



14
12
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN CONTROL DE PAR Y
VELOCIDAD DE UN MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA
POR MEDIO DE UN MICROPROCESADOR.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

Ingeniero Mecánico Electricista

P R E S E N T A

José Antonio de Jesús Arredondo Garza

MEXICO, D. F.

1984



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.

I N D I C E

CAPITULO I.-

	Pág.
1.- Introducción	
1.1.- Planteamiento del Problema	1
1.2.- Motivación del Problema	2
1.3.- Solución del Problema	2
1.4.- Bosquejo Histórico	3

CAPITULO II

2.- El Motor de Corriente Directa	6
2.1.- Introducción	6
2.2.- Ecuaciones Básicas de un Motor de C.D.	6
2.2.1.- Ecuación de velocidad	9
2.2.2.- Relaciones entre Caballo de vapor, HP, par y - velocidad.	10
2.3.- Tipos de excitación	12
2.3.1.- Motor con excitación en derivación	13
2.3.2.- Motor con excitación independiente	13
2.3.3.- Motor con excitación en serie	14
2.3.4.- Sistema Ward-Leonard de regulación de veloci- dad.	14
2.3.5.- Motores de excitación compuesta	17

CAPITULO III

3.- Análisis del Sistema de Control	19
3.1.- Introducción	19
3.2.- Sistema de control de excitación del motor	22
3.2.1.- El rectificador controlado de silicio "SCR"...	23
3.2.2.- El transistor de unijuntura bipolar "UTJ"	25

	Pág.
3.2.3.- Control de fase de un SCR disparado por un UTJ.	29
3.2.4.- El SCR con carga inductiva o resistiva	32
3.2.5.- El SCR con diodos en circuitos inductivos de corriente alterna	35
3.2.6.- El voltaje de cambio dv/dt	39
3.2.7.- Rectificador de onda completa con dos SCR _s con carga inductiva y resistiva	40
3.2.8.- Rectificador de onda completa con una carga que presenta una fuerza electromotriz	44
3.2.9.- Circuito de control de excitación del motor ..	47
3.3.- Simulación en computadora analógica de un motor de C.D. controlado por un campo y armadura.	51

CAPITULO IV

4.- Sistema de adquisición y transferencia de datos	56
4.1.- Introducción	56
4.2.- Interfaces de entrada	57
4.2.1.- El convertidor analógico-digital "A/D"	57
4.2.1.1.- Descripción funcional del convertidor A/D ..	60
4.2.1.2.- Hardware adicional empleado en combinación con el convertidor A/D y su funcionamiento..	64
4.2.2.- Los circuitos sensores	71
4.2.2.1.- El sensor de velocidad	71
4.2.2.2.- El sensor de corriente	75
4.3.- La interface de salida	77
4.3.1.- Los convertidores digital-analógico "D/A"	77

CAPITULO V

5.- Software	79
5.1.- Introducción	79
5.2.- Programas del Sistema	83
5.2.1.- Programa principal	83
5.2.2.- Subrutina "Incremento de Velocidad"	86
5.2.3.- Subrutina "Decremento de Velocidad"	87
5.2.4.- Subrutina "Decremento de Par"	90
5.2.5.- Subrutina "Incremento de Par"	90
5.2.6.- Subrutina "Delay"	91
5.3.- Listado de Programas	94

CAPITULO VI

6.- El Sistema de Control en forma Experimental	101
6.1.- Introducción	101
6.2.- Módulos del Sistema	102
6.2.1.- La fuente regulada de + 5 voltios	102
6.2.2.- El Starter Kit del Z-80	102
6.2.3.- El Sistema de Adquisición y Transferencia de - datos	104
6.2.4.- El Sistema de Control de Excitación	108
6.2.5.- El Motor de Corriente Directa	109
6.3.- El Sistema de Control en Malla Abierta	110
6.4.- El Sistema de Control en Malla Cerrada	112
6.5.- Gráficas de Respuesta Obtenidas del Sistema	114
DISCUSION.....	124
CONCLUSION	127
REFERENCIAS	128
APENDICE	130

PROLOGO

El presente trabajo es el reporte del Seminario de Tesis titulado "DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN CONTROL DE PAR Y VELOCIDAD DE UN MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA POR MEDIO DE UN MICROPROCESADOR", siendo este un trabajo de investigación interdisciplinario.- Este enfoque interdisciplinario es debido a que el diseño del sistema involucra varias ramas de la ingeniería como son las de control, electrónica, eléctrica y computación.

El desarrollo del proyecto se basó en un estudio preliminar de los aspectos históricos y algunos conceptos generales de control (Capítulo I). A partir de dichos conceptos se pasó al estudio de los motores de corriente directa en su forma más general (Capítulo II), para posteriormente plantear el Sistema de Control de par y velocidad y el sistema de excitación del motor (Capítulo III).- Una vez planteado el problema de control, se procedió al estudio de la adquisición y transferencia de datos entre el microprocesador y el motor (Capítulo IV), para lo cual fué necesario desarrollar mediante el software un programa que fuera capaz de controlar al motor (Capítulo V).- Una vez concluido el diseño del sistema se procedió a ajustar el mismo a partir de la observación del sistema en malla abierta (Capítulo VI) y para ello fué necesario utilizar algunos aparatos de medición proporcionados por el laboratorio de control de la Facultad de Ingeniería, teniendo por último este trabajo una parte de discusión y conclusión.

CAPITULO I

1.- INTRODUCCION.

El Control Automático ha jugado un papel importante en el avance de la Ciencia y la Ingeniería, debido a que se ha convertido en parte importante e integral de procesos industriales modernos y de manufactura de los más variados productos. Por ejemplo un control automático resulta esencial en operaciones industriales tales como el control de velocidad, de presión, de temperatura, humedad, etc., en industrias de proceso y maquinado, manejo y armado de piezas mecánicas en las industrias de fabricación.

En la actualidad el uso de computadoras digitales en sistemas de control automático, ha logrado verdaderos avances teórico prácticos en esta rama y muchas más.

1.1.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Para poder plantear el problema necesitamos plantear una definición de control automático que sea lo suficientemente satisfactorio a nuestros fines de control.- Por lo tanto, un control automático es aquel que compara el valor efectivo de la salida de una planta con el valor deseado, determinando así la desviación y produciendo una señal de control que sea capaz de reducir la desviación a cero o a un valor muy pequeño.

En base a lo antes expuesto lo que se desea es construir un controlador utilizando un microprocesador que sea capaz de mantener par y velocidad constantes en un motor de c.d. y que sea lo suficientemente versátil para poderse usar en alguna planta industrial en donde sea de suma importancia mantener el par y la velocidad constantes.

El diseño y construcción de este control puede presentar serias complicaciones relativas a la estabilidad del sistema, debido a que un microprocesador puede resolver el algoritmo de control muchas veces más rápido que el proceso que realiza la planta y mandar señales de control inadecuadas haciendo que el sistema de control funcione en forma errónea.- Más adelante detallaré paso a paso los problemas que presentó el diseño de este control.

1.2.- MOTIVACION DEL PROBLEMA.

El principal motivo por el cual quise desarrollar un proyecto de este tipo, fué el deseo de diseñar un sistema de control, en base a un microprocesador, debido al gran auge que este dispositivo ha cobrado gracias a su extensa aplicación en diversos campos, su gran versatilidad y su bajo costo. Además este proyecto me daba la oportunidad de comenzar a adquirir experiencia en el manejo de microprocesadores aplicados a control de sistema físicos, permitiéndome a futuro seguir experimentando en este campo.

1.3.- SOLUCION DEL PROBLEMA.

Para poder resolver este problema fue necesario utilizar dos circuitos para disparo de tiristores independientes entre sí que nos regularan el voltaje aplicado al campo y la armadura del motor de c.d., un sensor de corrientes en la armadura y un sensor de velocidad y ver que resultado se obtenía del sistema de malla abierta para diseñar el control del sistema en malla cerrada. El diseño también implicó, la construcción de un interfase para el microprocesador que fuera capaz de mandar la orden de control al motor y de recibir la información del estado actual del mismo.

