

105
R. G. L.



Universidad Nacional Autónoma de México
FACULTAD DE INGENIERIA

**DISEÑO DE UNA INTERFAZ Y DEL SOFTWARE
PARA EL CONTROL DE UN MANIPULADOR
MECANICO CON TRES GRADOS DE LIBERTAD**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A

MARIA EUGENIA PEREZ FONS

Director de Tesis
Ing. Rodolfo Peters
Investigador del Instituto de Ingeniería

MEXICO, D. F.

1985



Universidad Nacional
Autónoma de México

UNAM



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 está 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

INTRODUCCION

CAPITULO I: DESCRIPCION DEL MANIPULADOR

1.1 Descripción de la Estructura	1
1.2 Movimientos de la Estructura	7
1.3 Valores Máximos de los Movimientos	7
1.4 Dimensiones de la Estructura	10
1.5 Tipos de Terminales	10
1.6 Relación entre el Angulo y la Posición de las Uniones en el Manipulador	12
1.7 Fotografías del Modelo de los Motores Actuadores	15

CAPITULO II: DISEÑO DE LA INTERFAZ PARA EL CONTROL DE
LOS MOTORES DEL MANIPULADOR

2.1 Etapa de Salida de Datos	18
2.2 Etapa Conversora	19
2.3 Etapa de Control	21
2.4 Etapa de Potencia	24

CAPITULO III: DISEÑO DEL SOFTWARE

3.1 Descripción del Microcomputador	29
3.2 Descripción de los Puertos de Entrada/Salida	31
3.3 Programas de Control	32

CONCLUSIONES	46
--------------	----

BIBLIOGRAFIA	48
--------------	----

APENDICE A: Consideraciones Generales Sobre el Control de Motores de Corriente Directa y su Apli- cación en Robótica	50
APENDICE B: Consideraciones de Diseño para el Conver- sor Digital/Analógico	59
APENDICE C: Sensores de Posición Usados en Robótica	66
APENDICE D: Hojas de Datos de los Circuitos Integrados Usados.	71

INTRODUCCION

En este trabajo se desarrollan programas que nos ayudan a controlar el giro de tres motores de corriente directa. Los cuales posicionan las uniones en una estructura metálica que simula un brazo. Estos motores estan conectados a una interfaz de acoplamiento cuyo diseño también se incluye. El manipulador fue pensado para que efectuase tareas de traslado de material y herramientas y con ese objetivo en mente el trabajo se desarrolla de la siguiente manera:

En el capítulo I se propone una estructura que, aunque ideal, esta claramente definida, se especifican las partes que la componen, los movimientos que efectúa y se sugiere usar una terminal magnética encargada de tomar el material ó la herramienta que tendrá que transportar el manipulador. En el capítulo II se describe el diseño de la interfaz de acoplamiento por etapas desde que salen los datos del microcomputador hasta la etapa de potencia del motor, trata también el procedimiento de construcción del circuito y nos remite al apéndice B donde se habla de las consideraciones de diseño para el conversor digital-analógico, incluye también el diagrama general del sistema además de una lista de componentes.

En el capítulo III, "diseño del software", se da una breve descripción del microcomputador empleado y se indican las direcciones en memoria de los puertos de entrada-salida así como sus funciones, al final se listan los programas que posicionan los motores de la estructura. Para terminar se dan las conclusiones y la bibliografía. Los apéndices son importantes como complemento del trabajo por lo que se pide al lector se remita a ellos cada vez que se haga referencia. En el apéndice A se desarrollan ecuaciones de control para un motor de corriente directa ideal donde se toman en consideración algunas variables de este. En el apéndice B se dan las consideraciones de diseño para el conversor digital-analógico. En el apéndice C se describen los sensores más usados en robótica y se explica el principio del servomecanismo y en el apéndice D se incluyen las hojas de datos de los circuitos integrados usados.

CAPITULO I

DESCRIPCION DEL MANIPULADOR

En este capítulo se da una visión general del manipulador mecánico. Se definen las partes que lo componen, sus movimientos y se dan dimensiones. Cabe aclarar que el diseño que se describe es teórico y que no se construyó el prototipo debido a limitaciones económicas y de tiempo. Al final se muestran fotografías de un modelo que se construyó para probar los motores actuadores.

1.1 Descripción de la Estructura

La estructura esta formada por una base fija y tres segmentos móviles que unidos forman un brazo. Estos segmentos están unidos en serie y en cada unión se localiza un pequeño motor de corriente directa. Para que este motor sea capaz de mover el

brazo a pesar de su tamaño, tiene una reducción de 1:100.

En la figura 1.1.1 se muestra el motor # 1 en la unión que llamamos codo, el Motor # 2 se encuentra dentro de la base y el Motor # 3 da movimiento a la terminal. Estos tres movimientos dan lugar a tres grados de libertad. Dichos movimientos permiten posicionar la estructura en cualquier punto sobre una línea recta horizontal, que empieza en un extremo de la base y se extiende hasta 40 cm de distancia, pasando por el punto medio que queda a 20 cm. Entre mayor sea el número de grados de libertad más movilidad tendrá la estructura. Los movimientos anteriormente descritos se representan en las figuras 1.3.1, 1.3.2, 1.3.3, que muestran las posiciones extremas de manipulador.

Para la construcción de la estructura se sugiere que los miembros del brazo sean huecos y contruidos de aluminio para aligerar el peso y disminuir el momento de inercia que aparece cuando la estructura translada material de un lugar a otro. Esta consideración es importante y debe tomarse en cuenta para el diseño de la estructura. En este diseño, se propone que los motores se coloquen en las uniones ya que la estructura para nuestros propósitos es puramente ideal, pero en la práctica no es conveniente porque se aumenta considerablemente el peso y el momento de inercia en las uniones afectando los puntos más críticos de la estructura. Para resolver este problema se pueden colocar los motores en la base y transmitirles movimientos por medio de un cable flexible o cadenas y poleas o cremalleras. El inconveniente de esta solución es que varias uniones intervienen en el movimiento resultante y por lo tanto el movimiento en una unión podría resultar en un movimiento no deseado en otra. Estos movimientos pueden ser compensados en software pero para evitar que éste se complique es mejor prever cuidadosamente estas interacciones. En la fig 1.1.2 se muestra una estructura con los motores dispues

tos en la base.

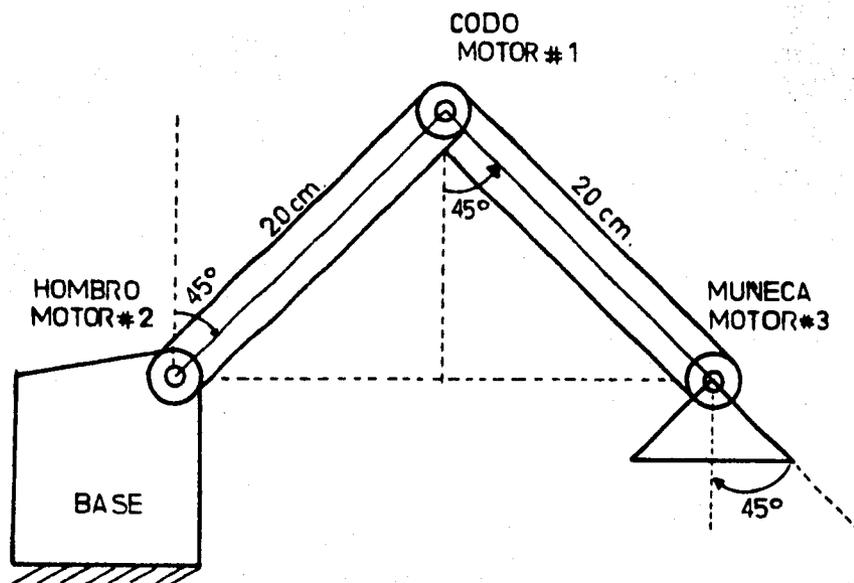


Fig 1.1.1 Diagrama de la estructura con los motores en las uniones

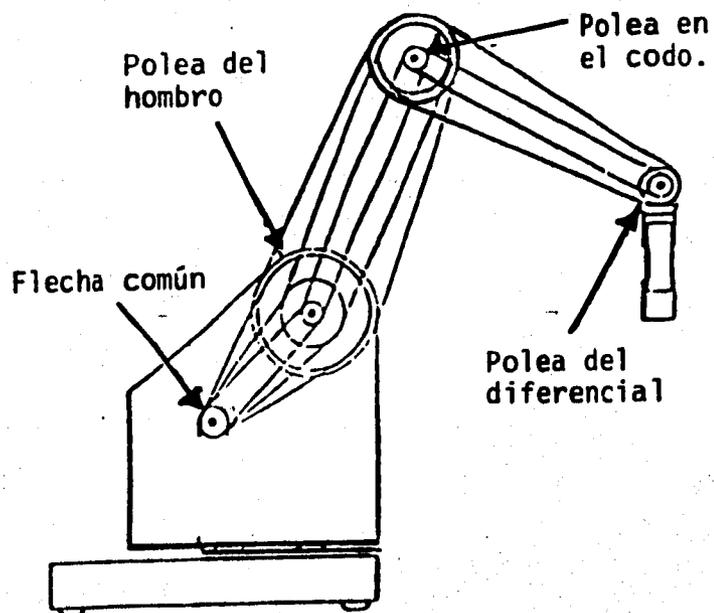


Fig 1.1.2 Diagrama de la estructura con los motores en la base.

Como se mencionó anteriormente, en el diseño que se propone aquí los motores se localizan en las uniones despreciando su peso y por consiguiente el momento de inercia asociado a éste. Se puede despreciar ese efecto en la estructura debido a que se tiene un movimiento rectilíneo, carga limitada a piezas pequeñas y suficiente potencia en cada motor. Pero principalmente se considera que se puede compensar el momento de inercia de la estructura (incluyendo, motores y carga) con el "par" que entrega el motor, aún en el caso más crítico, cuando el brazo está totalmente extendido (que es donde aparece el momento de inercia mayor) y con carga máxima (500 g) que es cuando el motor # 2 hombro (colocado en la base) tiene que funcionar a su máxima capacidad para contrarrestar el momento de inercia producido.

A continuación se hace un cálculo aproximado de la potencia del motor para justificar el por qué de tal decisión:

Potencia sin carga

Corriente del motor sin carga = 100 mA

Potencia = 12 V x 100 mA = 1.2 W

Eficiencia del motor = 50 %

$$1.2 \times 0.5 = 0.6 \text{ W} \\ (600 \text{ mW})$$

Eficiencia de la reducción = 90 %

$$0.9 \times 0.6 = 0.54 \text{ W} \\ (540 \text{ mW})$$

Considerando que la reducción en el motor es de 1:100

Potencia de salida en la

flecha sin carga =

$$0.540 \times 100 = 52 \text{ W}$$

Potencia con carga

Corriente del motor con carga = 500 mA

Potencia = 12 V x 500 mA = 6.0 W

Eficiencia del motor = 50 %

$$6.0 \times 0.5 = 3.0 \text{ W}$$

Eficiencia de la reducción = 90%

$$3.0 \times 0.9 = 2.7 \text{ W}$$

Reducción del motor = 1:100

Potencia de salida en la

Flecha con carga = $2.7 \times 100 = 270 \text{ W}$

Para hacer el cálculo del momento de inercia que tiene que soportar la estructura se deben considerar todas las fuerzas que intervienen. Estas fuerzas son el peso de los motores, que es de 300 g. c/u, el peso de la terminal magnética 150 g, el peso del brazo y del antebrazo, considerados aquí como cargas distribuidas, de 2 Kg en c/miembro, además de la carga útil que se limitó en este diseño a 500 g. La fig 1.1.3 muestra el diagrama de fuerzas.

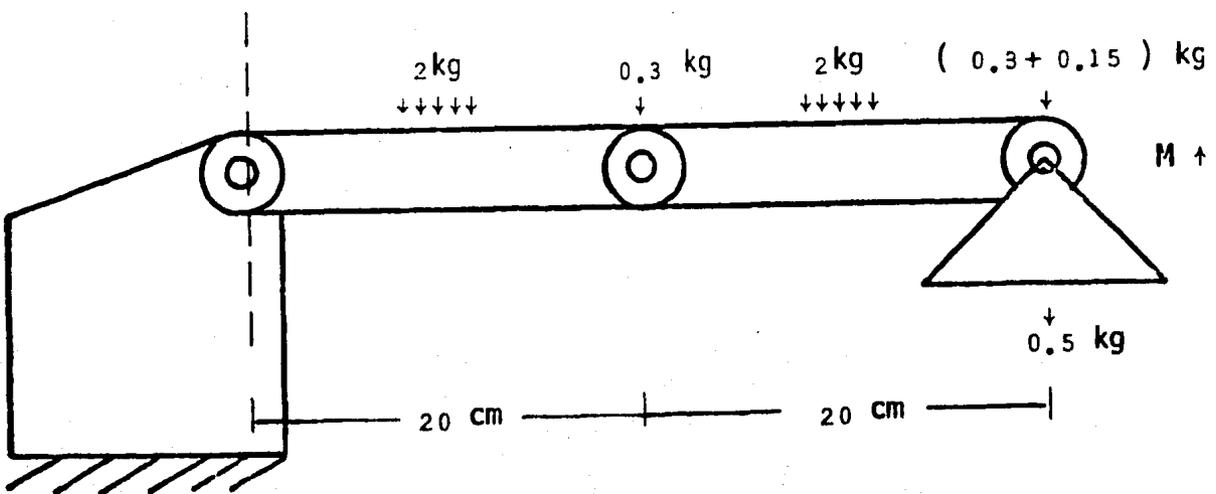


Fig 1.1.3 Cálculo del momento de inercia cuando el brazo se encuentra totalmente extendido y con carga máxima.

La ecuación para calcular el momento de inercia queda

$$M = (2) (0.2) + (0.3) (0.2) + (2) (0.4) + (0.3 + 0.15) (0.4)$$

Peso brazo
Motor # 1
Peso antebrazo
Motor # 3
y terminal

$$(0.5) (0.4) = 1.64 \approx 2 \text{ Kg-m}$$

carga útil

De la ecuación resulta que necesitamos un $T > 2\text{Kg-m}$ para contrarestar el momento de inercia producido por la estructura. Transformando este par a potencia se tiene:

$$P = \frac{T}{t}$$

$$P = 2 \text{ Kg-m} \times \frac{1}{\text{seg}}$$

O sea la potencia es el par sobre unidad de tiempo (en nuestro caso 1 seg) usando la siguiente conversión el cálculo resulta:

$$1 \text{ Watt} = 0.102 \frac{\text{Kg-m}}{\text{seg}}$$

$$P = 2 \frac{\text{Kg-m}}{\text{seg}} \times \frac{1}{0.102} \text{ Watts}$$

$$P = 19.6 \approx 20 \text{ Watts}$$

Por lo que se concluye que se necesitan un mínimo de 20 watts para contrarestar el momento de inercia. Calculando el par que nos da el motor para corriente máxima se tiene:

$$P = 270 (0.102) = 27.54 \quad \frac{\text{Kg-m}}{\text{seg}}$$

$$T = 27.54 \times 1 = 27.54 \quad \text{Kg-m}$$

Se hace notar que este par excede al par requerido para contrarrestar el momento de inercia 14 veces, lo que confirma lo acertado de la decisión. El análisis para la estructura, considerando la relación entre par y el momento de inercia, se incluye en el apéndice A. Es importante también señalar que este diseño no sufre de interacciones ya que el movimiento de cada motor es independiente.

1.2 Movimiento de la Estructura

La estructura cuenta con tres movimientos

- a) Movimiento del codo (motor # 1)
- b) Movimiento del hombro (motor # 2)
- c) Movimiento de la muñeca (motor # 3)

Para una mejor comprensión se sugiere referirse a la figura 1.1.1. Estos movimientos nos limitan a una trayectoria rectilínea de tal forma que para lograr alcanzar un objetivo este debe posicionarse al nivel adecuado (representado en la figura 1.3.1, 1.3.2, 1.3.3 por una línea punteada).

1.3 Valores Máximos de los Movimientos.

- | | |
|-----------------------------|------------|
| a) Movimiento del motor # 1 | 90° ó 180° |
| b) Movimiento del motor # 2 | 90° |
| c) Movimiento del motor # 3 | 90° |

El mecanismo propuesto realiza su movimiento rectilíneo, basado en el movimiento angular de cada motor, así, si se desea lograr un desplazamiento de 20 cm, el motor # 1 debe efectuar un giro de 60° el motor # 2 un giro de 30°.

Para propósitos de diseño se fijaron los movimientos angulares máximos de cada motor en 90° , con excepción del motor # 1 que puede adoptar dos valores de acuerdo a su referencia. El movimiento angular del motor # 1 será 90° cuando se tome como referencia la base y será de 180° cuando la referencia se toma en el mismo motor # 1.

Posiciones extremas del manipulador

ALCANCE
MINIMO

$$M1 = 0^\circ$$

$$M2 = 0^\circ$$

$$M3 = 0^\circ$$

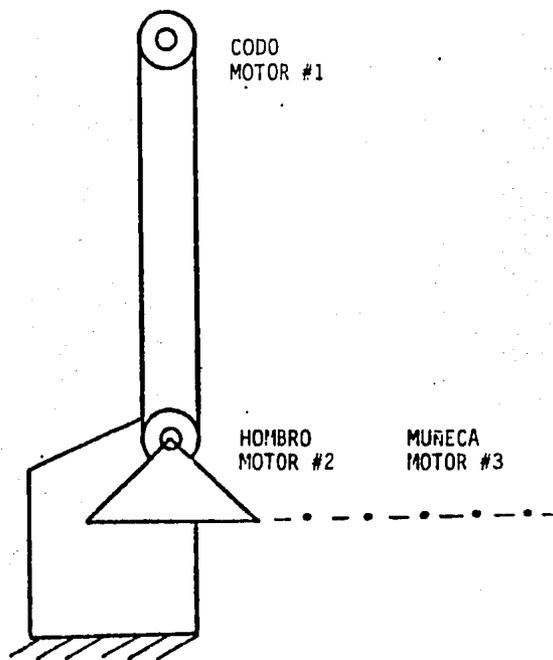


Fig 1.3.1 Punto de desplazamiento cero ó punto de descanso, no hay movimiento en ningún motor.

ALCANCE MEDIO

- M1 = 60°
- M2 = 30°
- M3 = 30°

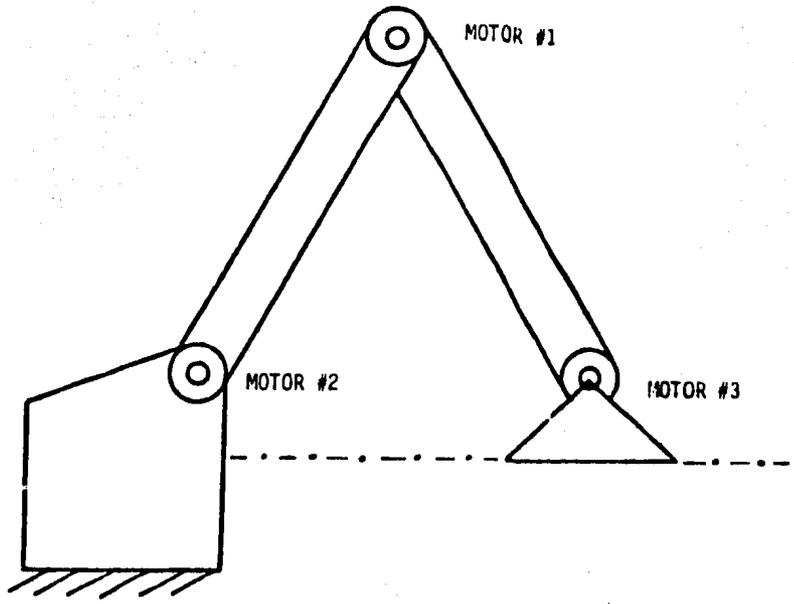


Fig 1.3.2 Punto medio, los tres motores se movieron 30°, 60° y 30°. El movimiento es individual en los 3 motores.

