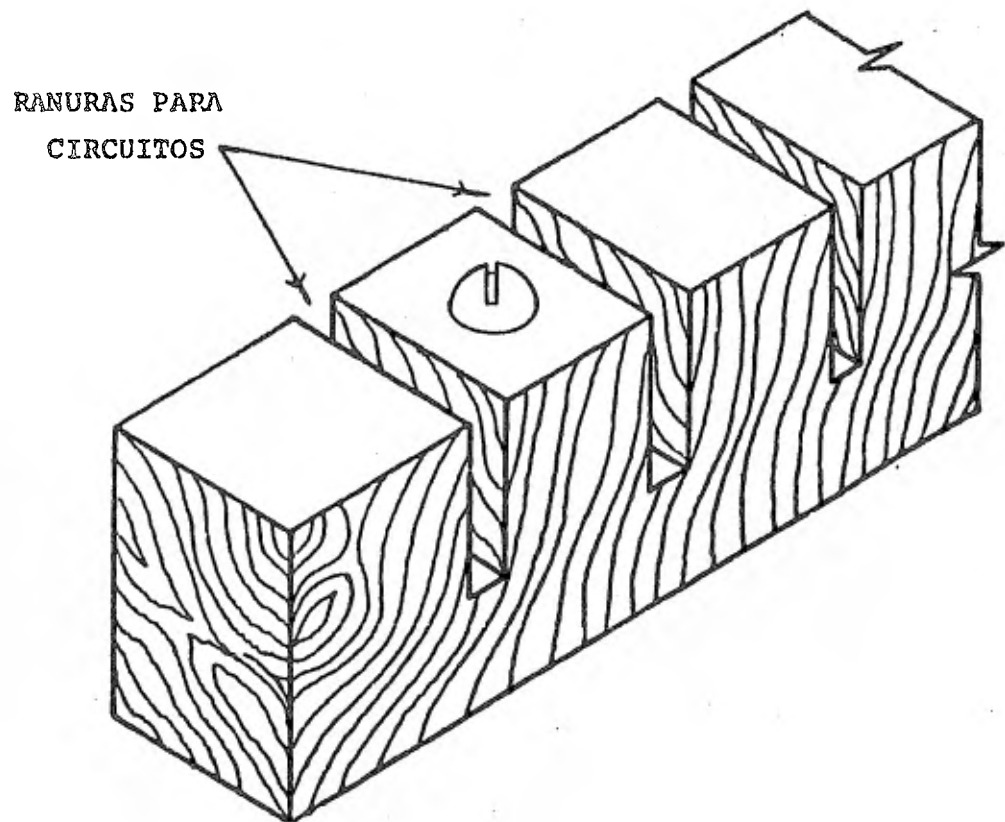


Figura 4.1. Bastidor de madera para montaje de circuitería.

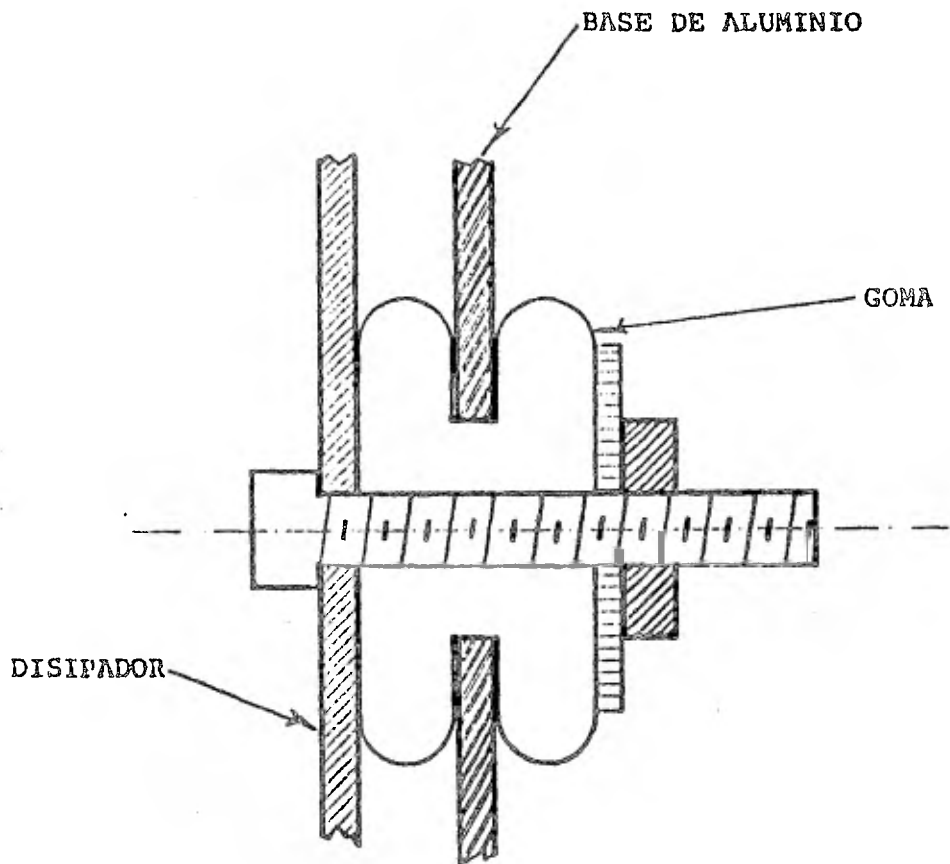


Fig. 4.2. Montaje de disipadores.

Gran parte de los elementos mecánicos fueron diseñados y construídos específicamente para el robot, como son el eje de tracción, las poleas de la dirección, las cajas de montaje de los baleros (tanto de dirección como de tracción), la polea y el eje del emisor giratorio, los bastidores de madera que albergan los pares optoelectrónicos, el disco codificado y su eje, etc. Para la construcción de estos elementos fué necesario aprender las bases más elementales del manejo de algunas de las máquinas herramientas del Taller de Maquinado Ligero de la Facultad de Ingeniería, como son el torno, fresador, taladro de banco, dobladora y cortadora de lámina.



### CAPITULO III

#### HARDWARE

En este capítulo describiremos el funcionamiento y constitución del hardware empleado en el robot. El funcionamiento del microprocesador, así como su arquitectura se tratan ampliamente en la referencia 1.

#### 1.- Sistemas de Interfase.

El microprocesador analiza la información que recibe y en base a ella genera los comandos necesarios para que el robot realice sus funciones. Sin embargo, el microprocesador por sí mismo no puede interpretar ni responder a los estímulos recibidos. El objeto del hardware es el sistema es transformar los estímulos en información que el microprocesador pueda manejar.

Por su función, el hardware se puede dividir en dos sistemas :

- a) Sistema de Percepción
- b) Sistema de desplazamiento

Mediante el sistema de percepción, el microprocesador adquiere la información necesaria para que el robot pueda desplazarse a través del medio que lo rodea, mientras que el sistema de desplazamiento ejecuta los comandos que el microprocesador

genera para controlar los elementos electromecánicos que comunican el movimiento al robot.

Por ejemplo, si se informa de la presencia de un objeto a la izquierda del robot, el microprocesador genera un comando que hará que la rueda de dirección gire a la derecha. Una vez que el objeto haya sido esquivado, el microprocesador ordena que la rueda regrese a su posición original.

La figura 1.1 muestra un diagrama de bloques de las partes que constituyen el hardware.

## 2.- Sistema de Percepción.

El sistema de percepción está dividido en dos partes :

1. Percepción a distancia
2. Percepción por choque

La percepción a distancia es, por así decirle, el sentido de la "vista" del robot, ya que mediante él, se pueden detectar objetos sin que exista contacto alguno con ellos.

Por su parte, la detección por choque constituye el sentido de "tacto" del robot y su función es detectar todos aquellos objetos que por alguna razón no fueron detectados a distancia.

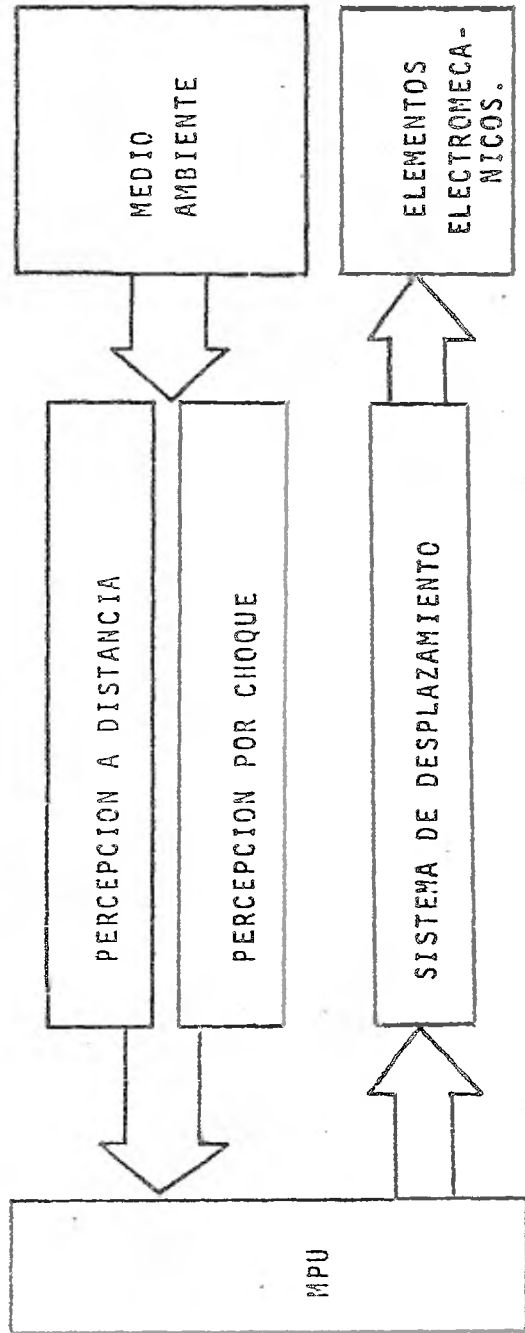


Figura 1.1 Diagrama de bloques del hardware.

## 2.1 Sistema de Percepción a Distancia.

### 2.1.1 Funcionamiento

Este sistema se basa en la emisión y posterior recepción de una onda ultrasónica de 40 KHZ. La onda emitida viaja a través del medio hasta que es reflejada por algún obstáculo. Se tienen elementos receptores que cuando captan la señal reflejada informan al microprocesador de la presencia del objeto. El microprocesador entonces cambia la dirección del robot generando comandos de control que son ejecutados por el sistema de desplazamiento.

La figura 2.1 es un diagrama de bloques de los elementos que constituyen al sistema de visión del robot.

A continuación se describen uno de los bloques que se ven en la figura 2.1

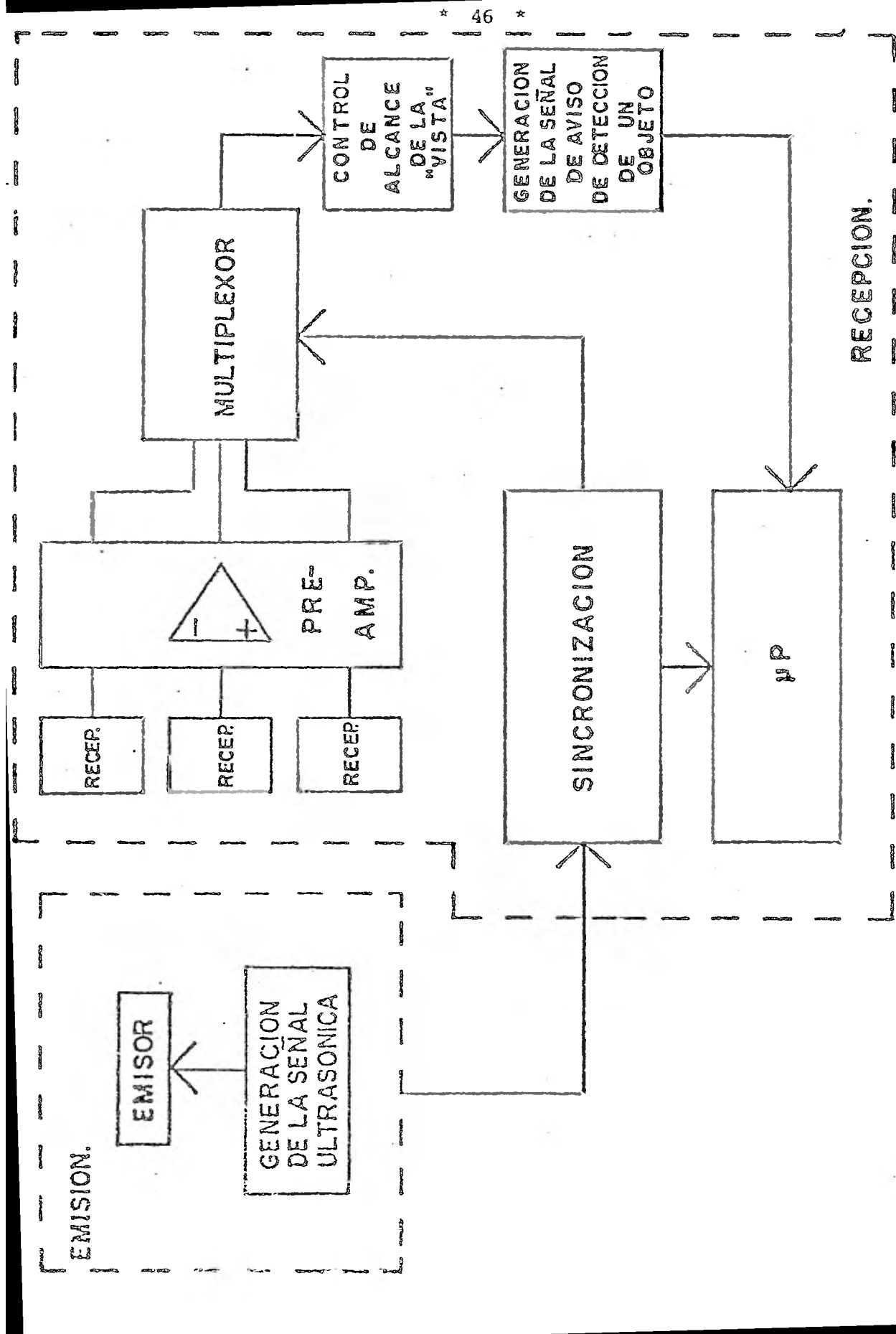


Figura 2.1 Sistema de percepción a distancia.

### 2.1.2 Emisión

La onda mecánica inaudible que es emitida por el robot, se obtiene al excitar con una señal de voltaje de 40 KHZ a un transductor ultrasónico omnidireccional, montado sobre un disco que gira a 87 rpm.

Inicialmente se había pensado en la utilización de tres emisores unidireccionales que serían colocados al frente y a los costados del robot junto a tres receptores. Sin embargo, los transductores unidireccionales emiten un haz de ondas estrecho que provoca la existencia de grandes zonas ciegas en los espacios que existen entre cada pareja emisor-receptor.

La utilización del emisor omnidireccional giratorio amplía grandemente el campo visual del robot (Fig. 2.2)

La señal de voltaje que excita al transductor se obtiene de un circuito oscilador LM555 timer que es alimentado independientemente del resto del sistema y que está montado junto con el transductor. La figura 2.3 muestra el diagrama de conexión del circuito emisor.

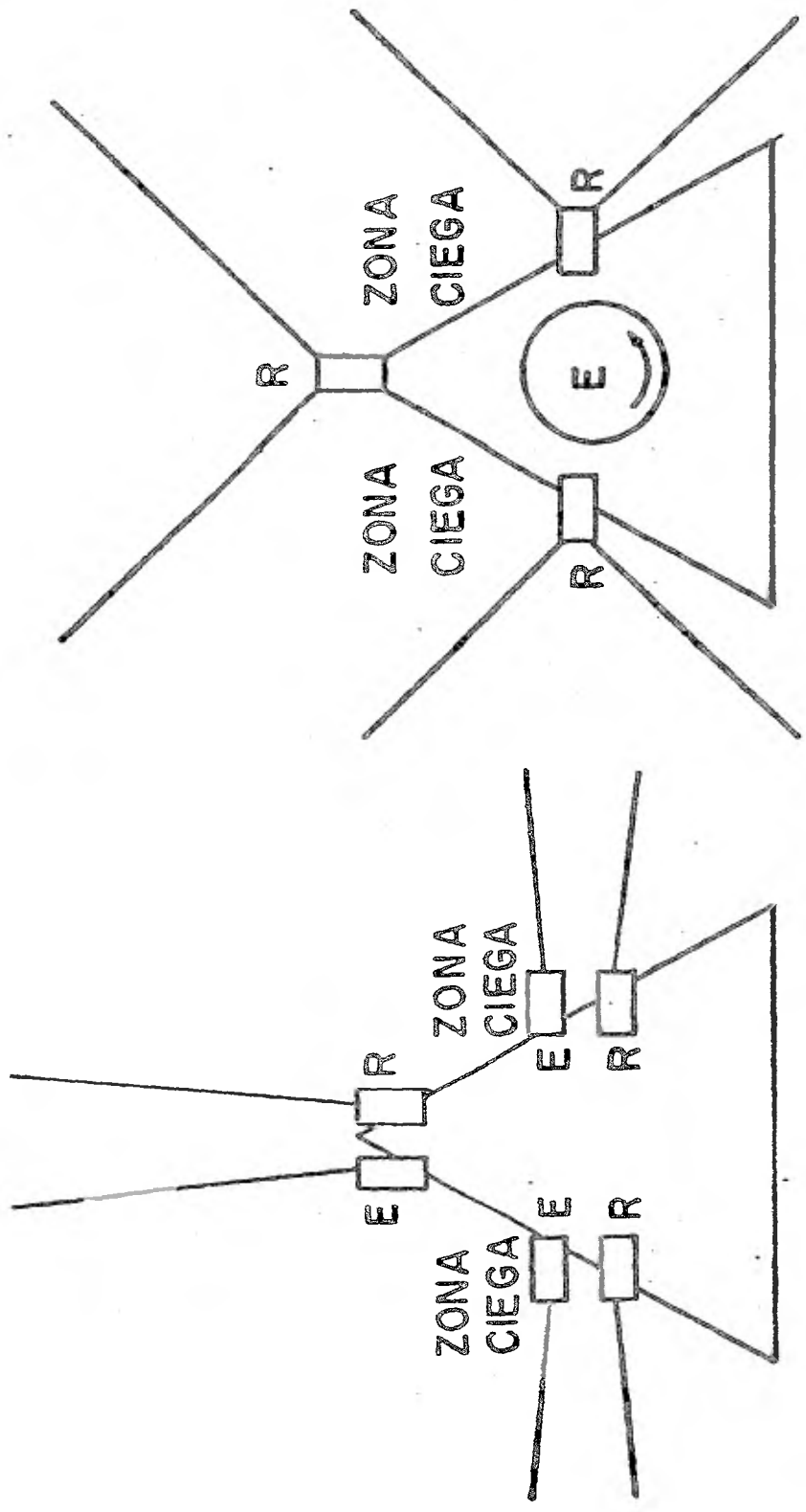


Figura 2.2 a) Sistema con tres emisores y tres receptores unidireccionales;  
b) Sistema con un emisor omnidireccional y tres receptores unidireccionales.

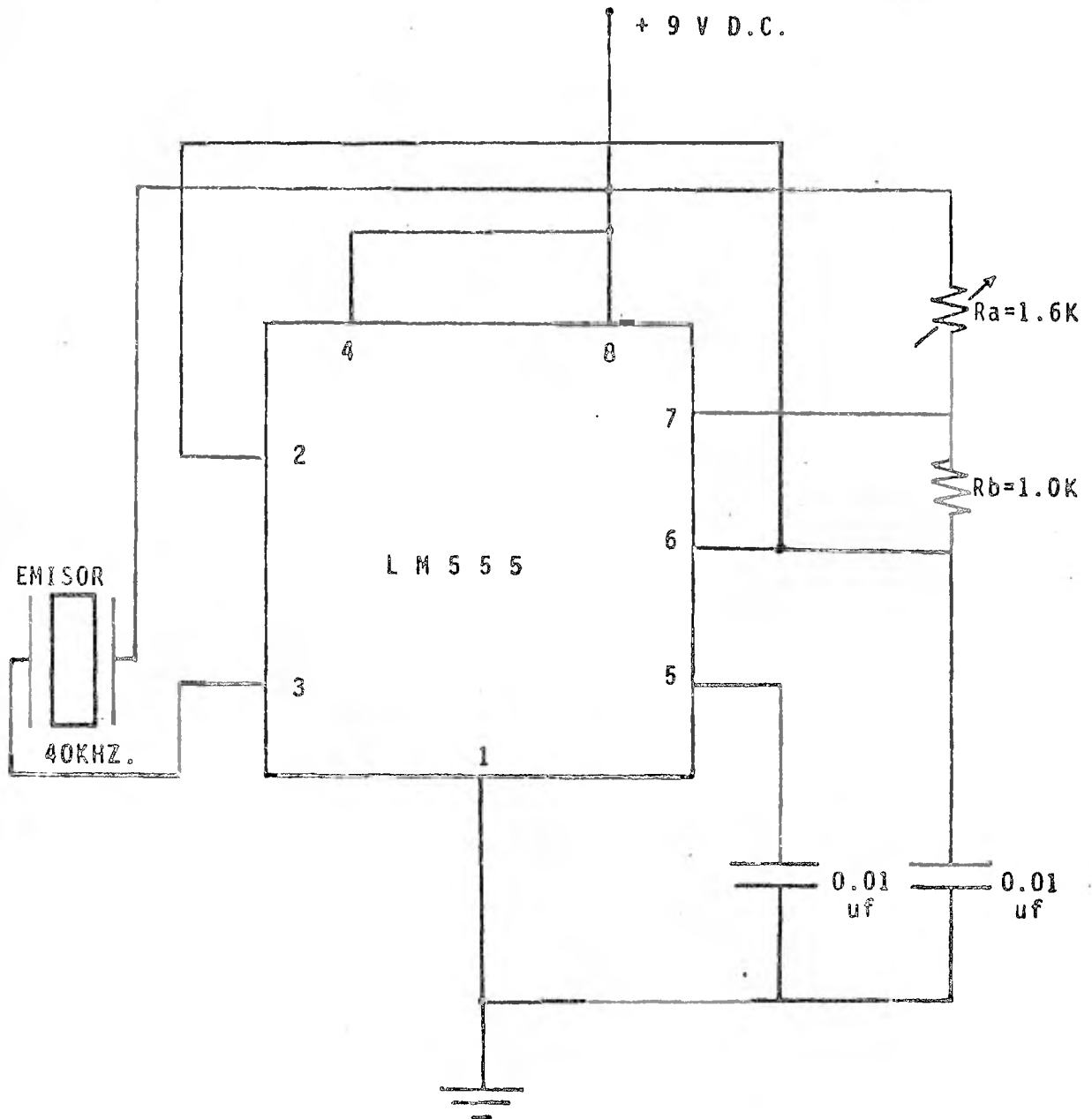


Figura 2.3 Circuito para generar la señal ultrasónica de 40 KHZ.