Finalmente se tuvieron que solucionar algunos problemas de software para hacer que el sistema fuera estable, concluyendo así satisfactoriamente el proyecto. Cabe hacer la aclaración que este proyecto puede decirse que es un modelo físico a escala de lo que sería ya en la realidad.

1.4.- BOSQUEJO HISTORICO.

En el Siglo XVIII se inició la primera revolución industrial, coincidiendo en esa misma época con el desarrollo del primer trabajo significativo en control automático, el cual fué un regulador centrífugo para el control de velocidad de una máquina de vapor hecha por James Watt.

A mediados del Siglo XIX James C. Maxwell, analiza por primera vez diversos tipos de gobernadores de velocidad y relacionó el problema de estabilidad de los mismos con un algebraico, el cual fué posteriormente resuelto por Hurwitz.

En 1922 Minorsky trabajó en controles automáticos de dirección de barcos y mostró como se podría determinar la estabilidad a partir de las ecuaciones diferenciales que describe el sistema.

Alrededor de 1930 Nyquist y Bode desarrollaron técnicas de análisis para sistemas retroalimentados, utilizando conceptos de respuesta en frecuencia, los cuales posibilitaron más tarde a los ingenieros en el diseño de sistemas de control realimentado lineal.

En 1932 se considera en Londres la posibilidad de construir un robot capaz de realizar algunas de las funciones humanas, utilizando varios de los conceptos ya desarrollados.

En 1934 Hazen introdujo el término servomecanismos para los sistemas de control de posición y estudió el diseño de servomecanismos repetidores capaces de seguir estrechamente una entrada cambiante.

Durante la Segunda Guerra Mundial el interés en aplicaciones bélicas, hizo que se consideraran problemas de dirección y guía de proyectiles balísticos, lo que tuvo como consecuencia el estudio de sistemas estocásticos y no lineales.

A fines de la década de los cuarentas y hasta los primeros años de la siguiente, se desarrolló completamente el método del lugar de las raíces en diseño de sistemas de control, quedando en base a esto y lo anteriormente expuesto, perfectamente definidos las bases de la teoría de control clásica.

En 1950 Estados Unidos utiliza los primeros robots destinados al manejo de combustible nuclear y posteriormente se comenzarán a utilizar en el control de diversos procesos industriales.

A finales de la década de los cincuentas, gracias al advenimiento de las computadoras digitales, se han redescubierto las variables de estado y se comienzan a estudiar más profundamente problemas tales como optimización y control bajo incertidumbre.

En esa misma década se comienza a desarrollar las técnicas de control numérico y control jerarquizado. También se comienzan a desarrollar las técnicas de conversión analógico-digital y digital-analógico.

En la década de los sesentas, se desarrollan las técnicas de diseño de filtros digitales, con los cuales se hace posible el procesamiento digital de señales analógicas y la simulación de sistemas analógicos.

En 1971 se inicia una nueva revolución en la industria electrónica al producirse el primer microprocesador y debido al impacto que representó esto, se le ha nombrado la segunda revolución industrial.

En 1973 aparece el primer artículo de control de velocidad de un motor de c.d., utilizando un control de fase cerrada (PLL), que posteriormente se utilizaría en diversos controles industriales.

En 1978, hasta la fecha Japón ha gastado dos billones de dólares en investigación y construcción de robots, principalmente destinados a uso industrial. Además Alemania, Francia, Estados Unidos y la URSS, han trabajado ampliamente en esta rama.

En 1981 los Estados Unidos lanza el Columbia, la cual es una nave espacial controlada por varias computadoras sumamente sofisticadas y capaz de realizar funciones muy especiales.

En 1982 construye una nave espacial similar a la otra y la bautiza como Challenger.

En 1983, comienza a incrementarse el uso de microprocesadores en sistemas de control de inyección de combustible en diversos tipos de motores y combustión interna, con lo cual se aumenta la eficiencia de los mismos.

En 1984, el empleo de microprocesadores prácticamente se ha extendido a todas las ramas de la ciencia, así como en la industria, en la oficina y en el hogar.

CAPITULO II

"EL MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA".

2.1.- INTRODUCCION.

El motor de corriente directa es una máquina eléctrica en la cual se realiza la conversión de energía eléctrica a mecánica. Esto se realiza por medio de dos embobinados acoplados magnéticamente de tal manera que produzca como resultante en el eje del motor un par y una velocidad.- Dichos embobinados son conocidos como armadura (rotor) y campo (estator).

Los motores de corriente directa son en esencia idénticos a los dínamos (figura 2.1), pero la diferencia radica en el uso que se les da.- Cuando se utiliza una máquina para transformar energía mecánica a eléctrica, se le denomina dínamo y cuando realiza lo inverso a esto, se le denomina motor.- Aunque las ecuaciones que rigen a ambas configuraciones de máquinas eléctricas son casi idénticas, en este capítulo solo se tratará el funcionamiento como motor.

2.2.- "ECUACIONES BASICAS DE UN MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA".

En un motor de C.D. hay que tener presente que tanto el embobinado de campo como el embobinado de armadura presentan resistencia al paso de la corriente eléctrica y dado que las espiras del embobinado de armadura están cortando las líneas de flujo de un campo magnético producido por el embobinado de campo, va a existir una fuerza electromotriz engendrada por la armadura que se opone a la corriente que circula por los conductores.- A esta fuerza electromotriz engendrada se le conoce como fuerza contraelectromotriz "Eg" la cual está expresada en voltios.- De acuerdo a lo anterior se puede hacer un balance energético (según las le

yes de Kirchof) en el motor de la siguiente manera:

$$E_g = V_t - I_a R_a \dots\dots\dots \text{Ecuac. 2.1.}$$

Donde:

E_g = fuerza contraelectromotriz (Voltios)

V_t = tensión aplicada (voltios)

R_a = resistencia de armadura (ohms)

I_a = corriente de armadura (Amperes)

El término $I_a R_a$ de la ecuac. 2.1 generalmente es menor de 5% - del voltaje aplicado, debido a que R_a es muy pequeña.

La potencia mecánica disponible en un motor, se debe al par - - electromagnético desarrollado por el mismo, el cual está dado por la siguiente ecuación:

$$T_e = K_t \phi I_a \dots\dots\dots \text{Ecuac. 2.2}$$

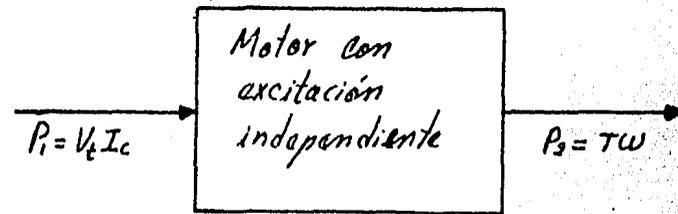
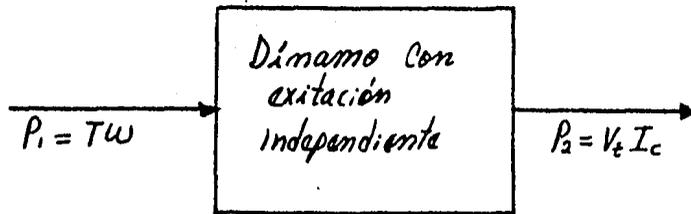
Donde: T_e = par electromagnético.

K_t = constante propia de cada motor.

ϕ = flujo magnético.

I_a = corriente de armadura.

Sin embargo, la potencia real suministrada por un motor está sujeta a diversos factores como son la pérdida de potencia a causa de rozamientos en cojinetes y escobillas, la resistencia del aire, resistencias magnéticas producidas por histéresis y corrientes de Foucault en el hierro etc.