ALCANCE MAXIMO

- M1 = 180°
- M2 = 90°
- M3 = 90°

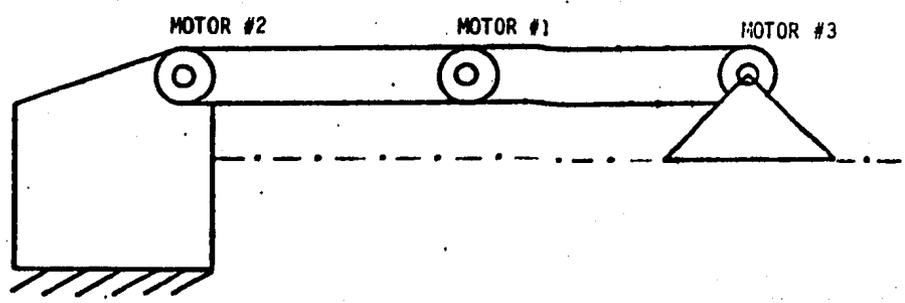


Fig 1.3.3 Desplazamiento máximo, los motores hacen su recorrido completo, aquí también el movimiento es individual.

En el capítulo 3 (diseño del software) se muestra una tabla con los valores de desplazamiento en cm y la relación de desplazamiento en grados para el giro de los motores en la estructura.

1.4 Dimensiones de la Estructura

La estructura guarda una relación geométrica con el movimiento angular de las uniones, de ahí que sea necesario especificar con precisión las dimensiones de la misma. Para nuestro diseño las dimensiones se sugiere guarden la siguiente proporción (es importante guardar la relación en la longitud de los segmentos del antebrazo y brazo ya que la tabla de aplicación se hizo en base a esas medidas).

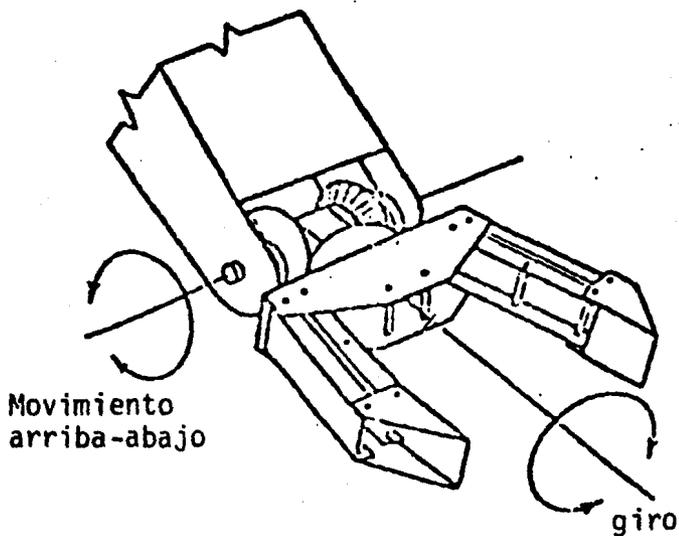
a) Base cuadrada fija de	10 cm x 10 cm
b) Antebrazo	20 cm
c) Brazo	20 cm
d) Terminal	5 cm

1.5 Tipos de Terminales

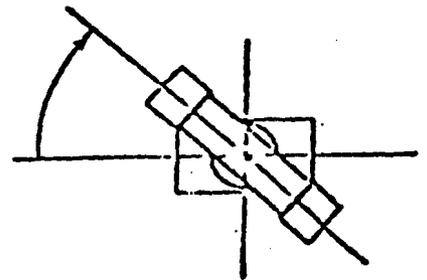
En los robots industriales más complejos, se emplean varios tipos de terminales que van desde la terminal magnética hasta las terminales hidráulicas y neumáticas, pasando por la terminal de tipo diferencial como la que muestra la fig 1.5.1. Para poder manejar esta terminal se necesitan dos grados de libertad adicionales o sea 2 motores más que serían los encargados de 1) mover el diferencial para tener un movimiento arriba, abajo y en círculo y 2) mover un resorte por medio de un cable que es el que proporciona la fuerza de agarre en la pinza. Esta estructura tiene 5 grados de libertad y no es fácil de manejar y nos enfrenta con el problema que se describió anteriormente con el movimiento desde la base presentando además problemas de sincronización.

Como se definió anteriormente, en el diseño de este manipulador sólo se planteó el problema de posicionar la estructura en un punto determinado y trasladar material de un lugar a otro, por lo que se propone el empleo de una terminal de tipo magnético. Para este tipo de terminal el diseñador solo debe tomar en cuenta la permeabilidad magnética del material que se va a transportar, para definir el número de vueltas que requiere el magneto y el flujo de corriente necesario. Esto reduce el problema a posicionar la terminal en un punto adecuado para atraer el material que se desea trasladar.

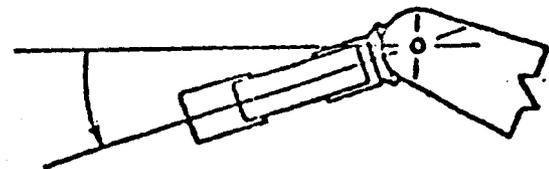
Vista general



Angulo de giro de la tenaza

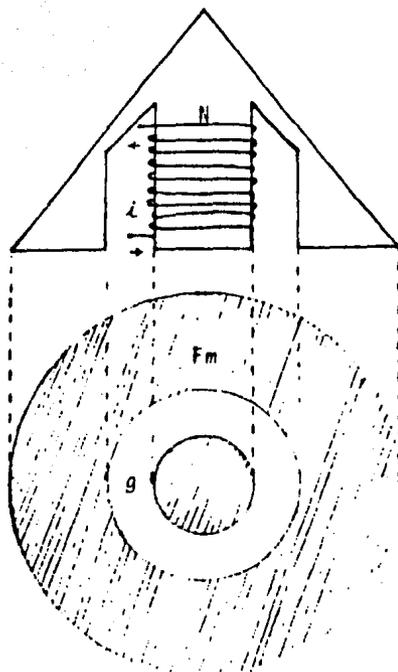


Vista frontal



Angulo del movimiento arriba-abajo. Vista de lado

1.5.1 Tenaza con sistema diferencial



1.5.2 Vista interior de la terminal magnética.

1.6 Relación entre el Ángulo y la Posición de las Uniones en el Manipulador

Estas son algunas de las relaciones entre el ángulo y la posición de las uniones. Todos los cálculos se hacen usando relaciones trigonométricas simples. La longitud de los segmentos AD y DC deben permanecer constantes. Las dos últimas figuras muestran valores para dos casos específicos.

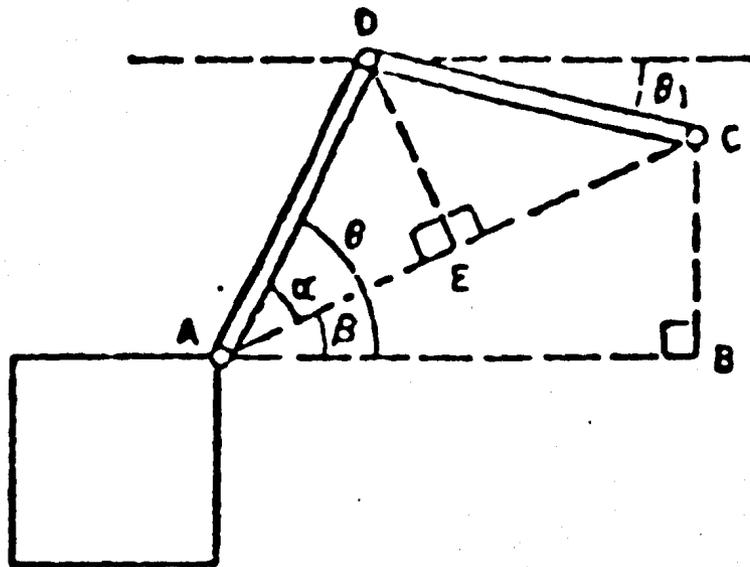


Fig 1.6.1 Diagrama donde se deducen las relaciones trigonométricas.

$$\beta = \tan^{-1} \frac{BC}{AB}$$

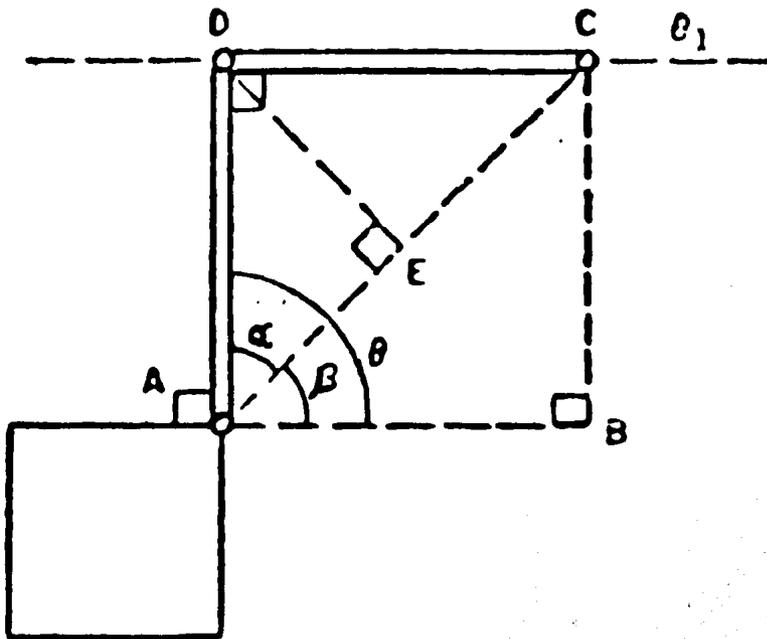
$$AB = \sqrt{(AC)^2 - (BC)^2}$$

$$DE = \sqrt{(AD)^2 - (AE)^2}$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{DE}{AE}$$

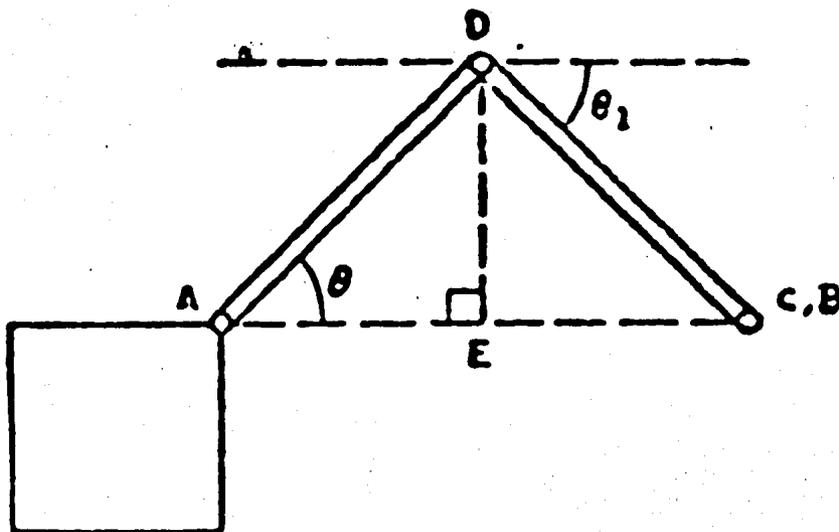
$$\theta = \beta + \alpha$$

$$\theta_1 = \beta - \alpha$$



$\beta = 45^\circ$
 $\alpha = 45^\circ$
 $\theta = 90^\circ$
 $\theta_1 = 0^\circ$

Fig 1.6.2



$\alpha = 45^\circ$
 $\beta = 0^\circ$
 $\theta = 45^\circ$
 $\theta_1 = 45^\circ$

Fig 1.6.3

De esta forma conociendo el ángulo de un segmento con respecto a su unión se puede saber la posición de la terminal.

1.7 Fotografías del Modelo de los Motores Actuadores.

En esta sección se muestran las fotografías del modelo que se construyó para determinar las características principales de los motores. El modelo incluye además del motor, la reducción y el potenciómetro que permite realizar el control de posición.

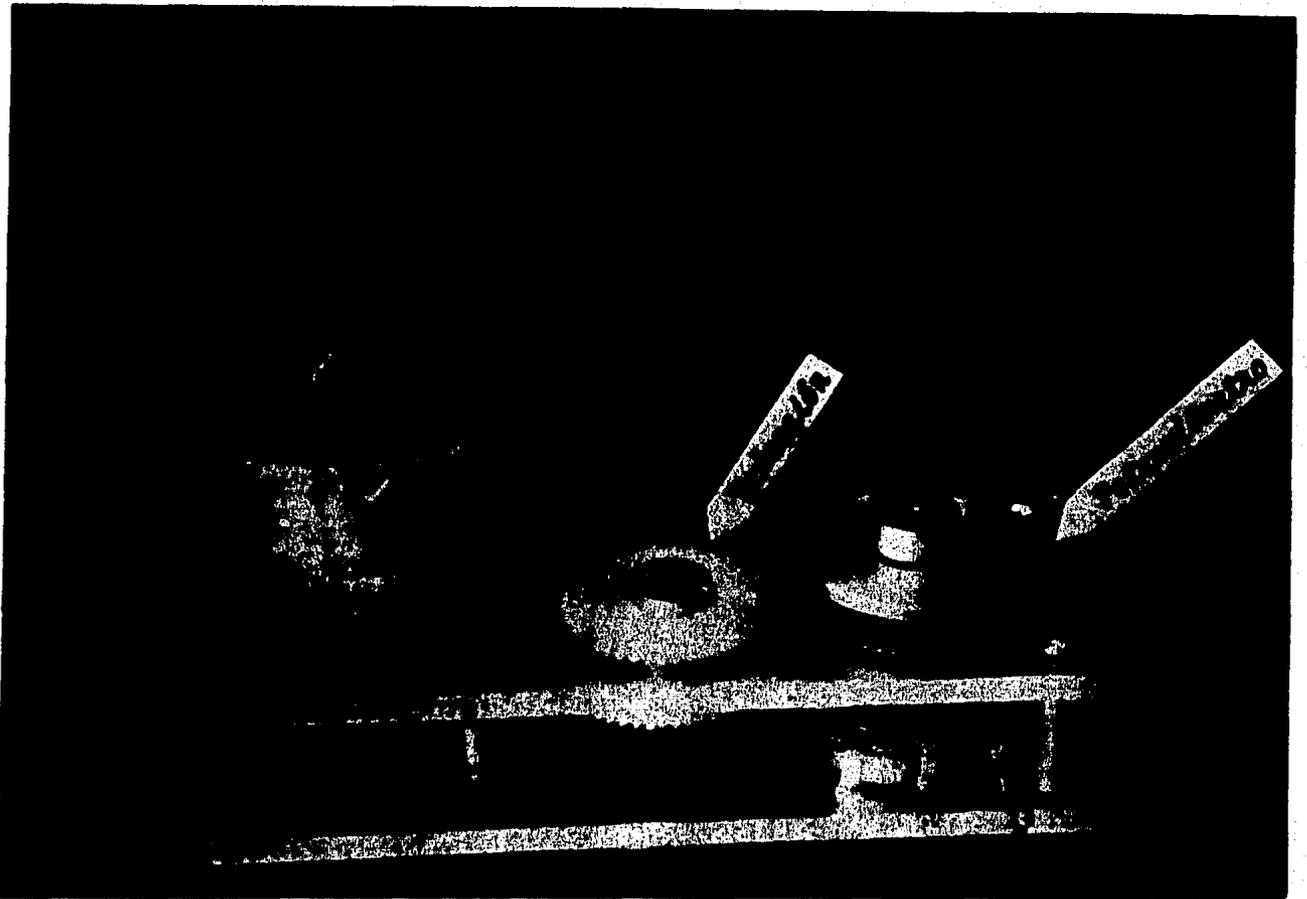


Foto 1

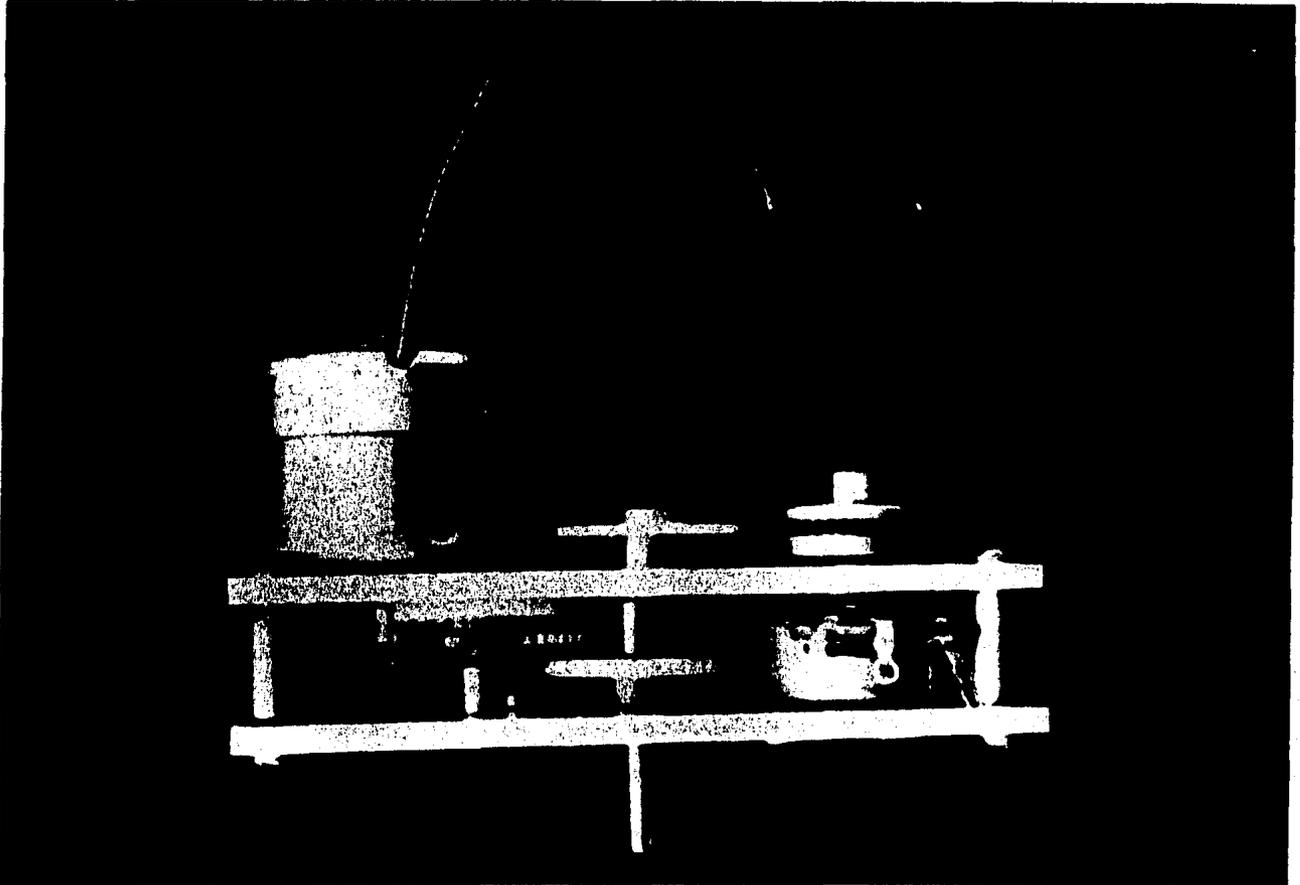


Foto 2 Detalle de los engranes que intervienen en la reducción.