### 2.1.3 Recepción.

Para captar la onda reflejada, se dispone de tres transductores ultrasónicos unidireccionales fijos que están colocados uno al frente, otro en el costado izquierdo y el último en el derecho. Los tres transductores están conectados a un solo canal de recepción a través de un multiplexor. El multiplexor es controlado por un circuito que sincroniza la selección de cada transductor con el giro del emisor. Cuando uno de los receptores detecta la señal ultrasónica reflejada, el canal de recepción dá aviso al microprocesador generando un pulso bajo en el puerto PA7. El circuito de sincronización se utiliza también para informar al microprocesador de la dirección en que se encuentra el objeto que provocó la reflexión.

A continuación se explica en detalle la constitución del circuito de sincronización y del canal de recepción.

### 2.1.4 Sincronización

La sincronización se lleva a cabo por medio de tres parejas foto-emisor-fototransistor, el multiplexor y el disco giratorio sobre el que se encuentra montado el emisor ultrasónico (ver Fig. 2.4).

El disco giratorio tiene en su borde una ranura justamente en frente del emisor. Los tres fotoemisores se encuentran por encima del disco y están colocados junto a los receptores

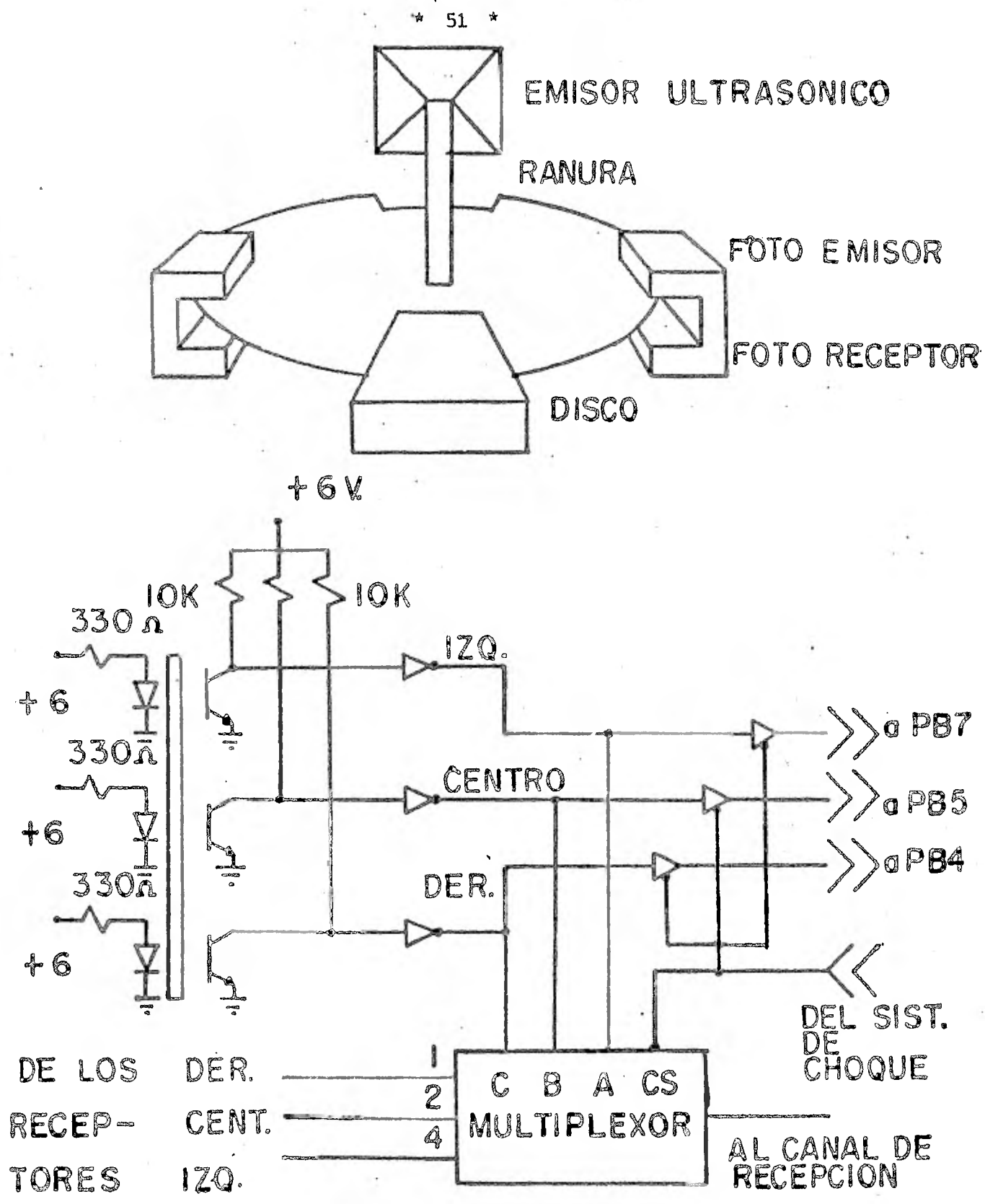


Figura 2.4 Circuito de sincronización emisión recepción.

ultrasónicos. Por debajo del disco y alineados con los fotomisores se encuentran los fototransistores.

Se usa un multiplexor analógico 8 a 1 número 4051B que se maneja por medio de tres líneas de control. El receptor ultrasónico izquierdo, se encuentra conectado a la línea de entrada 4 del multiplexor, el central a la 2 y el derecho a la 1.

Los colectores de los fototransistores se encuentran conectados a través de inversores, por una parte, a los puertos PB7, PB5 y PB4 del microprocesador y, por otra, a las líneas de control de multiplexor según la disposición que se presenta en la tabla 2.1.

FOTOTRANSISTOR	PUERTO MICROPROCESADOR	LINEA DE CONTROL MULTIPLEXOR
Izquierdo	PB7	C
Central	PB5	B
Derecho	PB4	A

Tabla 2.1

Normalmente, los fototransistores se encuentran cortados, es decir, en sus colectores existe un nivel lógico alto y, por tanto, en las líneas de control del multiplexor A, B, C se tienen respectivamente los estados lógicos 0, 0, 0.

Cuando la ranura pasa entre la pareja fotoemisor - fototransistor colocada en el costado derecho, el fotoemisor se satura y el estado de las líneas de control cambia de 000 a 001 seleccionándose así la línea de entrada número 1 a la que está conectado el receptor ultrasónico derecho.

Del mismo modo, cuando la ranura pasa entre las parejas - colocadas al centro y a la izquierda, el estado de las líneas de control cambia a 010 y 100 que corresponden a la Selección de los receptores central e izquierdo.

Como las líneas de control del multiplexor se encuentran conectadas a los puertos del microprocesador, al ser detectada la recepción éste sólo tiene que leer el estado de los puertos para saber de donde proviene la señal de aviso.

El tiempo de funcionamiento de cada receptor ultrasónico queda determinado por la longitud del orificio y la velocidad de giro del emisor. Dado que la velocidad angular del disco es de 87 rpm (546.64 rad/min) y el orificio ocupa un arco de 80°, el tiempo de funcionamiento de cada receptor es :

$$t = \frac{\theta}{\omega} = 1.396 \text{ rad} / 546 \text{ rad/min} = 0.153 \text{ seg.}$$

### 2.1.5 Canal de Recepción.

El canal de recepción está formado por dos circuitos: un circuito que controla el alcance de la vista del robot y un circuito que genera un nivel lógico bajo en el puerto PA7 cuando se recibe la onda reflejada.

#### Control de Alcance.

Dado que el robot debe esquivar los objetos que están en su camino, se debe fijar un límite de aproximación a partir del cual el robot dé vuelta para no chocar con el obstáculo. Esto se puede lograr limitando el alcance máximo de la vista del robot.

El circuito de la figura 2.5 realiza esta función.

La amplitud de la onda ultrasonora emitida varía inversamente con la distancia recorrida; mientras mayor es la distancia que separa al robot del objeto a detectar, menor es la amplitud de la señal recibida.

Para establecer el alcance de la vista del robot, se fija un cierto nivel de voltaje de comparación y se varía la ganancia del amplificador hasta obtener en su salida una onda cuyo lóbulo positivo rebase el nivel de comparación. Si se desea un alcance mayor, sólo hay que bajar el nivel de comparación y subirlo para un alcance menor. La figura 2.6 ilustra esta situación.

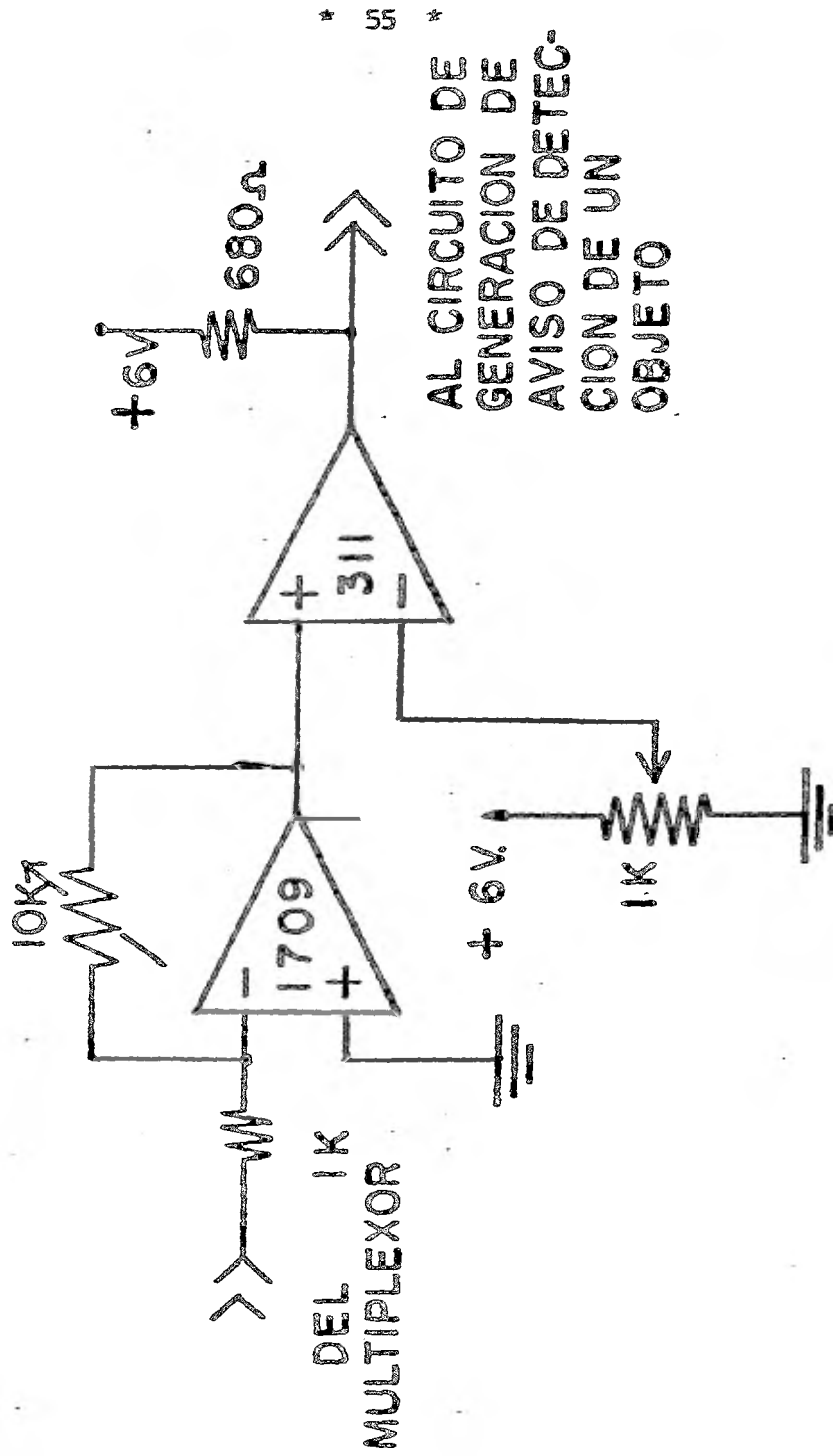


Figura 2.5 Circuito de control de alcance de la "vista".

mV

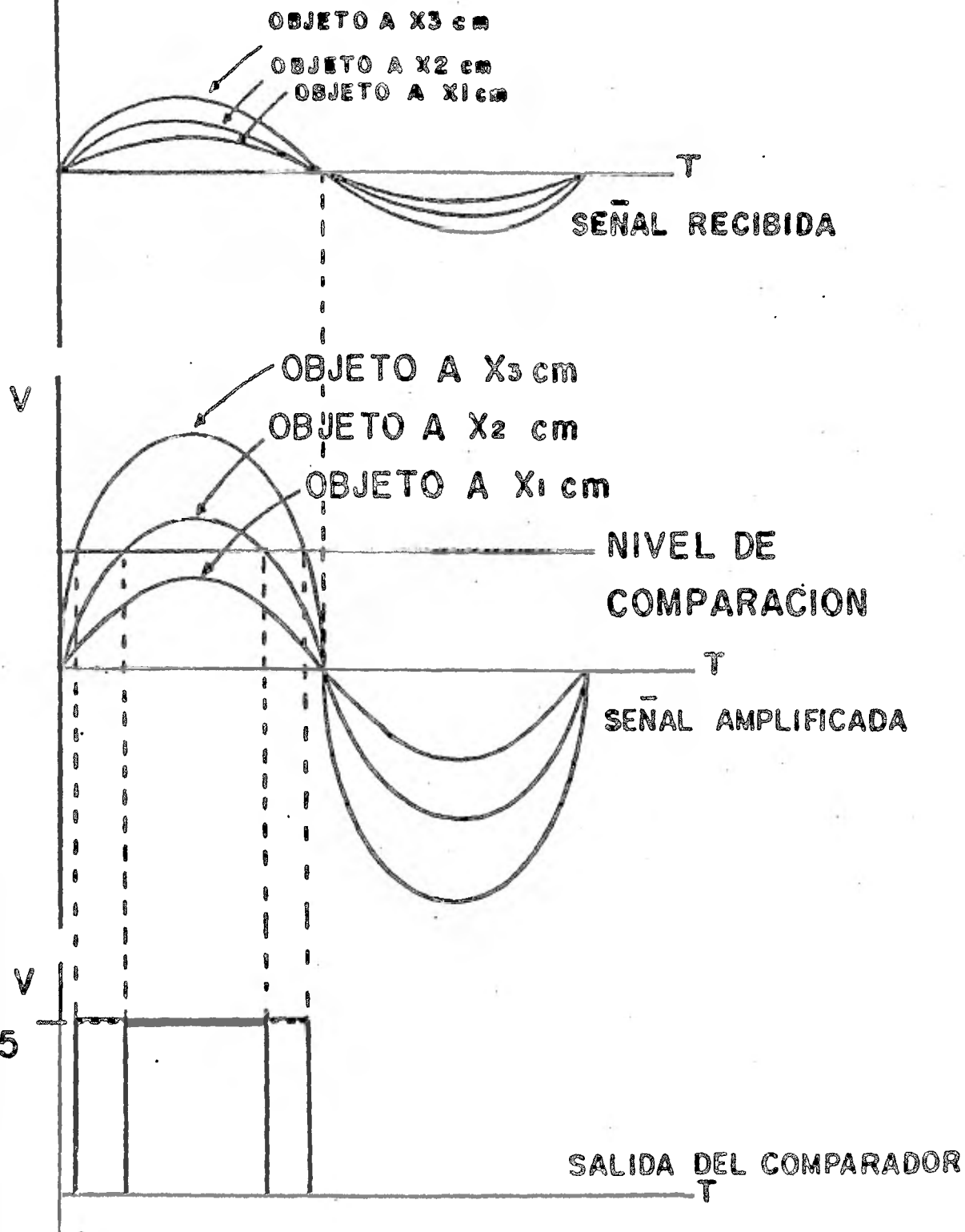


Figura 2.6 Formas de onda para diferentes distancias objeto-sistema.

Debido a las dimensiones del robot, se estimó que un alcance de 30 cm es adecuado para que el robot pueda tener libertad de movimiento suficiente para desplazarse y esquivar los obstáculos que se encuentren en su camino.

El tiempo que transcurre entre la emisión y recepción de la onda ultrasónica para un alcance de 30 cm es :

$$T_d = 2 \text{ alcance de la vista} / \text{velocidad de la onda ultrasónica en el aire.}$$

$$T_d = 60 \text{ cm} / (34.3 \text{ cm/seg}) \times 10^3 = 1.75 \times 10^{-3} \text{ seg.}$$

#### 2.1.6 Generación de aviso de recepción.

Para dar aviso al microprocesador de la presencia de un objeto, se utiliza un circuito decodificador de tonos PLL 567.

El 567 es un circuito diseñado específicamente para responder a una señal de voltaje de frecuencia constante que se encuentre dentro del ancho de banda del circuito. Cuando se capta la onda reflejada, en la salida del comparador del circuito de control de alcance se tiene una señal de voltaje cuadrada de 40 KHz y amplitud 5 volts a la que responde el decodificador con un nivel bajo que se mantiene mientras la señal está presente. La figura 2.7 muestra el diagrama de conexión del circuito.

El valor del ancho de banda del circuito 567, queda dado



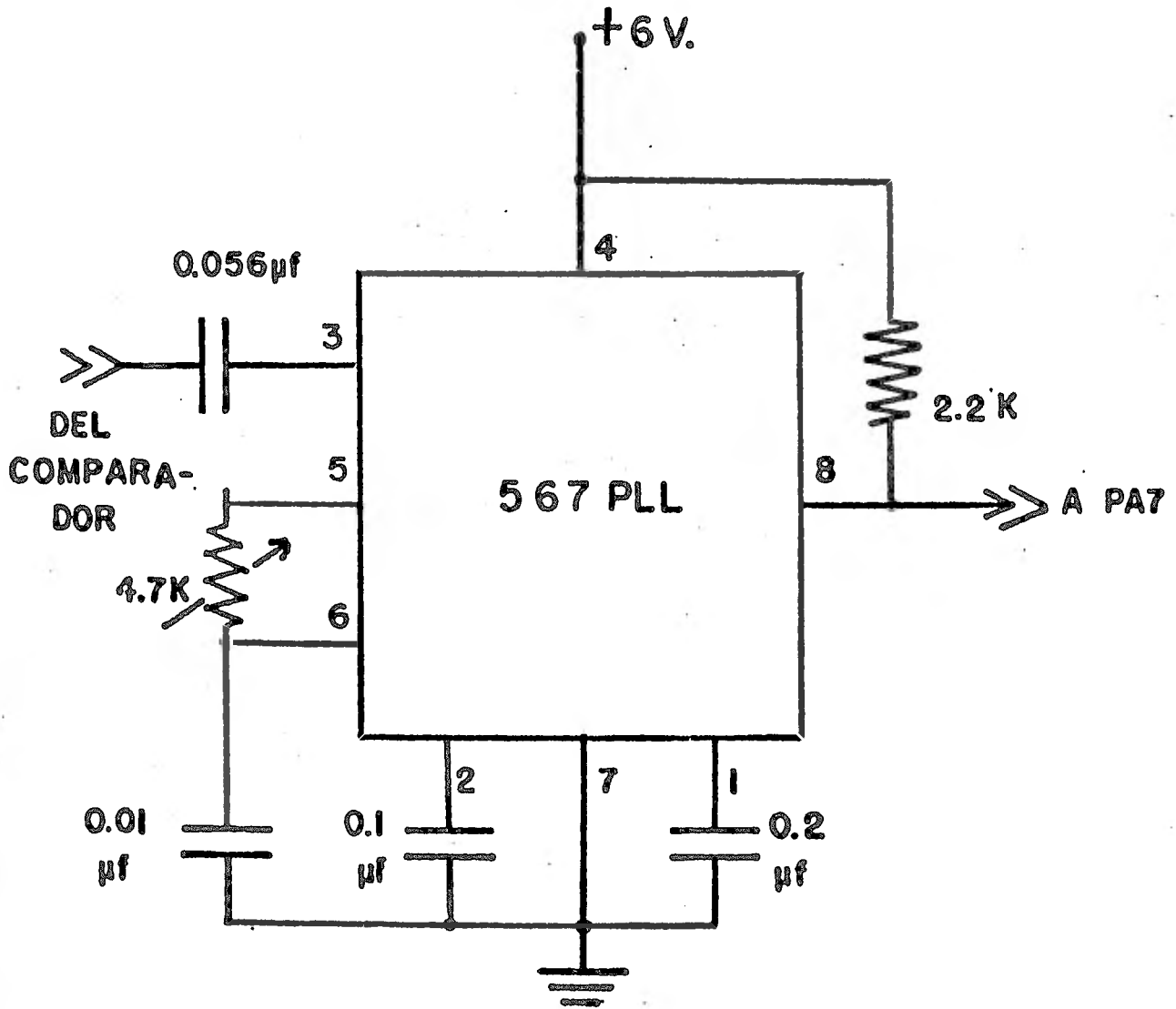


Figura 2.7 Circuito de aviso de la presencia de un objeto.

por la fórmula :

$$BW(\%fo) = 1070 (V_i \text{ rms}/foC_2)^{1/2}$$

donde :

$$fo = 1/R_1 C_1 = \text{frecuencia de oscilación libre del PLL}$$

Para nuestro caso se escogió  $C_1 = 0.01 \times 10^{-6}$  farads  
y  $fo = 40$  Khz.

de donde :

$$R_1 = 1/40\,000 \times 0.01 \times 10^{-6} = 2.75 \text{ Kohms.}$$

El valor del ancho de banda BW depende del valor cuadrático medio de la señal de entrada  $V_i$ . Suponiendo que la señal de entrada tiene un ciclo de trabajo de 10% y considerando un ancho de banda de 14% de  $fo$  tenemos :

$$V_i \left| \begin{array}{l} \text{rms} \\ 10\% \end{array} \right. = (1/T \int_0^T V_i^2 dt)^{1/2} = (1/2.5 \times 10^{-5} \int_0^{2.5 \times 10^{-5}} 5^2 dt)^{1/2} \\ = 1.58 \text{ volts rms.}$$

de donde :

$$BW(14\%) = 1070 (1.58/40\text{Khz } C_2)^{1/2}$$

$$\text{Por tanto : } C_2 = (1070/14)^2 \times 1.58/40\,000 = 0.2 \text{ micro faradíos.}$$

## 2.2 Sistema de Percepción por Choque.

Este sistema al igual que el de detección a distancia, utiliza los puertos para informar al microprocesador sobre la -presencia de un objeto. Sin embargo, dado que un choque representa una condición indeseable dentro del funcionamiento del -robot, el sistema genera una interrupción a través de la línea  $\overline{\text{INT}}$  para que el microprocesador actúe de inmediato y corrija esta situación.