$R_a =$ Resistencia de armadura.

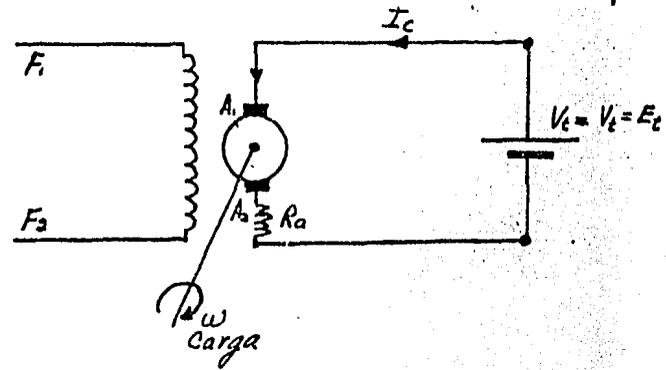
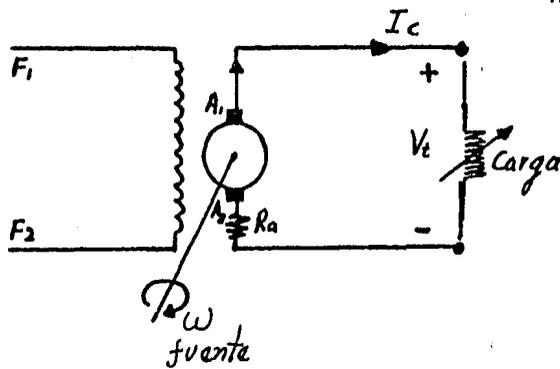


FIGURA 2.1 a) Dinamo, b) Motor de C.D.

2.2.1.- "ECUACION DE VELOCIDAD".-

Cuando un motor gira la fuerza contraelectromotriz E_g , es siempre inferior a la fem aplicada, difiriendo de ésta por la caída de potencial $I_a R_a$ de la armadura.- Esta E_g engendrada por el motor es proporcional al flujo por polo y a la velocidad y es expresada por la siguiente ecuación:

$$E_g = K \phi \times \text{rpm} \dots\dots\dots \text{Ecuac. 2.3.}$$

Donde:

K = Una constante

ϕ = flujo por polo

rpm = la velocidad del motor.

Si despejamos la velocidad del motor de la ecuación anterior:

$$\text{rpm} = \frac{E_g}{K \phi} \dots\dots\dots \text{Ecuac. 2.4}$$

Si se substituye la ecuación 2.1 en la ecuación anterior, nos va a quedar finalmente la ecuación de velocidad de la siguiente manera:

$$\text{rpm} = \frac{E_t - I_a R_a}{K \phi} \dots\dots\dots \text{Ecuac. 2.5}$$

En la Ecuación 2.5 E_t es constante y el término $I_a R_a$ es prácticamente despreciable. Por lo tanto la ecuación de velocidad establece que si se reduce el flujo ϕ , el motor tiene que aumentar su velocidad para compensar la E_g engendrada.- Esto se puede comprobar observando que debido a lo pequeño que es la resistencia de armadura, el motor tenderá a engendrar una tensión aproximadamente igual a la tensión de la lí

nea E_t con objeto de reducir la corriente de armadura I_a a su valor adecuado.- Por lo tanto, si se reduce ϕ el motor tiene que girar más rápido para engendrar E_g al valor necesario. Si no lo hiciera así, la corriente I_a sería muy grande y necesitaría un gran par para lograr la E_g .

Observando la relación existente entre las constantes K_t y K de las ecuaciones de par y velocidad respectivamente, se puede ver que:

$$K = \frac{Z \text{ Polos}}{\text{Trayectorias}} \frac{1}{60} \dots\dots\dots \text{Ecuac. 2.6}$$

$$K_t = \frac{Z \text{ Polos}}{2 \text{ Trayectorias}} \dots\dots\dots \text{Ecuac. 2.7}$$

Donde Z es el número total de conductores de la armadura.

De acuerdo a las dos ecuaciones anteriores, se puede establecer que:

$$\frac{K}{K_t} = \frac{2}{60} \dots\dots\dots \text{Ecuac. 2.8}$$

De manera que si la ecuación 2.5 la midiésemos en radianes por segundo, en vez de rpm tendríamos que $K = K_t$

2.2.2.- "RELACIONES ENTRE CABALLO DE VAPOR, HP, PAR Y VELOCIDAD".

El par entregado por el motor a una carga mecánica recibe el nombre de par motor T_b (par de frenado), el cual es menor que el par electromagnético T_e .- Esto se debe al par de retardo producido por las pérdidas (rozamiento, resistencias etc), como ya se mencionó anteriormente.-

Si expresamos la ecuación de par electromagnético en función del par motor T_b y las pérdidas:

$$T_e = T_b + T_r + T_a + T_H \quad (\text{Kg.m}) \dots \dots \dots \text{Ecuac. 2.9}$$

donde: T_e = Par electromagnético

T_b = par motor

T_r = par producido por rozamientos

T_a = par producido por la resistencia del aire.

T_H = par producido por las pérdidas en el hierro.

Ahora bien, definiendo la relación que existe entre caballo de vapor y kilográmetros, sabemos que un caballo de vapor es igual a 75 Kg.m/seg o 4500 kg.m/min. Conocemos también que un caballo de vapor equivale a:

$$\text{CV a la salida} = \frac{2 \pi N T_b}{4500} \dots \dots \dots \text{Ecuac. 2.10}$$

6

$$\text{CV transformados} = \frac{2 \pi N T_e}{4500} \dots \dots \dots \text{Ecuac. 2.11}$$

donde: CV = Caballos de vapor

N = rpm

Se sabe también que la potencia eléctrica transformada en mecánica está dada por la siguiente relación:

$$CV = \frac{E_g I_a}{736} \dots \dots \dots \text{Ecuac. 2.12}$$

Sustituyendo en la ecuación anterior:

$$\frac{E_g I_a}{736} = \frac{2 \pi N T_e}{4500} \dots \dots \dots \text{Ecuac. 2.13}$$

Debido a que la potencia de un motor comercialmente está expresada en HP.

$$IHP = \frac{ICV}{0.9864} \dots\dots\dots \text{Ecuac. 2.14}$$

Si sustituimos ésto en la ecuación 2.13

$$\frac{Eq Ia}{746} = \frac{2 \pi N T_e}{4500} \dots\dots\dots \text{Ecuac. 2.15}$$

Despejando el par electromagnético transformado de la ecuación anterior:

$$T_e = \frac{Eq Ia}{2 \pi N} \frac{4500}{746} = (6.032) \frac{Eq Ia}{2 \pi N} \dots\dots\dots \text{Ecuac. 2.16}$$

La ecuación anterior es necesaria para poder definir el par del motor de C.D. usado en este proyecto en base a las mediciones tomadas del motor.

2.3.- "TIPOS DE EXCITACION".

Los sistemas de distribución de energía más importantes del mundo, son todos de corriente alterna no obstante que en la industria a veces es necesario usar corriente continua para muy diversos fines y ello requiere el uso de convertidores de corriente alterna a continua.-

Una de las aplicaciones más comunes de la corriente continua es en los motores de C.D.- El uso de motores de C.D. tiene la ventaja de poder tener un control de velocidad muy superior al que se podría obtener de un motor de AC.

Según los requerimientos de la industria, existen varios posibles tipos de excitación para los motores de corriente continua, los cuales serán presentados a continuación.

2.3.1.- "MOTOR CON EXCITACION EN DERIVACION".

El motor con excitación en derivación (fig. 2.2.a), se denomina motor de velocidad constante debido a que su velocidad solo varía ligeramente con la carga.- Las curvas características del motor (fig. 2.2.c), dan una idea de como varía el par y la velocidad con la corriente de armadura, siendo constante la tensión aplicada.