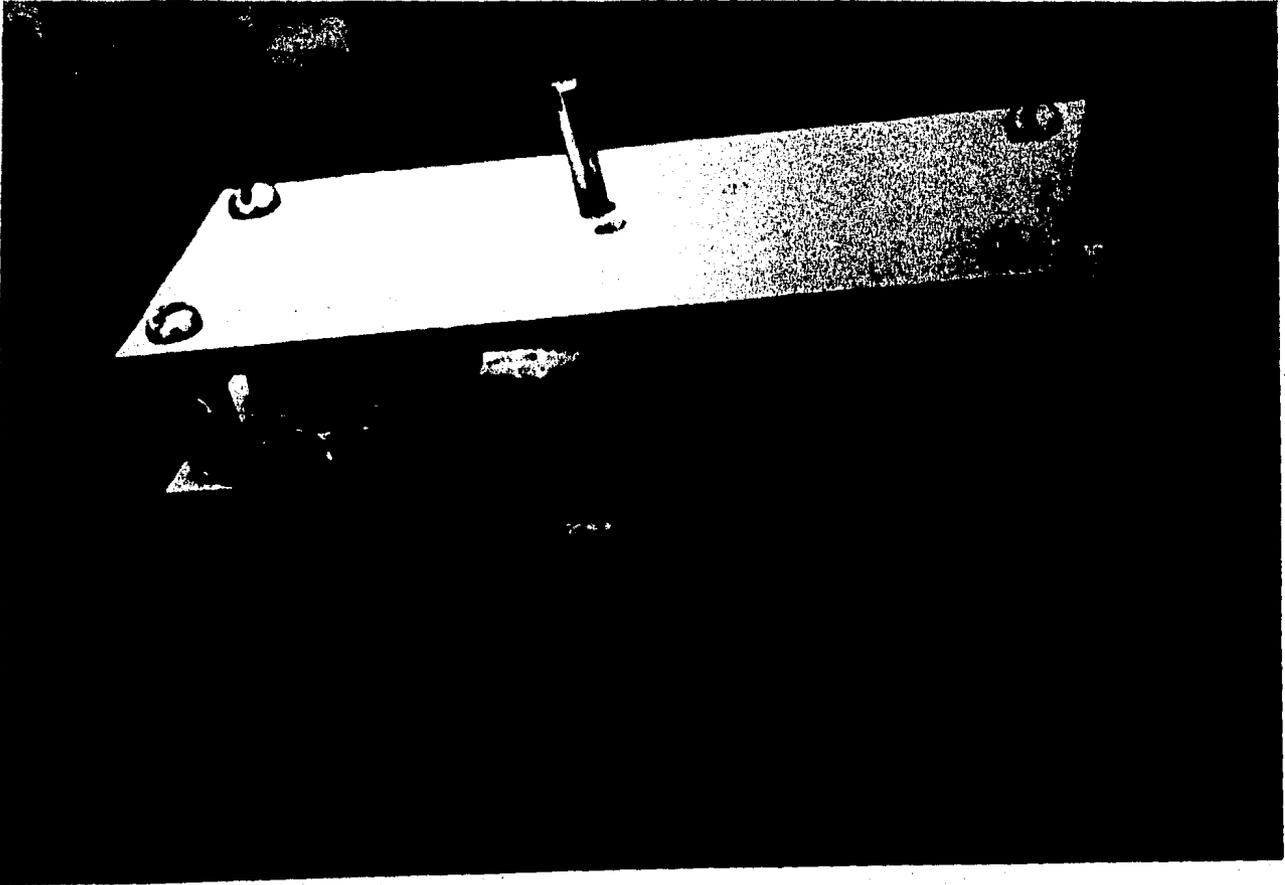


Foto 3 Flecha encargada de mover las uniones en el manipulador.

CAPITULO II

DISEÑO DE LA INTERFAZ PARA EL CONTROL DE LOS MOTORES DEL MANIPULADOR.

La interfaz permite que los motores, engranes y cremalleras se muevan de acuerdo a las órdenes dadas por el microcomputador para proporcionar a la estructura el movimiento deseado. En este capítulo se explica como actúan los datos sobre el circuito interfaz de acoplamiento. En la última parte del capítulo se presenta un diagrama general que abarca al sistema en su totalidad. Para facilitar esta explicación se describe el funcionamiento de un solo motor.

2.1 Etapa de Salida de Datos

El microcomputador AIM-65 cuenta con dos puertos de 8 bits cada uno disponibles al usuario por medio de un conector. Estos puertos pueden ser usados como entradas o salidas, según se necesite, la única diferencia entre ellos es que el puer-

to B (PB) tiene capacidad para prender leds o manejar relevadores mientras que el puerto A (PA) no la tiene. Por lo tanto se escogió el PB como puerto de salida de datos para poder conectarle la carga sin necesidad de intercalar un *driver*. En este PB se utilizan las ocho salidas disponibles y van conectadas directamente a la entrada del conversor. Del PA se utilizan como salida tres bits para habilitar los relojes de los tres *latches**.

2.2 Etapa Conversora

En esta etapa recibimos los datos del puerto de salida del microcomputador en un latch de ocho bits que retiene la información hasta que el conversor este listo para recibir nuevos datos. Los voltajes que llegan al conversor son de 5V y 0V que corresponden a los niveles lógicos de "unos" y "ceros" respectivamente.

El conversor está construido con elementos discretos, resistencias de valores comerciales con 10 % de tolerancia y 1/4 Watt de potencia, emplea también amplificadores operacionales LM741. El conversor tiene por objeto proporcionar a la salida un voltaje analógico que corresponda a los valores digitales que se aplican a la entrada.

En el diagrama general Fig 2.4.2 se puede apreciar que se usa un potenciómetro de ajuste, este potenciómetro se incluye en los sumadores # 1 y # 2 y su función es la de ajustar el vol

* Latch: Memoria temporal, almacena los datos hasta que el reloj les permite salir.

taje de *offset** para evitar errores en la suma de voltaje. Las consideraciones para el diseño de este conversor se dan en el apéndice B (Consideraciones de diseño para el conversor Digital/Analógico). En la fig 2.2.1 se muestra el circuito conversor completo.

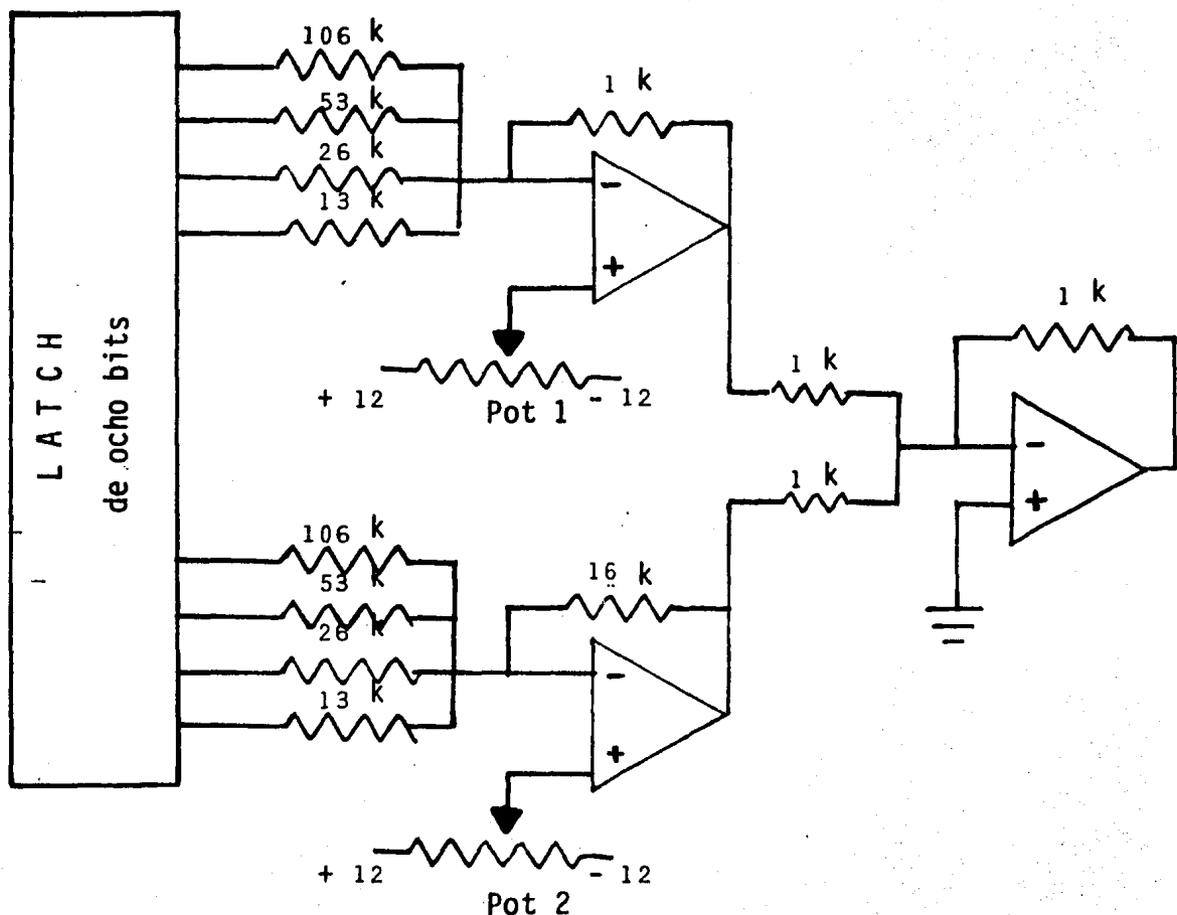


Fig 2.2.1 Conversor Digital-Analógico

*Offset: Voltaje pequeño que aparece en la salida del amplificador cuando se aterrizan o se alimentan con cero volts las entradas de este.

2.3 Etapa de Control

En la etapa anterior se describe como se obtiene el voltaje análogo equivalente al dato digital enviado por el microcomputador. Este voltaje análogo es aplicado a su vez a la etapa de control que controla al motor por medio de una comparación de voltaje. Para ello se diseñó un comparador de ventana con tres zonas, tanto en la señal de entrada como en la salida. La fig 2.3.1 muestra la gráfica que nos ayuda a entender su funcionamiento.

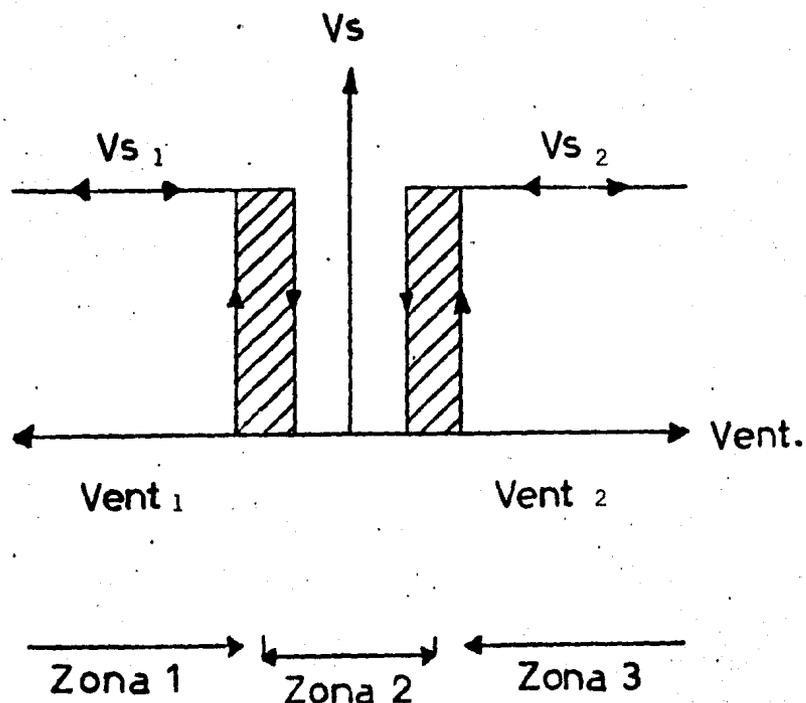


Fig 2.3.1 Límites del comparador de ventana

En este comparador si el voltaje de entrada es igual o menor a V_{ent1} , tenemos activa la salida V_{s1} y si el voltaje de entrada es igual o mayor a V_{ent2} , tenemos activa la salida V_{s2} . En el primer caso estamos en la Zona 1 y en el segundo en la Zona 3.

La Zona 2 corresponde a voltajes de entrada mayores a V_{ent1} pero menores a V_{ent2} y además no se tiene una salida activa.

En la figura 2.3.2 se muestra un circuito comparador que permite fijar la amplitud de la histéresis.

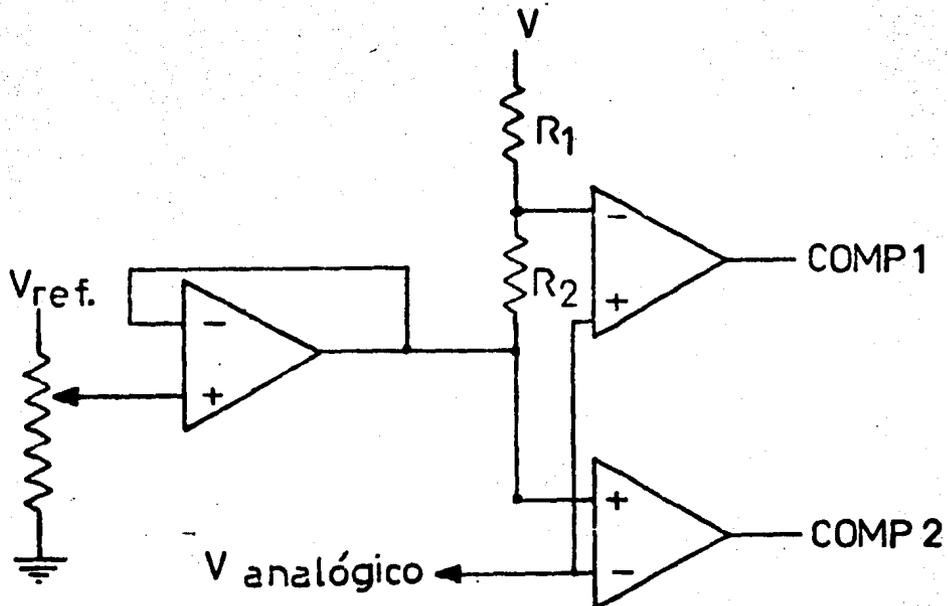


Fig 2.3.2 Circuito comparador con resistencia

El inconveniente del circuito de la fig 2.3.2 es que el valor de histéresis ajustado con R_2 no permanece fijo si se cambia el valor de V_{ent} . que es el caso, ya que el circuito de control activa el motor y al girar éste en un sentido u otro cambia el valor de V_{ent} . El procedimiento para eliminar este inconveniente es substituir R_1 por una fuente de corriente lo que permite tener la misma caída de tensión en la resistencia R_2 caída que corresponde al ajuste de histéresis o Zona 2. Finalmente el circuito queda como se muestra en la fig 2.3.3

Para el ajuste de histéresis se emplea también un potenciómetro. Este está acoplado a la flecha del motor y nos permite la comparación del nivel de voltaje de referencia con el voltaje a la salida del conversor pudiendo así tener un reporte constante de la posición del motor. Para obtener mayor información de este servomecanismo remitirse al apéndice C (Sensores usados en Robótica).

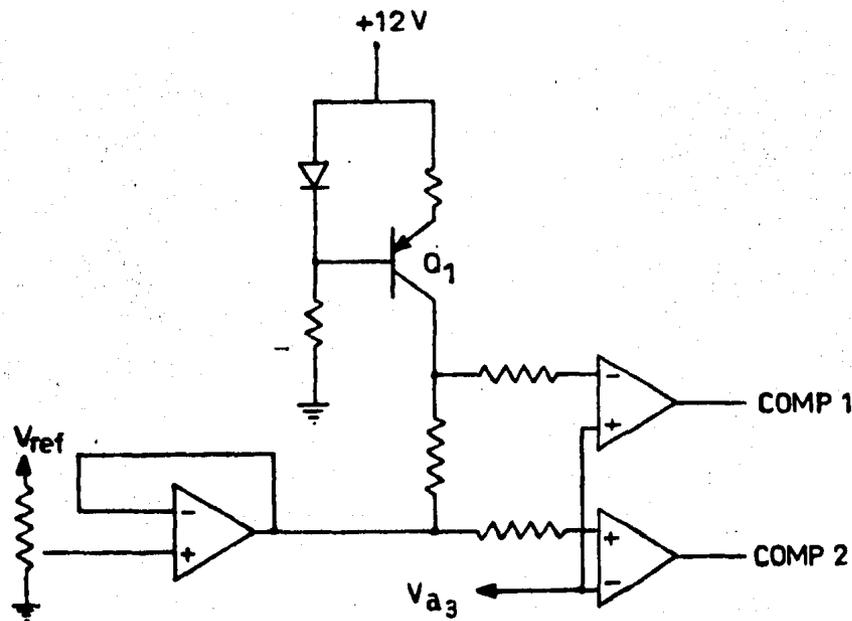


Fig 2.3.3 Circuito comparador con fuente de corriente

2.4 Etapa de Potencia

De la Etapa de control tomamos la señal de salida de los comparadores y la enviamos a dos pares de transistores de potencia complementarios como se muestra en la fig 2.4.1.

Cuando el voltaje de entrada corresponde a la Zona 2 el COMP 1 satura al transistor Q_3 y el COMP 2 satura al transistor Q_5 .

Considerando los transistores como interruptores, de esta manera se tienen dos interruptores abiertos Q_2 y Q_4 y dos interruptores cerrados Q_3 y Q_5 no existiendo caída de tensión en las terminales del motor.