La Figura 2.8 muestra el diagrama de conexión del sistema.

Se tienen dos switches normalmente abiertos colocados en los costados del robot que se encuentran conectados, por una -parte, a los puertos PB7 y PB4 a través de dos buffers de tres estados, y por otra, a una compuerta lógica AND. Cuando el robot se desplaza libremente, los dos switches están abiertos y en la salida de la compuerta AND se tiene un nivel lógico alto. En el momento en que se produce un choque, el nivel de la compuerta cambia y provoca la interrupción. Este mismo nivel sirve para desconectar del microprocesador al sistema de recepción a distancia y habilita a los buffers de tres estados del sistema de choque.

El caso de un choque de frente también está considerado -ya que cuando se produce, los dos switches son accionados si -multaneamente.

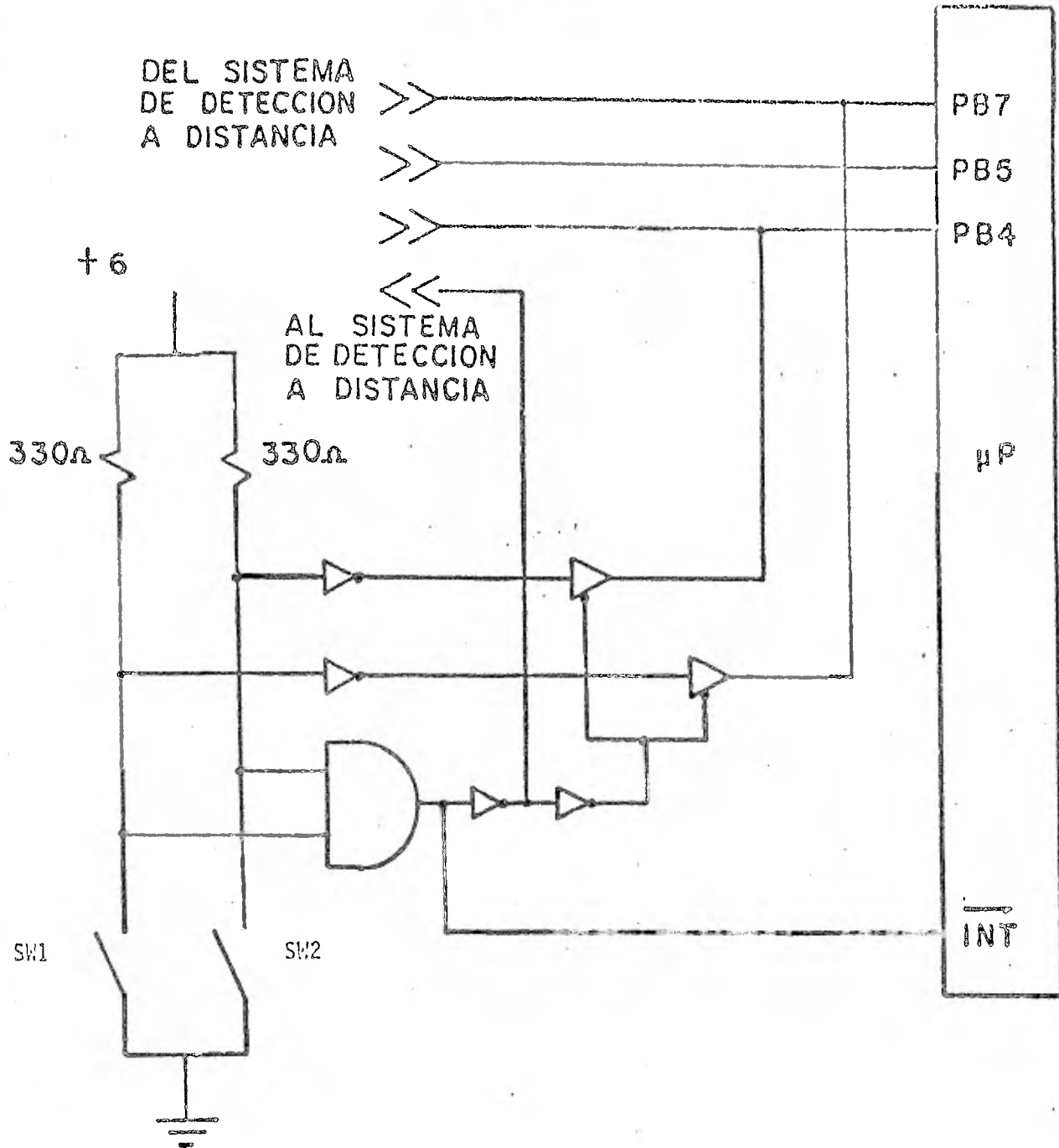


Figura 2.8 Sistema de percepción por choque.

La figura 2.9a muestra los estados de los puertos PB7 y PB4 para las diferentes posibilidades de choque y la figura 2.9b es un diagrama de tiempos que corresponde a un choque por la izquierda.

La Figura 2.10 es un diagrama eléctrico del sistema de percepción.

### 3.- Sistema de Desplazamiento.

#### 3.1 Funcionamiento.

El movimiento del robot se logra mediante dos motores de corriente directa : uno de tracción y otro de dirección. Cada motor está controlado por el microprocesador a través de un circuito de conmutación que se encuentra acoplado a los puertos por medio de una compuerta lógica y un optoacoplador como se muestra en la figura 3.1.

Se tienen dos pares Darlington complementarios en configuración Pushpull que hacen girar al motor en uno u otro sentido. Si en las entradas de las compuertas NAND se tienen niveles altos, los optoacopladores se encuentran inactivos, esto es, la corriente de emisor de los dos fototransistores es nula y, por tanto, los pares Darlington se encuentran en estado de corte lo que impide que el motor sea polarizado.

Cuando el nivel de entrada de una de las compuertas es bajo, el optoacoplador correspondiente es activado y el par Dar -

CHOQUE	PB7	PB4
IZQ.	1	0
FRENTE	1	1
DERECHA	0	1

Figura 2.9a Estados lógicos de los puertos PB7 y PB4 para diferentes choques.

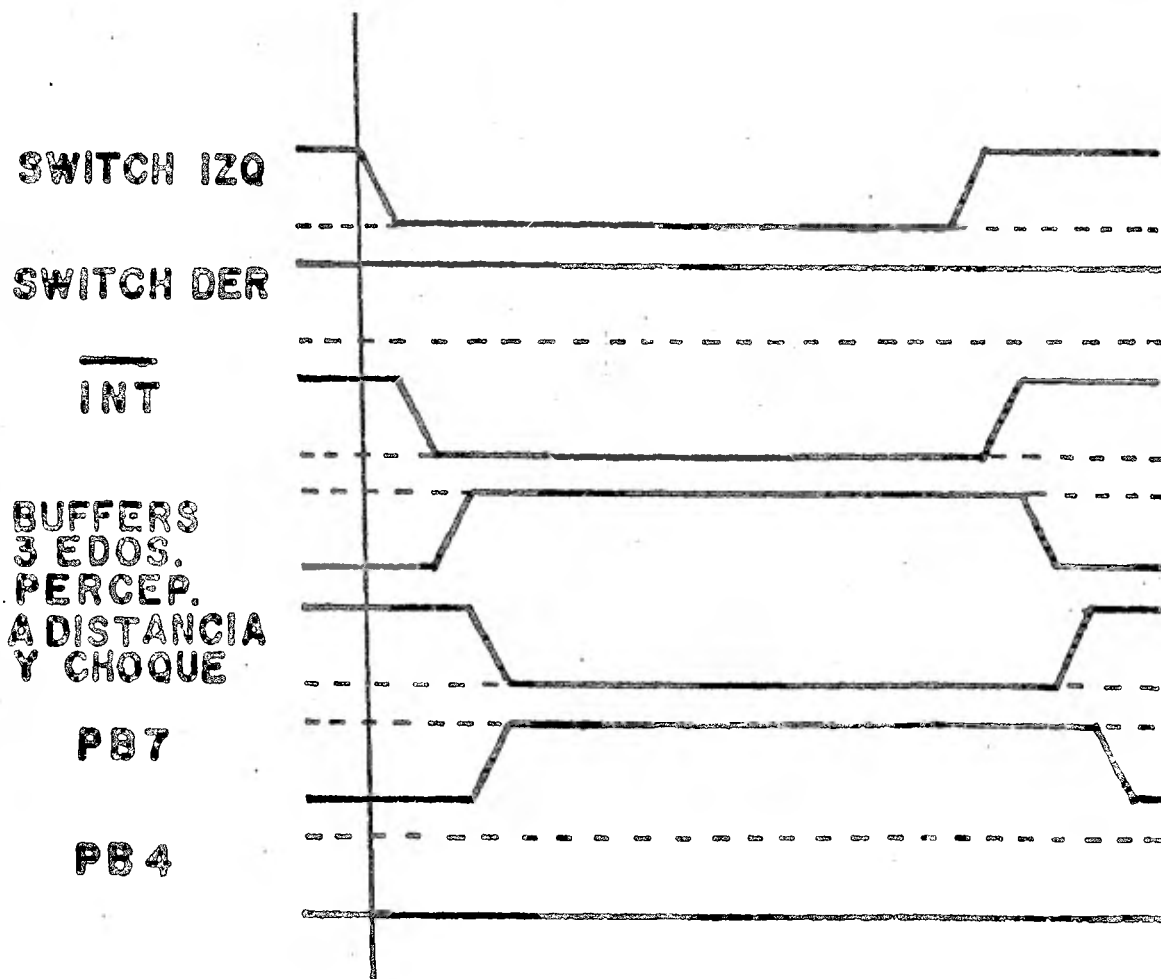


Figura 2.9b Diagrama de tiempo para un choque por la izquierda.

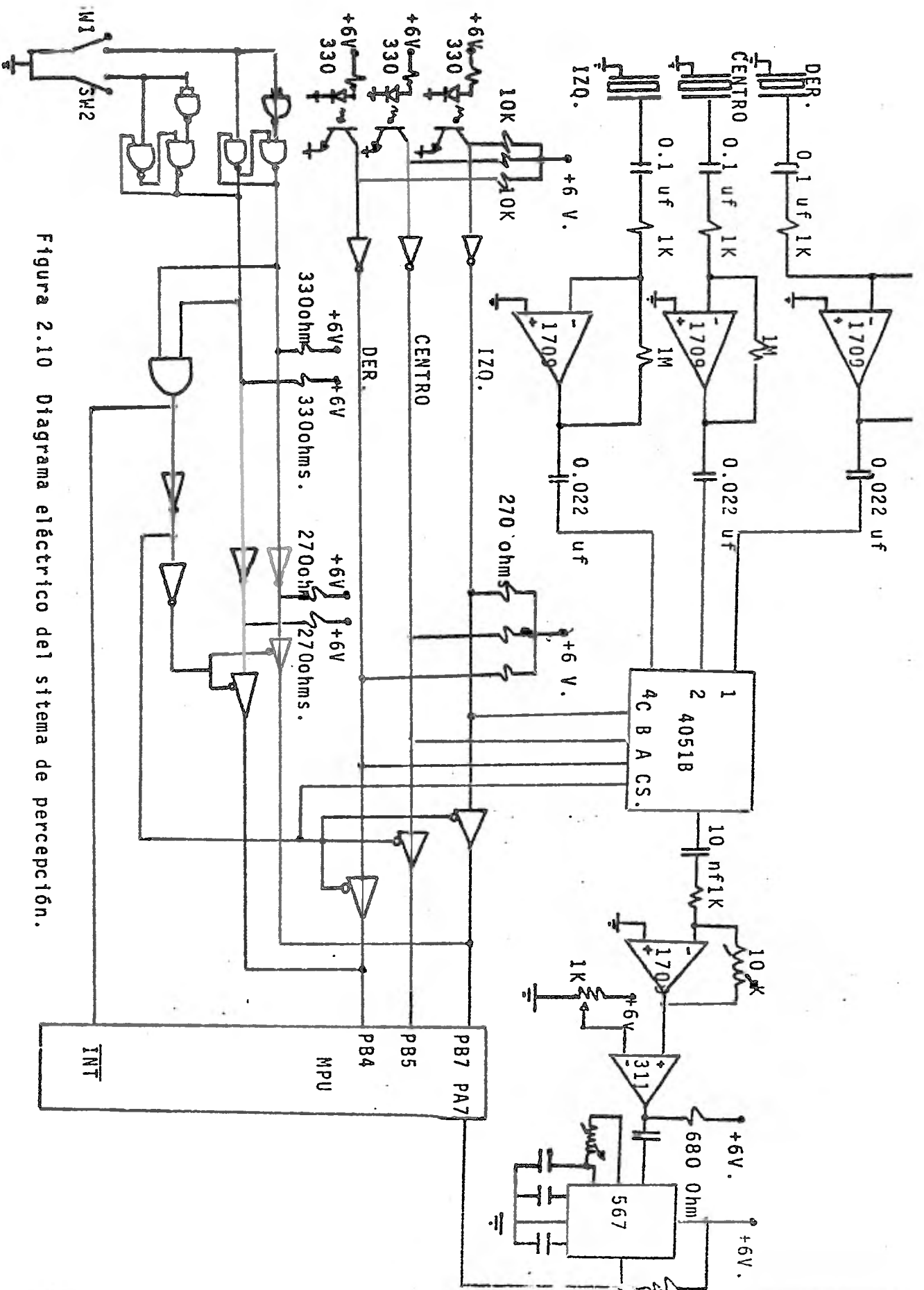


Figura 2.10 Diagrama eléctrico del sistema de percepción.

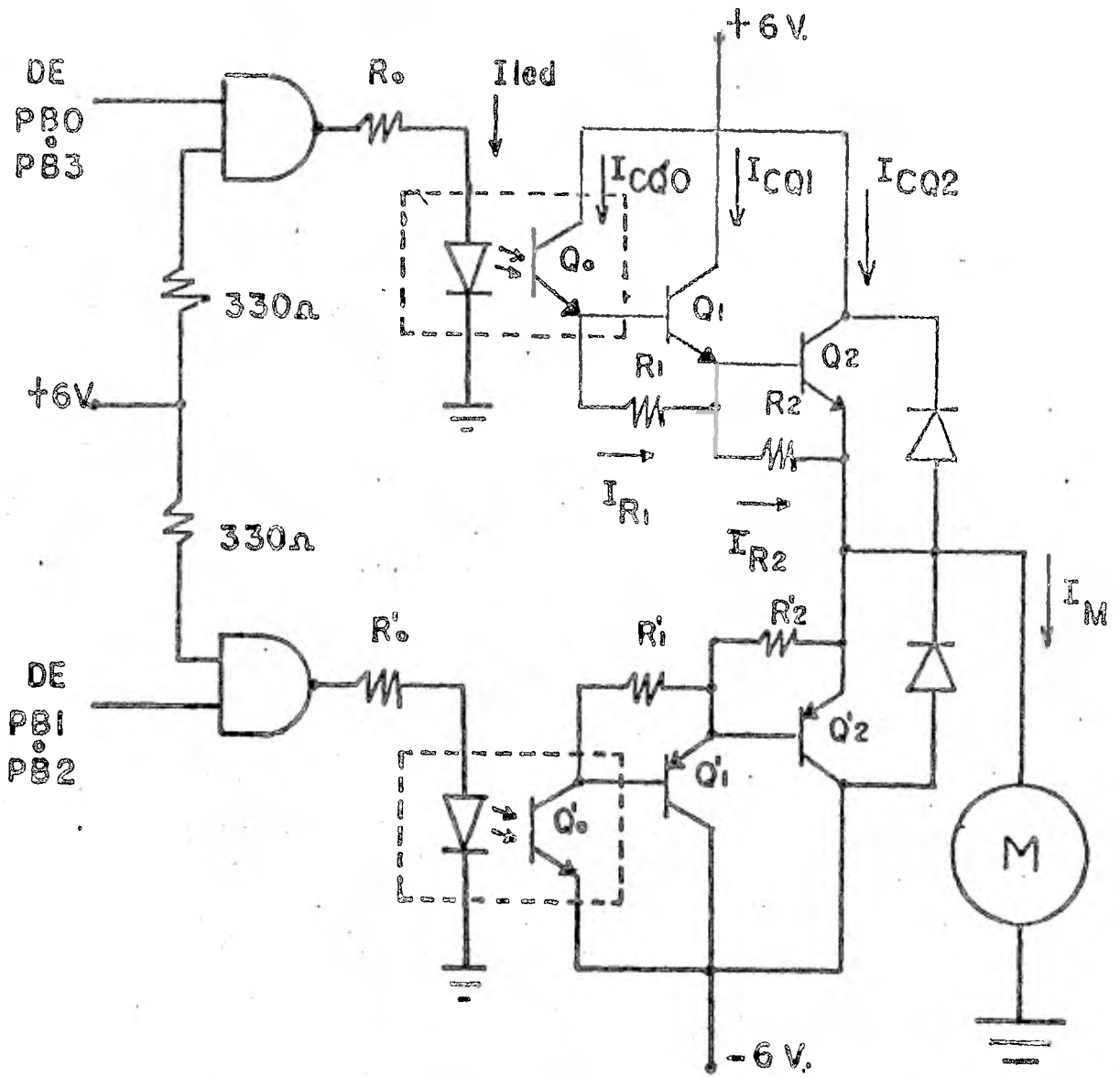


Figura 3.1 Circuito de conmutación para el control del motor de tracción y de dirección.



lington proporciona corriente al motor. Para que gire el motor en sentido inverso se utiliza la parte complementaria del circuito.

Los diodos conectados entre el emisor y el colector del par Darlington, sirven para proteger al circuito de la corriente producida por la f.cem. del motor.

La tabla 3.1 muestra los puertos a los que están conectados los circuitos de conmutación, así como los niveles lógicos que se deben presentar en ellos para que se tenga movimiento - hacia adelante, hacia atrás, a la derecha y a la izquierda.

Dirección	PB3	PB2
Izquierda	0	1
Derecha	1	0

Avance	PB0	PBA
Adelante	0	1
Atrás	1	0

Tabla 3.1

### 3.2 Determinación de los elementos del circuito de conmutación.

Si llamamos  $I_m$  a la corriente que circula por el motor a plena carga, tenemos :

$$I_m = I_{R_2} + I_{CQ_2} = V_{BEQ_2} / R_2 + I_{CQ_2} \quad \dots\dots (1)$$

$$I_{CQ_0} = I_{R_1} + I_{BQ_1} = V_{BEQ_1} / R_1 + I_{CQ_1} / \beta_{Q_1} \quad \dots (2)$$

$$I_{CQ_1} + I_{R_1} + I_{R_2} + I_{BQ_2} \quad \dots\dots (3)$$

El anterior es un sistema de tres ecuaciones con cinco incógnitas ( $I_{CQ_0}$ ,  $I_{CQ_1}$ ,  $I_{CQ_2}$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ), por tanto, se deben fijar dos de las incógnitas para poderlo resolver. Para ello, sabemos de las características del optoacoplador que cuando por el diodo emisor de luz LED circulan 10 ma., por el emisor del fototransistor circulan 5 ma., de aquí podemos determinar el valor de  $R_0$  para tener una corriente de 10 ma. circulando por el LED:

$$I_{LED} = (V_{cc} - V_{LED}) / R_0$$

$$R_0 = (6 - 1.25) / 10 = 0.475 \text{ kohms.}$$

Con esto, el valor de  $I_{CQ_0}$  queda fijo en 5 ma.

Por otra parte, si hacemos  $I_{CQ_1} = 200 \text{ ma.}$  que es la -

corriente continua de colector para el transistor  $Q_1$  (2A237), tenemos un sistema compatible de tres ecuaciones con tres incógnitas.

Resolviendo el sistema obtenemos :

$$R_1 = 0.219 \text{ Kohms}$$

$$R_2 = 0.048 \text{ Kohms}$$

$$I_{CQ_2} = 2.7 \text{ Amperes.}$$

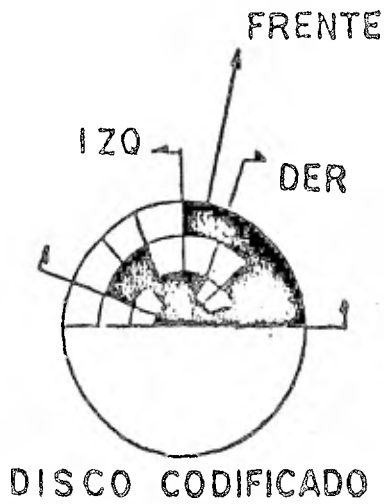
### 3.3 Control de dirección.

Para lograr un control eficaz de la dirección seguida por el robot, es necesario conocer la posición en que se encuentra la rueda que lo guía. Con este fin se cuenta con un disco codificado que traduce la posición de dicha rueda en un número binario de tres dígitos expresado en código Gray.

La codificación está hecha sobre la mitad del disco ( $180^\circ$ ), de manera que se cuenta con  $2^3 = 8$  direcciones diferentes, - esto es, cada una abarca  $180/8 = 22.5^\circ$ .

La lectura del disco se hace con tres pares fotoemisor - fototransistor conectados a los puertos PA3, PA2 y PA1.

La figura 3.2 muestra el disco y el circuito de lectura - del mismo.