Si la tensión aplicada es E_t y la corriente I_f de campo constantes, las ecuaciones de par y velocidad van a ser entonces idénticas a las ecuaciones 2.2 y 2.5.- Estas ecuaciones están representadas en las curvas de la figura 2.2.c, las cuales pueden ser obtenidas experimentalmente.-

Una de las características más importantes del motor con excitación en derivación, es el ser un motor regulable cuando se le provee las resistencias de control apropiadas con las cuales se puede variar la corriente de campo, lo cual se traduce en una variación de ϕ o bien variar la corriente de armadura.-

2.3.2.- "MOTOR CON EXCITACION INDEPENDIENTE".

Las curvas de respuesta para este caso son casi idénticas a las del motor en derivación debido a que se puede variar tanto la corriente de armadura como la corriente de campo, con lo cual es posible obtener -

una variación de velocidad y una variación del par.- En la actualidad es uno de los arreglos más usados debido a su gran versatilidad.- La figura 2.2.b presenta el diagrama de este tipo de excitación.-

2.3.3.- "MOTOR CON EXCITACION EN SERIE".

Para el caso de un motor en serie (fig. 2.3a), se debe a colocar también una resistencia en serie con la armadura para evitar que durante el arranque el motor tome demasiada corriente.- Esta resistencia de arranque se va disminuyendo conforme el motor va tomando velocidad.-

Aplicando un potencial constante y una corriente fija en la armadura, se puede aumentar la velocidad, disminuyendo el flujo por polo.- Esto se puede lograr de dos maneras: a) Por medio de una resistencia en paralelo con el campo se logra reducir la corriente de campo y por lo tanto el flujo por polo. (figura 2.3.b).- b).- Cortocircuitando parte del embobinado de campo (fig. 2.3.c).- En ambos casos se logra la disminución del flujo por polo y por consiguiente el aumento de velocidad.- Este tipo de excitación ya no es muy usado debido a su curva de par-velocidad contra corriente de armadura (fig. 2.3.d).-

2.3.4.- "SISTEMA WARD LEONARD DE REGULACION DE VELOCIDAD".

El sistema Ward Leonard es un sistema muy eficaz para obtener un amplio margen de velocidades sin utilizar resistencia de arranque en la armadura. Su desventaja es que utiliza una dinamo de excitación independiente que acciona un motor de velocidad regulable. Esta regulación se logra variando la excitación de la dinamo, además para poder mover la dinamo se utiliza un primotor que generalmente es de corriente alterna con

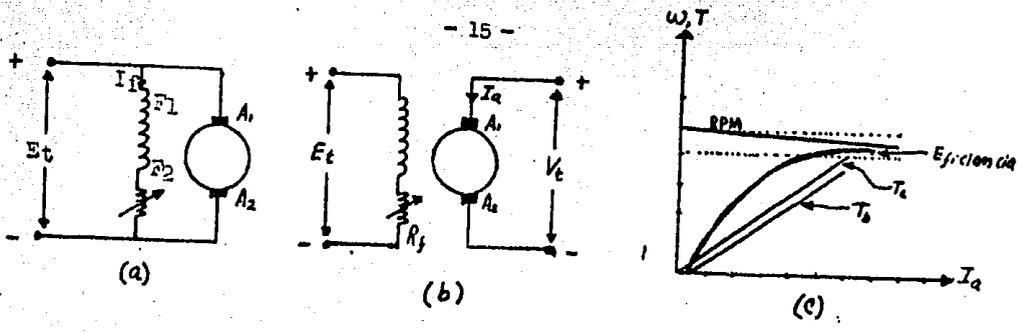


Figura 2.2. a) Motor con excitación en Derivación. b) Motor con excitación Independiente. c) Curvas características.

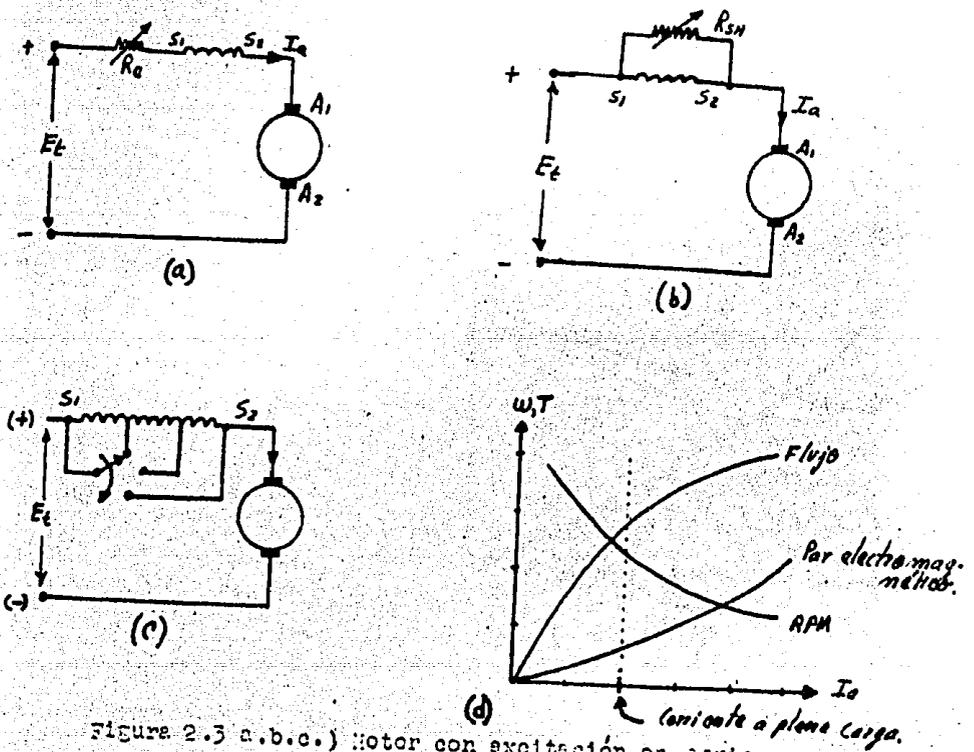


Figura 2.3 a.b.c.) Motor con excitación en serie d) Curvas características.

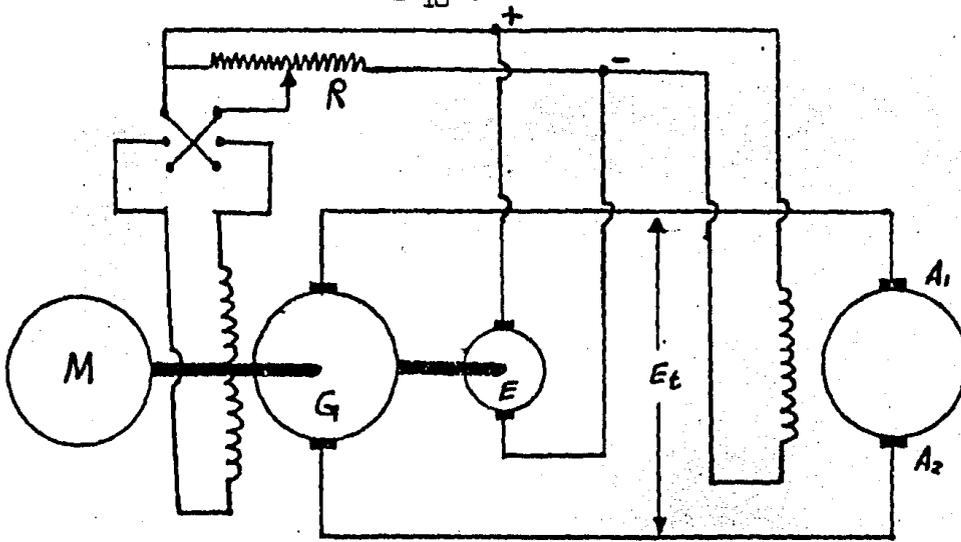


Figura 2.4. Sistema Ward-Leonard.