Si el voltaje de entrada está en la Zona 1 o la Zona 3 se activan los transistores Q_2 y Q_5 o los transistores Q_4 y Q_3 apareciendo una tensión que da movimiento al motor en uno u otro sentido

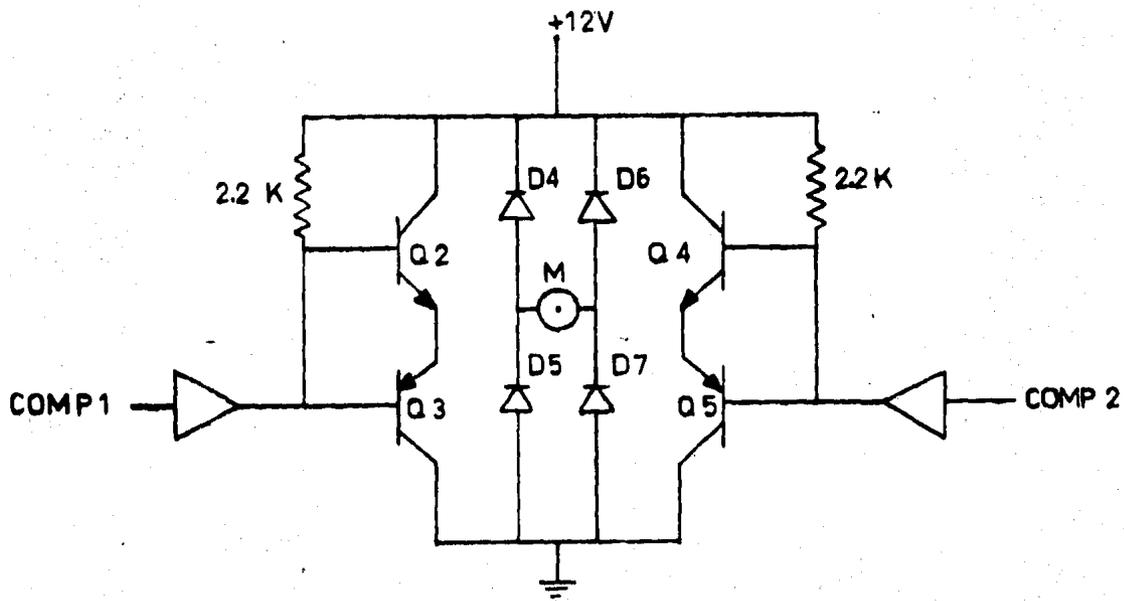
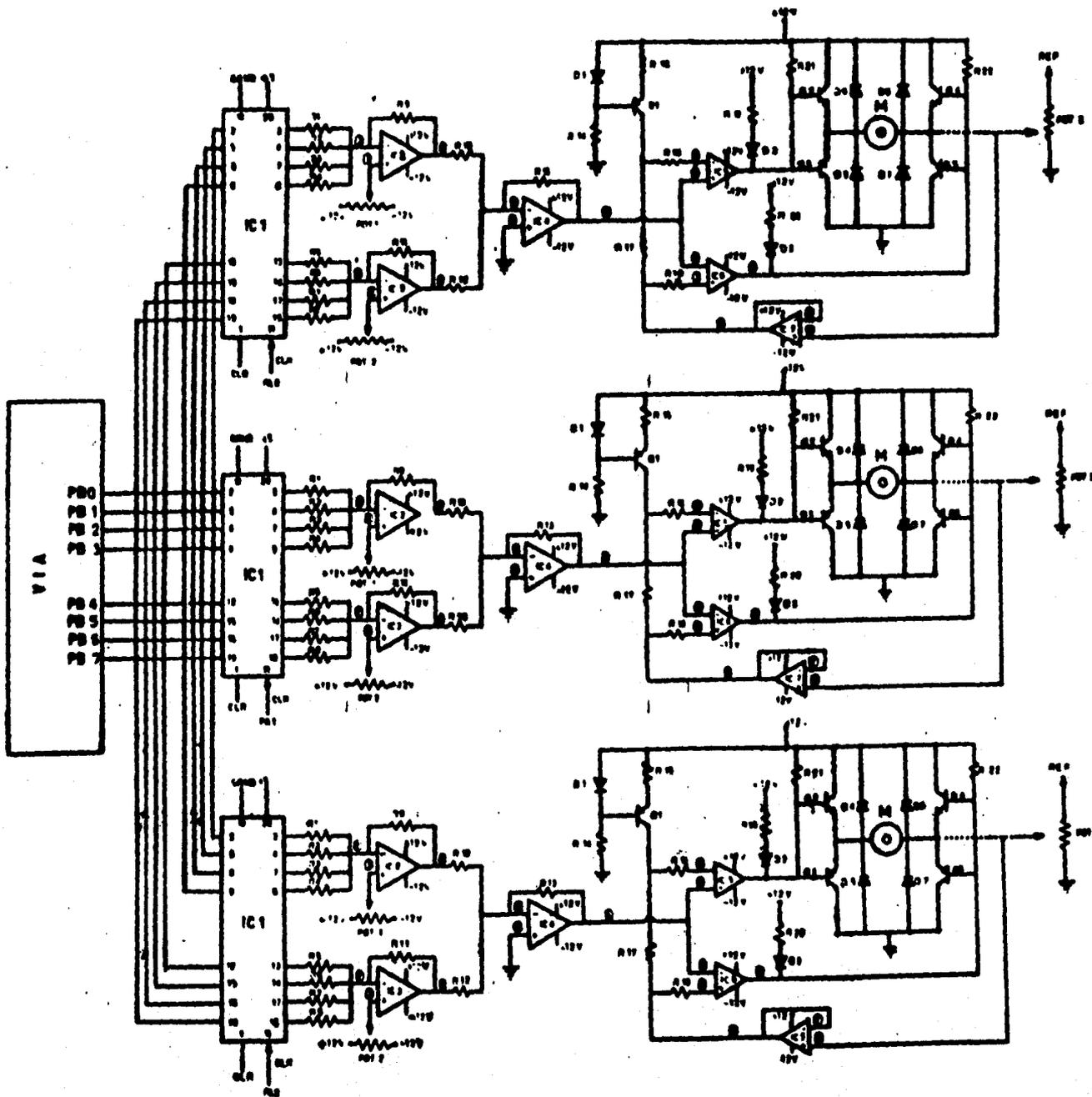


Fig 2.4.1 Circuito de potencia



- R 1 = 106 K
- R 2 = 53 K
- R 3 = 26 K
- R 4 = 13 K
- R 5 = 106 K
- R 6 = 53 K
- R 7 = 26 K
- R 8 = 13 K
- R 9 = 1 K
- R 10 = 1 K
- R 11 = 16 K
- R 12 = 1 K
- R 13 = 1 K
- R 14 = 1 K
- R 15 = 220 Ω
- R 16 = 10 K
- R 17 = 330 Ω
- R 18 = 10 K
- R 19 = 1 K
- R 20 = 1 K
- R 21 = 2K2
- R 22 = 2K2

- POT 1 = 10 K
- POT 2 = 10 K
- POT 3 = 10 K

Todas las resistencias son al 5% y de 1/4 de WATT

- IC1 = Latch de ocho bits 74LS273
- IC2-IC3-IC4-IC5-IC6-IC7 = Amp. op. LM741
- D1-D2-D3 = Leds
- D4-D5-D6-D7 = Diodo 1N4
- Q1 = BC557 (PNP)
- Q2-Q4 = TIP 31 (NPN)
- Q3-Q5 = TIP 32 (PNP)
- M = Motor de C.D. de 12 v.

Fig 2.4.2 Diagrama General

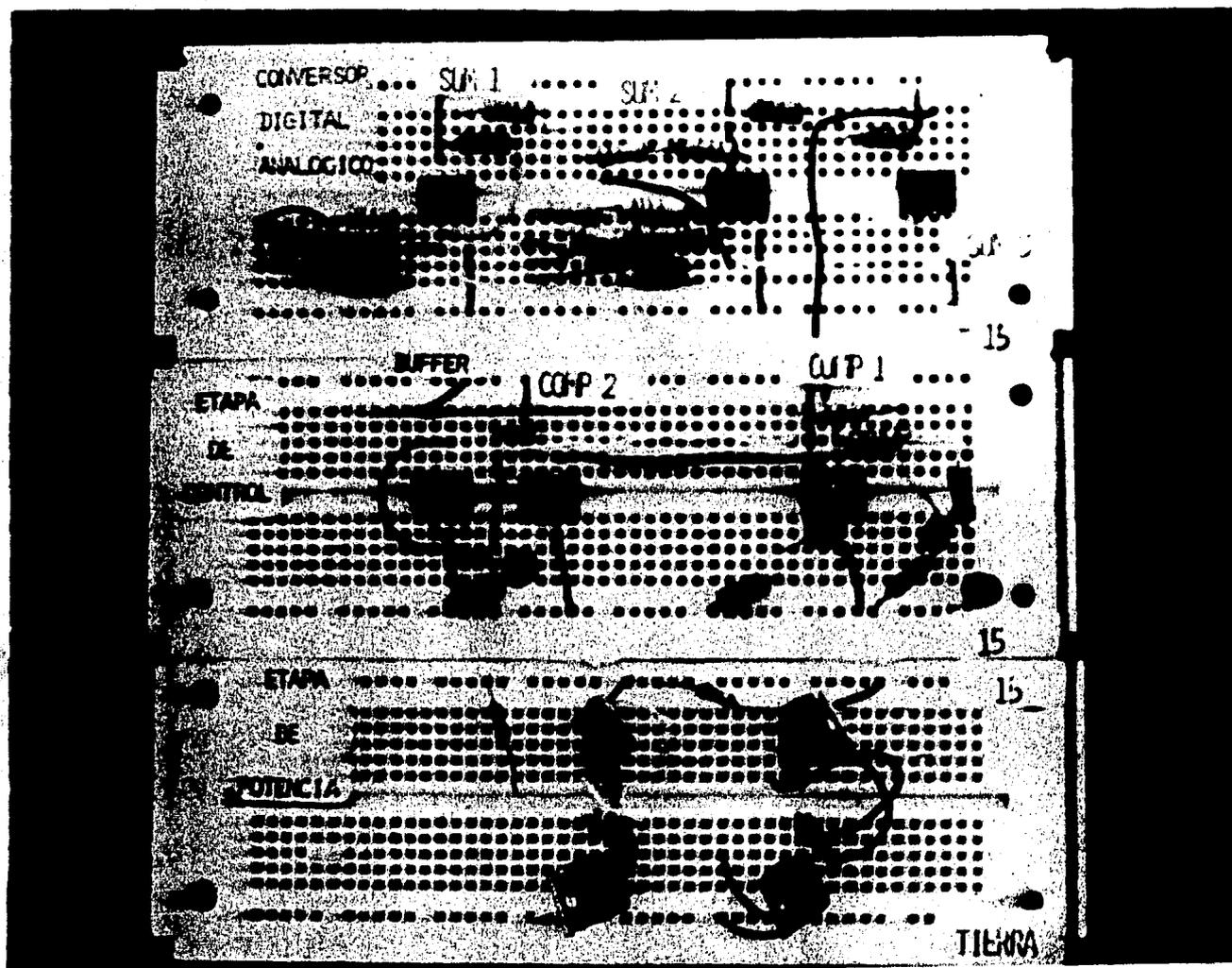


Foto 4 Circuito interfaz con el que se experimentó.

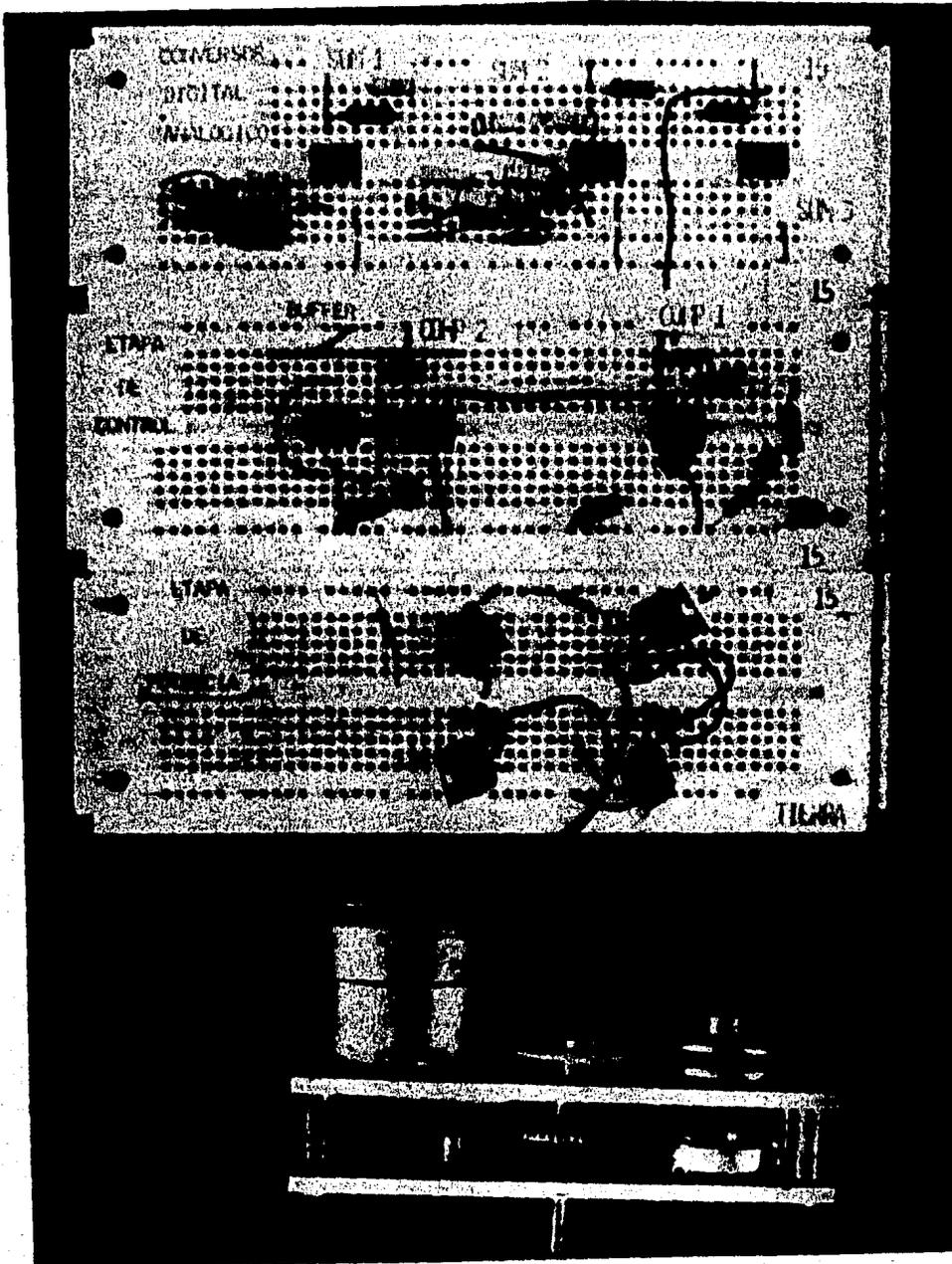


Foto 5 Vista del circuito interfaz unido al motor-actuador.

CAPITULO III

DISEÑO DEL SOFTWARE* _

El microcomputador elegido para el diseño de los programas de control del manipulador, es el AIM-65** y fue escogido por que es económico y versátil en el manejo del software. El software fue desarrollado en lenguaje de máquina lo cual reduce el tiempo de operación y de respuesta y facilita el manejo de los puertos de Entrada/Salida. La fig 3.1.1 muestra el diagrama de bloques del sistema y al final del capítulo se muestran fotografías.

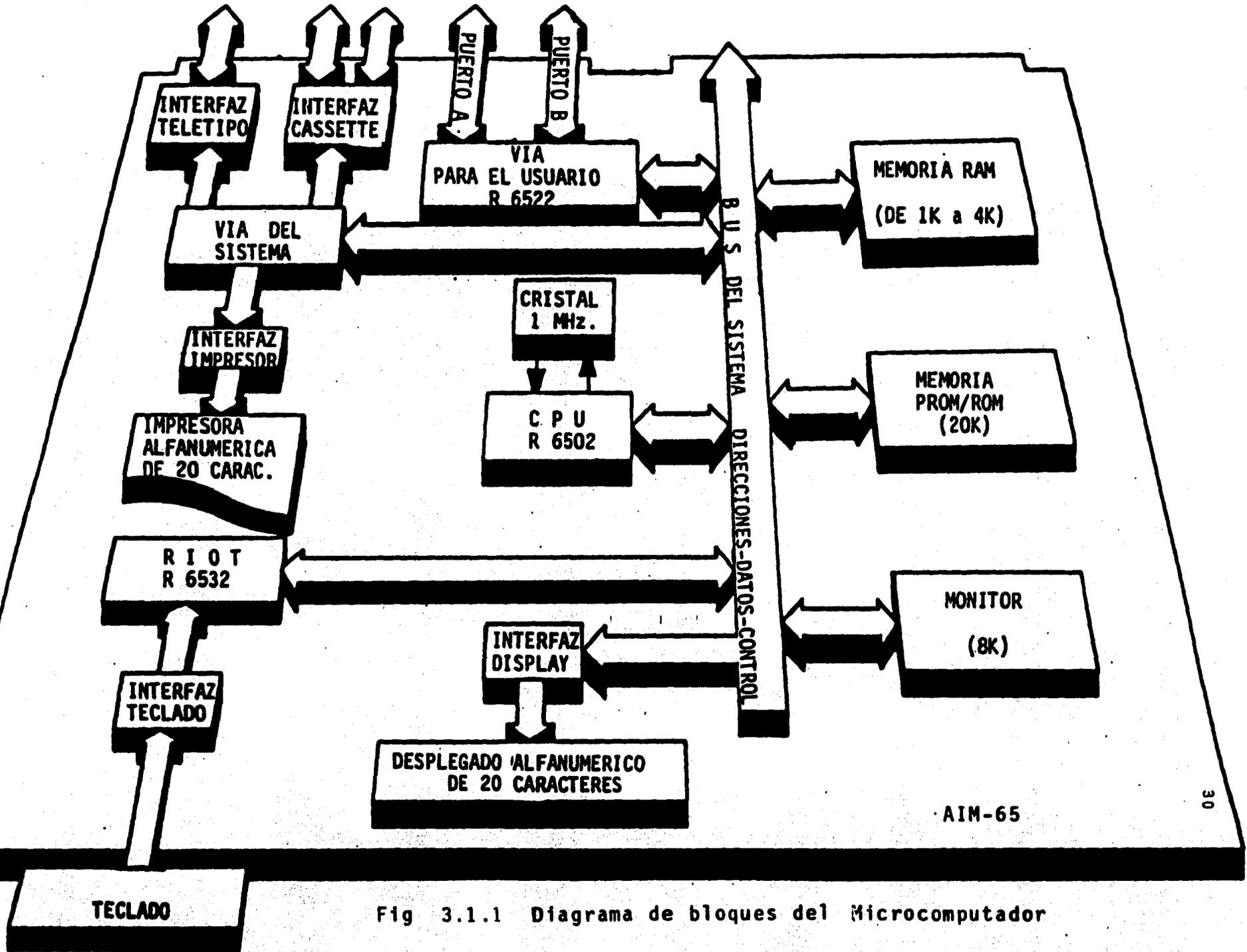
* Software: Nombre dado a los programas de computadora

** AIM: Advanced Interactive Microcomputer

3.1 Descripción del Microcomputador

El AIM-65 está formado por varios módulos a saber: el R6502, que es la unidad Central de procesamiento ó CPU. Este integrado tiene gran variedad de usos y es uno de los microprocesadores más populares que existen actualmente (la computadora Apple II usa un microprocesador 6502 como CPU), opera a 1MHz para dar un tiempo mínimo de ejecución por instrucción de dos microsegundos. Cuenta también con 56 instrucciones y 13 modos de direccionamiento que lo hacen muy flexible y fácil de programar. Otros circuitos integrados del microcomputador son: el R2114 memoria RAM de 4 K bytes y el R2332 memoria ROM con 20 K bytes. Dispone también de una mini-impresora de 20 columnas y una velocidad de impresión de 120 líneas por minuto. Contando adicionalmente con un desplegado luminoso de 20 caracteres que provee el usuario con una realimentación visual de los datos que son alimentados, por medio de un teclado que nos escribe todos los caracteres del código ASCII, incluyendo teclas para funciones de control predefinidas.

La operación del AIM-65 está controlada por un monitor residente en 8 K bytes de ROM, disponiendo de un grado de comandos fáciles de usar que simplifican considerablemente el uso del CPU, la memoria, y los puertos de Entrada/Salida. Esto beneficia al usuario ya que puede concentrarse en el diseño, aplicación y desarrollo de los programas de control exclusivamente.



· AIM-65

Fig 3.1.1 Diagrama de bloques del Microcomputador

3.2 Descripción de los Puertos de Entrada/Salida.

Generalmente en casi todos los microcomputadores el módulo de Entrada/Salida (E/S) es muy importante ya que nos proporciona una interacción inmediata de los programas de control con los mecanismos controlados. Pero también es de los módulos más complicados de manejar (por sus múltiples funciones) además de ser la parte más costosa del microcomputador. Otra característica de estos puertos es que su función varía de microcomputador a microcomputador y según la aplicación que se les de. Para aplicaciones generales una buena sección de E/S sería la que cuenta con:

Buffers: Dispositivos que dan potencia a la salida

Drivers: Dispositivos capaces de manejar motores, relevadores, focos, etc.

Shift registers: Registros de corrimiento

Counters: Contadores

Decoders: Decodificadores

Multiplexers: Multiplexores

Es posible que para algunas aplicaciones aun la más compleja sección de E/S sea insuficiente ya sea porque no ofrezca un número adecuado de E/S ó porque la combinación deseada de señales de control no sea conveniente.

La interfaz para el usuario; VIA (Versátil Interface Adapter) del AIM-65 es un ejemplo de una sección *completa* de E/S que contiene:

- 1.- Dos puertos de 8 bits de E/S, A y B. Cada línea puede ser seleccionada individualmente para ser entrada ó salida.
- 2.- Cuatro líneas de control (dos asociadas con cada puerto)

- 3.- Dos relojes/contadores que pueden ser usados para generar ó contar pulsos. Estos contadores pueden producir pulsos y/o series de pulsos.
- 4.- Un registro de corrimiento de 8 bits el cual puede convertir datos en serie a datos en paralelo.
- 5.- Una lógica de interrupción. Esta lógica incluye un registro con banderas que nos indican cuando ha ocurrido una interrupción en particular.

El VIA ocupa 16 localidades en memoria. La manera que opera está determinada por el contenido de cuatro registros.