No. BINARIO DIRECCION

101	0° / -22.5°	FRENTE
100	-22.5° / -45°	DER. 1
110	-45° / -67.5°	DER. 2
111	-67.5° / -90°	DER. 3
001	0° / 22.5°	IZQ. 1
011	22.5° / 45°	IZQ. 2
010	45° / 67.5°	IZQ. 3
000		NO UTILIZADO

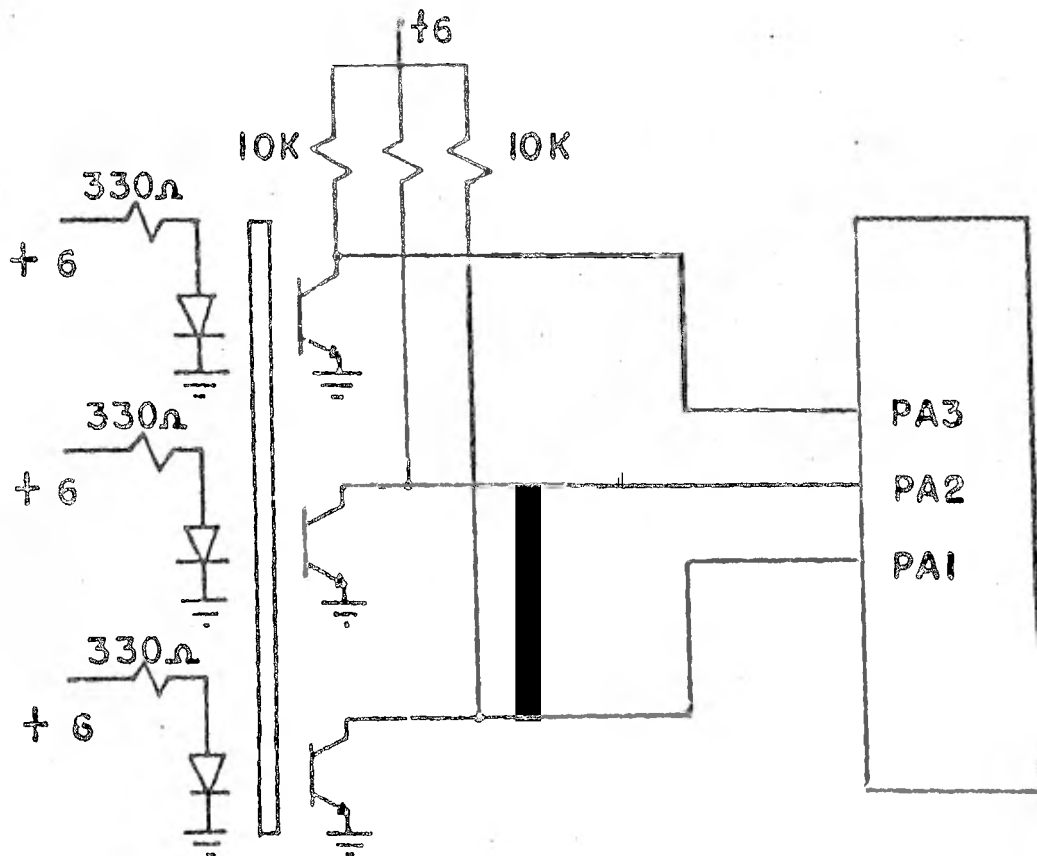


Figura 3.2 Disco codificado en Gray y circuito de lectura del disco del sistema de desplazamiento.

CAPITULO IV  
SOFTWARE

1.- Software :

En este capítulo describiremos el software del sistema, - como está formado y qué funciones realiza.

El software consiste en una serie de programas escritos en lenguaje de máquina para el procesador 6502. El microproce\_sador junto con los programas constituyen la inteligencia del sistema y hacen las veces de "cerebro", permitiéndole ser inde\_pendiente y tomar decisiones basadas en la información que re\_cibe del mundo externo por medio de sus sensores. (Fig. 1.1)

Los programas se caracterizan por otorgar al sistema la capacidad de saber qué hacer cuando detecte algún obstáculo en su trayectoria ya sea mediante el circuito ultrasónico o el de contacto.

En términos generales el software está compuesto de la - siguiente forma :

- I Programa principal.
- II Subrutinas de uso general.
- III Subrutina de interrupción.

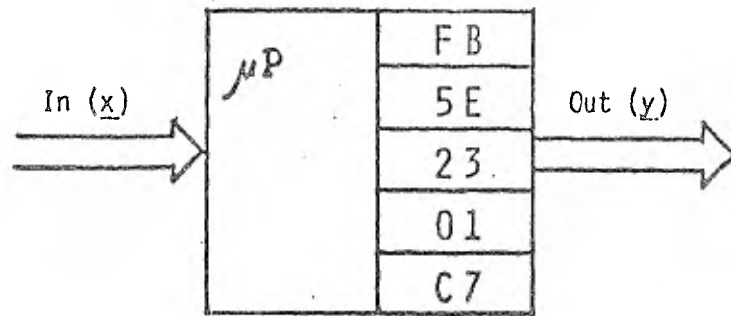


Figura 1.1

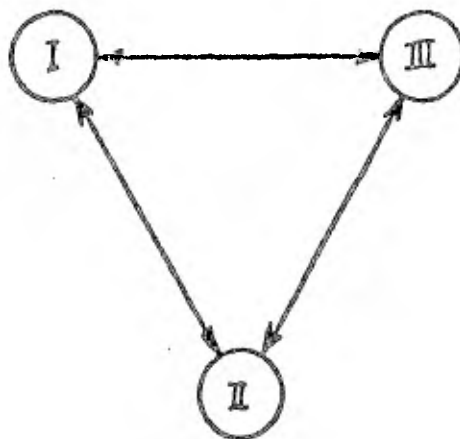


Figura 1.2

Estas tres partes se interrelacionan entre sí para lograr respuestas a las señales provenientes del mundo externo (Fig. 1.2).

La función principal de cada una de las partes mencionadas es la siguiente : Con respecto al Programa Principal, éste, además de inicializar los puertos y habilitar interrupción, pone en avance al sistema monitoreando continuamente la posible existencia de obstáculos en el entorno y en caso que éstos existieran, ordena la corrección del presente curso. En cuanto a las subrutinas de uso general, éstas sirven principalmente como apoyo a las demás partes del software, las cuales son: la subrutina CENTRO cuya función es centrar la rueda de la dirección y la subrutina DELAY que, como su nombre lo dice, crea retardos de tiempo. Finalmente, la subrutina de INTERRUPCION es únicamente utilizada cuando al no haberse podido evitar el choque (programa principal), debido a que los obstáculos estaban fuera del ángulo de radiación de los transductores de ultrasonido, los circuitos de contacto son habilitados y requieren ser atendidos con máxima prioridad.

La forma como se interrelacionan los programas así como la filosofía general de éstos dentro del sistema se puede ver en el diagrama de flujo de la figura 1.3.

De acuerdo a las condiciones que se presenten, el sistema seleccionará en forma autónoma la mejor solución, de tal

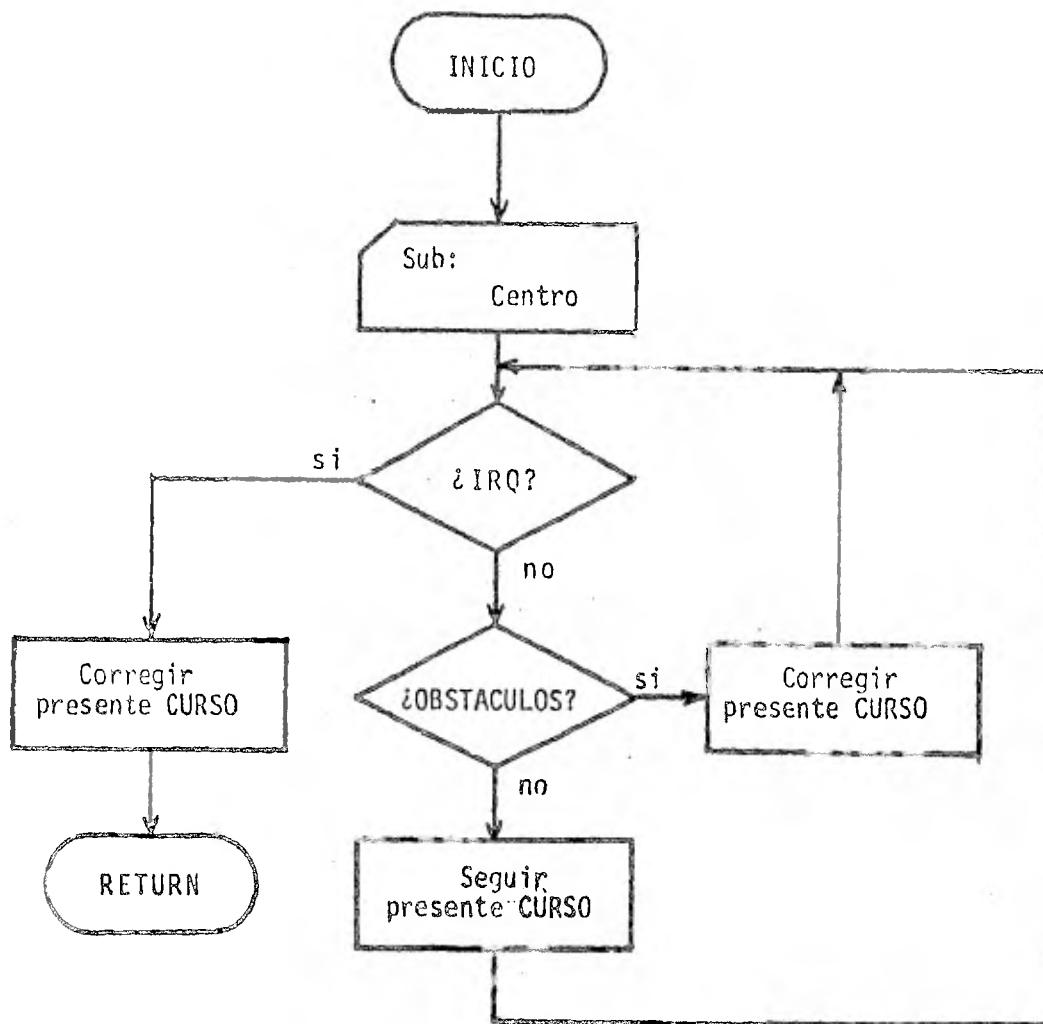


Figura 1.3



forma que continúe en movimiento.

Un diagrama general del sistema y las señales que harán - tomar una solución u otra así como las señales que se activarán, se muestra en la figura 1,4.

Como se ilustra en la figura 1,3, de acuerdo a la información obtenida en los puertos  $P_{a_1}$ ,  $P_{a_2}$ ,  $P_{a_3}$ ,  $P_{a_7}$ ,  $P_{b_4}$ ,  $P_{b_5}$ ,  $P_{b_7}$ , activaremos las señales de control que harán que los motores de dirección giren en algún sentido, o en el caso de los motores de tracción, los pondrán en avance o en retroceso.

Podemos observar que existe un sistema de lazo cerrado - formado por el  $\mu p$ , el motor de dirección y el disco codificado (I). Véase la figura 1.5.

En este sistema se puede sensar un error, el cual es igual a la diferencia entre la posición deseada y la posición recibida. Este error es utilizado por el algoritmo de SW, el cual genera proporcionalmente la señal de corrección que excita el motor y lo lleva a la posición deseada.

## 2.- Programas del Sistema.

Antes de mostrar los diagramas de flujo, así como los objetivos principales de los diversos programas que componen el SW hablaremos un poco sobre los algoritmos existentes así como del que nosotros utilizamos para la orientación del sistema en pre-

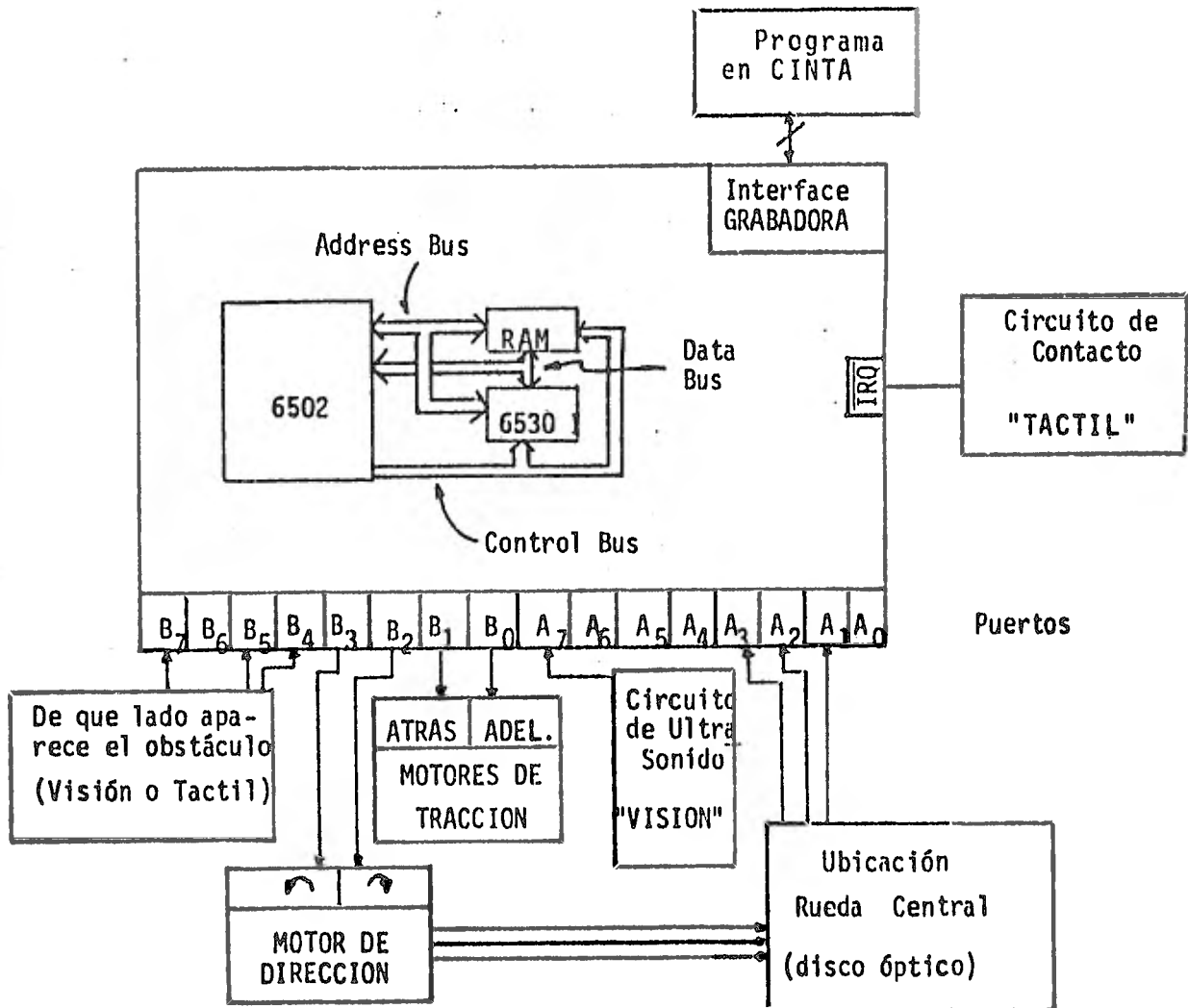


Figura 1.4

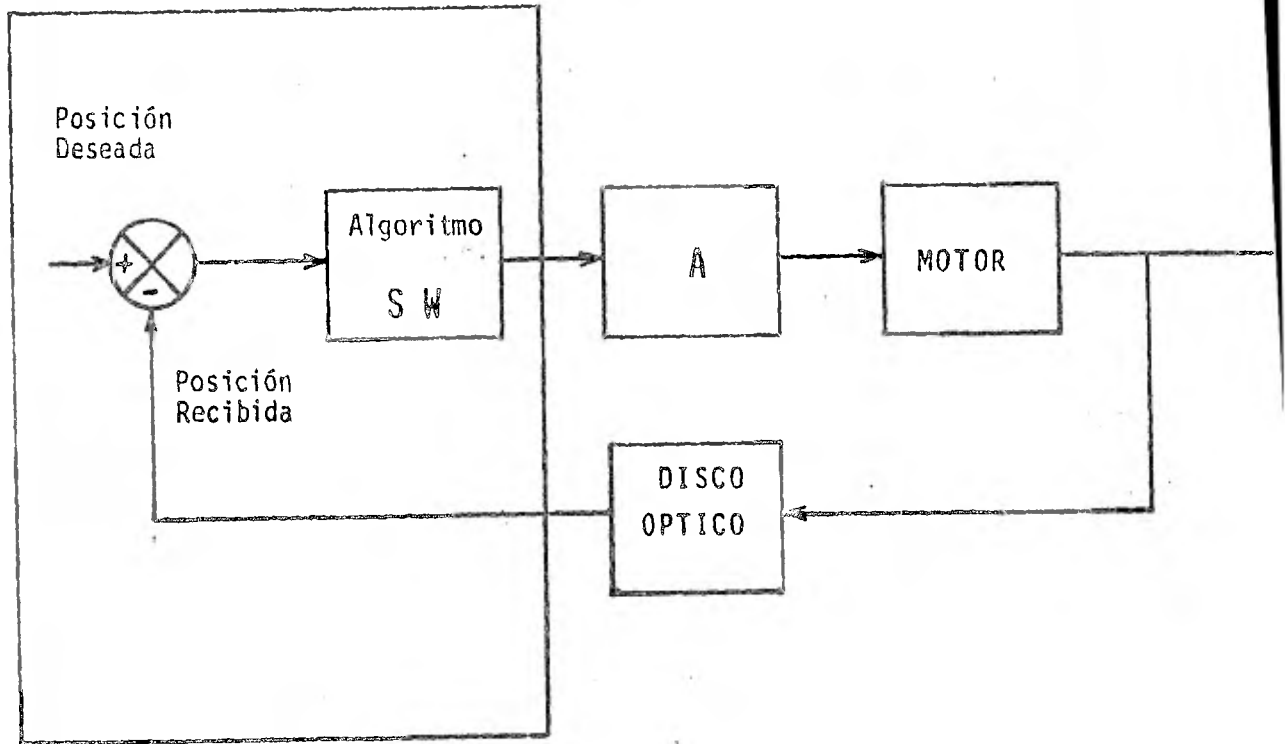


Figura 1.5

sencia de obstáculos.

Hasta la fecha no existe un algoritmo que en forma general resuelva el problema <sup>(II)</sup>, sin embargo existen aproximaciones.

Existen dos posibles formas de darle solución al problema: es por medios Heurísticos (Stanford 1974), ampliamente usada y la cual fué utilizada por nosotros y la segunda es planteando el problema como uno de Programación Lineal <sup>(II)</sup>, pero la posible adaptación de ésta última a nuestro proyecto presentaba grandes dificultades por lo cual decidimos tomar la primera solución.

El algoritmo que utilizamos fué completamente desarrollado por nosotros, no obstante que existen artículos <sup>(III)</sup> en los cuales se utilizan algoritmos muy similares al nuestro.

A continuación presentamos los programas (que forman el SW) junto con sus diagramas de flujo y objetivos principales <sup>(III)</sup>.

## 2.1 Programa principal.

Sus objetivos principales son :

- 1.- Inicializar puertos.
- 2.- Centrar rueda frontal, para lo cual se apoya en la subrutina centro.

- 3.- Habilitar IRQ.
- 4.- Iniciar movimiento frontal.
- 5.- Verificar la posible existencia de obstáculo en la vecindad del sistema, en caso de no existir ir a 4 o si no :
- 6.- Determinar de qué lado se presentó el obstáculo, - una vez hecho esto se procede a activar el correspondiente ángulo y sentido de giro del motor de dirección con el fin de evitar el obstáculo.
- 7.- Se pone en avance al sistema unos cuantos segundos, dados éstos por la subrutina delay.
- 8.- Se procede a centrar la rueda frontal.
- 9.- Regresa al punto 4.

Los puntos 5, 6, 7, 8 y 9 se encuentran esquematizados - en la Fig. 2.1.

Es importantes hacer notar los siguientes detalles :

- 1.- Si el obstáculo es detectado por ambos lados, el lado al cual el obstáculo esté mas cercano tendrá prioridad sobre el otro. (Fig. 2.2).

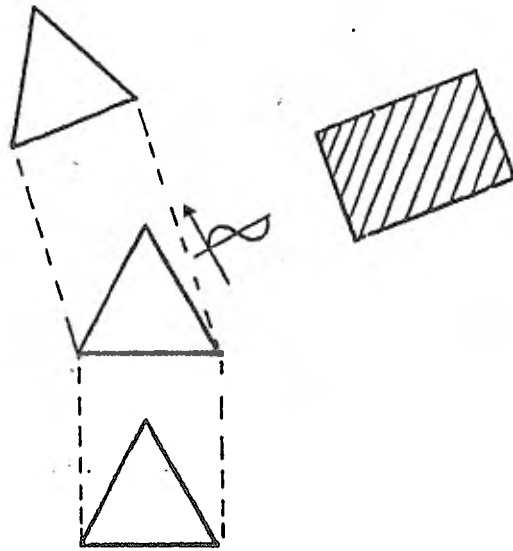


Figura 2.1

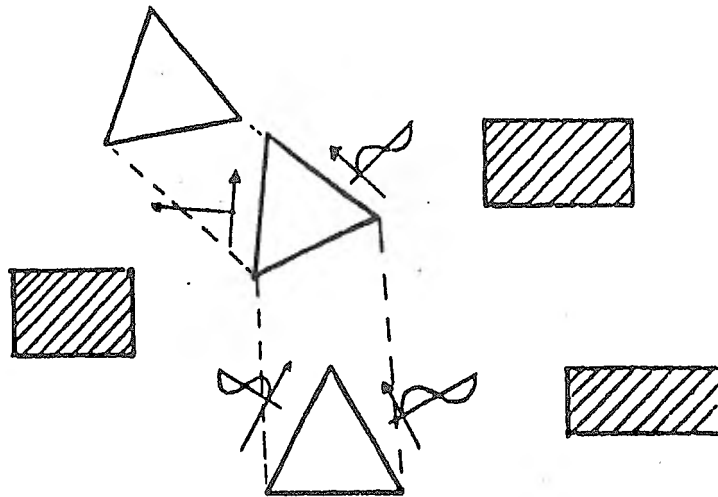


Figura 2.2

- 2.- Si ambos obstáculos están a la misma distancia, la -  
uc arbitrariamente escogerá el lado izquierdo dándo-  
le mayor prioridad.
- 3.- Lo mismo que en 2 sucederá si el obstáculo es detec-  
tado frontalmente.

NOTA: Aunque esta manera de proceder parezca arbitraria, en ba-  
se a la experiencia se ha comprobado que funciona bastante  
te bien (Ref. III).

## 2.2 Subrutina Centro.

Sus objetivos principales son :

- 1.- Detectar la posición de la rueda central, si está en  
el centro ir a 6.
- 2.- Con esta información, determinar el sentido de giro  
del motor de dirección, con el fin de centrar la rueda  
da.
- 3.- Mover continuamente el motor, comparando la posición  
deseada con la posición actual.
- 4.- En caso de que la diferencia entre la posiciones no  
sea nula, volver a 3, en caso contrario :

5.- Parar todos los motores.

6.- Regresar.

Es importante recordar que la ubicación de la rueda central es conocida en todo instante de tiempo, gracias al disco óptico.

El diagrama de flujo de esta subrutina se muestra en la Figura 2.4.

### 2.3 Subrutina Delay I, II.

Sus objetivos principales son :

- 1.- Cargar ciertas localidades de memoria con los datos requeridos, de tal forma que se logre el retardo deseado.
- 2.- Empezar a mover los motores, de acuerdo a como se preestableció en el programa que está usando esta subrutina.
- 3.- Decrementar las localidades de memoria, si no son iguales a cero, ir a 2, en caso contrario :
- 4.- Regresar.