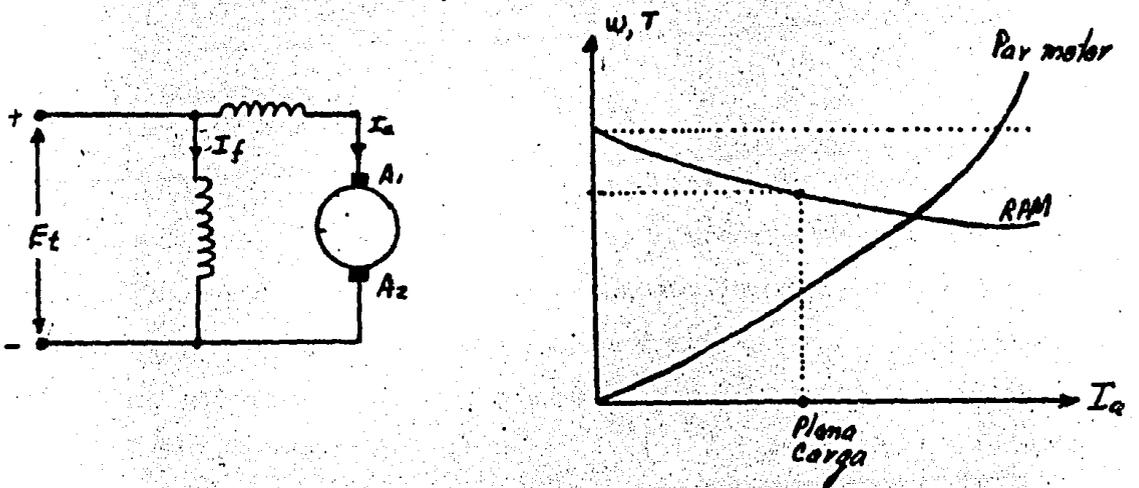


Figura 2.5 a) Motor con excitación compuesta.
b) Curvas características.

velocidad constante.

Según la figura 2.4 este sistema está compuesto de un primotor M que está acoplado a un generador G y una pequeña dinamo autoexcitada E denominada excitatriz que proporciona la corriente de excitación tanto para la dinamo como para el motor; cambiando la posición del Switch S es posible cambiar el sentido de rotación del motor M. Al variar el reostato R se varía la corriente de excitación del generador y por consiguiente la velocidad del motor al variar también Et.-

El sistema Ward Leonard de regulación de velocidad es ampliamente usado. Su principal aplicación es en fábricas siderúrgicas para activar trenes reversibles de laminación, obtener tubos sin soldadura e impulsar cizallas, accionar ascensores de velocidad media y elevada en grandes edificios, malacates de minas, máquinas de fabricar papel, etc.

2.3.5.- "MOTORES DE EXCITACION COMPUESTA".

El motor de excitación compuesta figura 2.4.a, constituye un término medio entre el motor en derivación y el motor serie.- La ventaja del motor de excitación compuesta, es que elimina prácticamente el problema de la quemadura del colector de la armadura, que de otra manera puede producirse y por lo tanto asegura un arranque rápido, lo que da una estabilidad mayor al motor.-

Para el caso de los motores de excitación compuesta, existen tres tipos de excitación: a) Excitación compuesta - Acumulativa, b) Excitación compuesta - plana, c) Excitación compuesta - diferencial.

Para finalizar presento un cuadro resumen de los principales tipos de excitación en motores de corriente directa.-

CONEXION	DIAGRAMA	CURVAS	EQUACION DE VOLTAJE
EXCITACION EN DERIVACION.			$E_t = E_g + I_a R_a$ $I_c = I_a + I_f$ $R_f = \text{resistencia en serie con al Campo.}$
EXCITACION INDEPENDIENTE			$E_t = E_g + I_a R_a$ $I_a = I_c$
EXCITACION EN SERIE (ya no se usa)			$E_t = E_g + I_a (R_a + R_s)$ $R_s = \text{Resistencia en el Campo Seria.}$ $I_a = I_c = I_f$
EXCITACION COMUESTO-ACUMULATIVA			$E_t = E_g + I_s R_s + I_a R_a$
EXCITACION COMUESTO-FLAMA			$E_t = E_g + I_c R'_s + I_a R_a$ $R'_s = \frac{R_s R_{sn}}{R_s + R_{sn}}$ $I_c = I_a + I_f$
EXCITACION COMUESTO-DIFERENCIAL			$E_t = E_g + I_s R_s + I_a R_a$

CAPITULO III

"ANALISIS DEL SISTEMA DE CONTROL"

3.1.- INTRODUCCION.

En años recientes se ha hecho un significativo progreso en las señales discretas y los sistemas de control digital. Estos sistemas han ganado una popularidad e importancia en todas las industrias debido en parte a los grandes avances hechos en las computadoras digitales y además recientemente en las microcomputadoras, además de las ventajas que se tiene al trabajar con señales digitales.

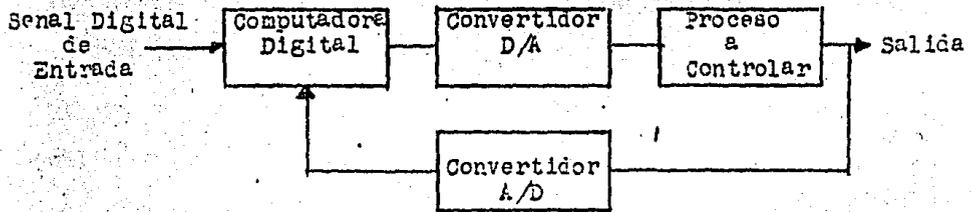
Los sistemas discretos y los sistemas de control digital difieren de los sistemas continuos o sistemas analógicos en que las señales en una o más de sus partes son en la forma de un tren de pulsos o de un código numérico. Los términos sistemas muestreados, señales discretas, sistemas discretos en el tiempo y sistemas digitales, son ampliamente usados en la literatura de control. Estrictamente una señal muestreada se refiere a señales que son pulsos modulados en amplitud, esto es, son trenes de pulsos con señal de información portada en la amplitudes de dichos pulsos; también señales digitales usualmente se refieren a señales que son generadas por computadoras digitales o transductores digitales y por lo tanto, en la forma de algún código.- Sin embargo, más adelante veremos que en nuestro sistema de control, el configurar físicamente cada una de sus partes, no fué tan sencillo como podría parecer teóricamente.- Debido a esto también podemos decir que el diseño de cualquier sistema de control práctico necesariamente involucra procedimientos de tanteo. Teóricamente es posible la síntesis de sistemas de control, pero en la práctica el sistema puede quedar sujeto a restricciones como las

de ser lineal o no lineal y para estos casos no hay métodos de síntesis. Además no pueden conocerse con precisión las características de los componentes y por ello son necesarios los procedimientos de tanteo.

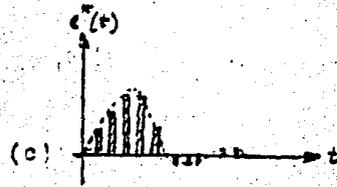
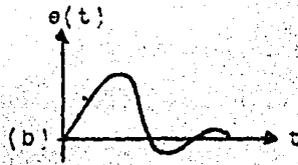
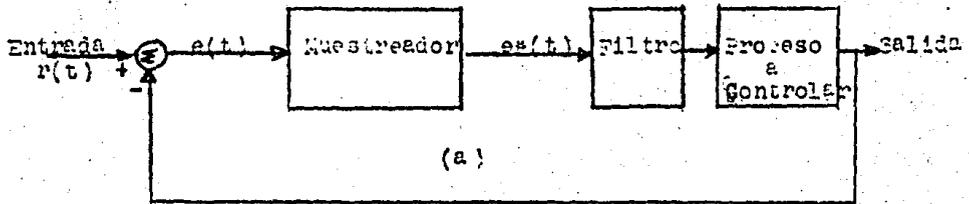
Un requerimiento básico en cualquier sistema de control (digital o analógico), es que debe ser estable y además de esta estabilidad absoluta, el sistema debe tener una estabilidad relativa razonable, es decir, que la velocidad de respuesta debe ser razonablemente rápida, debiendo presentar un razonable amortiguamiento. Otro requerimiento básico, es que el sistema de control debe poder reducir a cero o a un valor tolerablemente pequeño los errores.-

El requisito entre una estabilidad relativa razonable y el de una exactitud en régimen permanente, tienden a ser incompatibles y por lo tanto el proyectar un sistema de control, es necesario llegar a un compromiso eficaz entre ambos requisitos.