- 1.- Data Direction Register A (DDRA) ó dirección del registro de datos A (A003). Determina cual de las líneas del puerto A es entrada o salida.
- 2.- Data Direction Register B (DDRB) o dirección del registro de datos B (A002). Determina cual de las líneas del puerto B es entrada o salida.
- 3.- Peripheral Control Register (PCR) o Registro de Control de Periféricos. Determina cuál polaridad de transición (cresta ascendente o descendente) es reconocida por las líneas de status de entrada CA1 y CB1.
- 4.- Auxiliary Control Register (ACR) o Registro Auxiliar de Control. Determina cuando los puertos de datos son almacenados y como operan los registros de corrimiento.

3.3 Programas de Control

El microcomputador para nuestros fines es usado como generador de datos. El programa principal facilita la captación de da-

tos del exterior por medio de letreros que ayudan al usuario a interactuar con la máquina. Estos datos se almacenan en memoria e indexan una localidad específica donde se encuentran las instrucciones de movimiento. Este movimiento ya ha sido calculado en una tabla. Dicha tabla relaciona desplazamiento angular, desplazamiento lineal y voltaje de referencia (+12 V) tabla 3.3. La tabla se almacena en otra parte de la memoria, al indexarla el programa le pide que proporcione los datos para el posicionamiento del motor.

La información que el usuario debe proporcionar será:

1º *Quieres moverme?*

El usuario debe proporcionar una letra

N para No movimiento

S para SI movimiento

(en N el programa insiste y pregunta 2 veces más y en S el programa continua).

2º *Cuantos cm (centímetros)?*

El usuario puede escoger DOS números del 00 al 20 o sea un desplazamiento que va de cero centímetros (posición inicial) a 20 cm (posición totalmente extendida).

3º *Cual motor?*

Los motores en el manipulador se accionarán en forma independiente dándole preferencia a que se mueva primero el motor # 1 (codo) y después los motores 2 ó 3 indistintamente. En este letrero el usuario debe proporcionar también dos números que van del 00 (ningún motor) al 03 (enciende el motor # 3).

4º Más acción?

Por último el programa despliega un letrero que pregunta si el movimiento sigue (el movimiento se hace por etapas) y si el usuario desea seguir proporcionando instrucciones tecleará S para comenzar todo el proceso una vez más, pero si no, tecleará N que mandará al programa de control a su fin. En la fig 3.3.1. Se muestra el diagrama de flujo el programa de control.

Fig 3.3.1 Diagrama de flujo para el programa de control.

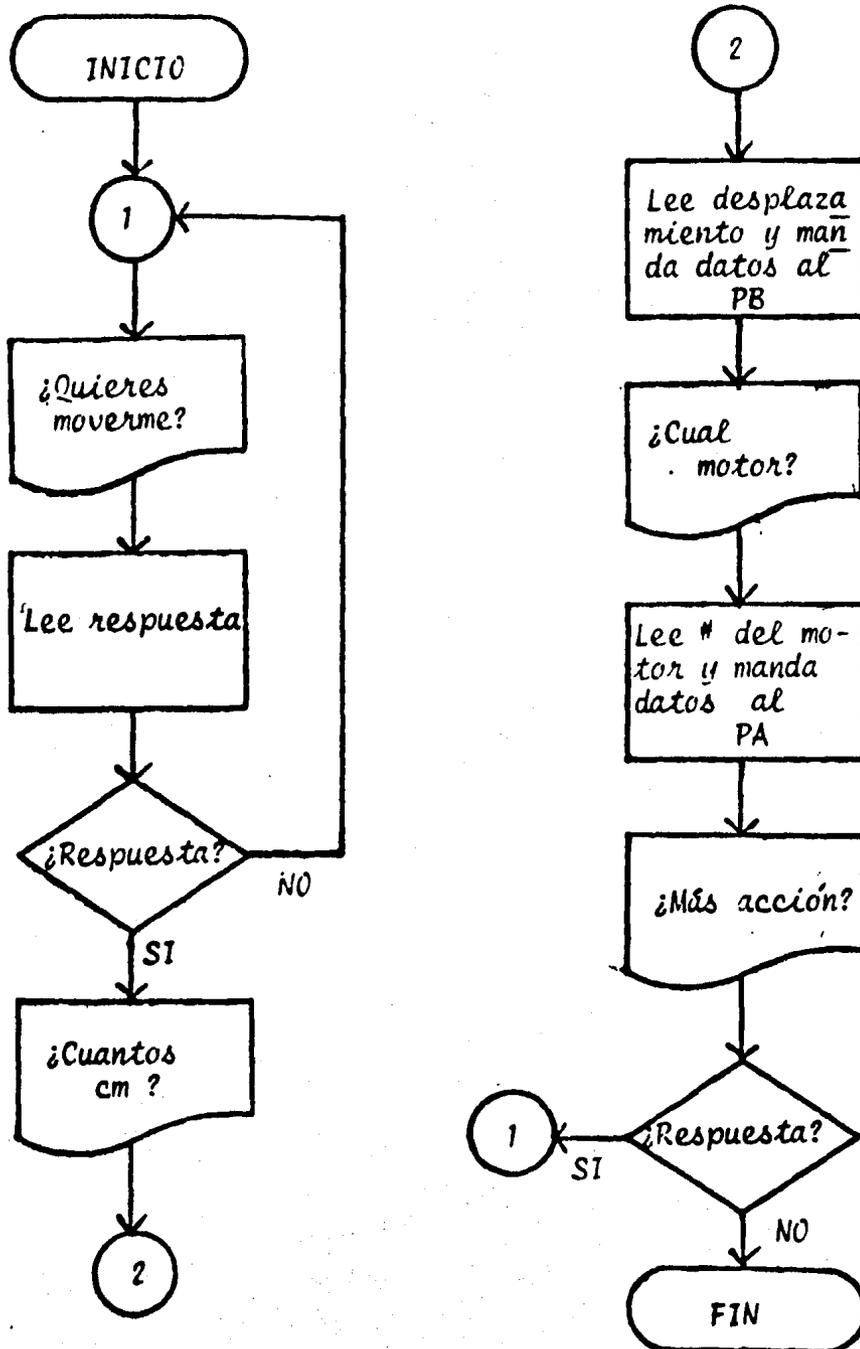


TABLA 3.3 DESPLAZAMIENTO DEL MANIPULADOR CUANDO EL MOVIMIENTO DE LOS MOTORES ES INDEPENDIENTE.

Localidad de Memoria	Desplaz. (cm)	Grados	Equivalentes en Voltaje	Valor Binario	Valor Hexadecimal
0300	0	0°	0.00V	00000000	00
0301	1	3°43'	0.45V	00000101	05
0302	2	6°13'	0.81V	00010001	11
0303	3	9°02'	1.20V	00011010	1A
0304	4	11°53'	1.50V	00100000	20
0305	5	14°47'	1.90V	00101000	28
0306	6	17°45'	2.3 V	00110001	31
0307	7	20°48'	2.7 V	00111001	39
0308	8	23°57'	3.1 V	01000010	42
0309	9	27°14'	3.6 V	01001110	4E
0310	10	30°	4.0 V	01010101	55
0311	11	33°36'	4.4 V	01011110	5D
0312	12	37°26'	4.9 V	01101000	68
0313	13	40°54'	5.4 V	01110010	72
0314	14	44°42'	5.9 V	01111101	7D
0315	15	48°59'	6.4 V	10001000	88
0316	16	53°13'	7.0 V	10010101	95
0317	17	58°21'	7.7 V	10100100	A4
0318	18	64°15'	8.5 V	10110100	B4
0319	19	72°20'	9.6 V	11001100	CC
0320	20	90°	12.0 V	11111111	FF

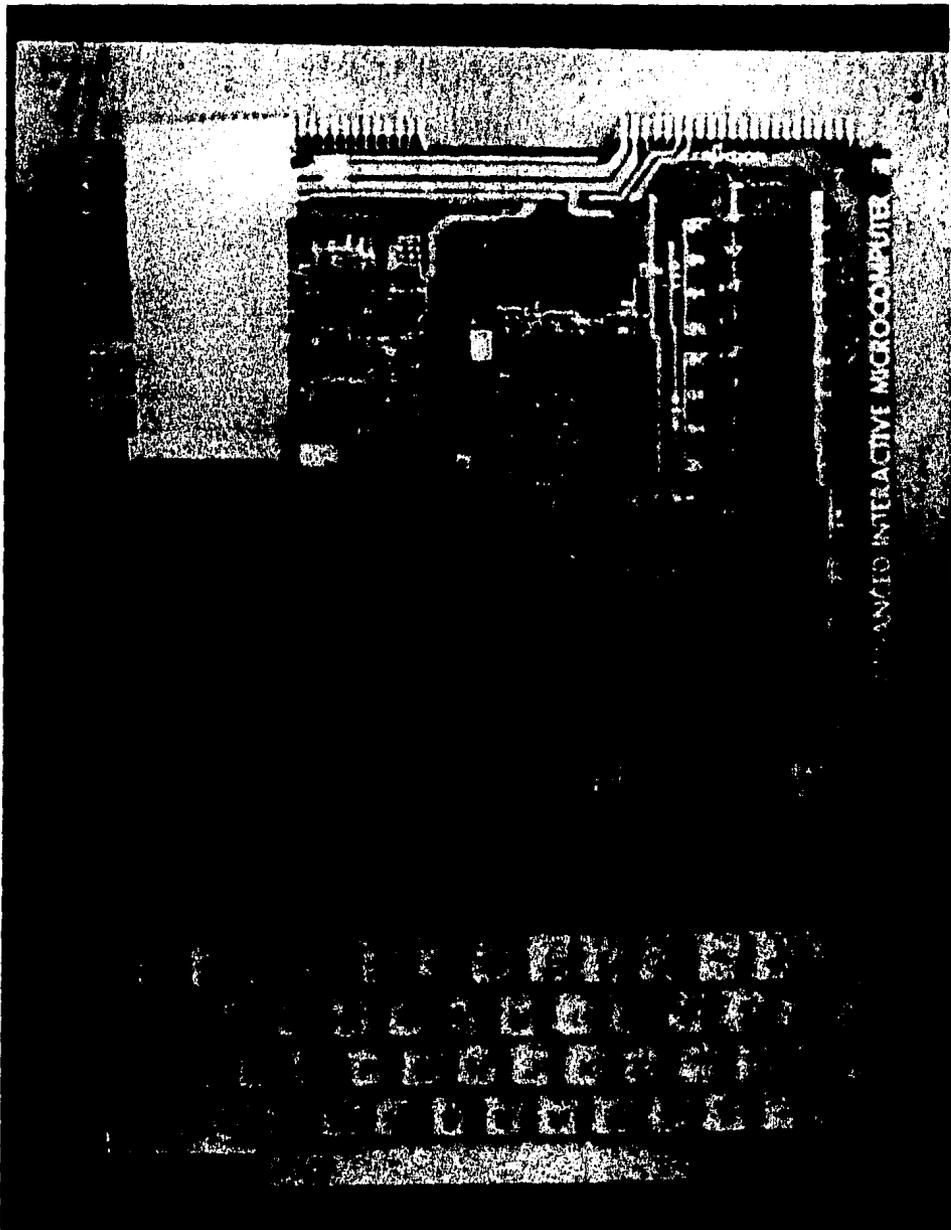


Foto 6 Vista frontal del microcomputador empleado en la elaboración de los programas.

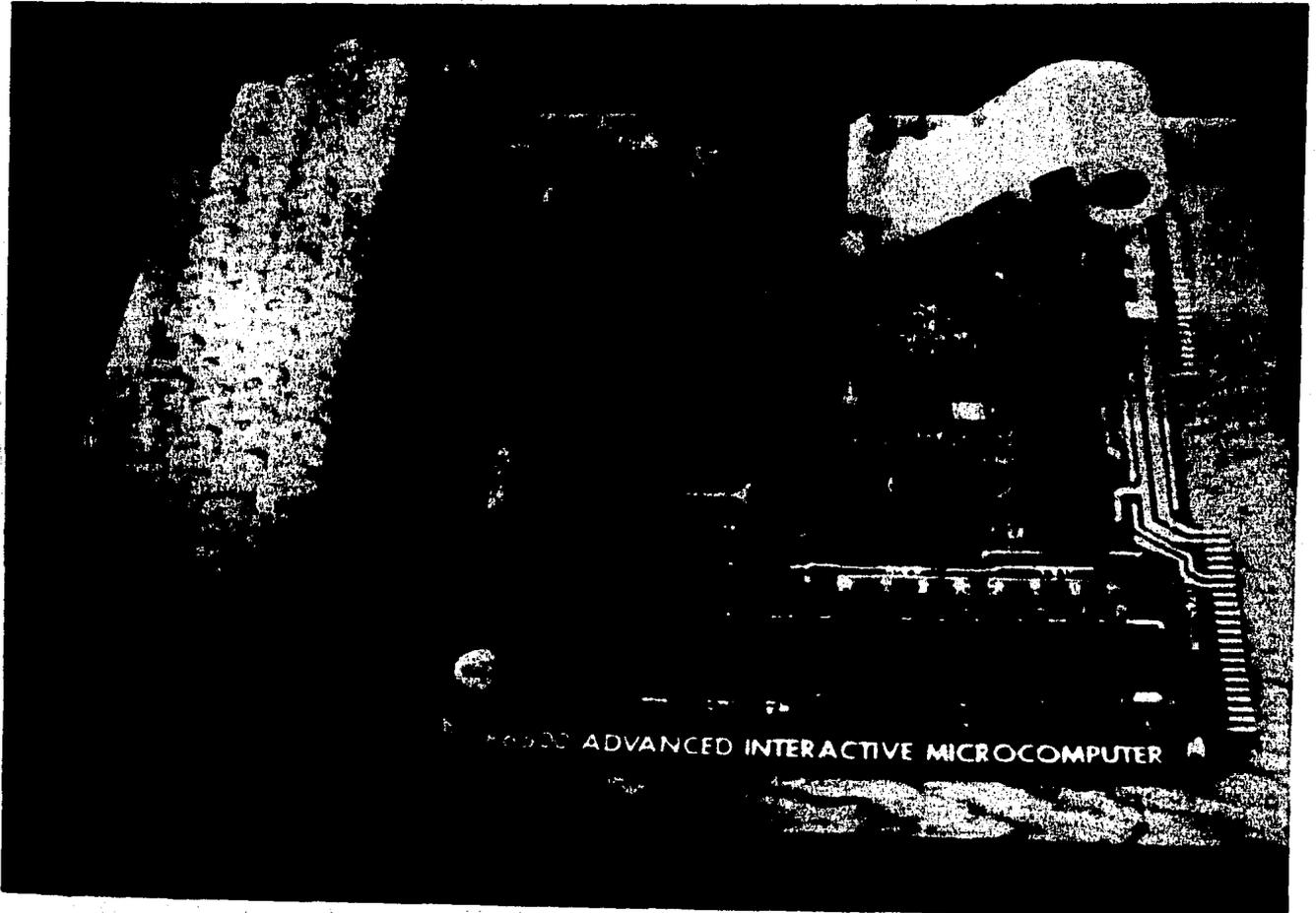


Foto 7 Vista de lado del Advanced Interactive Microcomputer

P R O G R A M A S

ROCKWELL AIM 65

/15

```

0200 A2 LDX #00
0202 BD LDA 0325,X
0205 20 JSR E97A
0208 E8 INX
0209 E0 CPX #14
020B D0 BNE 0202
020D 20 JSR E95F
0210 8D STA 0400
0213 C9 CMP #4E
0215 F0 BEQ 0200
0217 C9 CMP #53
0219 F0 BEQ 021E
021B EA NOP
021C EA NOP
021D EA NOP

```

ROCKWELL AIM 65

```

<M>=0324 20 20 51 55
< > 0328 49 45 52 45
< > 032C 53 20 4D 4F
< > 0330 56 45 52 4D
< > 0334 45 3F 20 20
< > 0338 00 00 20 43

```

ROCKWELL AIM 65

LETRERO

QUIERES MOYERME?

ROCKWELL AIM 65

/08

021E A2 LDX #00
 0220 BD LDA 033A,X
 0223 20 JSR E97A
 0226 E8 INX
 0227 E0 CPX =0E
 0229 D0 BNE 0220
 022B 20 JSR E3FD
 022E 8D STA 0401

/08

0231 A9 LDA #FF
 0233 8D STA A002
 0236 AD LDA 0401
 0239 AA TAX
 023A BD LDA 0300,X
 023D 8D STA A000
 0240 EA NOP
 0242 EA NOP

ROCKWELL AIM 65

LETRERO

CUANTOS CM?

(MANDA DATOS AL P. JER

TO DE SALIDA PB)

.ROCKWELL AIM 65

<M>=0300 00 05 11 1A

< > 0304 20 28 31 39

< > 0308 42 E0 13 00

< > 030C 00 00 00 00

< > 0310 55 5D 68 72

< > 0314 7D 88 95 A4

< > 0318 B4 CC 00 00

< > 031C 00 00 00 00

< > 0320 FF 20 20 20

< > 0324 20 20 51 55

ROCKWELL AIM 65

<M>=0338 00 00 20 43

< > 033C 55 41 4E 54

< > 0340 4F 53 20 43

< > 0344 4D 3F 20 20

< > 0348 20 20 20 43

ROCKWELL AIM 65

/08

0243 A2 LDX #00
 0245 BD LDA 034A, X
 0248 20 JSR E97A
 024B E8 INX
 024C E0 CPX #0E
 024E D0 BNE 0245
 0250 20 JSR E3FD
 0253 8D STA 0402

/13

0256 A9 LDA #FF
 0258 8D STA A003
 025B AD LDA 0402
 025E AA TAX
 025F BD LDA 0360, X
 0262 8D STA A001
 0265 EA NOP
 0266 EA NOP
 0267 EA NOP
 0268 EA NOP
 0269 EA NOP
 026A EA NOP
 026B EA NOP

ROCKWELL AIM 65

LETRERO:

CUAL MOTOR?

(MANDA DATOS AL FUER

TO DE SALIDA PA)

<

ROCKWELL AIM 65

<M>=0348 20 20 20 43
 < > 034C 55 41 4C 20
 < > 0350 4D 4F 54 4F
 < > 0354 52 3F 20 20
 < > 0358 20 20 20 20
 < > 035C 20 20 20 20

ROCKWELL AIM 65

<M>=0360 00 01 02 04
 < > 0364 00 00 00 00
 < > 0368 20 4D 41 53

ROCKWELL AIM 65

718

0260 A2 LDX #00
0265 B0 LDA 0369,X
0271 20 JSR E97A
0274 E8 INX
0275 E0 CPX #0E
0277 D0 BNE 025E
0279 20 JSR E95F
027E 80 STA 0402
027F C9 CNP #5C
0281 F0 BEC 0197
0281 C9 CNP #4E
0285 F0 BEQ 028A
0287 40 JNP 0280
028A 00 BRK
028B EA NOP
028C EA NOP
028D EA NOP
028E EA NOP

ROCKWELL AIM 65

<M>=0268 20 4D 41 53

< > 0360 20 41 43 43

< > 0370 49 4F 4E 2F

< > 0374 20 20 20 20

< > 0378 20 20 20 20

ROCKWELL AIM 65

LETREPQ:

NAS ACCION?

ROCKWELL AIM 65

QUIERES MOVERME? S

CUANTOS CM? 20

CUAL MOTOR? 01

MAS ACCION? S

<

ROCKWELL AIM 65

QUIERES MOVERME? S

CUANTOS CM? 20

CUAL MOTOR? 02

MAS ACCION? S

ROCKWELL AIM 65

QUIERES MOVERME? S

CUANTOS CM? 20

CUAL MOTOR? 03

MAS ACCION? S

QUIERES MOVERME? N

FIN.