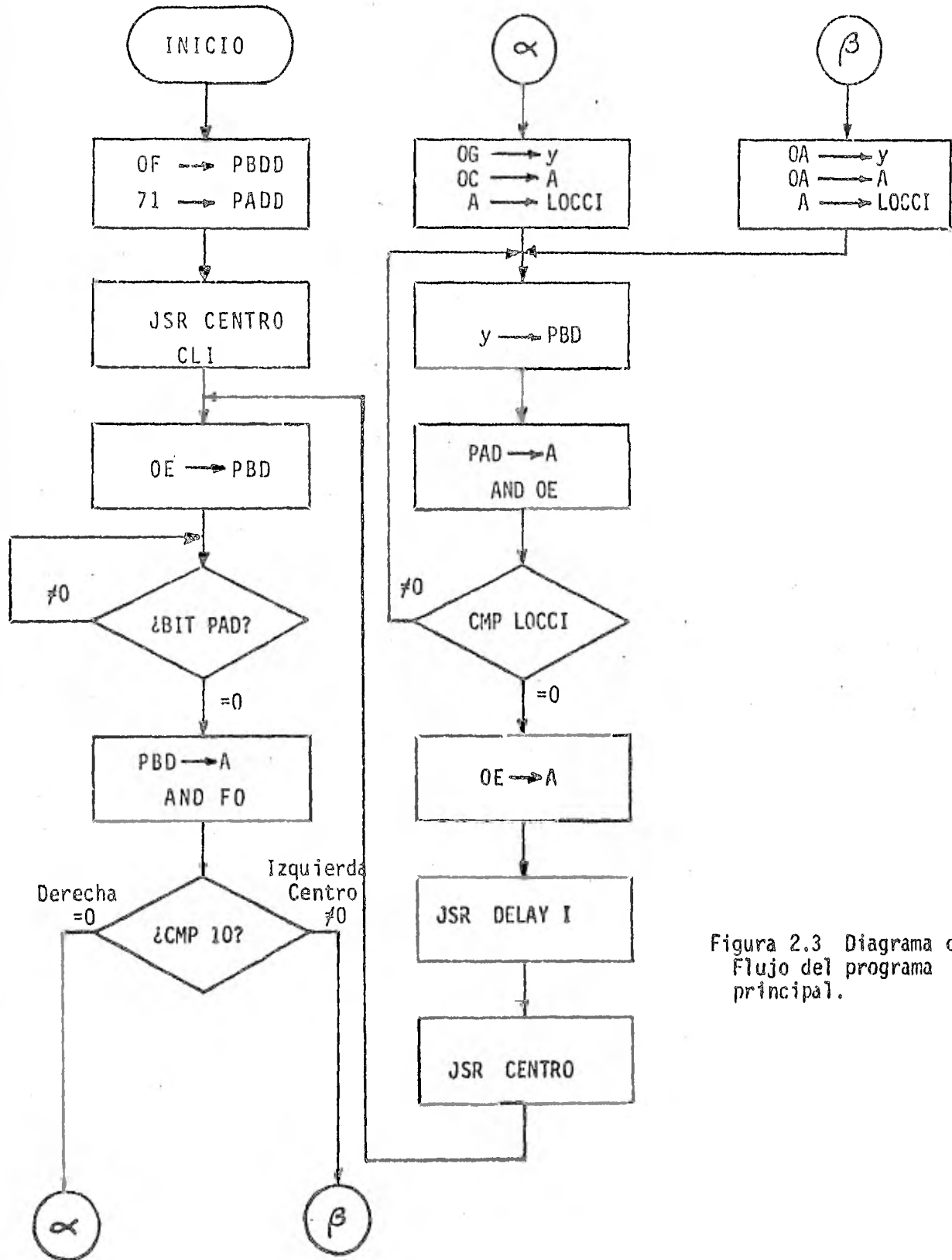


Figura 2.3 Diagrama de Flujo del programa principal.

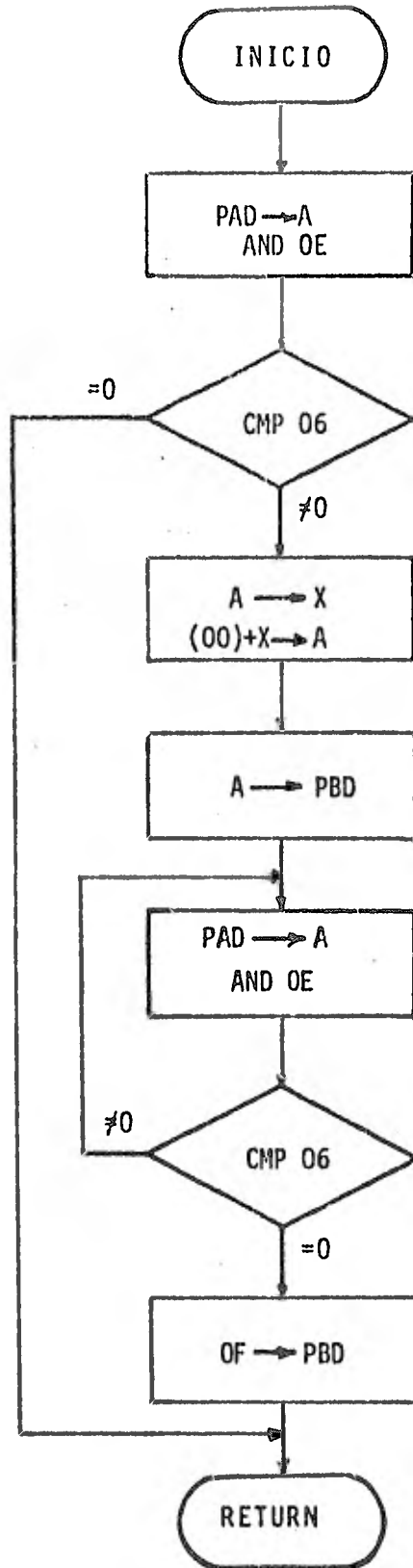


Figura 2.4 Diagrama de Flujo de la Subrutina Centro.

El tiempo de retardo dado por la subrutina es calculado mediante la siguiente fórmula :

$$A = (12 * LOCC II) - \underline{1} ; \quad B = \{(A + 8) * LOCC III\} - 1$$

$$RT = \{(B + 5) * LOCC IV\} - \underline{1} ; \quad (\mu \text{ seg})$$

El diagrama de flujo se muestra en la Figura 2.5.

#### 2.4 Interrupción.

Sus objetivos principales son :

- 1.- Salvar registros necesarios.
- 2.- Determinar de que lado se produjo el choque.
- 3.- Hechar para atrás al sistema, para estos nos apoyamos en la subrutina delay.
- 4.- De acuerdo a la información obtenida en 2, se activa el correspondiente ángulo y sentido de giro del motor de dirección.
- 5.- Se pone en avance al sistema, (subrutina delay).
- 6.- Se centra la rueda.
- 7.- Se reestablecen los registros anteriormente salvados.
- 8.- Regresar.

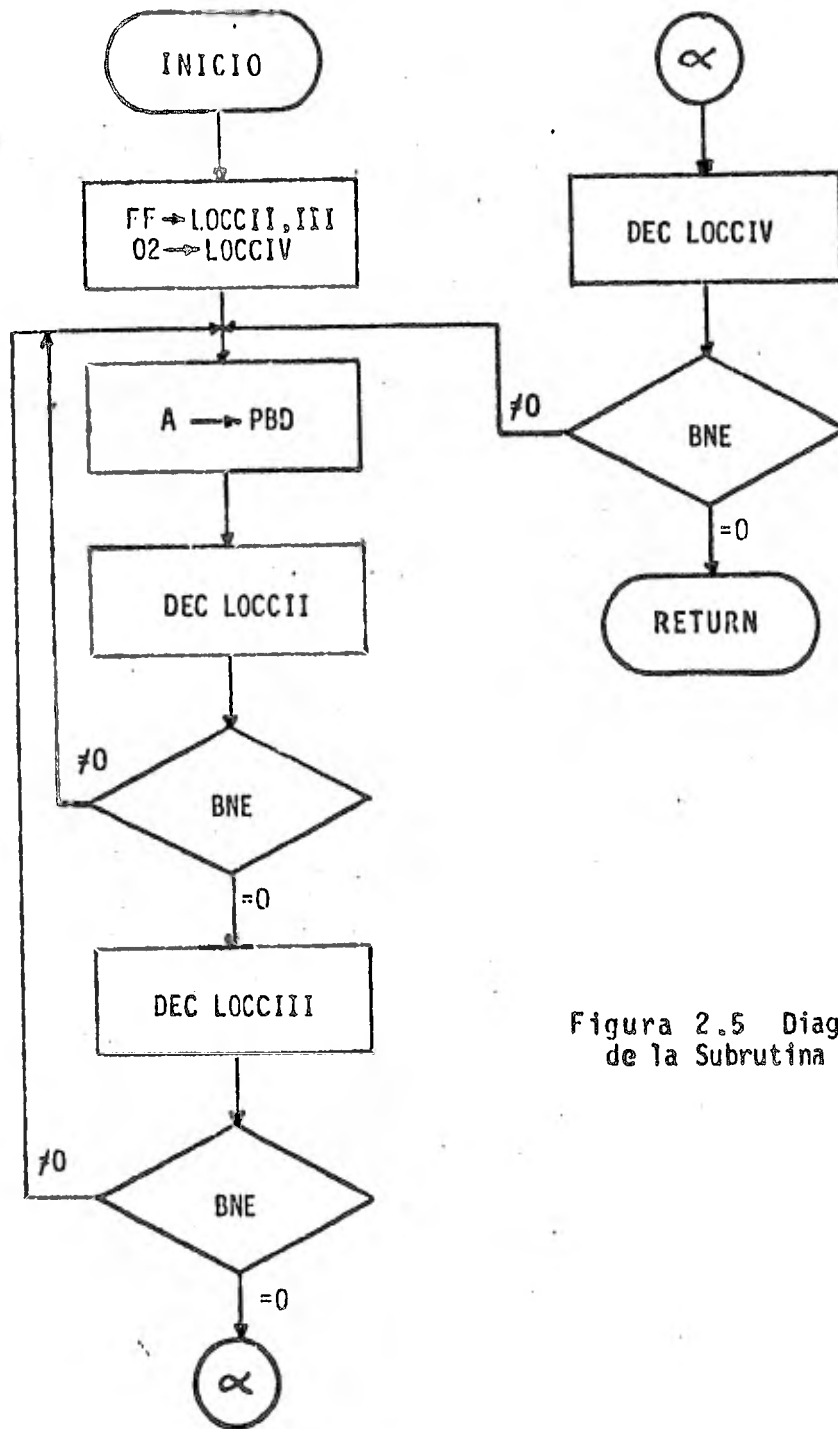


Figura 2.5 Diagrama de Flujo de la Subrutina DELAY.

El diagrama de flujo se muestra en la figura 2.6.

Como se observa esta rutina de interrupción es muy parecida a los últimos puntos del programa principal, sin embargo hay que tomar en cuenta que trabaja sobre diferentes localidades de memoria.

Los puntos 2, 3, 4, 5, 6 y 7 son ilustrados en la figura 2.7.

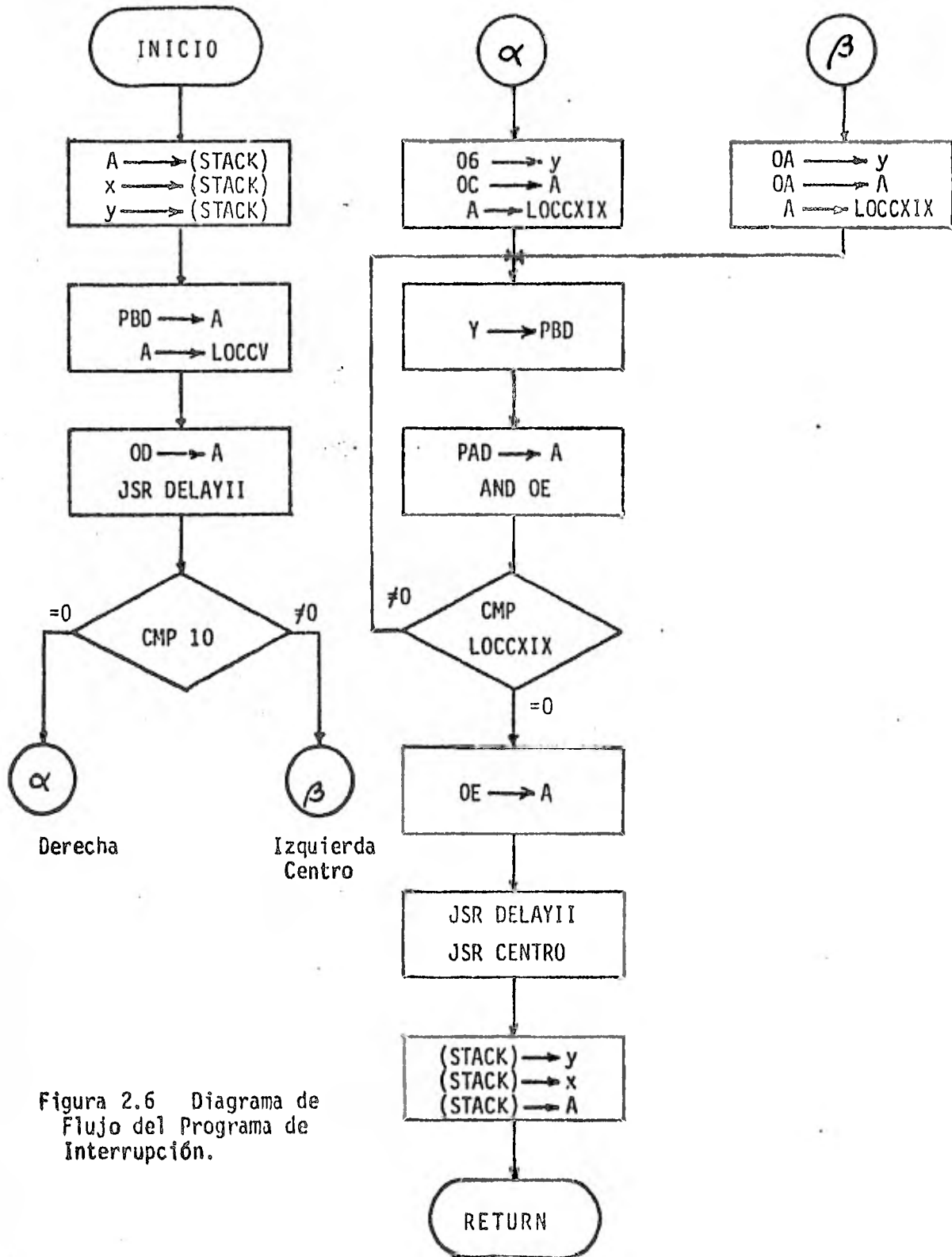


Figura 2.6 Diagrama de Flujo del Programa de Interrupción.

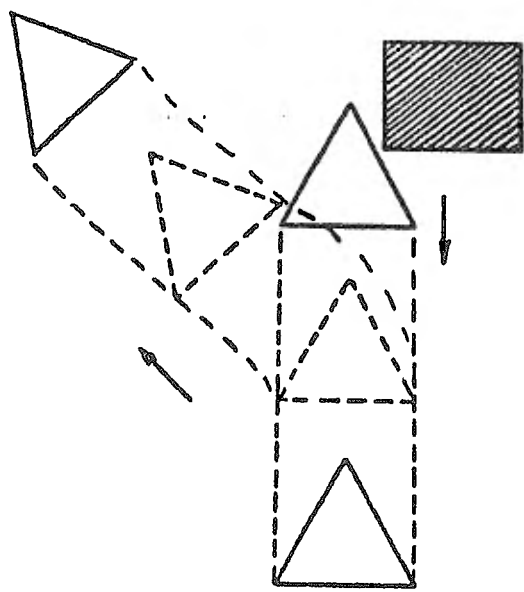


Figura 2.7

3. REFERENCES :

- I.- Applying Microrprocessors to Machine Tool Controller Design.  
PART 2. Digital Control and Automation Systems.  
Thomas A. Seim.  
April 1980, Computer Design.
- II.- Control of Robot Manipulator with obstacle avoidance under  
little information about the environment.  
A. A. Petrov, I. M. Sirota.  
Institute of Control Science, Moscow, USSR.  
Reprints : Control Science and Technology for the progress  
of Society, VOL XIV.
- III.- On Building a light-seeking Robot Mechanism.  
Stephen Allen and Tony Rossetti.  
August 1978, Byte.



## 4. Listado de los Programas.

PROGRAMA PRINCIPAL

	LDA OF	021F	A9 OF
	STAPBDD	0221	8D 03 17
	STA PBD	0224	8D 02 17
	LDA 71	0227	A9 71
	STA PADD	0229	8D 01 17
	JSR CENTRO	022C	20 00 02
	CLI	022F	58
AGAIN	LDA OE	0230	A9 OE
	STA PBD	0232	8D 02 17
BACK	BIT PAD	0235	2C 00 17
	BMI BACK	0238	30 FB
	LDA PBD	023A	AD 02 17
	AND FO	023D	29 FO
	CMP 10	023F	C9 10
	BEQ RIGHT	0241	FO OD
	CMP 80	0243	C9 80
	BNE CENTER	0245	DO 12
LEFT	LDY OA	0247	AO OA
	LDA OA	0249	A9 OA
	STA LOCCI	024B	85 00
	JMP TURNI	024D	4C 5C 02
RIGHT	LDY 06	0250	AO 06
	LDA OC	0252	A9 0C
	STA LOCCI	0254	85 00
	JMP TURNI	0256	4C 5C 02
CENTER	JMP LEFT	0259	4C 47 02
TURNI	STY PBD	025C	8C 02 17
	LDA PAD	025F	AD 00 17
	AND OE	0262	29 OE
	CMP {00}	0264	C5 00
	BNE TURNI	0266	DO F4
	LDA OE	0268	A9 OE
	JSR DELAY I	026A	20 79 02
	JSR CENTRO	026D	20 00 02
	JMP AGAIN	0270	4C 30 02

SUBROUTINA CENTRO

	LDA PAD	0200	AD 00 17
	AND OE	0203	29 OE
	CMP 06	0205	C9 06
	BEQ RET	0207	FO 14
	TAX	0209	AA
	LDA TABLE I, X	020A	B5 00
	STA PBD	020C	8D 02 17
AGAIN	LDA PAD	020F	AD 00 17
	AND OE	0212	29 OE
	CMP 06	0214	C9 06
	BNE AGAIN	0216	DO F7
	LDA OF	0218	A9 OF
	STA PBD	021A	8D 02 17
	RTS	021D	60

SUBROUTINA DELAY I

	LDY FF	0279	AO FF
	STY LOCC II	027B	84 01
	STY LOCC III	027D	84 03
	LDY 02	027F	AO 02
	STY LOCC IV	0281	84 05
LOOP	STA PBD	0283	8D 02 17
	DEC LOCC II	0286	C6 01
	BNE LOOP	0288	DO F9
	DEC LOCC III	028A	C6 03
	BNE LOOP	028C	DO F5
	DEC LOCC IV	028E	C6 05
	BNE LOOP	0290	DO F1
	RTS	0292	60

INTERRUPCION IRQ

	PHA	0293	48
	TXA	0294	8A
	PHA	0295	48
	TYA	0296	98
	PHA	0297	48
	LDA PBD	0298	AD 02 17
	STA LOCC V	029B	85 06
	LDA OD	029D	A9 OD
	JSR DELAY II	029F	20 00 03
	LDA OF	02A2	A9 OF
	STA PBD	02A4	8D 02 17
	LDA LOCC V	02A7	A5 06
	AND FO	02A9	29 FO
	CMP 10	02AB	C9 10
	BEQ RIGHT	02AD	FO OD
	CMP 80	02AF	C9 80
	BNE CENTER	02B1	DO 12
LEFT	LDY OA	02B3	A0 0A
	LDA OA	02B5	A9 0A
	STA LOCC XIX	02B7	85 OD
	JMP TURN II	02B9	4C C8 02
RIGHT	LDY 06	02BC	A0 06
	LDA 0C	02BE	A9 0C
	STA LOCC XIX	02C0	85 OD
	JMP TURN II	02C2	4C C8 02
CENTER	JMP LEFT	02C5	4C B3 02
TURN II	STY PBD	02C8	8C 02 17
AGAIN	LDA PAB	02CB	AD 00 17
	AND OE	02CE	29 OE
	CMP (OD)	02D0	C5 OD
	BNE AGAIN	02D2	DO F7
	LDA OE	02D4	A9 OE
	JSR DELAY II	02D6	20 00 03
	JSR CENTRO	02D9	20 00 02
	LDA OE	02DC	A9 OE
	STA PDB	02DE	8D 02 17
	PLA	02E1	68
	TAY	02E2	A8
	PLA	02E3	68
	TAX	02E4	AA
	PLA	02E5	68
	RTI	02E6	40

SUBROUTINA DELAY II

	LDY FF	0300	AO FF
	STY LOCC VI	0302	84 07
	STY LOCC VII	0304	84 09
	LDY 04	0306	AO 04
	STY LOCC VIII	0308	84 0B
LOOP	STA PBD	030A	8D 02 17
	DEC LOCC VI	030D	C6 07
	BNE LOOP	030F	DO F9
	DEC LOCC VII	0311	C6 09
	BNE LOOP	0313	DO F5
	DEC LOCC VIII	0315	C6 0B
	BNE LOOP	0317	DO F1
	RTS	0319	60

DATOS A GUARDAR, (O SACAR), EN PAGINA CERO

0000	-	LOCC I
0001	-	LOCC II
0002	-	07
0003	-	LOCC III
0004	-	OB
0005	-	LOCC IV
0006	-	LOCC V
0007	-	LOCC VI
0008	-	OB
0009	-	LOCC VII
000A	-	07
000B	-	LOCC VIII
000C	-	OB
000D	-	LOCC XIX
000E	-	07

VECTORES

17FA	-	00	17FE	-	93
17FB	-	1C	17FF	-	02
		(NMI)			(IRQ)

APENDICE A.

Teoría básica sobre circuitos P.L.L. (Phase - locked - loop).

Un circuito P.L.L. es básicamente un sistema electrónico de lazo cerrado, que consiste de :

1. Un detector de fase.
2. Un filtro paso bajas.
3. Una etapa amplificadora.
4. Un oscilador controlado por voltaje (O.C.V.)

La figura A1. ilustra la posición de cada uno de éstos elementos dentro de la malla de realimentación.

El oscilador controlado por voltaje es un oscilador cuya frecuencia es proporcional a un voltaje externo. La frecuencia ( $f_0$ ) de salida del oscilador es realimentada al detector de fase donde se compara con la frecuencia de la señal de entrada ( $f_i$ ). El detector de fase produce una señal de voltaje de D.C. o de baja frecuencia ( $V_i$ ) que es proporcional a la diferencia de fase entre la señal de entrada y la señal del O.C.V. El voltaje de error ( $V_i$ ) es entonces filtrado y amplificado, y es aplicado a la entrada del oscilador. El voltaje de error fuerza a que la frecuencia ( $f_0$ ) del oscilador cambie en tal forma que se reduzca la diferencia de frecuencia entre la señal de entrada y el O.C.V.