Finalmente podemos concluir que un sistema de control digital está definido como un sistema en el cual la señal en uno o más puntos del mismo está expresada en un código numérico para una computadora digital y para poder expresar la señal analógica en un código numérico, es necesario un transductor digital. El diagrama de bloques de un sistema típico de control digital, es presentado en la figura 3.1.- La señal digital representada en un código binario en ciertas partes del sistema, hace que se requiera el uso de convertidores analógico-digitales y digital-analógicos.- Si nos ponemos a comparar un sistema muestreado (figura 3.2) de un sistema de control digital, podemos ver que existen básicas diferencias, pero a pesar de ello podemos usar las mismas herramientas analíticas.



3.1 Sistema tipico de Control Digital.



3.2.-a.) Sistema muestreado de control. b) Senal de error sin muestrear. c) Senal de error muestreada.

3.2.- SISTEMA DE CONTROL DE EXCITACION DEL MOTOR.

La inmensa mayoría de los sistemas electrónicos de control de motores de corriente directa, están constituidos por componentes de estado sólido y ésto se debe a los grandes avances logrados en dispositivos electrónicos de estado sólido en las últimas décadas y al bajo costo de producción de los mismos. Uno de los dispositivos más usados en la rectificación de energía eléctrica, es el rectificador controlado de silicio "SCA" conocido también como tiristor del cual en la actualidad se construyen dispositivos capaces de manejar corrientes del orden de tres mil a cuatro mil amperes.

Para poder funcionar correctamente el tiristor, debe usarse en combinación con un circuito adicional que sea capaz de controlarlo y por lo tanto el circuito que compone al sistema de control de excitación lo podemos dividir en dos secciones principales que son: el circuito de disparo y el puente rectificador.

Nuestro sistema de control está constituido por dos circuitos simétricos e idénticos a lo mencionado anteriormente, de los cuales uno se encarga de controlar la tensión aplicada al campo y el otro la de la armadura del motor. La ventaja de poder controlar la tensión en campo y armadura, es que podemos elegir un par y una velocidad constantes según nuestras necesidades. La figura 3.3 nos muestra una gráfica del voltaje aplicado al campo y armadura contra velocidad. En ella podemos ver que existe un punto A de equilibrio entre el voltaje aplicado al campo y armadura y por lo tanto, si se reduce el voltaje en el campo, aumentará la velocidad y el par debido a que se reduce el flujo ϕ del campo, o si se reduce el voltaje de armadura se reducirá la velocidad y el par porque se está reduciendo la corriente I_a de armadura. Todo lo anterior puede -

comprobarse por las ecuaciones 2.2 y 2.5 de par y velocidad del motor de corriente directa.

3.2.1.- EL RECTIFICADOR CONTROLADO DE SILICIO.

El rectificador controlado de silicio "SCR", es un dispositivo semiconductor que pertenece a la familia de los tiristores, y por lo tanto, podemos decir que un tiristor es cualquier switch semi-conductor de silicio cuya acción biestable depende de la distribución de cargas eléctricas en una unión PNP, como se indica en la figura 3.4.- El SCR consta de tres terminales que son el ánodo "A", el cátodo "K" y la compuerta "G". Esta última terminal es la que nos va a servir para poner al SCR en estado de conducción y solo podrá ser sacado de ese estado, al decrementarse la corriente del ánodo a un valor cercano a cero.

Para poder visualizar mejor el funcionamiento de un SCR, podemos aproximar el modelo de la estructura PNP al modelo de un transistor PNP conectado con otro NPN (figura 3.4). Esta combinación actúa como un circuito abierto hasta que hacemos que la compuerta G sea más positiva que el cátodo K. En ese momento una corriente pequeña i_1 fluirá entre la base y el emisor del transistor Q 1 por la acción usual del transistor y una gran corriente i_2 , fluirá a través del colector de Q 1 y esta misma corriente también es la corriente de base del transistor Q 2.- Al fluir esta corriente a través de la base tipo N provoca que haya también un gran flujo de corriente a través del colector del Q2.- Esta corriente i_3 de colector que fluye hacia la base tipo P de Q 1 sirve como una gran corriente de compuerta, incrementándose así la conducción de ambos transistores que se encuentran es estado de saturación, podemos decir que ésta es una forma de realimentación. Si la corriente i_1 de compuerta es -

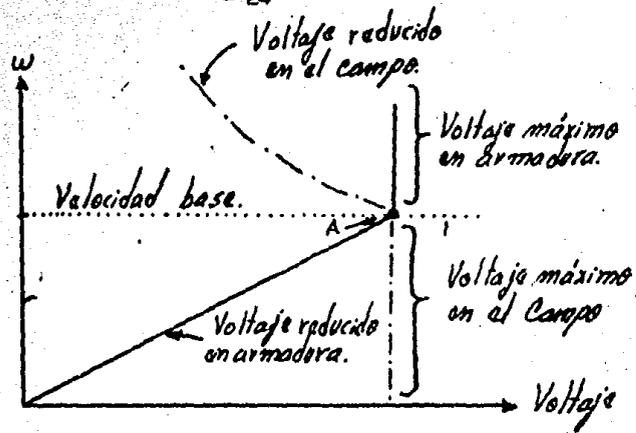


Figura 3.3 Gráfica de voltaje aplicado al campo y Armadura contra velocidad.

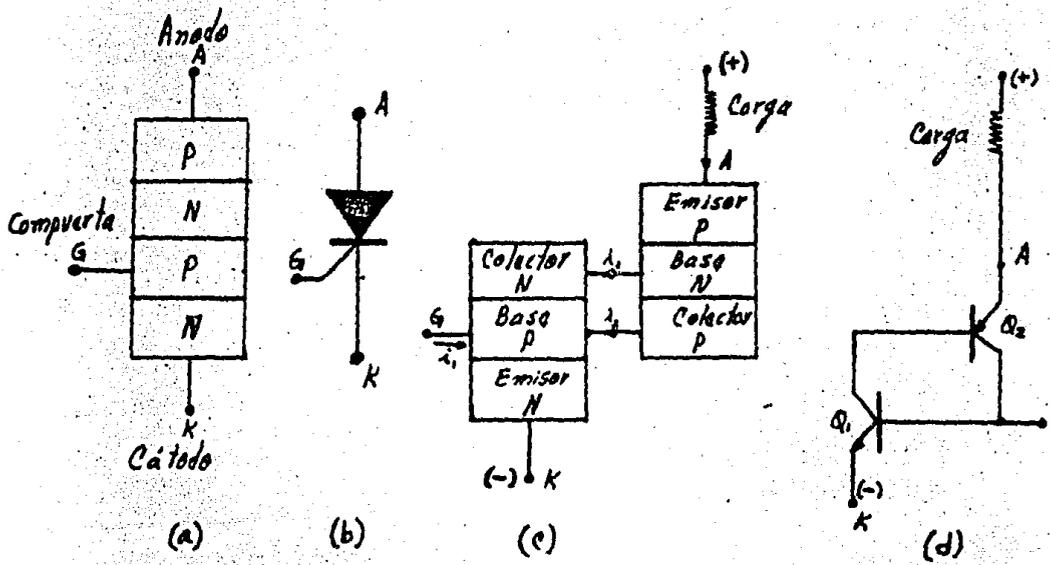


Figura 3.4.- El rectificador controlado de silicio.
 a, c, d) Modelo del SCR.
 b) Símbolo

removida el circuito continúa en estado de conducción como un simple --
rectificador hasta que el potencial de ánodo es removido o la corriente
de ánodo es decrementada hasta un valor cercano a cero. El voltaje que -
existe entre las terminales del ánodo y cátodo en estado de conducción,-
es aproximadamente de 0.7 voltios.-