EJEMPLO

COMPLETO

/70

0200 A2 LDX #00
 0202 BD LDA 0325, X
 0205 20 JSR E97A
 0208 E8 INX
 0209 E0 CPX #13
 020B D0 BNE 0202
 020D 20 JSR E95F
 0210 8D STA 0400
 0213 C9 CMP #4E
 0215 F0 BEQ 0200
 0217 C9 CMP #53
 0219 F0 BEQ 021E
 021B EA NOP
 021C EA NOP
 021D EA NOP
 021E A2 LDX #00
 0220 BD LDA 033A, X
 0223 20 JSR E97A
 0226 E8 INX
 0227 E0 CPX #0E
 0229 D0 BNE 0220
 022B 20 JSR E3FD
 022E 8D STA 0401
 0231 A9 LDA #FF
 0233 8D STA A002
 0236 AD LDA 0401
 0239 AA TAX
 023A BD LDA 0300, X
 023D 8D STA A000
 0240 E0 CPX #17
 0242 EA NOP
 0243 A2 LDX #00
 0245 BD LDA 034A, X
 0248 20 JSR E97A
 024B E8 INX
 024C E0 CPX #0E
 024E D0 BNE 0245
 0250 20 JSR E3FD
 0253 8D STA 0402
 0256 A9 LDA #FF
 0258 8D STA A003
 025B AD LDA 0402
 025E AA TAX
 025F BD LDA 0360, X
 0262 8D STA A001
 0265 EA NOP
 0266 EA NOP
 0267 EA NOP
 0268 EA NOP
 0269 EA NOP
 026A EA NOP
 026B EA NOP
 026C A2 LDX #00
 026E BD LDA 0368, X
 0271 20 JSR E97A
 0274 E8 INX
 0275 E0 CPX #0E
 0277 D0 BNE 026E
 0279 20 JSR E95F
 027C 8D STA 0403
 027F C9 CMP #53
 0281 F0 BEQ 0287
 0283 C9 CMP #4E
 0285 F0 BEQ 028A
 0287 4C JMP 0200
 028A EA NOP
 028B EA NOP
 028C EA NOP
 028D EA NOP
 028E EA NOP

ROCKWELL AIM 65

<M>=0300 00 05 11 1A
 < > 0304 20 28 31 39
 < > 0308 42 E0 13 00
 < > 030C 00 00 00 00
 < > 0310 55 5D 68 72
 < > 0314 7D 88 95 A4
 < > 0318 B4 CC 00 00
 < > 031C 00 00 00 00
 < > 0320 FF 20 20 20
 < > 0324 20 20 51 55
 < > 0328 49 45 52 45
 < > 032C 53 20 4D 4F
 < > 0330 56 45 52 4D
 < > 0334 45 3F 20 20
 < > 0338 00 00 20 43
 < > 033C 55 41 4E 54
 < > 0340 4F 53 20 43
 < > 0344 4D 3F 20 20
 < > 0348 20 20 20 43
 < > 034C 55 41 4C 20
 < > 0350 4D 4F 54 4F
 < > 0354 52 3F 20 20
 < > 0358 20 20 20 20
 < > 035C 20 20 20 20
 < > 0360 00 01 02 04
 < > 0364 00 00 00 00
 < > 0368 20 4D 41 53
 < > 036C 20 41 43 43
 < > 0370 49 4F 4E 3F
 < > 0374 20 20 20 20
 < > 0378 20 20 20 20
 < > 037C 20 20 20 20

CONCLUSIONES

Cuando se decidió proponer un diseño para el control de un manipulador mecánico como tema de tesis se sabía de las dificultades de desarrollar un trabajo de tal extensión y complejidad y no faltó el pesimista que advirtiera la dificultad del tema y que asegurara que nunca se le vería fin. Contando con esto se fijaron metas realistas y modestas, sobre todo era importante que la investigación se enfocara de manera precisa, por lo que se pensó en un tipo de control sencillo, accesible a todo aquél que se interesara en la implementación de un mecanismo autómatas. Este tipo de mecanismo entra en la clasificación de *robot de 1a. generación* entendiendo esto como un dispositivo que efectúa tareas en forma independiente y automática, pero que no cuenta con ninguna realimentación exterior.

La aportación de este trabajo al amplio campo de la Robótica es el desarrollo de una interfaz de acoplamiento para comunicar al microcomputador con los motores actuadores del manipulador. Se considera que el diseño de este circuito interfaz

facilita de manera importante el control de los motores de corriente directa proporcionándoles una realimentación automática de su posición simplificando en esa forma los programas de control.

Se deja a futuros investigadores en el tema la construcción de la estructura, así como la implementación de otros tipos de sensores y la programación de trayectorias no rectilíneas.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Safford Edward. *Handbook of advanced robotics*. Pasadena Ca., Tab books inc, 1982.
- 2.- Zacks Rodney. *6502 Applications book*. Berkeley Cal., SYBEX, 1979.
- 3.- Bonner Susan and Shin Kang. "A comparative study of robot languages". *IEEE Computer*. 1982, pp 82-96.
- 4.- Bollinger John and Duffie Neil. "Sensors and actuators". *Spectrum*. May 1983, pp 74-83.
- 5.- Lester V. Ottinger. "Engineering robot systems for existing facilities". *Industrial Engineering*. Vol. 14, No. 2, Febr 82, pp 20-23.
- 6.- Morris Henry. "Where do robots fit in industrial control?". *Control Engineering*. Vol. 29, No. 3, febr 82, pp 58-64.
- 7.- Holzer A. J. "Some Critical areas in robotics research". *Computers in Industry*. Vol. 2, No. 3, Oct. 81, pp 199-208.
- 8.- Hill W. John. "Introducing mini-mover 5". *Robotics age*. Summer 80, pp 18-25.
- 9.- Hill W. John. "The microbot teach mover" *Robotics age*. Vol. 4, No. 4, July/Aug. 82, pp 12-20.
- 10.- Jemelka Jorg R. "Some notes on the Rhino XR-1 and mini-mover 5". *Robotics age*. Vol. 4, No. 4, July/Aug. 82, pp 21-23.

- 11.- Hollingshead Paul. "Use your Apple as a robotics development system". *Robotics age*. Vol. 4, No. 4, July/Aug. 82, pp 26-28.
- 12.- Derry James F. "IBM Robots". *Robotics age*. Vol. 4, July/Aug. 82, pp 29-33.
- 13.- Lee George and Arbor Ann. "Robot Arm kinematic's dynamics and control". *IEEE Computer*. 1982, pp 62-79.
- 14.- Powers William. "The Nature of robots". *BYTE*. July 79, pp 134-152.
- 15.- Heginbotham W.B. "Robots and automatic factories" *Engineers Digest*. Vol. 14, No. 12, Dec 80, pp 19-23.
- 16.- Bradt Jack and Allred James. "Materials handling systems". *IEEE Spectrum*. May 83, pp 74-83.
- 17.- Callahan Michael. "The state of industrial robotics". *BYTE*. Oct 82, pp 128-142.
- 18.- Hayes B.D. and Blaesi La Von. "Training a new generation of robotics personnel". *Robotics world*. April 83, pp 15-20.

APENDICE A

CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE EL CONTROL DE MOTORES DE CORRIENTE DIRECTA Y SU APLICACION EN ROBOTICA.

Un robot es un sistema que consiste en un manipulador mecánico, un microcomputador, sensores y actuadores. Los actuadores pueden ser hidráulicos, motores de corriente directa (C.D.) ó motores de pasos. Los motores de pasos son limitados en resolución y potencia por lo tanto adecuados solo para robots pequeños, también tienden a ser muy ruidosos y se usan muy raramente en la práctica. Los actuadores hidráulicos son muy apropiados para robots grandes donde los requerimientos de potencia son muy altos, sin embargo el costo de los actuadores hidráulicos no es proporcional a la potencia requerida, por lo tanto no son recomendables para robots pequeños ni medianos, también representan ciertos problemas en términos de mantenimiento. Los motores de C.D son ideales para manejar robots medianos y pequeños, además tienen la ventaja de que cuentan

Con un amplio rango de potencia y son relativamente baratos.

En este apéndice se plantean en forma general las relaciones básicas que intervienen en el control de un motor de corriente directa. Para esto en la fig 1, se muestra el diagrama eléctrico de un motor de C.D. en el cual se desprecia la inductancia.

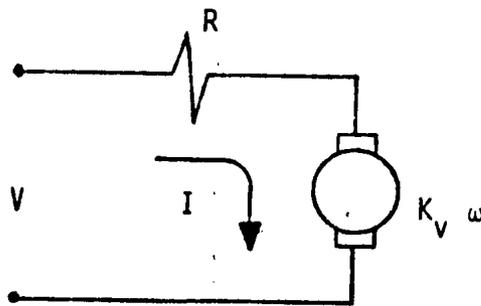


Fig 1. Diagrama eléctrico para un motor de corriente directa.

$$V - IR = K_V \omega \quad (1)$$

De esta relación observamos que la velocidad de rotación de la flecha del motor (ω) es proporcional al voltaje aplicado (V) menos la caída debida a la resistencia interna del motor (R). K_V es la constante de conversión de energía electromecánica.

En la fig 2. se tiene un sistema que representa un eje de movimiento donde se desprecian la flexibilidad de la flecha y el amortiguamiento viscoso.

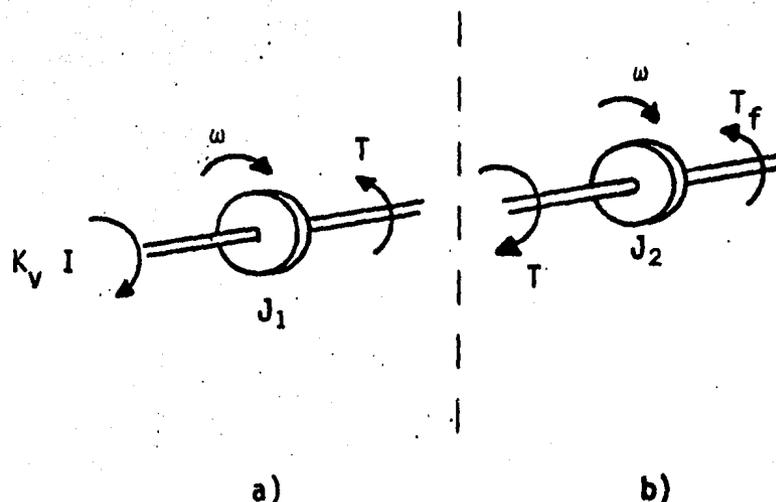


Fig 1. a) Diagrama mecánico de un motor de C.D. b) Diagrama mecánico de una unión o eje de movimiento.

En las expresiones (2) y (3) se indica la relación que guardan la corriente (I) y el par (T) en función del momento de inercia (J) y la aceleración angular ($\dot{\omega}$), para este caso.

$$K_v I - J_1 \dot{\omega} = T \quad (2)$$

$$T_f + J_2 \dot{\omega} = T \quad (3)$$

T_f : par ligado a la fricción

De las ecuaciones (1) y (2) vemos que hay dos alternativas de control. Una es controlar el par de salida (T) manipulando la corriente del motor (I) y la otra es controlar la velocidad de rotación del motor (ω) manipulando el voltaje (V).

La alternativa basada en la manipulación de la corriente trata al par producido por el motor como entrada para el brazo robot. La segunda alternativa basada en la manipulación del

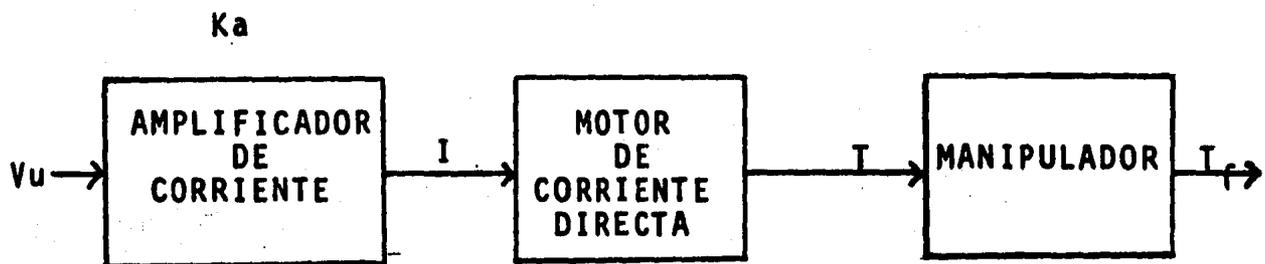
voltaje trata a la estructura como una alteración en la fecha del motor, esa alteración se entenderá como una carga actuando sobre dicha flecha. Estas diferencias tienen básicamente importancia práctica para el control final y el diseño del sistema.

En la práctica ciertas tareas exigen controlar la velocidad (por ejemplo pintar con atomizador), en tanto que otras requieren controlar el par (ciertas tareas de ensamblado). Se han hecho algunos intentos para desarrollar técnicas que satisfagan simultáneamente especificaciones de posición y fuerza usando sensores en la muñeca del prototipo para dar realimentación al par. Sin embargo en las ecuaciones (1) y (2) se ve claramente que no podemos controlar independientemente velocidad y par.

Por lo dicho anteriormente se discutirán las dos alternativas de control y sus relativas ventajas y desventajas. Comenzando por el control del par.

Control del Par en Malla Abierta

La mejor manera de controlar el movimiento del manipulador es aplicando un par apropiado para contrarrestar fricción y pares dinámicos, aunados al momento de inercia. El control del par se basa en la manipulación de la corriente que se aplica al motor. Para este propósito se utiliza un amplificador de corriente, que produce una corriente proporcional a su entrada de voltaje (V_u). El motor producirá un par (T) de salida proporcional a la corriente de entrada e independiente de la velocidad angular.



$$I = K_a V_u \quad (4)$$

Representación esquemática del control de par en lazo abierto.

El problema con este tipo de sistema es que se necesita tener una aproximación (estimada) del cambio en el momento de inercia (J) para obtener la posición angular de la flecha del motor (θ) y la velocidad de rotación (ω). Si el valor de J es más pequeño de lo que se espera entonces el par (T) aplicado es mayor que el requerido. Este par será traducido a mayor aceleración y consecuentemente a mayor velocidad. Esto puede

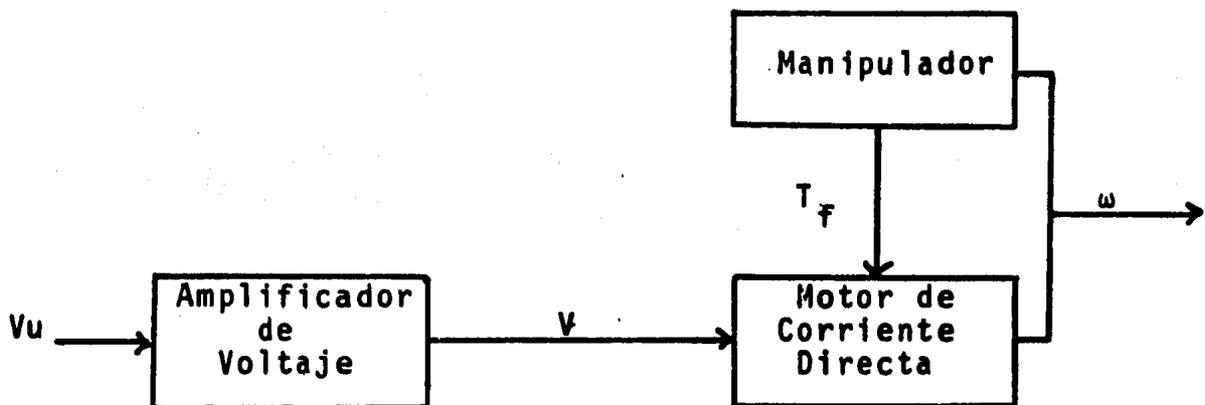
tener consecuencias desastrosas como por ejemplo cuando una pieza puede chocar y romperse ya que ω no es cero cuando se desea ajustar la posición.

Una ventaja importante de este control es que podemos mantener un par específico cosa muy útil para algunas aplicaciones de robótica como prensado y atornillado durante una operación de ensamblado. Otra ventaja es que cuando el manipulador encuentra resistencia (golpea un obstáculo) éste mantendrá un par constante y no tratará de tomar potencia adicional de la fuente eléctrica por lo tanto no existirá el problema de quemar el motor.

En este sistema de control de par podemos tener una realimentación de corriente (o par) en el bloque de amplificación de corriente. Esta realimentación no cambia la estructura del control ya que todavía es malla abierta para ω , la dinámica del sistema sólo provee mejor control de la corriente (ó par) y compensa para no linealidades del amplificador de corriente y provee un mejor ajuste de la ganancia completa del sistema.

Control de Velocidad en Malla Abierta

La segunda alternativa es controlar la velocidad del manipulador variando el voltaje del motor utilizando un amplificador de voltaje como se muestra en el diagrama.



Representación esquemática del control de velocidad en Malla abierta.

En el diagrama de bloques la salida del sistema es ω , el par (T_f) debido a la fricción actúa como una perturbación en el sistema y el momento de inercia (J) del sistema varía con el movimiento del brazo. La principal ventaja de este control es que las variaciones en J afectan sólo a la constante de tiempo de la respuesta, pero no el resultado final del movimiento.

El manipulador prescinde de J para aproximarse al objeto suavemente (a baja velocidad). El problema en este sistema es que el par no está controlado, el sistema literalmente obtendrá del amplificador de voltaje cuanta corriente necesite para vencer la perturbación (ó par). Esto puede llevarnos a quemar el amplificador cuando el brazo encuentra un obstáculo

rígido. Este problema puede ser corregido usando un limitador de corriente. Otra desventaja es que este sistema no es recomendado para tareas de ensamblado (prensado y atornillado) las cuales requieren un par constante. Otra consideración importante es el hecho de que el amplificador de voltaje presenta no linealidades. En la práctica se incluye un tacómetro. El tacómetro se usa para proveer una señal de realimentación proporcional a la velocidad de rotación de la flecha (esto ayuda a reducir la constante de tiempo), reduce también el efecto del par de carga y cualquier no linealidad en el amplificador haciendo un ajuste en la ganancia del sistema.

Control de Velocidad en Malla Cerrada.

El análisis anterior de la estructura en malla abierta es útil para extender las características básicas de los dos sistemas. En la actualidad el control en malla cerrada utiliza decodificadores como realimentación. La salida del decodificador es un tren de pulsos en el cual el número de pulsos corresponde a la velocidad angular. La realimentación para este control es por muestreo de datos usando la computadora como parte de la realimentación. La computadora muestrea la señal codificada a una frecuencia constante y la compara con una referencia producida en la computadora. El error resultante en la salida de la computadora es transmitido de un convertidor digital analógico al drive del motor, de ahí se realimenta el decodificador y, este a su vez envía pulsos a un contador donde en cada interacción se acumula (ΔP) e inmediatamente se borra.

Para lograr que la velocidad angular sea constante y tenga un error cero en estado estable, la diferencia entre el valor de referencia de la velocidad angular y su valor actual deben integrarse.

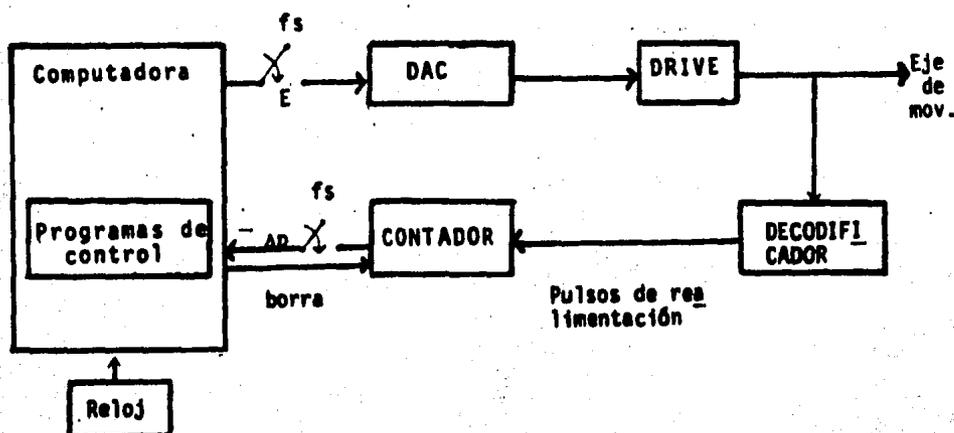


Diagrama de un motor controlado por computadora

APENDICE B

CONSIDERACIONES DE DISEÑO PARA EL CONVERTOR DIGITAL-ANALOGICO.