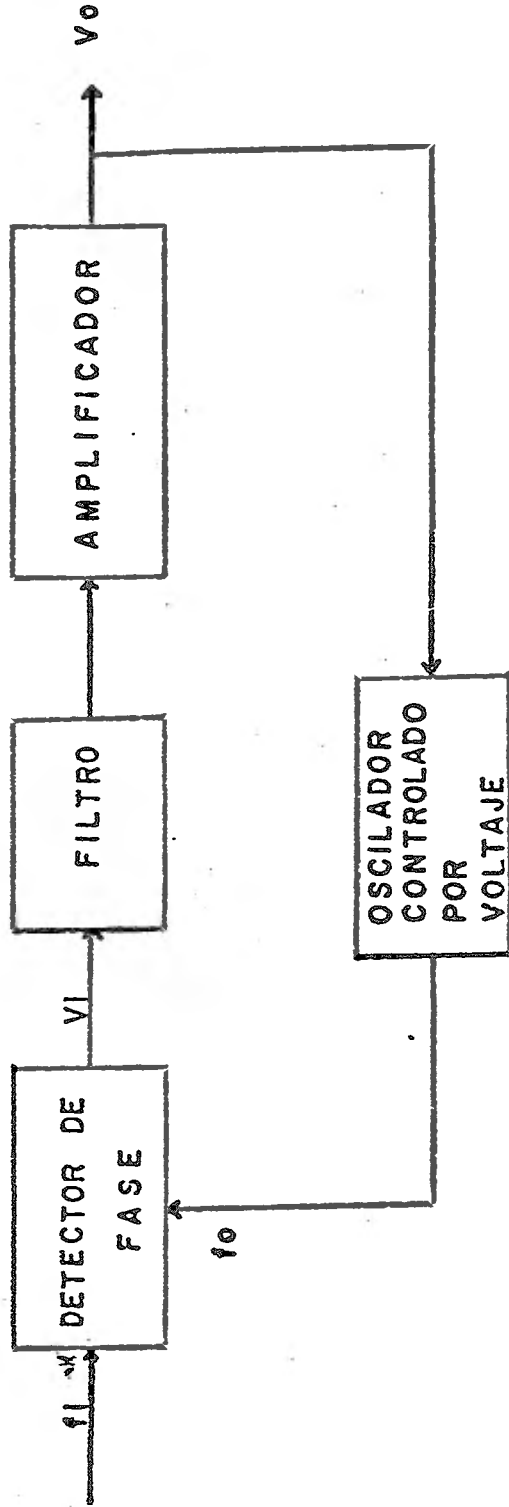


Figura A1 Diagrama de bloques de un P.L.L.

Una vez que el O.C.V. comienza a cambiar de frecuencia, se dice que el P.L.L. se encuentra en la etapa de captura.

Este proceso continúa hasta que la frecuencia del O.C.V. y la señal de entrada son exactamente iguales. En éste momento se dice que el sistema está en "fase encadenada". Durante ésta etapa, la frecuencia de la señal de entrada y del O.C.V. son iguales pero existe una pequeña diferencia en la fase de las mismas, la cual se requiere para generar el error de voltaje necesario que controla al O.C.V. manteniendo con ello al sistema en fase encadenada.

Podemos decir entonces, que los circuitos P.L.L. tienen 3 estados distintos:

1. Oscilación libre.
2. Captura.
3. Fase encadenada.

Al rango en el cual, el sistema sigue cualquier cambio en la frecuencia de la señal de entrada, se le llama "rango de encadenamiento" (LOCK - RANGE).

Por otra parte, el rango de frecuencias de la señal de entrada para el cual el sistema entra en fase encadenada partiendo de un estado no encadenado, se le llama "rango de captura".

El rango de captura es siempre menor que el rango de enca-  
denamiento.

La figura A2 ilustra los dos rangos.

Las características dinámicas del circuito P.L.L. quedan  
determinadas principalmente por el filtro paso bajas y la ga -  
nancia del lazo.

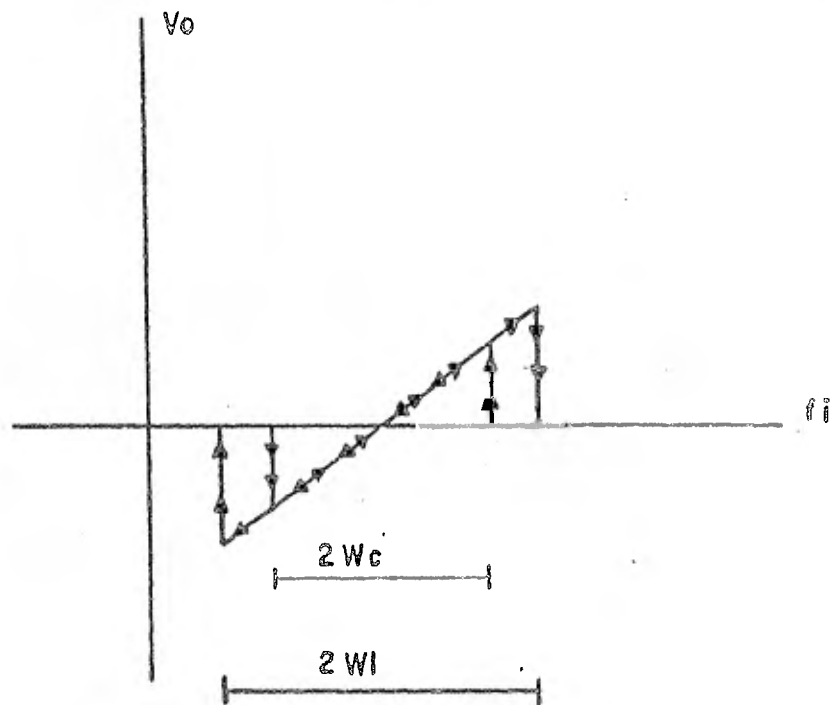
El objetivo del filtro es eliminar los componentes de al-  
ta frecuencia que se presentan cuando la diferencia de fase en-  
tre la señal de entrada y el O.C.V. es muy grande o cuando -  
existen transitorios ocasionados por ruido. Cuando se reduce  
el ancho de banda del filtro, se incrementa el rechazo a seña-  
les fuera de banda pero, al mismo tiempo, el rango de captura  
se hace menor y, por tanto, el sistema tarda más en entrar en  
fase encadenada.

Bajo condiciones de fase encadenada, el detector de fase  
presenta una característica lineal; por tanto, el PLL se puede  
modelar como se muestra en la figura A3.

La relación matemática que existe entre la señal de volta-  
je de salida  $V_o$  y la fase de la señal de entrada  $\theta_i$ , está da-  
da por :

$$\frac{V_o}{\theta_i} = \frac{A F(S) K_D}{1 + \frac{A F(S) K_D K_o}{S}} = \frac{S A F(S) K_D}{S + A F(S) K_D K_o}$$





$2W_l = \text{RANGO DE ENCADENAMIENTO}$

$2W_c = \text{RANGO DE CAPTURA}$

Figura A.2 Rangos de encadenamiento y captura de un P.L.L.

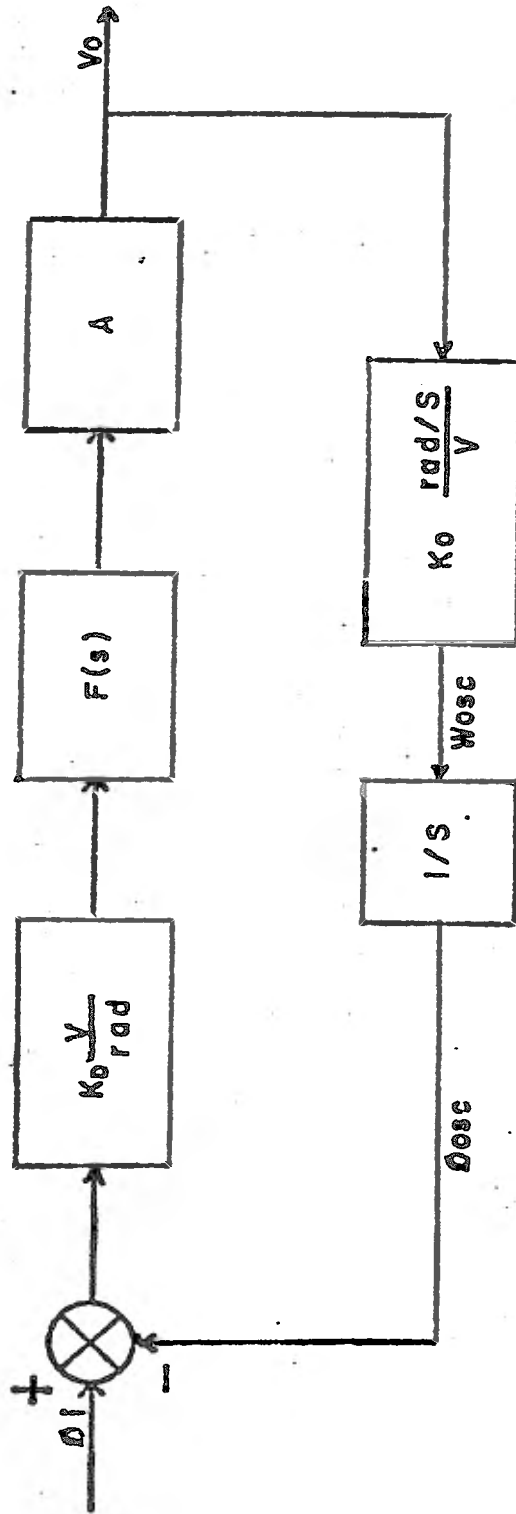


Figura A.3 Diagrama de bloques de un P.L.L.

Si se quiere obtener la respuesta del sistema a la frecuencia de la señal de entrada en lugar de a su fase, entonces tenemos :

$$\omega_i (t) = \frac{d \theta_i}{dt}$$

$$\omega_i (S) = S \theta_i (S).$$

Por tanto :

$$\frac{V_o (S)}{\omega_i (S)} = \frac{A F (S) K_D}{S + A F(S) K_D K_o} \dots \dots (1)$$

Como puede verse de la ecuación (1), el orden del sistema depende directamente del filtro; por ejemplo, si  $F(S) = 1$  :

$$\frac{V_o (S)}{\omega_i (S)} = \frac{A K_D}{S + A K_D K_o}$$

Que es un sistema de primer orden con ecuación característica :

$$S + A K_D K_o = 0$$

Calculando la respuesta de éste sistema a un escalón unitario

$$V_o (S) = \frac{A K_D}{S + A K_D K_o} \frac{1}{S}$$

$$V_0 (S) = \frac{1}{K_0} \left( \frac{1}{S} - \frac{T}{TS + 1} \right) ; \text{ donde } T = \frac{1}{\Lambda K_D K_0}$$

$$V_0 (t) = \frac{1}{K_0} (1 - e^{-t/T})$$

El valor de T es la constante de tiempo del sistema.

La figura A4 muestra los diagramas de Bode, de tiempo y el lugar geométrico de las raíces para la función de transferencia del circuito P.L.L. de primer orden.

Si se utiliza un filtro como el mostrado en la figura A5 - tenemos :

$$\frac{V_2 (S)}{V_1 (S)} = \frac{1 + SC R_2}{1 + SC (R_1 + R_2)} = \frac{S + \frac{1}{CR_2}}{S + \frac{1}{C(R_1 + R_2)}} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad .. (2)$$

El valor  $\frac{1}{C(R_1 + R_2)}$  =  $\omega_{\text{FILTRO}}$ , es la frecuencia de corte del filtro.

Sustituyendo (2) en (1) :

$$\frac{V_0 (S)}{\omega_i (S)} = \frac{\Lambda K_D F(S)}{S + \Lambda K_D K_0 F(S)} , \text{ si } \Lambda K_D K_0 = K_1 = \frac{1}{T}$$

$$\frac{V_0 (S)}{\omega_i (S)} = \frac{K_1 K_2}{K_0} \frac{S + \frac{1}{C_1 R_2}}{S^2 + S \left( \frac{1}{C(R_1 + R_2)} + K_2 K_2 \right) + \frac{K_1 K_2}{C_1 R_2}}$$

donde 
$$K_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

La ecuación característica del sistema es :

$$S^2 + S \left( \frac{1}{C (R_1 + R_2)} + K_1 K_2 \right) + \frac{K_1 K_2}{C_1 R_2} = 0$$

de donde, la frecuencia natural del sistema es :

$$\omega_n = \left( \frac{K_1 K_2}{C_1 R_2} \right)^{1/2} = \left( \frac{A K_D K_0}{C_1 (R_1 + R_2)} \right)^{1/2} = (A K_D K_0 \omega_{\text{FILTRO}})^{1/2}$$

y el factor de amortiguamiento :

$$\zeta = \frac{\omega_n}{2} \left( \frac{1}{A K_D K_0} + R_2 C \right)$$

Como puede verse, nuevamente el filtro determina las características de respuesta dinámica de todo el sistema.

Prácticamente, el operar sin filtro paso bajas ( $F(S) = 1$ ), presenta varias desventajas ya que el detector de fase es un multiplicador analógico y, por tanto, en su salida se tienen componentes armónicas del tipo  $B(f_i - f_0)$  y  $B(f_i + f_0)$ , éstas últimas al no ser filtradas, se amplifican y provocan que la frecuencia de salida del O.C.V. no siga a la frecuencia de entrada al P.L.L.; además el ruido tampoco es filtrado y, por tanto, es fácil que el sistema se salga del estado de encadenamiento. Es por esto que, normalmente, se utilizan filtros de

segundo orden.

Rango de encadenamiento.- El rango de encadenamiento depende directamente, del rango de funcionamiento del comparador de fase. Como antes se mencionó, cuando el sistema se encuentra en fase encadenada, el comparador de fase presenta una característica lineal, si la diferencia entre la señal de entrada y el O.C.V. excede el rango de funcionamiento lineal, el P.L.L., sale de la fase encadenada.

La figura A5 muestra la función de transferencia de un comparador de fase. De ésta figura podemos ver que para trabajar en la región lineal  $\theta_i - \theta_0$  debe estar entre 0 y  $\pi$ . Para  $\theta_i - \theta_0 = 0$  ó  $\theta_i - \theta_0 = \pi$ ,  $V_i$  tiene su valor máximo :

$$V_{i_{\max}} = \pm K_D \left( \frac{\pi}{2} \right)$$

para éste valor de  $V_i$ , tenemos :

$$|\omega_{\text{osc}}| = |K_0 F(S) \wedge K_D \left( \frac{\pi}{2} \right)| = K \frac{\pi}{2}$$

donde :

$$K = K_0 F(S) \wedge K_D$$

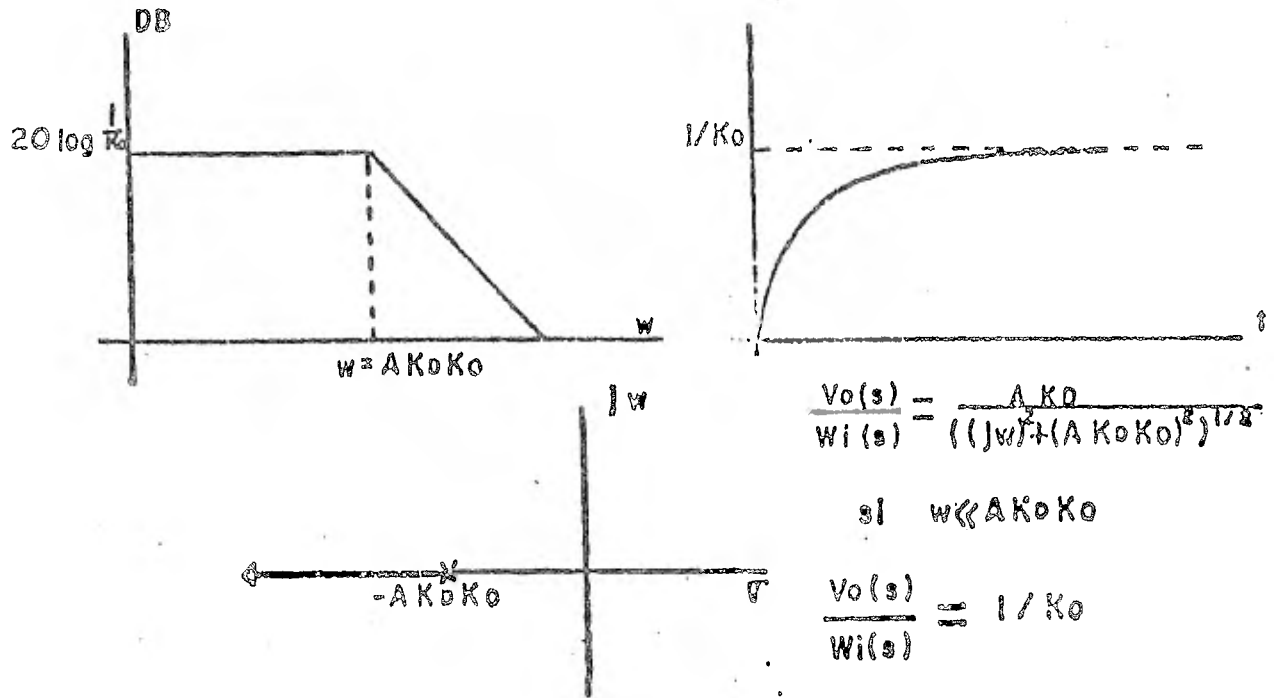


Figura A.4 Diagramas de Bode, de tiempo y lugar geométrico de las raíces de un circuito P.L.L. de primer orden.

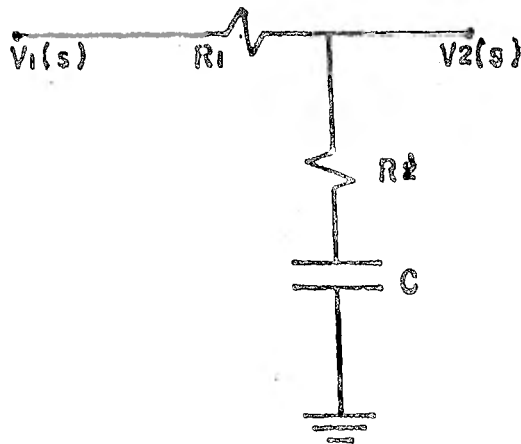


Figura A.5 Filtro de un circuito P.L.L. de segundo orden.

Para un valor de  $\theta_i - \theta_0$  menor a cero o mayor a  $\pi$ ,  $V_i$  disminuye y, por tanto, el P.L.L. se sale de la fase encadenada y el oscilador regresa a su frecuencia libre de oscilación, por esto, el rango de encadenamiento es (figura A6) :

$$\text{Rango encadenamiento} = 2k \pi/2$$

Rango de captura.- Un rango de captura aproximado se puede estimar usando el siguiente procedimiento: En la figura A1 - asúmase que el lazo se abre en la salida del amplificador y que se aplica una señal diferente de la frecuencia libre del O.C.V. a la entrada del P.L.L. La salida en el detector de fase toma el valor

$$V_p(t) = \frac{\pi}{2} K_D \cos(\omega_i - \omega_{osc})$$

donde  $\omega_i$  es la frecuencia de la señal de entrada y  $\omega_{osc}$  es la del O.C.V. Después de pasar por el filtro, la salida en el amplificador es

$$V(t) = \frac{\pi}{2} K_D \Lambda |F[j(\omega_i - \omega_{osc})]| \cos[(\omega_i - \omega_{osc})t + \theta] \dots \dots \dots (3)$$

donde

$$\theta = \angle F[j(\omega_i - \omega_{osc})]$$



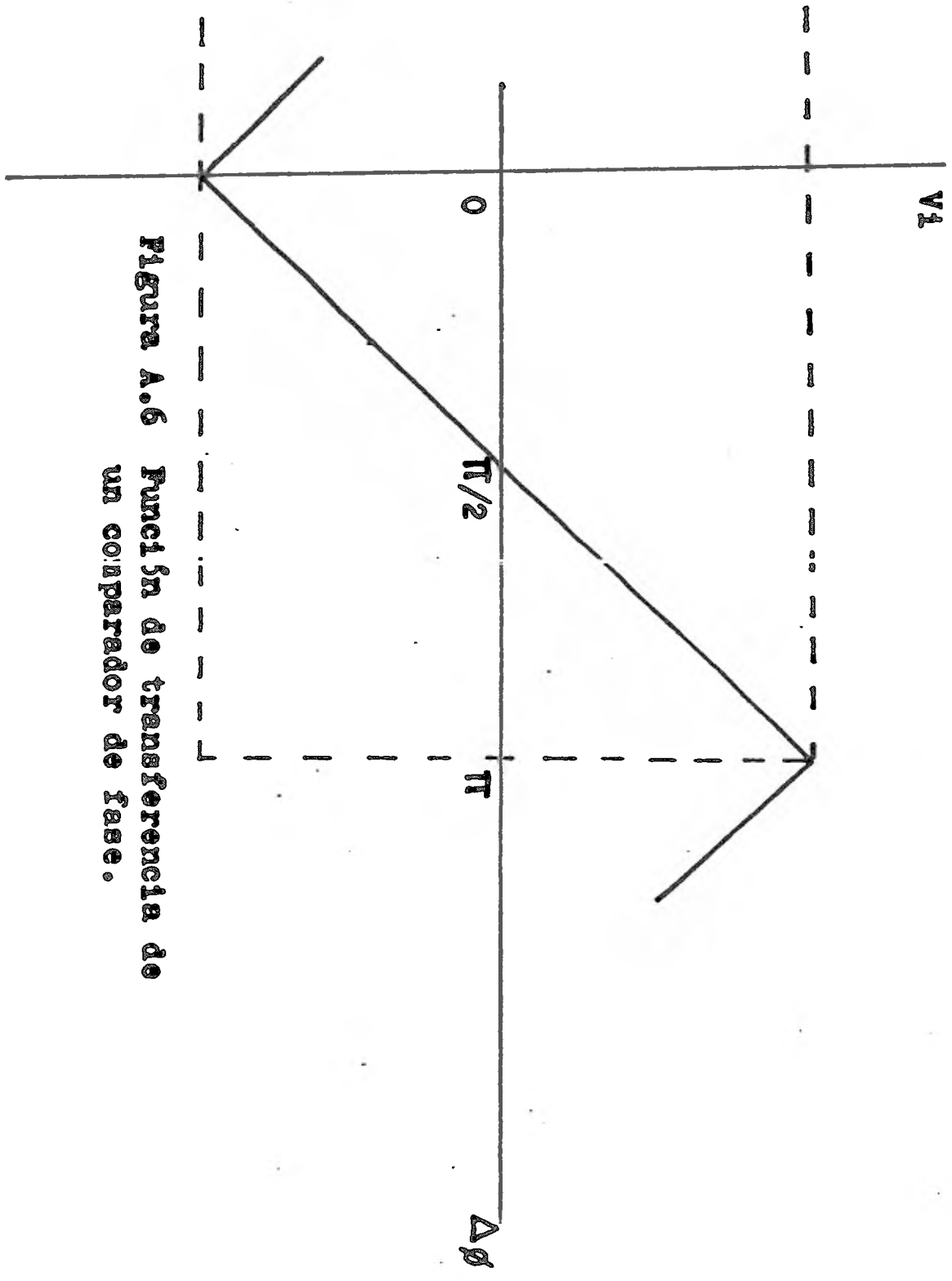


Figura A.6 Función de transferencia de un comparador de fase.