Un SCR puede ser puesto en estado de conducción por un pulso mo-
mentáneo de corriente en la compuerta de unos cuantos miliamperes con --
una duración del orden de cuatro microsegundos. Cuando es usado en un -
circuito de corriente alterna, el pulso de disparo es adelantado por un
circuito que es un control de fase con el que podemos variar al ángulo -
de conducción, además el SCR estará operando sólo durante el ciclo posi-
tivo de la onda de voltaje alterno. Si un nivel continuo de voltaje de -
directa es aplicado a un SCR, para poderlo sacar del estado de conduc--
ción, será necesario diseñar un circuito que sea capaz de aplicar un vol-
taje negativo que sea lo suficientemente grande para sacar el SCR del es-
tado de conducción.

3.2.2.- EL TRANSISTOR DE UNIJUNTURA BIPOLAR. "UTJ".

Este dispositivo semiconductor también puede ser considerado co-
mo un tiristor, debido a que presenta una acción biestable y está consti-
tuido como se indica en la figura 3.5 por un pequeño cristal o barra de
silicio tipo N y presenta una gran resistencia (alrededor de 10 K) a ca-
da extremo de la barra, en las cuales se encuentra hecho un contacto óh-
mico. A estas terminales correspondientes a los contactos óhmicos, se les
conoce como base 1 y base 2.

Una pieza de material tipo P, es formada próxima a la mitad de -

la barra tipo N, formándose así una juntura PN en la barra del cristal, la cual está actuando como un emisor. El transistor de unijuntura bipolar "UTJ" no es uno de los transistores más usados, pero se usa como un dispositivo de switcheo.

Internamente el UTJ actúa como un divisor de voltaje que consiste de dos series de resistores "R A" y "R B", mientras que la juntura PN actúa como un diodo "D".

Cuando un voltaje V_{BB} es aplicado entre las interbases B 1 y B 2, aparece una porción de voltaje V_E , entre el emisor y base B 1. Esta porción está dada por la relación $= R_A / (R_A + R_B)$, esta es llamada Standoff ratio, donde $F =$ esta.

Se aplicamos un voltaje externo haciendo que el emisor "E" sea más positivo que la base B 1, no ocurrirá ningún flujo de corriente a través del emisor mientras este voltaje aplicado sea menor que V_E que es V_{BB} . Sin embargo, cuando el voltaje aplicado exceda V_E en una fracción de un voltio ocurrirá un flujo de corriente a través del emisor a 1 disminuir la resistencia R A por un proceso conocido como Conductibilidad modulada que a continuación es descrita.

Mientras no ocurra flujo de corriente a través del emisor, el flujo eléctrico en la barra tipo N, casi enteramente consiste de portadores mayoritarios (exceso de electrones) moviéndose de B 1 a B 2; podemos decir que relativamente es poco el flujo de electrones a causa de la alta resistencia de la barra ya que el material de la misma está ligeramente dopada. Cuando el potencial del emisor E, es elevado para que ocurra flujo de corriente a través de la juntura PN, se puede decir que es un -

flujo de exceso de agujeros (que son los portadores mayoritarios en el material tipo P) que pasa a través de la barra tipo N hacia la base B 1. Así sucesivamente al incrementarse el número de portadores disponibles rápidamente disminuirá la resistencia R A y aumentará el flujo de corriente entre E y B 1. - A sí la conductividad de R A es modulada o varia da por el flujo de la corriente de emisor.

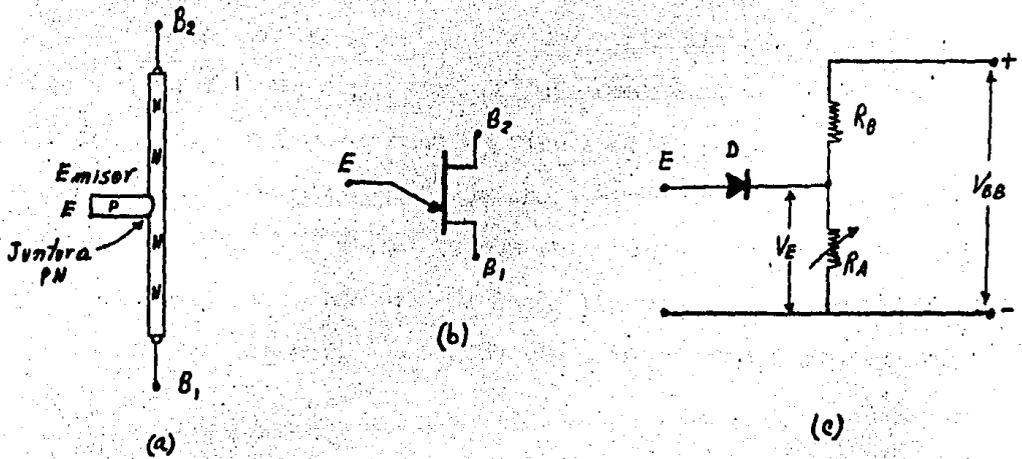


Figura 3.5. El transistor de unijuntura bipolar.
a, b) Modelo. c) Símbolo.

3.2.3.- CONTROL DE FASE DE UN SCR DISPARADO POR UN UTJ.

Una de las grandes ventajas del SCR al estar conectado a una línea de corriente alterna, en su capacidad de poder variar la corriente media aplicada a una carga eléctrica modificando su ángulo de conducción (figura 3.6).

Si una carga eléctrica recibe una corriente pico de 10 amperes, la corriente media en cada ciclo será de 6.4 amperes cuando es disparado en cero grados (ciclo completo) y si es disparado en 90 grados, se estará disparando a la mitad del ciclo y la corriente media por lo tanto será de 3.2 amperes y así sucesivamente podríamos seguir retardando el disparo del SCR disminuyendo cada vez más la corriente media. A este método de variación gradual del ángulo de conducción, se le conoce como control de fase.-

Como un SCR usualmente necesita un pulso de corriente de muy corta duración en la compuerta, es necesario un circuito que nos pueda dar un retardo y control en un instante preciso dentro de cada ciclo.- El circuito apropiado para ello es el mostrado en la figura 3.7 que emplea un UTJ que se encarga de disparar al SCR.- Su funcionamiento es de la siguiente manera:

Cuando el condensador C1 se carga a través de R3, se incrementa también el voltaje entre el emisor E y la base B1 del UTJ y al exceder el voltaje de C1, el voltaje VE, se inicia un flujo a través del emisor y es entonces disparado el UTJ.- Como resultante tenemos que disminuye el valor de R A permitiendo que C1 cargue a través de RA y la resistencia externa R5. Parte de esta descarga irá a parar a la compuerta del SCR en

la forma de un pulso de corriente, siendo así disparado el SCR.- Otra característica de este circuito es que opera durante cada semiciclo de la onda de corriente alterna, rectificadas y la variación de fase se logra al variar la constante $R_3 \cdot C_1$ de carga del capacitor, con la cual se varía también la pendiente de la rampa generada.- Este circuito es un generador típico de diente de sierra y por lo tanto sus aplicaciones pueden ser muy variables.