La tabla de valores que relaciona las posiciones del manipulador, con el voltaje de control que se aplica a los motores, está almacenada en forma digital y disponible en el puerto de salida del microcomputador AIM-65 . Por consiguiente para obtener los voltajes analógicos necesarios para operar los motores se requiere de un convertidor digital-analógico, cuyo diseño y cálculo de valores se presentan a continuación.

El diseño del convertidor seleccionado está basado en el empleo de un amplificador operacional en configuración sumadora, cuya ganancia se varía en función de los valores binarios que se aplican a la entrada, obteniéndose a la salida un voltaje analógico proporcional a la entrada digital. Los circuitos que se emplean en esta aplicación se muestran en las figuras 1a, 1b y 1c.

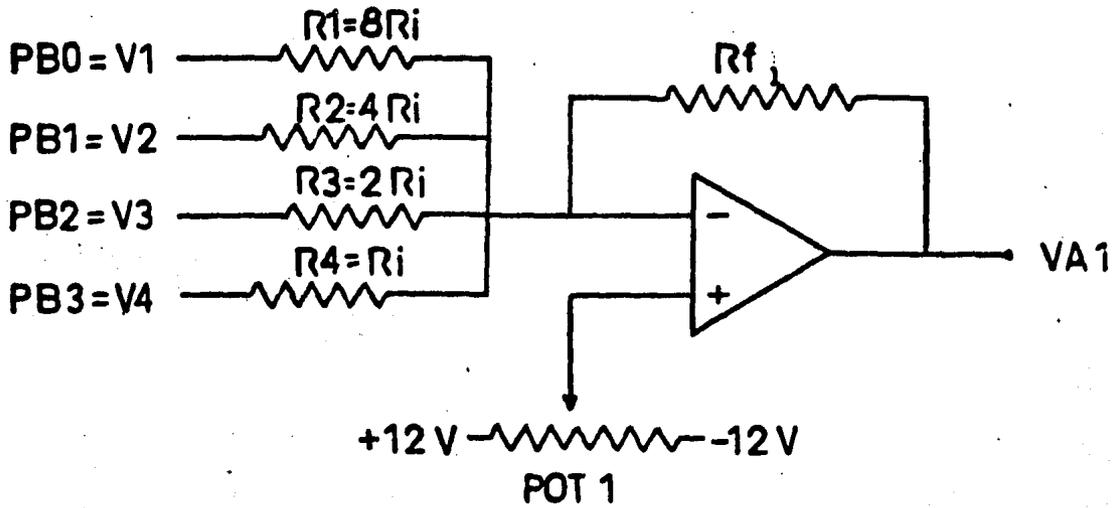


Fig 1a. Sumador # 1

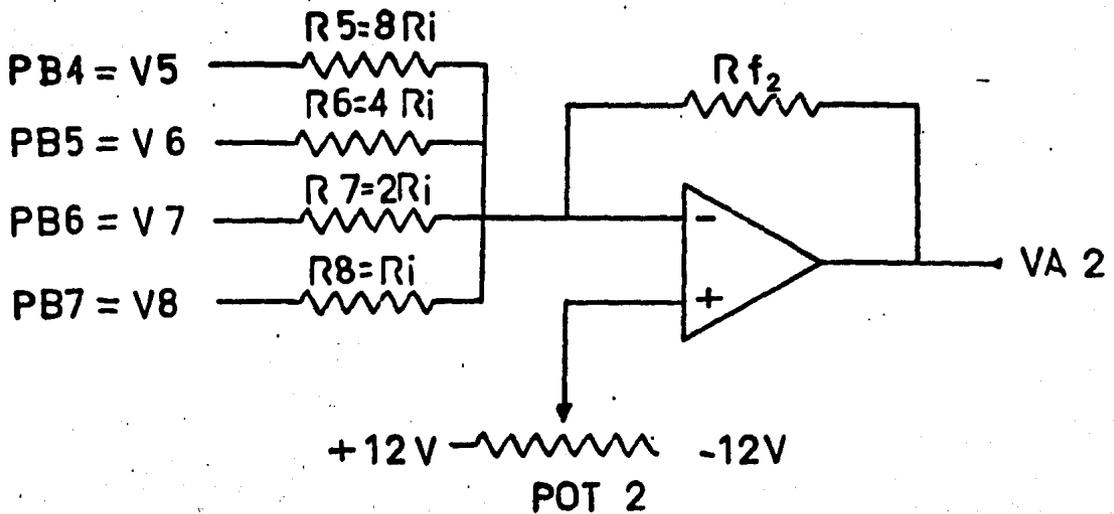


Fig 1b. Sumador # 2

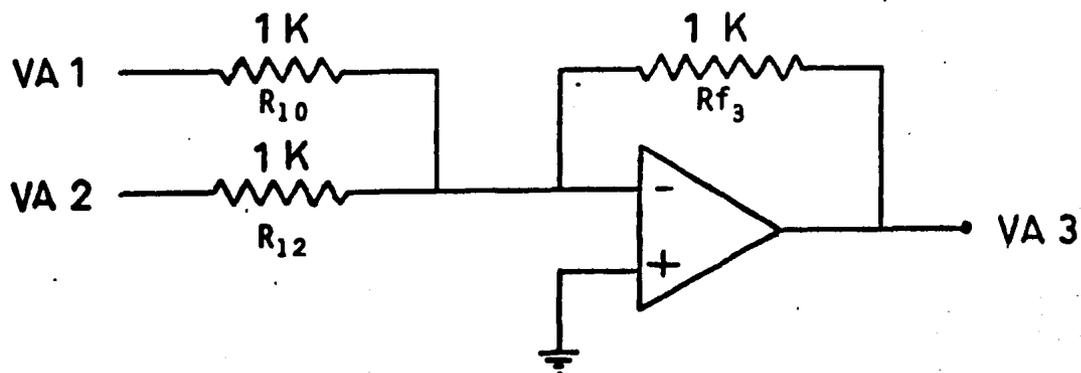


Fig 1c. Sumador # 3

VA1 y VA2 corresponden a los voltajes digitales de entrada al conversor y VA3 es el voltaje analógico de salida.

La decisión de utilizar dos sumadores con cuatro entradas cada uno en lugar de uno solo con ocho entradas, se basó fundamentalmente en la idea de facilitar la selección de los valores de las resistencias; de manera tal que no se tengan valores muy grandes que puedan afectar la estabilidad del amplificador o muy pequeñas que carguen las salidas de los latches. El sumador # 3 nos proporciona la señal de salida de los sumadores # 1 y # 2 y además invierte la señal para darnos la polaridad correcta.

Para el cálculo del voltaje de salida en cada sumador tenemos la siguiente expresión:

Para el sumador # 1

$$V_{a1} = -\left(\frac{R_{f1}}{R_1} V_1 + \frac{R_{f1}}{R_2} V_2 + \frac{R_{f1}}{R_3} V_3 + \frac{R_{f1}}{R_4} V_4\right)$$

Para el sumador # 2

$$V_{a2} = -\left(\frac{R_{f2}}{R_5} V_5 + \frac{R_{f2}}{R_6} V_6 + \frac{R_{f2}}{R_7} V_7 + \frac{R_{f2}}{R_8} V_8\right)$$

Finalmente el voltaje analógico total a la salida del sumador # 3, está dado por

$$V_{a3} = -\left(\frac{R_{f3}}{R_{10}} V_{a1} + \frac{R_{f3}}{R_{12}} V_{a2}\right) = -(V_{a1} + V_{a2})$$

Por otro lado para definir el valor del bit menos significativo, dividimos el voltaje de referencia que es de 12 V entre el valor decimal de ocho bits.

$$\text{Valor del bit menos significativo} = \frac{12}{255} = 0.047 \text{ V}$$

LSB	2 ⁰	1 - 0.047 V
	2 ¹	2 - 0.094 V
	2 ²	4 - 0.192 V
	2 ³	8 - 0.380 V
	2 ⁴	16 - 0.750 V
	2 ⁵	32 - 1.5 V
	2 ⁶	64 - 3.0 V
MSB	2 ⁷	128 - 6.0 V

Así se multiplica por 2, 4 y 8 el valor de la resistencia R_i considerando $R_{f1} = 1$ o ganancia unitaria para los cuatro primeros bits del sumador # 1 y $R_{f2} = 16$ o ganancia 16 para los cuatro últimos bits más significativos o sumador # 2 y así conseguiremos a la salida del sumador # 3 la conversión deseada. Nótese que el mismo procedimiento puede ser usado con cualquier referencia variando solamente el valor de R_i . El valor de voltaje para el bit más significativo debe ser de 6V.

De donde:

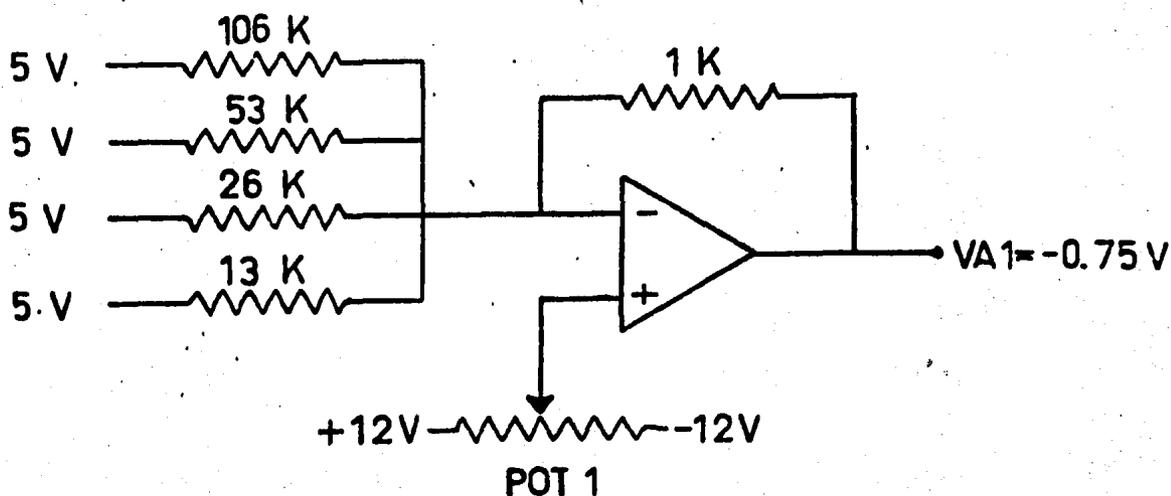
$$\frac{R_{f2}}{R_i} V_8 = 6V$$

$$R_i = \frac{16}{6} (5) = 13.33 \text{ K}$$

$$\frac{R_{f1}}{R_i} V_4 = 0.380 \text{ V}$$

$$R_i = \frac{1}{0.380} (5) = 13.33 \text{ K}$$

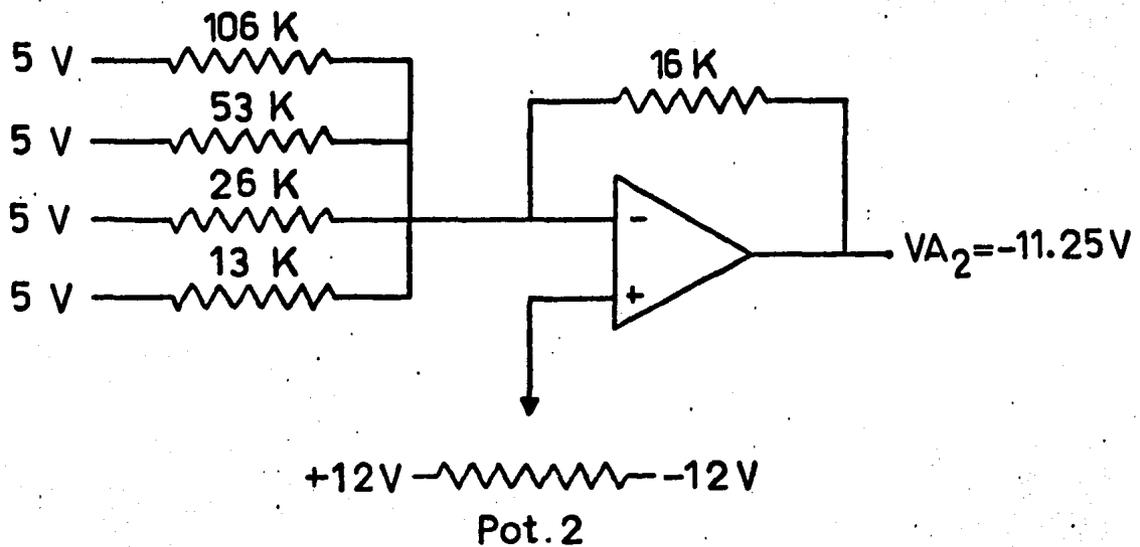
Los cálculos para el caso en que los puertos de salida PB0 a PB3 estén en nivel digital 1 ó sea $PB0 = PB1 = PB2 = PB3 = 5V$ de nivel analógico para el sumador # 1.



$$V_{a_1} = -\left(\frac{1}{106} (5) + \frac{1}{53} (5) + \frac{1}{26} (5) + \frac{1}{13} (5)\right)$$

$$V_{a_1} = -(0.047 + 0.094 + 0.192 + 0.380) = -0.75 \text{ V}$$

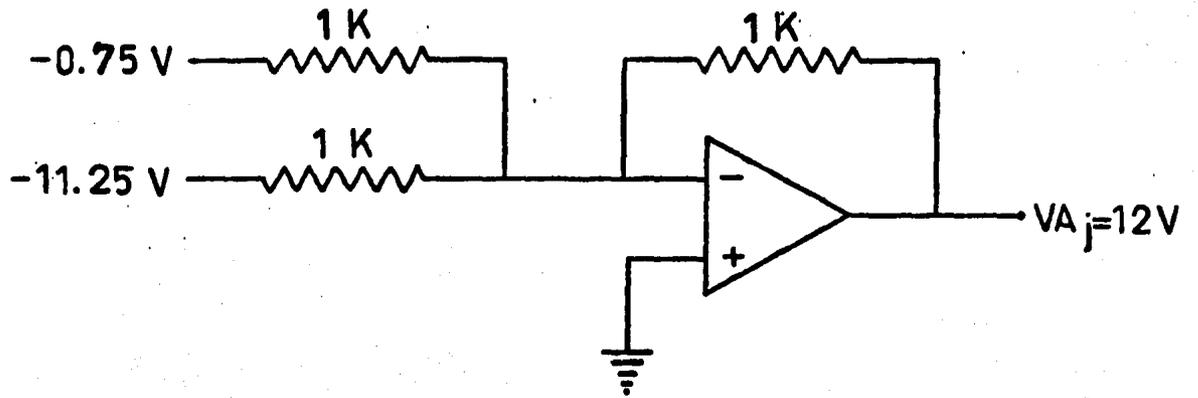
En el sumador # 2 tenemos $PB_4 = PB_5 = PB_6 = PB_7 = 5V$



$$V_{a_2} = -\left(\frac{16}{106} (5) + \frac{16}{53} (5) + \frac{16}{26} (5) + \frac{16}{13} (5)\right)$$

$$V_{a_2} = -(0.750 + 1.5 + 3.0 + 6.0) = -11.25$$

finalmente para el sumador # 3



$$V_{a_3} = -((-0.75) + (-11.25)) = 12V$$

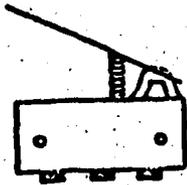
APENDICE C

SENSORES DE POSICION USADOS EN ROBOTICA

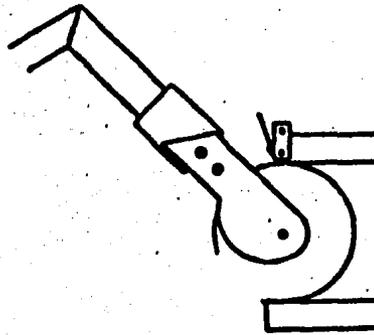
Microinterruptores

Se tiene una estructura capaz de girar la muñeca, abrir y cerrar una pinza, extender el brazo, etc. ¿Cómo sabemos si el movimiento de la estructura es el correcto? ¿Si la pinza se cerró?, en una palabra ¿Cómo podemos tener una comprobación continua de la posición de las uniones (motores) en la estructura? Este tipo de información debe dársele al microcomputador si queremos que la pinza sea capaz de alcanzar un objeto. Nosotros como seres humanos usamos multitud de sensores, siendo el principal el de la vista. Los sistemas electrónicos de visión son muy complicados y costosos, existen métodos más simples como lo sería un dispositivo llamado interruptor-limitador. Los interruptores-limitadores, como su nombre lo indica, detectan un objeto en movimiento que alcanza su entorno físico. Los inte-

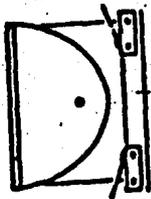
ruptores-limitadores sirven para asegurar que no continúe el movimiento cuando es imposible físicamente y también para detectar dónde está el brazo o la tenaza en un momento determinado.



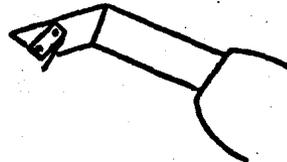
Microinterruptor



Microinterruptor en la muñeca



Microinterruptor en el hombro

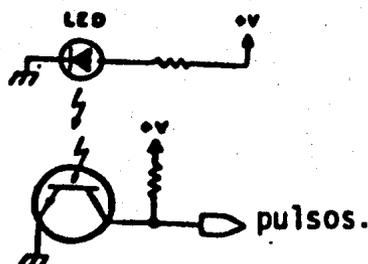
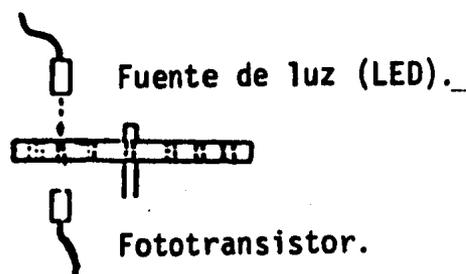
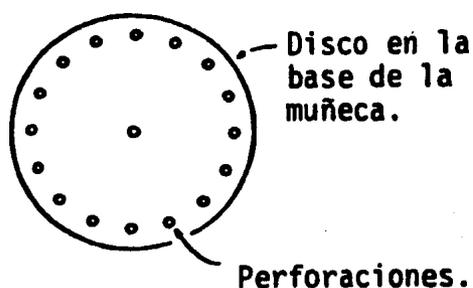


Microinterruptor en la tenaza

Microinterruptores usados en un manipulador

Sensores optoelectrónicos

En estos sensores se emplea un detector que puede sentir la presencia o ausencia de luz. En este tipo de sensores (fototransistores) el voltaje de control en la base es sustituido por la luz aplicada a través de un pequeño lente. Para detectar posición, se puede usar un disco con una serie de perforaciones, este disco está localizado en la base de la muñeca. La fuente de luz será un LED* el haz de luz pasará a través de los agujeros hacia el otro lado. La luz que recibirá el fototransistor en su base, lo activará cerrando el circuito. Ahora, si la muñeca gira, el disco se mueve. Los agujeros quedan fuera del haz de luz y se abrirá el circuito desactivando el fototransistor. Esto proporciona una serie de pulsos prendido-apagado que pueden ser contados por el microcomputador, determinando la posición del mecanismo.