Entonces, la salida del amplificador consiste en una senoide cuya amplitud es reducida por el filtro. Para que la captura ocurra, la magnitud del voltaje que debe aplicarse a la entrada del O.C.V. es

$$|V_{OSC}| = \frac{\omega_i - \omega_{OSC}}{K_0} \dots \dots \dots (4)$$

El rango de captura se puede estimar haciendo iguales las magnitudes de (3) y (4). El resultado es que la captura puede ocurrir si se satisface la siguiente desigualdad :

$$|\omega_i - \omega_{OSC}| < \frac{\pi}{2} K K_0 A |F [j(\omega_i - \omega_{OSC})]|$$

Esta ecuación dá una estimación de rango de captura implícitamente. Para el lazo de primer orden, donde  $F(S)$  es unitario, indica que el rango de encadenamiento y el de captura son aproximadamente iguales; para el lazo de segundo orden, el rango de captura es significativamente menor que el de encadenamiento.

APENDICE B.

Cristales piezoeléctricos.

El efecto piezoeléctrico.- El efecto piezoeléctrico fué descubierto en 1880 por los hermanos Curie. Este efecto consiste en el hecho de que en ciertos cristales aparece una carga eléctrica cuando se les aplica una tensión o una presión mecánica.

Existe una proporción directa entre la presión mecánica y la carga resultante. El signo de la carga cambia cuando la presión pasa a ser tensión y viceversa. La relación entre la fuerza aplicada y la carga inducida está dada por :

$$Q = d \cdot f$$

donde : Q es la carga producida en Cb.

f es la fuerza aplicada en Nw.

d es la constante piezoeléctrica en Cb/Nw.

El voltaje de salida del cristal está dado por :

$$E = gtp$$

donde : t es el espesor del cristal en metros

p es la presión aplicada en Nw/m<sup>2</sup>.

g es la sensibilidad de voltaje en Vm/Nw.

El valor de  $g$  está dado por la relación :

$$g = d/e$$

donde  $e$  es la permitividad del cristal.

La tabla B1 muestra las constantes piezoeléctricas y sensibilidad de voltaje para varios materiales.

CONSTANTES PIEZOELECTRICAS \*

Material	Orientación	Sensibilidad de carga $d$ , coulombs/m <sup>2</sup> newtons/m <sup>2</sup>	Sensibilidad de voltaje $g$ , volts/m newtons/m <sup>2</sup>
Cuarzo	Corte X; largo sobre Y, largo longitudinal	$2.25 \times 10^{-7}$	0.055
	Corte X; espesor longitudinal	-2.04	-0.050
	Corte Y; esfuerzo cortante al espesor	4.4	-0.108
Sal de Rochelle	Corte X, 45°; largo longitudinal	435.0	0.098
	Corte Y, 45°; largo longitudinal	-78.4	-0.29
Fosfato dihidro genado de amon- nio.	Corte Z, 0°; esfuerzo cortante frontal	48.0	0.354
	Corte Z, 45°; largo longitudinal	24.0	0.177
Cerámicas comercia les de titanio de bario	A polarización	130-160	0.0106
	A polarización	-56.0	0.0042-0.0053

\* De acuerdo a Lion

TABLA B1

Esencialmente la carga es independiente de la temperatura. La actividad piezoeléctrica es prácticamente constante entre 20 y 300 grados centígrados, pero por encima de 300 grados disminuye considerablemente. El rendimiento máximo se obtiene alrededor de 200 grados centígrados. A los 573 el efecto desaparece.

El efecto está presente en muchos tipos de cristal, pero se presenta con mayor eficiencia en el cuarzo en en la sal de Rochelle.

El cuarzo es un material extremadamente estable, química y físicamente, y muy duro. Habitualmente se le encuentra en forma de prisma de seis caras con una pirámide pegada en cada base. A la línea que une los vértices de las pirámides se le llama el eje óptico o eje Z (ver figura B1). A las líneas que pasan a través de las aristas opuestas del cristal se les llama ejes X o ejes eléctricos. Los ejes Y son perpendiculares a las caras del cristal. Ambos ejes son perpendiculares al eje Z.

El cristal se puede cortar en placas o láminas según cualquiera de estos ejes y en cada caso tienen ciertas características definidas.

El cristal de cuarzo con corte X es el más utilizado ya que genera ondas longitudinales (L). Cuando el cristal es cortado en esta dirección, una presión sobre el eje X provoca una

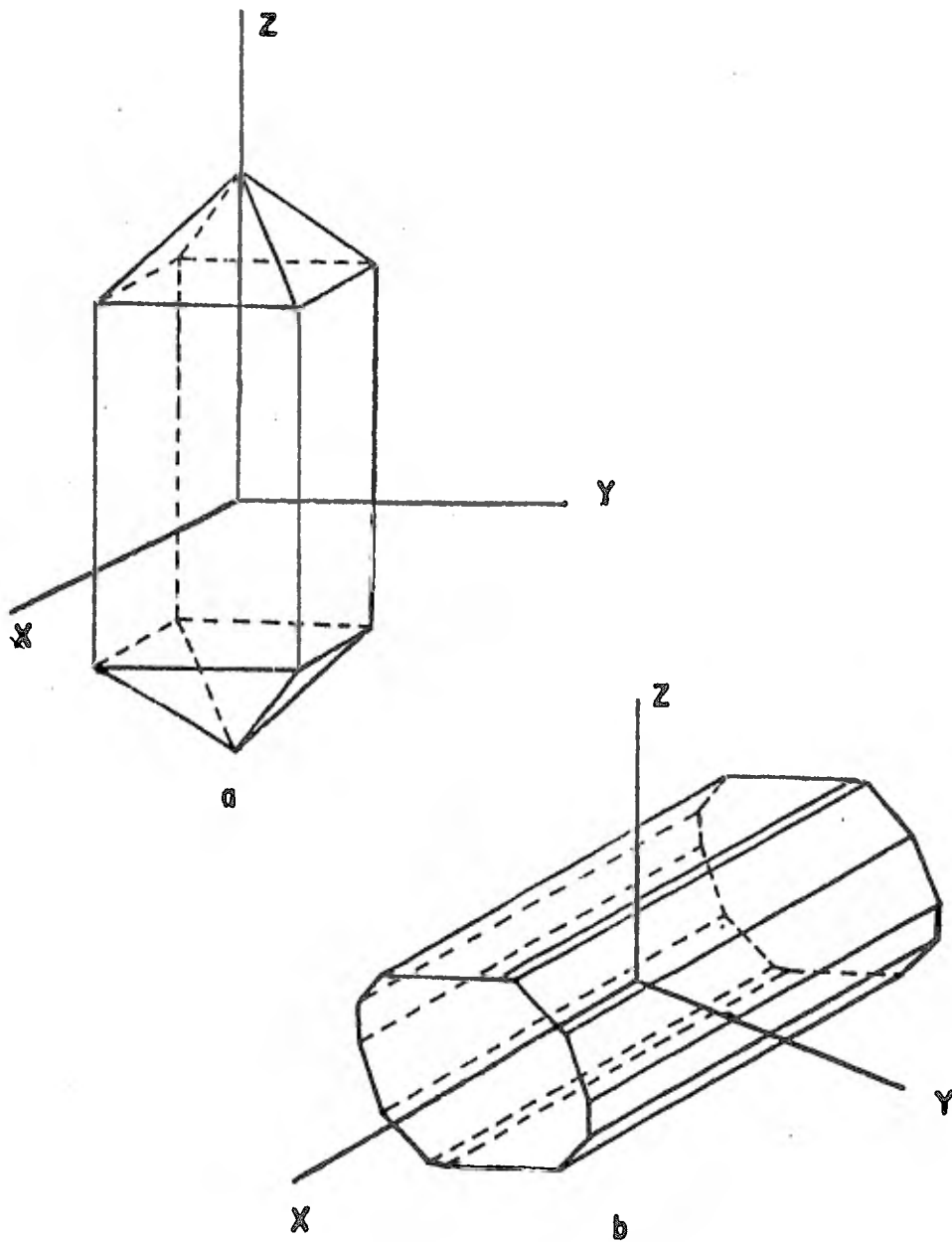


Figura B.1 Ejes cristalográficos :a) Fosfato amónico bihidrogenado;  
b) sal de Rochelle.

carga sobre las superficies del cristal perpendiculares al eje. A esto se le conoce como efecto "directo longitudinal".

Efecto piezoeléctrico inverso.- En 1881 Lippmann predijo el efecto inverso que consiste en que colocando cargas eléctricas sobre el cristal, se producen vibraciones mecánicas.

En un transductor ultrasónico de cristal, se utilizan los dos efectos. Si se aplica una carga alterna de alta frecuencia al cristal, éste sigue la oscilación. Las placas del cristal se mueven cada una respecto a la otra y si una de ellas ejerce presión sobre la superficie de un medio, se producirán ondas ultrasónicas que se propagarán a través del medio.

Teóricamente, no es necesario que un cristal vibre a su frecuencia de resonancia, sin embargo, en la mayoría de las aplicaciones se utilizan oscilando en resonancia, ya que la amplitud de la oscilación es entonces máxima.

En la figura B2 se muestra el circuito equivalente de un cristal. Por sí mismo, el cristal se comporta como un circuito RCL en serie, pero debido al soporte que sostiene al cristal se introduce una capacitancia adicional que se representa por  $C_1$ , que está en paralelo con el circuito del cristal, de éste modo, el cristal se comporta como un circuito resonante serie a su frecuencia natural de resonancia, pero a una frecuencia ligeramente mayor el cristal resuena con la capaci-

tancia C y se tiene la resonancia en paralelo.

Los valores de éstas resonancias se obtienen de :

$$\omega_s = 2 \pi f_s = \frac{1}{(LC)^{1/2}} \left( 1 + \frac{R^2 C_1}{2L} \right)$$

$$\omega_p = 2 \pi f_p = \frac{1}{(LC)^{1/2}} \left( 1 + \frac{C}{2C_1} - \frac{R^2 (C_1 + C)}{2L} \right)$$

Para el cuarzo el valor de  $C_1/C$  es mayor a 100. A medida que la relación  $C_1/C$  se hace mayor las frecuencias de resonancia se aproximan.

La figura B3 ilustra la curva de reactancia contra frecuencia.



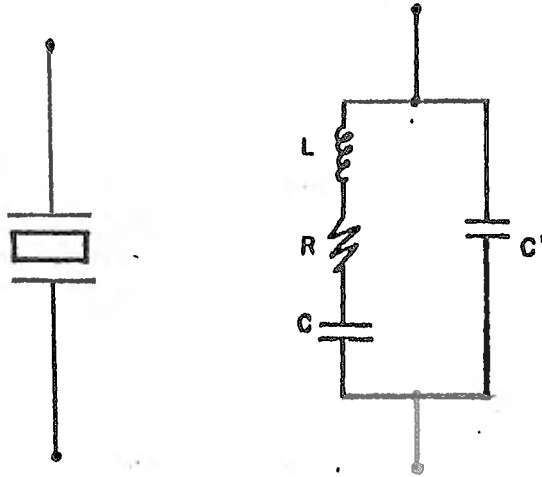


Figura B.2 Circuito equivalente de un cristal piezoeléctrico.

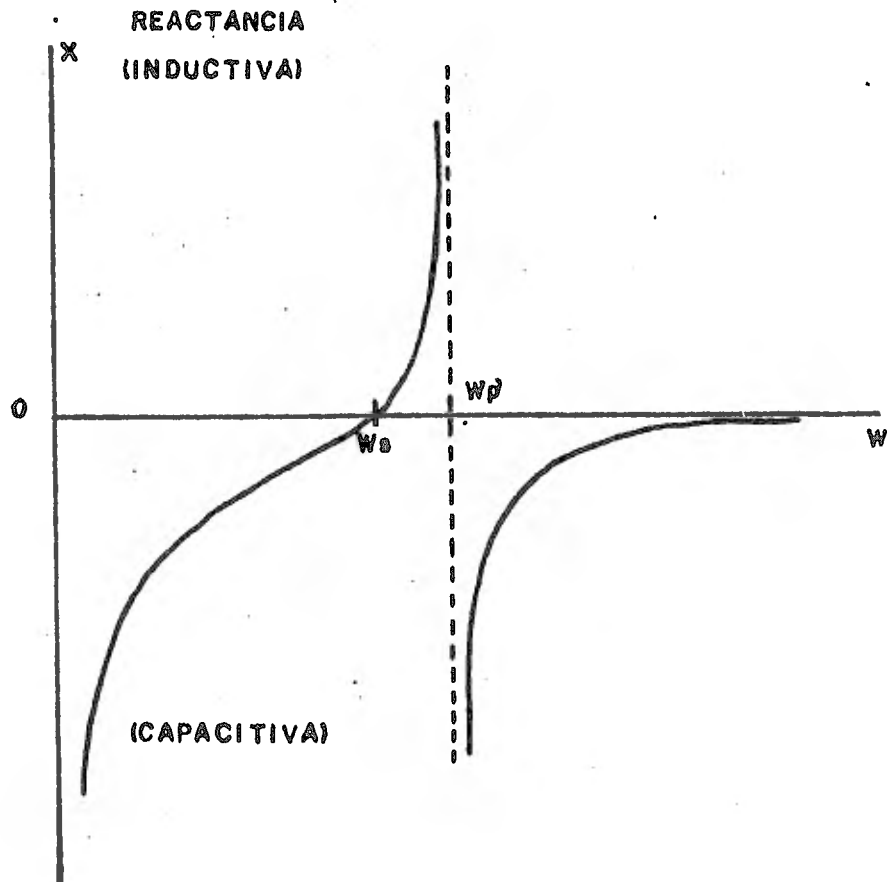


Figura B.3 Curva de reactancia contra frecuencia para un cristal piezoeléctrico.

APENDICE C.

Microcomputador KIM-1.

En la figura C1 se muestra un diagrama del microcomputador KIM-1 que se utiliza en el robot.

El sistema KIM-1 utiliza un microprocesador MCS 6502 como elemento central de control del sistema. La arquitectura del microprocesador es orientada a memoria, es decir, cada uno de los elementos dentro del sistema tiene una dirección específica y no se hace distinción alguna entre la memoria y los circuitos de entrada - salida sino que son considerados como parte de una memoria externa. El sistema cuenta con tres buses a través de los cuales el microprocesador se comunica con otros elementos como son los puertos de E/S, las memorias (RAM y ROM) y los periféricos, vg.: teclado, display, grabadora, impresora, etc. Estos buses son :

- a) un bus de dirección de 16 bits que permite el direccionamiento de 65,536 localidades diferentes;
- b) un bus de datos bidireccional de 8 bits que transporta datos entre cualquiera de las 65,536 localidades y el microprocesador;
- c) un bus de control que comunica señales de control y de sincronización entre los elementos del microcomputador.

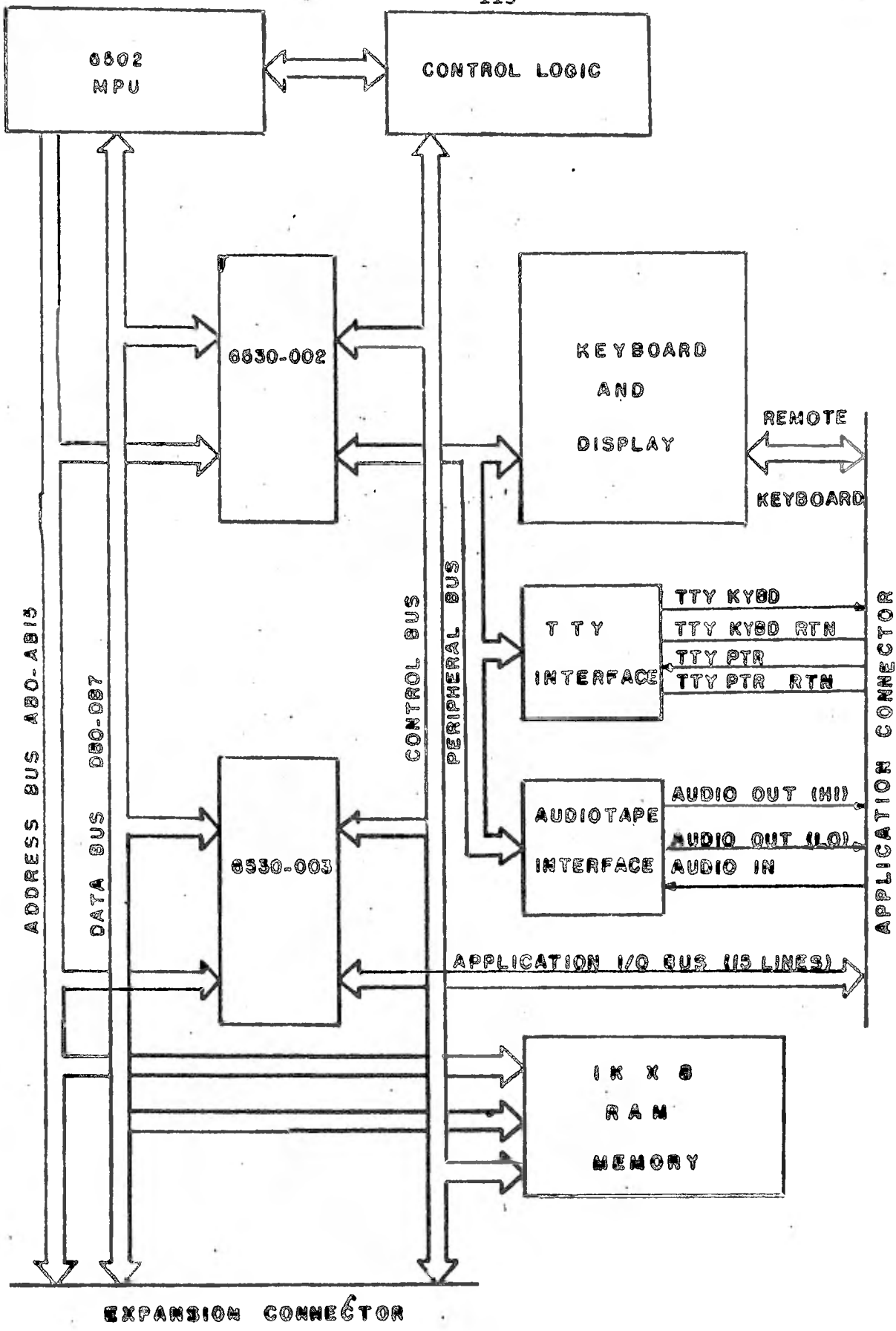


Figura C.1 Diagrama de bloques del microcomputador KIM-1

Para generar la base de tiempo se utiliza un cristal de 1 MHz que opera con un oscilador que está contenido dentro del mismo "chip" 6502. A partir de éste oscilador se obtienen 2 señales de tiempo  $\phi_1$  y  $\phi_2$ , defasadas entre sí como se muestra en la figura C2.

Además del microprocesador, el sistema utiliza dos circuitos integrados 6530 conteniendo cada uno de ellos 1K ROM, 64 Bytes de RAM, 15 puertos de E/S y un contador que se decrementa con los pulsos de reloj a partir de un determinado número - que es fijado a través de programa.

De estos elementos, el usuario puede utilizar 15 puertos E/S y un contador de pulsos de reloj.

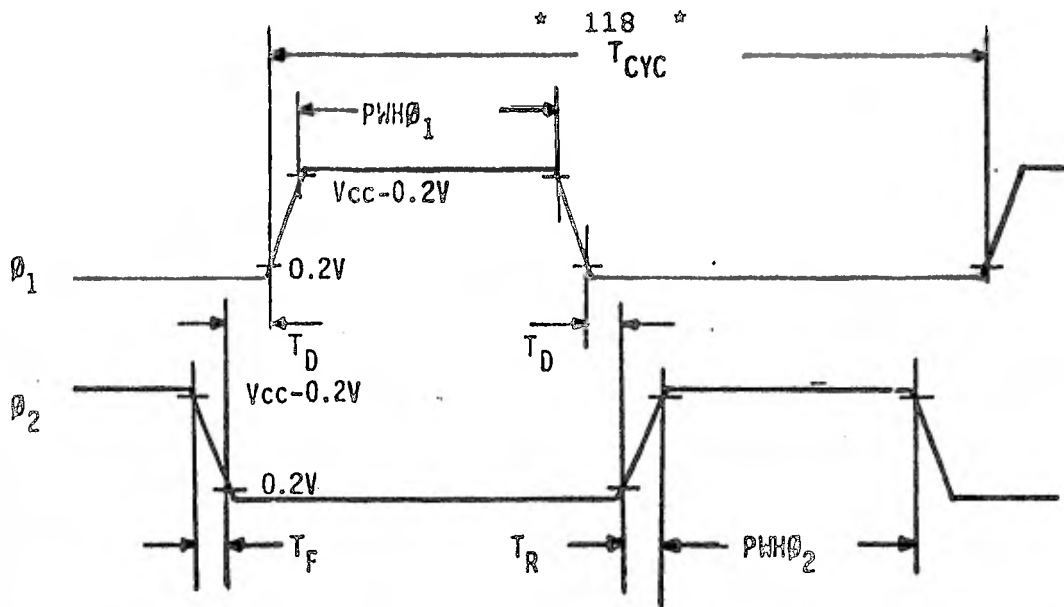
La figura C3 muestra la arquitectura del microprocesador 6502 y la figura C4 la del circuito 6530.

Para que el usuario pueda generar programas, se tiene adicionalmente 1K RAM ya instalado dentro del microcomputador.

La figura C5 muestra un diagrama que detalla todos los bloques que se utilizan en el sistema KIM-1. La figura C6 es un mapa que muestra todas las localidades que pueden ser direccionadas dentro del sistema.