* LED: Light emitting diode, (diodo emisor de luz)

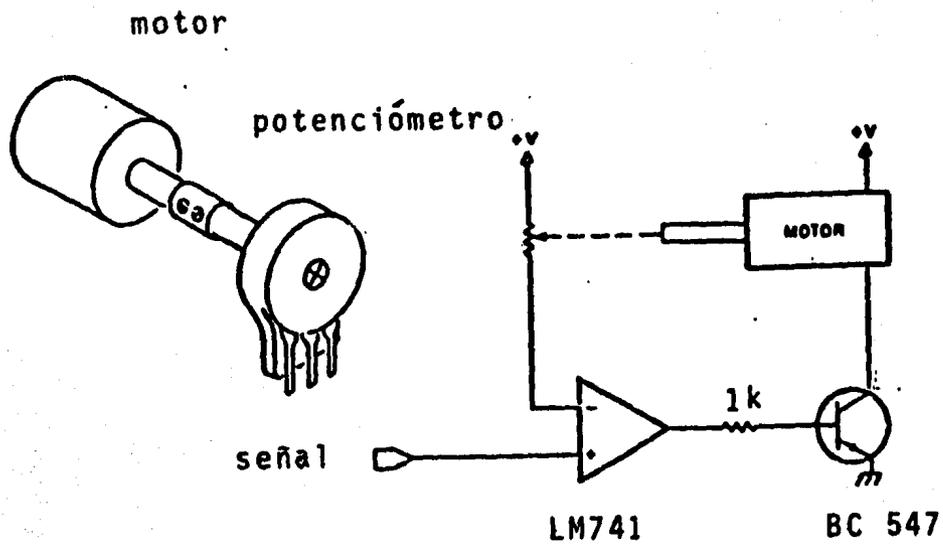
Los dos métodos anteriormente señalados tienen una desventaja: sólo pueden reportar posición tan pronto como se lo permite la proximidad al otro punto, el interruptor-limitador sólo sensa el final de la excursión del mecanismo y los sensores optoelectrónicos permiten incrementos en la posición muy pequeños, tan pequeños como el número de perforaciones permitidas en la base. Entonces. ¿Qué hacer si se desea un reporte constante de la posición? La respuesta es pensar en una realimentación que nos permita saber donde se encuentra un motor en un momento determinado. Un método que resulta conveniente y que se ajusta a las necesidades del diseño es el empleo de un dispositivo llamado:

Servomecanismo

Con este nombre se conoce a los mecanismos que se corrigen automáticamente. Para esta aplicación específica se trata de que ayuden al motor a posicionarse en un punto determinado.

En el diseño de la interfaz se usa un potenciómetro para efectuar la realimentación. La variación de voltaje resultante del potenciómetro se aplica a un circuito que mide el valor del voltaje y lo compara a un nivel predefinido (la posición que se desea). Mientras los dos voltajes no sean iguales el circuito deja girar al motor, en uno u otro sentido dependiendo del signo de la diferencia entre los dos voltajes. Cuando los dos voltajes son iguales, el circuito detiene el giro del motor quedando este en la posición que se deseó asumiera.

La flecha del potenciómetro se conecta físicamente al mecanismo de rotación del objeto controlado (las flechas de los motores que en la estructura representan a las uniones del manipulador).



Acoplamiento motor-potenci6metro y
circuito equivalente

APENDICE D**HOJAS DE DATOS DE LOS CIRCUITOS INTEGRADOS USADOS.**

LM741/LM741A/LM741C/LM741E



Operational Amplifiers/Buffers

LM741/LM741A/LM741C/LM741E operational amplifier general description

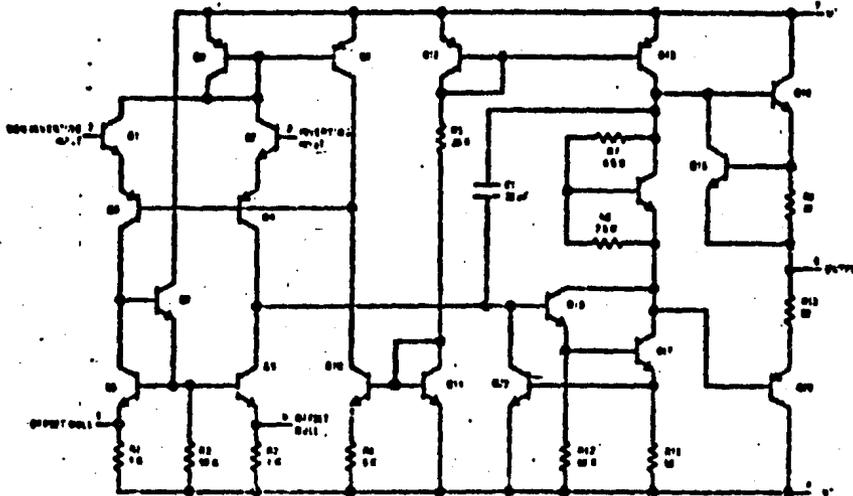
The LM741 series are general purpose operational amplifiers which feature improved performance over industry standards like the LM709. They are direct, plug-in replacements for the 709C, LM201, MC1439 and 74b in most applications.

The amplifiers offer many features which make their application nearly foolproof: overload pro-

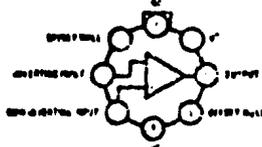
tection on the input and output, no latch-up when the common mode range is exceeded, as well as freedom from oscillations.

The LM741C/LM741E are identical to the LM741/LM741A except that the LM741C/LM741E have their performance guaranteed over a 0°C to +70°C temperature range, instead of -55°C to +125°C.

schematic and connection diagrams (Top View)



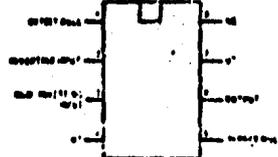
Metal Can Package



Note: Pin 8 is connected to case.

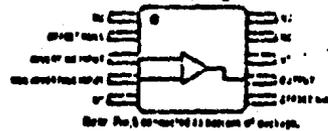
Order Number LM741M, LM741AM,
LM741CM or LM741EM
See NS Package H39C

Dual-In-Line Package



Order Number LM741CN or LM741EN
See NS Package N30R
Order Number LM741CJ or LM741EJ
See NS Package J31A

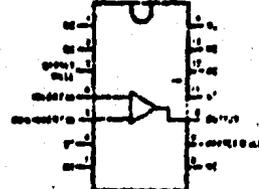
Flat Package



Note: Pin 8 is connected to bottom of package.

Order Number LM741F or LM741AF
See NS Package F10A

Dual-In-Line Package



Order Number LM741CD, LM741ED,
LM741AD or LM741AE
See NS Package F11B
Order Number LM741D, LM741E
See NS Package J31A
Order Number LM741CJ or LM741EJ
See NS Package J31A

LM741/LM741A/LM741C/LM741E

electrical characteristics (con't)

PARAMETER	CONDITIONS	LM741A/LM741E			LM741			LM741C			UNITS
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Supply Voltage Rejection Ratio	$T_{A\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{A\text{MAX}}$ $V_S = \pm 20V$ to $V_S = \pm 15V$ $R_S \leq 50\Omega$ $R_L \leq 10k\Omega$	86	86		77	86		77	86		dB
Transient Response Rise Time	$T_A = 25^\circ\text{C}$, Unity Gain		0.25	0.8		0.3			0.3		μs
				0.0	20		5			5	
Bandwidth (Note 4)	$T_A = 25^\circ\text{C}$	0.437	1.5								MHz
Slew Rate	$T_A = 25^\circ\text{C}$, Unity Gain	0.3	0.7		0.5			0.5			V/ μs
Supply Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$				1.7	2.8		1.7	2.8		mA
Power Consumption	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $V_S = \pm 20V$ $V_S = \pm 15V$		80	180				80	85		mW
						80	85		80	85	
LM741A	$V_S = \pm 20V$ $T_A = T_{A\text{MIN}}$			165							mW
	$T_A = T_{A\text{MAX}}$			135							mW
LM741E	$V_S = \pm 20V$ $T_A = T_{A\text{MIN}}$			150							mW
	$T_A = T_{A\text{MAX}}$			150							mW
LM741	$V_S = \pm 15V$ $T_A = T_{A\text{MIN}}$				60	100					mW
	$T_A = T_{A\text{MAX}}$				45	75					mW

Note 1: The maximum junction temperature of the LM741/LM741A is 150°C, while that of the LM741C/LM741E is 100°C. For operation at elevated temperatures, devices in the TO-5 package must be derated based on a thermal resistance of 150°C/W junction to ambient, or 45°C/W junction to case. The thermal resistance of the dual-in-line package is 100°C/W junction to ambient. For the flat package, the derating is based on a thermal resistance of 155°C/W when mounted on a 1/16 inch thick epoxy glass board with ten, 0.03 inch wide, 2 ounce copper conductors.

Note 2: For supply voltages less than ±15V, the absolute maximum input voltage is equal to the supply voltage.

Note 3: Unless otherwise specified, these specifications apply for $V_S = \pm 15V$, $-55^\circ\text{C} \leq T_A \leq +125^\circ\text{C}$ (LM741/LM741A). For the LM741C/LM741E, these specifications are limited to $0^\circ\text{C} \leq T_A \leq +70^\circ\text{C}$.

Note 4: Calculated value from: BW (MHz) = 0.35/Rise Time(μs).

TTL
MSI

TYPES SN54273, SN54LS273, SN74273, SN74LS273 OCTAL D-TYPE FLIP-FLOP WITH CLEAR

BULLETIN NO. DL-8 7813091, OCTOBER 1974

- Contains Eight Flip-Flops with Single-Rail Outputs
- Buffered Clock and Direct Clear Inputs
- Individual Data Input to Each Flip-Flop
- Applications Include:
Buffer/Storage Registers
Shift Registers
Pattern Generators

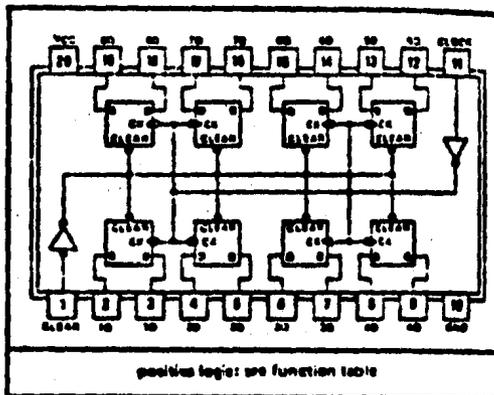
SN54273, SN54LS273 ... J PACKAGE
SN74273, SN74LS273 ... J OR N PACKAGE

description

These monolithic, positive-edge-triggered flip-flops utilize TTL circuitry to implement D-type flip-flop logic with a direct clear input.

Information at the D inputs meeting the setup time requirements is transferred to the Q outputs on the positive-going edge of the clock pulse. Clock triggering occurs at a particular voltage level and is not directly related to the transition time of the positive-going pulse. When the clock input is at either the high or low level, the D input signal has no effect at the output.

These flip-flops are guaranteed to respond to clock frequencies ranging from 0 to 30 megahertz while maximum clock frequency is typically 40 megahertz. Typical power dissipation is 39 milliwatts per flip-flop for the '273 and 10 milliwatts for the 'LS273.



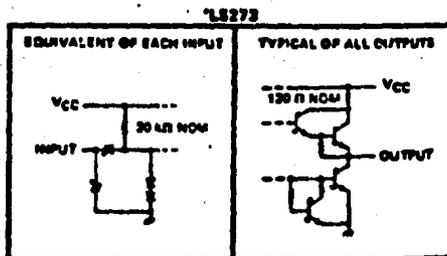
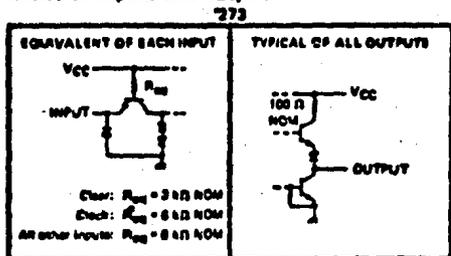
positive logic: see function table

FUNCTION TABLE
EACH FLIP-FLOP

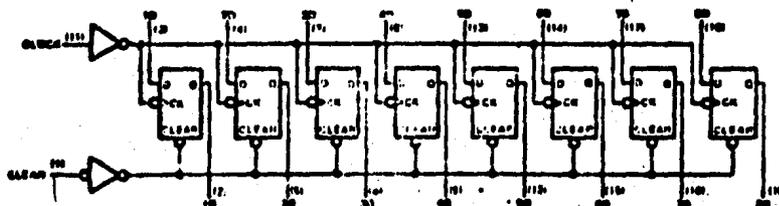
INPUTS			OUTPUT
CLEAR	CLOCK	D	Q
L	X	X	L
H	↑	H	H
H	↑	L	L
H	L	X	Q ₀

See explanation of function table on page 3-8.

schematics of inputs and output



functional block diagram



TYPES SN54273, SN74273

OCTAL D-TYPE FLIP-FLOP WITH CLEAR

absolute maximum ratings over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

Supply voltage, V_{CC} (see Note 1)	7 V
Input voltage	5.5 V
Operating free-air temperature range: SN54273	-65°C to 125°C
SN74273	0°C to 70°C
Storage temperature range	-65°C to 150°C

NOTE 1: Voltage values are with respect to network ground terminal.

recommended operating conditions

	SN54273			SN74273			UNIT
	MIN	NOM	MAX	MIN	NOM	MAX	
Supply voltage, V_{CC}	4.5	5	5.5	4.75	5	5.25	V
High-level output current, I_{OH}			-830			-800	mA
Low-level output current, I_{OL}			16			16	mA
Clock frequency, f_{clock}	0		30	0		30	MHz
Width of clock or clear pulse, t_w			165			165	ns
Setup time, t_{su}	Data input		20†	Data input		20†	ns
	Clear inactive state		25†	Clear inactive state		25†	ns
Data hold time, t_h		5†			5†	ns	
Operating free-air temperature, T_A		-55	125		0	70	°C

†The arrow indicates that the rising edge of the clock pulse is used for reference.

electrical characteristics over recommended operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS ¹	MIN	TYP ²	MAX	UNIT
V_{IH} High-level input voltage			2		V
V_{IL} Low-level input voltage				0.8	V
V_{IK} Input clamp voltage	$V_{CC} = \text{MIN}, I_I = -12 \text{ mA}$			-1.5	V
V_{OH} High-level output voltage	$V_{CC} = \text{MIN}, V_{IH} = 2 \text{ V},$ $V_{IL} = 0.8 \text{ V}, I_{OH} = -800 \mu\text{A}$	2.4	3.4		V
V_{OL} Low-level output voltage	$V_{CC} = \text{MIN}, V_{IH} = 2 \text{ V},$ $V_{IL} = 0.8 \text{ V}, I_{OL} = 16 \text{ mA}$			0.4	V
I_I Input current at maximum input voltage	$V_{CC} = \text{MAX}, V_I = 5.5 \text{ V}$			1	mA
I_{IH} High-level input current	Clear			80	mA
	Clock or D	$V_{CC} = \text{MAX}, V_I = 2.4 \text{ V}$		40	mA
I_{IL} Low-level input current	Clear			-3.2	mA
	Clock or D	$V_{CC} = \text{MAX}, V_I = 0.4 \text{ V}$		-1.6	mA
I_{OS} Short-circuit output current ³	$V_{CC} = \text{MAX}$	-18		-57	mA
I_{CC} Supply current	$V_{CC} = \text{MAX}$, See Note 2		62	94	mA

¹For conditions shown as MIN or MAX, use the appropriate value specified under recommended operating conditions.

²All typical values are at $V_{CC} = 5 \text{ V}, T_A = 25^\circ\text{C}$.

³Not more than one output should be shorted at a time.

NOTE 2: With all outputs open and 4.5 V applied to all data and clear inputs, I_{CC} is measured after a momentary ground, then 4.5 V, is applied to clock.

switching characteristics, $V_{CC} = 5 \text{ V}, T_A = 25^\circ\text{C}$

PARAMETER	TEST CONDITIONS ¹	MIN	TYP ²	MAX	UNIT
f_{max} Maximum clock frequency		30	40		MHz
t_{PHL} Propagation delay time, high-to-low-level output from clear	$C_L = 15 \text{ pF},$ $R_L = 400 \Omega,$ See Note 3		18	27	ns
t_{PLH} Propagation delay time, low-to-high-level output from clock			17	27	ns
t_{PHL} Propagation delay time, high-to-low-level output from clock			18	27	ns

NOTE 3: Load circuit and voltage waveforms are shown on Page 3-10.

TYPES SN54LS273, SN74LS273

OCTAL D-TYPE FLIP-FLOP WITH CLEAR

absolute maximum ratings over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

Supply voltage, V_{CC} (see Note 1)	7 V
Input voltage	7 V
Operating free-air temperature range: SN54LS273	-55°C to 125°C
SN74LS273	0°C to 70°C
Storage temperature range	-65°C to 150°C

NOTE 1: Voltage values are with respect to network ground terminal

recommended operating conditions

	SN54LS273			SN74LS273			UNIT
	MIN	NOM	MAX	MIN	NOM	MAX	
Supply voltage, V_{CC}	4.5	5	5.5	4.75	5	5.25	V
High-level output current, I_{OH}			-400			-400	μ A
Low-level output current, I_{OL}			4			8	mA
Clock frequency, f_{clock}	0		30	0		30	MHz
Width of clock or clear pulse, t_w			20			20	ns
Setup time, t_{su}	Data input		20			20	ns
	Clear inactive state		25			25	ns
Data hold time, t_h			5			5	ns
Operating free air temperature, T_A			-55			125	°C

† The arrow indicates that the rising edge of the clock pulse is used for reference.

electrical characteristics over recommended operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS†	SN54LS273		SN74LS273		UNIT
		MIN	TYP; MAX	MIN	TYP; MAX	
V_{IH} High-level input voltage		2		2		V
V_{IL} Low-level input voltage			0.7		0.8	V
V_{IK} Input clamp voltage	$V_{CC} = \text{MIN.}, I_I = -18 \text{ mA}$		-1.5		-1.5	V
V_{OH} High-level output voltage	$V_{CC} = \text{MIN.}, V_{IH} = 2 \text{ V},$ $V_{IL} = V_{ILmax}, I_{OH} = -400 \mu\text{A}$	2.5	3.4	2.7	3.4	V
V_{OL} Low-level output voltage	$V_{CC} = \text{MIN.}, V_{IH} = 2 \text{ V},$ $V_{IL} = V_{ILmax}, I_{OL} = 4 \text{ mA}$ $I_{OL} = 8 \text{ mA}$	0.25	0.4	0.25	0.4	V
I_I Input current at maximum input voltage	$V_{CC} = \text{MAX.}, V_I = 7 \text{ V}$		0.1		0.1	mA
I_{IH} High-level input current	$V_{CC} = \text{MAX.}, V_I = 2.7 \text{ V}$		20		20	μ A
I_{IL} Low-level input current	$V_{CC} = \text{MAX.}, V_I = -0.4 \text{ V}$		-0.4		-0.4	mA
I_{OS} Short-circuit output current ‡	$V_{CC} = \text{MAX.}$	-20	-100	-20	-100	mA
I_{CC} Supply current	$V_{CC} = \text{MAX.}$, See Note 2	17	27	17	27	mA

† For conditions shown as MIN or MAX, use the appropriate value specified under recommended operating conditions.

‡ All typical values are at $V_{CC} = 5 \text{ V}, T_A = 25^\circ\text{C}$.

§ Not more than one output should be shorted at a time and duration of short circuit should not exceed one second.

NOTE 2: With all outputs open and 4.5 V applied to all data and clear inputs, I_{CC} is measured after a momentary ground, then 4.5 V is applied to clock.

switching characteristics, $V_{CC} = 5 \text{ V}, T_A = 25^\circ\text{C}$

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
$f_{M,CLK}$ Maximum clock frequency		20	40		MHz
t_{PHL} Propagation delay time, high-to-low-level output from clear	$C_L = 15 \text{ pF},$ $R_L = 2 \text{ k}\Omega,$ See Note 4		18	27	ns
t_{PLH} Propagation delay time, low-to-high-level output from clock			17	27	ns
t_{PHL} Propagation delay time, high-to-low-level output from clock			18	27	ns

NOTE 4: Load circuit and voltage waveforms are shown on page 3-11.