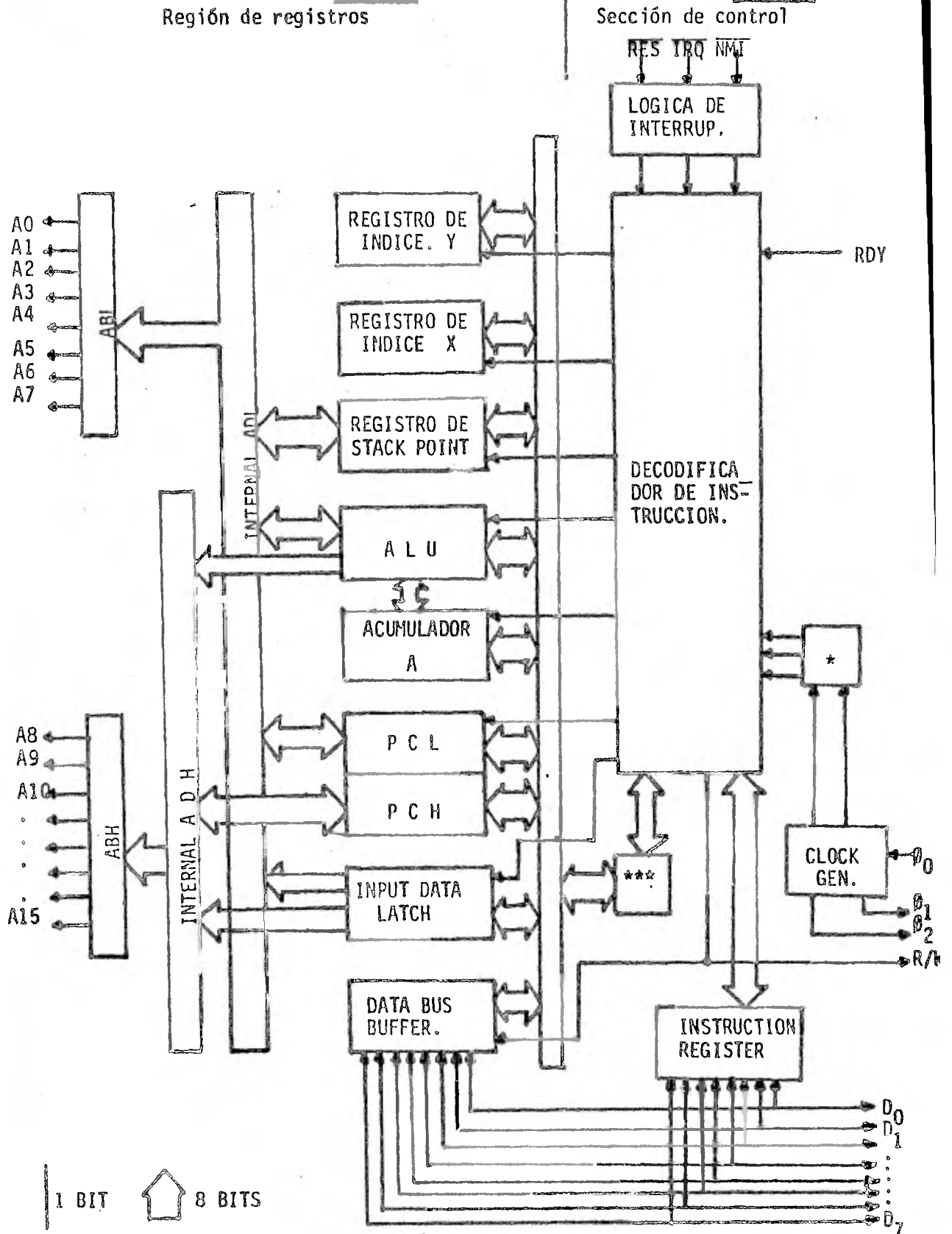
Las áreas de memoria que el usuario puede ocupar son las siguientes :

1. Toda página 0 excepto las localidades comprendidas entre la dirección 00EF y la 00FF.
2. Toda la página 1 (el stack puede llegar a utilizar 8 bytes de este espacio).
3. Toda la página 2 y 3.
4. En la página 23 :
  - Todas las localidades correspondientes a los puertos E/S desde 1780 a 173F.
  - 64 bytes de RAM desde 1780 hasta 17BF.
  - 44 bytes de RAM desde 17C0 hasta 17EB.



CARACTERÍSTICA	STANDARD	MIN	MAX	TÍPICO	UNIDAD
PERIODO	$T_{CYC}$	1.0	---	-----	microseg
ANCHO DEL PULSO $\phi_1$ $\phi_2$	$PWH\phi_1$ $PWH\phi_2$	430 430	---	-----	nanoseg
Tiempo de subida Tiempo de caída	$T_R$ $T_F$	-----	25	-----	nanoseg
Retraso entre señales de reloj.	$T_D$	0	---	-----	nanoseg

Figura C.2 Relación entre las señales de reloj  $\phi_1$  y  $\phi_2$



\* Timing control    \*\*\* PROCESSOR STATUS REGISTER.

Figura C.3 Arquitectura del microprocesador 6502.

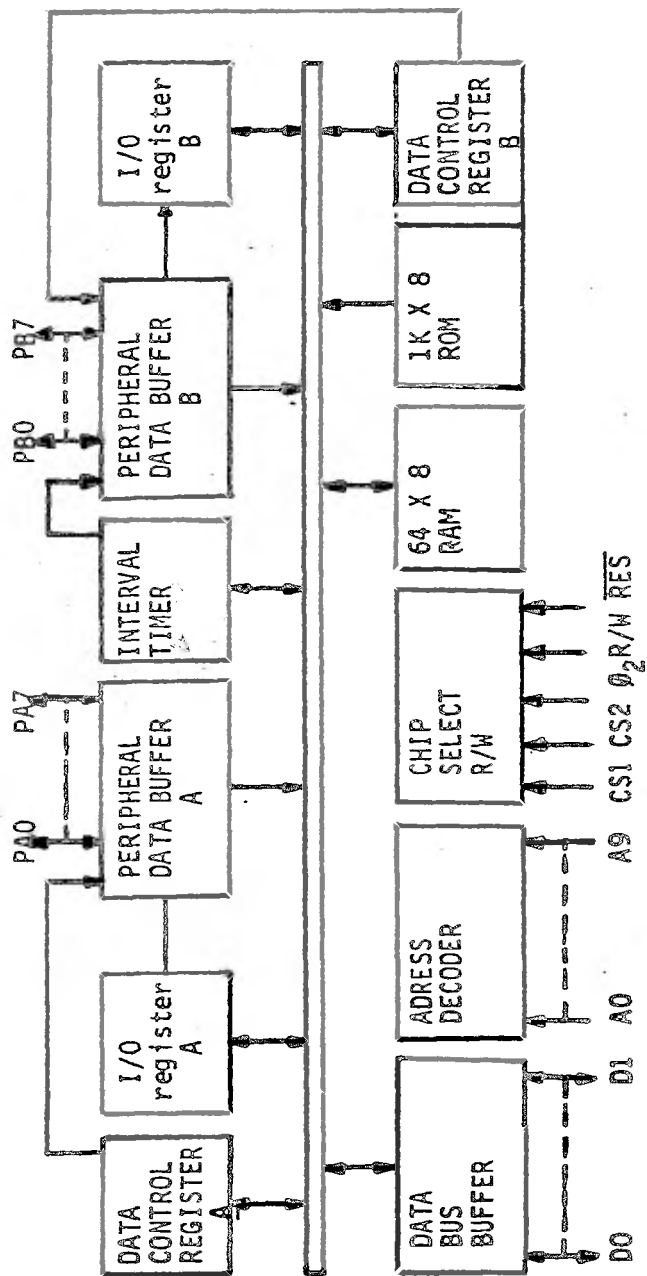


Figura C.4 Arquitectura del circuito integrado 6530.



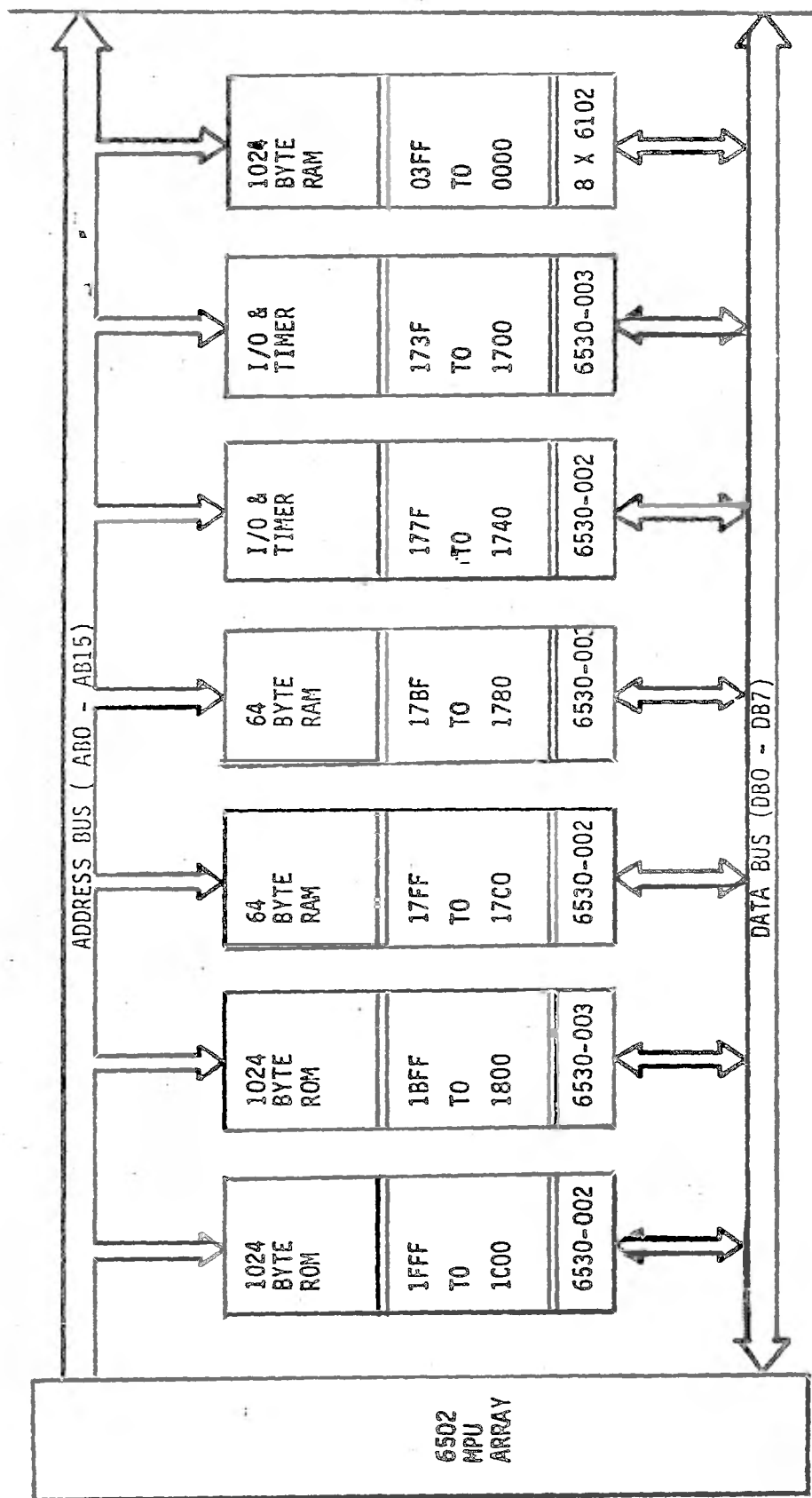


Figura C.5 Diagrama de bloques de la memoria utilizada en el sistema KIM - 1.

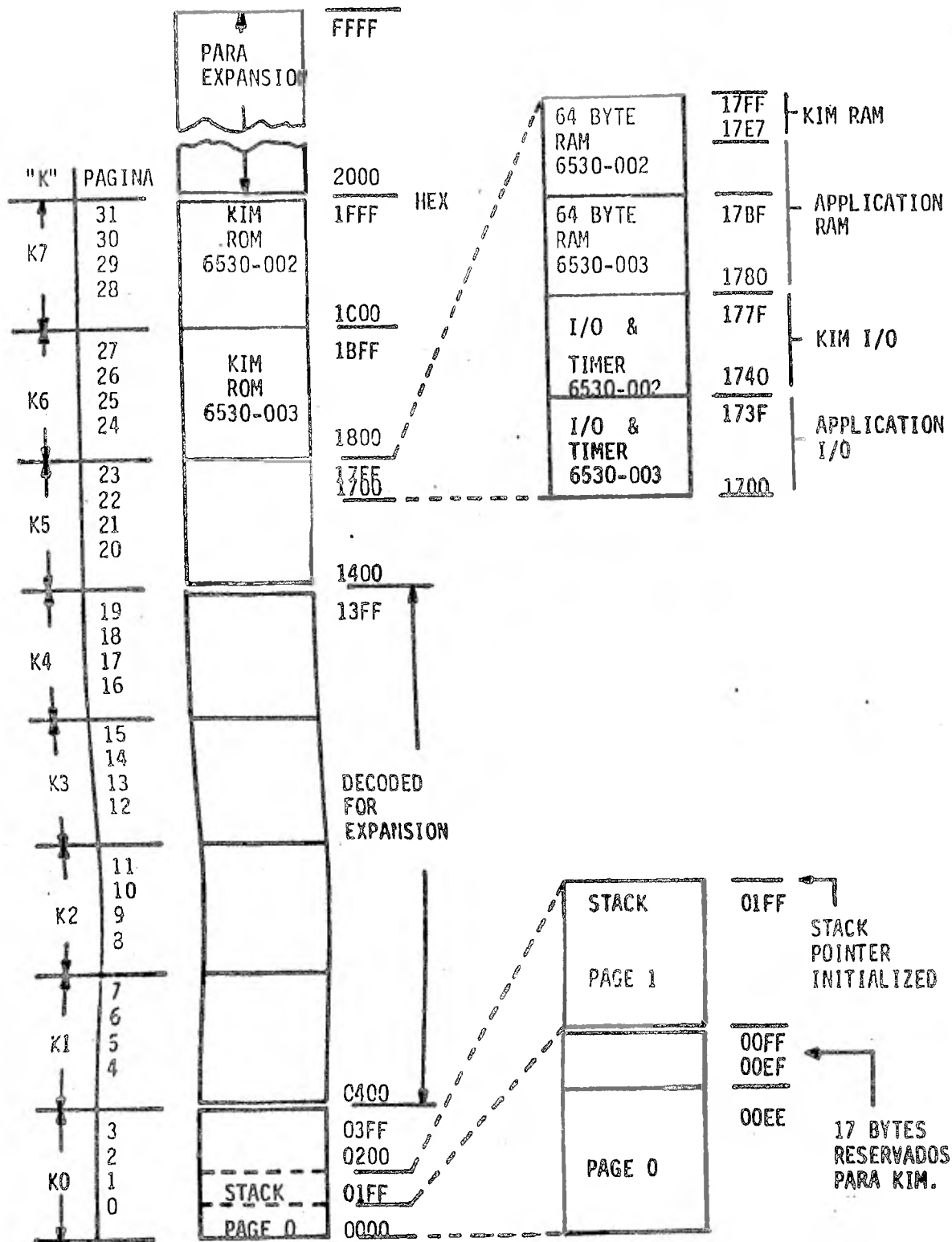
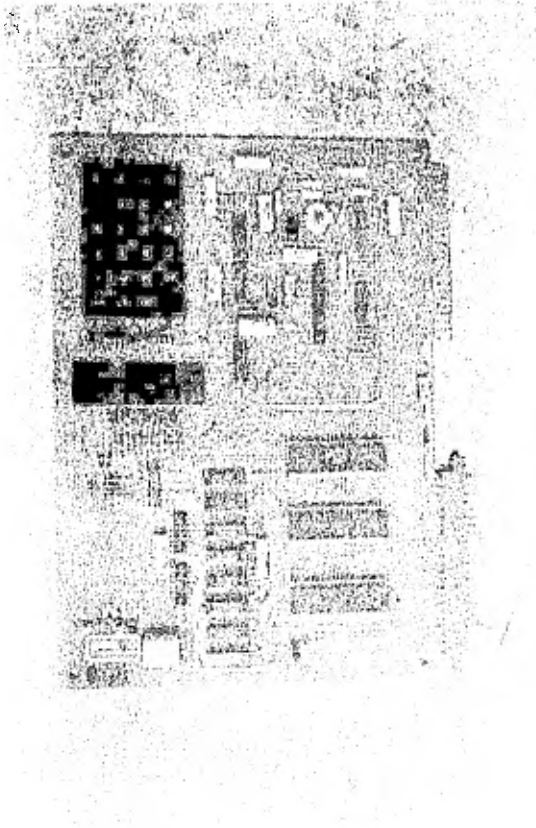
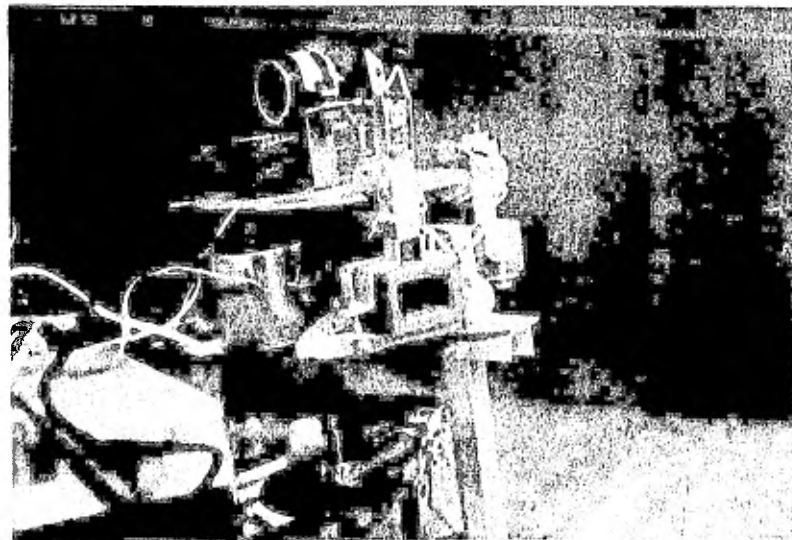


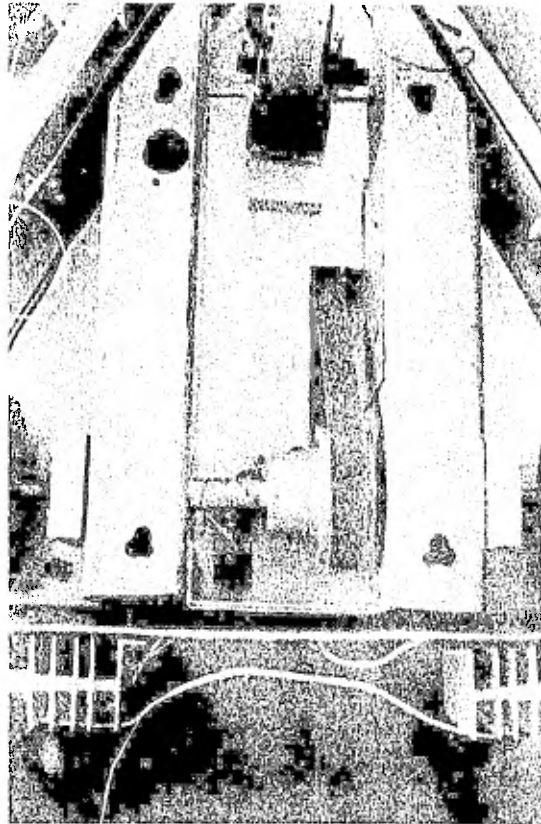
Figura C.6 Mapa de todas las localidades de memoria que pueden ser seleccionadas.



Sistema KIM-1 con uP 6502



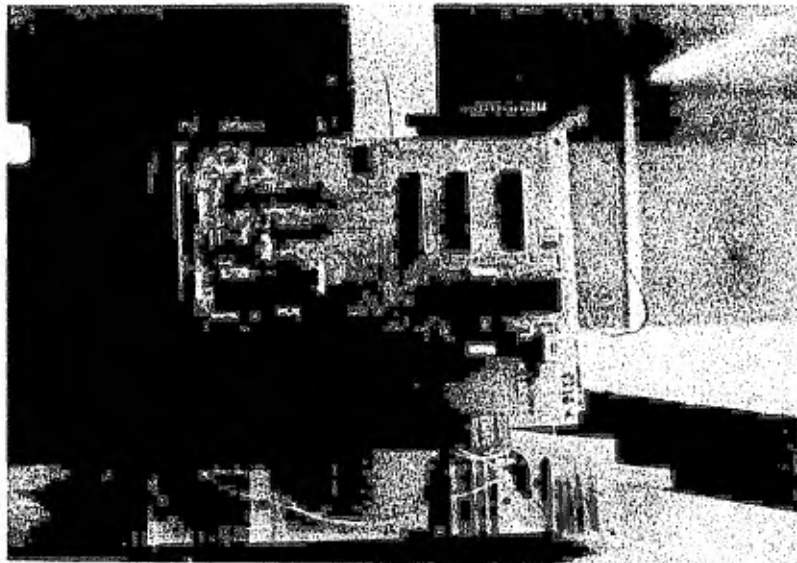
Emisor y receptores ultrasónicos



Vista inferior del robot



Sistema de dirección y disco codificado



El uP montado en el robot

B I B L I O G R A F I A

1. "MCS6500 MICROCOMPUTER FAMILY HARDWARE MANUAL", 2a. Ed.,  
MOS TECHNOLOGY INC., Pa., USA, Enero de 1976.
2. "KIM-1 MICROCOMPUTER MODULE USER MANUAL", 2a. Ed.,  
MOS TECHNOLOGY INC., Pa., USA, Agosto de 1976.
3. Leo J. Scanlon: "6502 SOFTWARE DESIGN", 4a. edición,  
Howard W. Sams & Co., USA, 1981.
4. Tod Loofbourrow: "HOW TO BUILD A COMPUTER-CONTROLLED  
ROBOT", Hayden Book Company, Inc., New Jersey, USA, 1978.
5. J. P. Holman: "METODOS EXPERIMENTALES PARA INGENIEROS", 2a.  
Ed., Mc. Graw-Hill, México, 1978.
6. "ELECTRONICA Y AUTOMATICA INDUSTRIALES", volumen II, Serie  
Mundo Electrónico, Marcombo, Boixareu Editores.
7. Alley y Atwood: "INGENIERIA ELECTRONICA", 3a. Ed., Editorial  
LIMUSA, México.
8. Paul R. Gray y Robert G. Meyer: "ANALYSIS AND DESIGN OF ANALOG  
INTEGRATED CIRCUITS", John Willey and Sons, New York, 1977.
9. Herbert Taub y Donald Schilling: "DIGITAL INTEGRATED  
ELECTRONICS", Mc. Graw-Hill, Japan, 1977.
10. Benson Carlin: "ULTRASONICS", 2a. Ed., Mc. Graw-Hill, New York,  
USA, 1960.