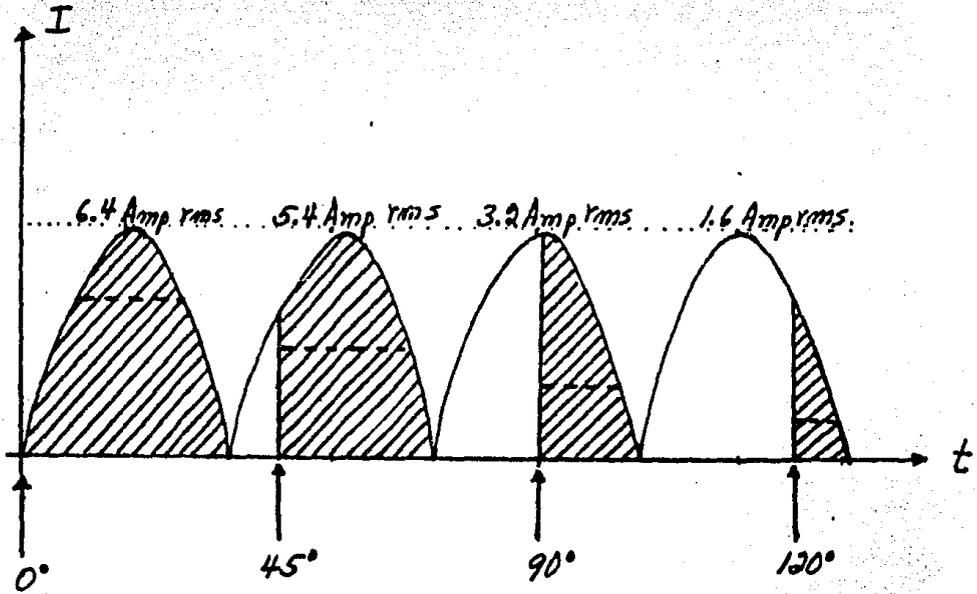


Figura 3.6. Efecto de la variación del ángulo de conducción sobre la corriente media.

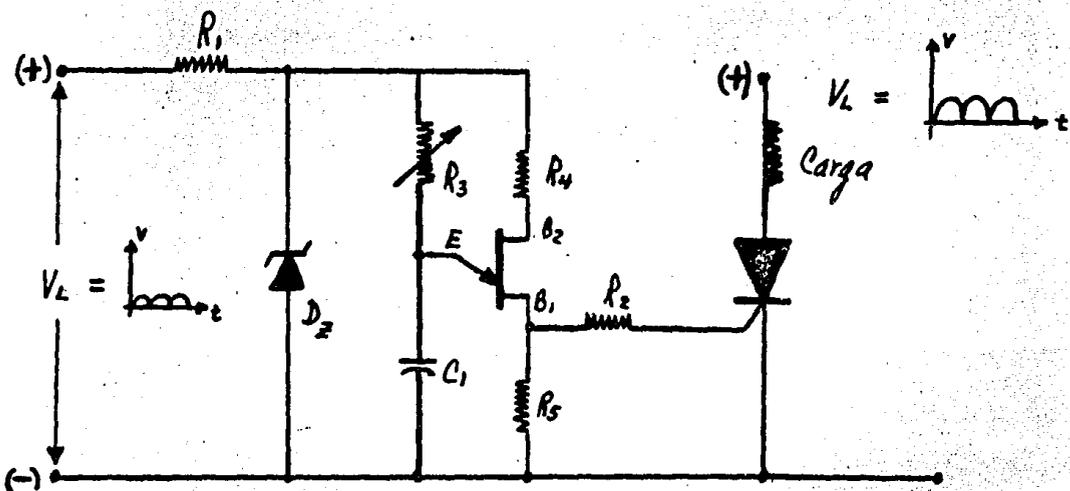


Figura 3.7. Circuito típico de disparo.

3.2.4.- EL "SCR" CON CARGA RESISTIVA O INDUCTIVA.

A continuación vamos a analizar el comportamiento de un "SCR" - conectado en serie con una carga puramente resistiva a una línea de corriente alterna.

Mientras el "SCR" no recibe algún pulso de disparo en la compuerta G, el voltaje entre el ánodo y el cátodo, es aproximadamente el voltaje de la línea de corriente alterna y por lo tanto prácticamente no está circulando corriente por la carga (solo corrientes de fuga). Cuando el "SCR" es disparado en el punto F (figura 3.8) el potencial entre ánodo y cátodo, caerá a un valor muy cercano a cero voltios y será entonces cuando circule una corriente que es proporcional al voltaje aplicado y solo se reducirá a cero cuando el voltaje de línea sea cero.- Luego en el punto L cuando comienza la parte negativa de la onda de corriente alterna, no circulará ninguna corriente entre ánodo y cátodo a menos que se llegue a exceder el voltaje de reversa del diodo (considerándolo como diodo).

Existen notorias diferencias con respecto a lo anterior en el funcionamiento del "SCR" cuando funciona con carga inductiva tal como un transformador un reactor etc.- Como se indica en la figura 3.9 cuando el "SCR" es disparado en V, la corriente del ánodo comienza a subir muy lentamente en U. Sin embargo, debido a la energía almacenada, la corriente sigue fluyendo por la carga inductiva X, no decrece a cero al llegar al punto W y continúa fluyendo por algún tiempo después de que la onda de voltaje de corriente alterna ha pasado a su semiciclo negativo.- Mientras esta corriente de ánodo fluye, el voltaje remanente a través del "SCR", caerá a muy pocos voltios. El potencial positivo remanente que abarca parte del medio ciclo negativo es representado en Y y Z.- Al dis-

parar el "SCR" en el inicio del siguiente semiciclo positivo, la corriente del "SCR" se incrementará a su valor medio en "C" que es justamente un instante antes de comenzar el semiciclo negativo.- La energía almacenada en el reactor X puede ser removida aplicando un voltaje negativo en el ánodo, con lo cual se saca al "SCR" del estado de conducción.

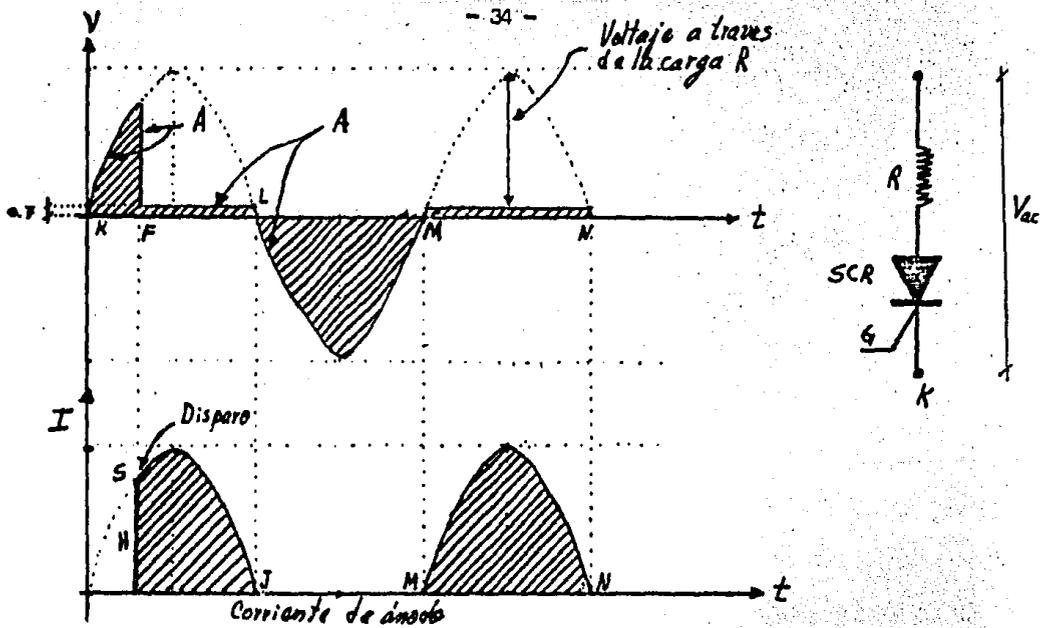


Figura 3.8.- El SCR con carga resistiva.

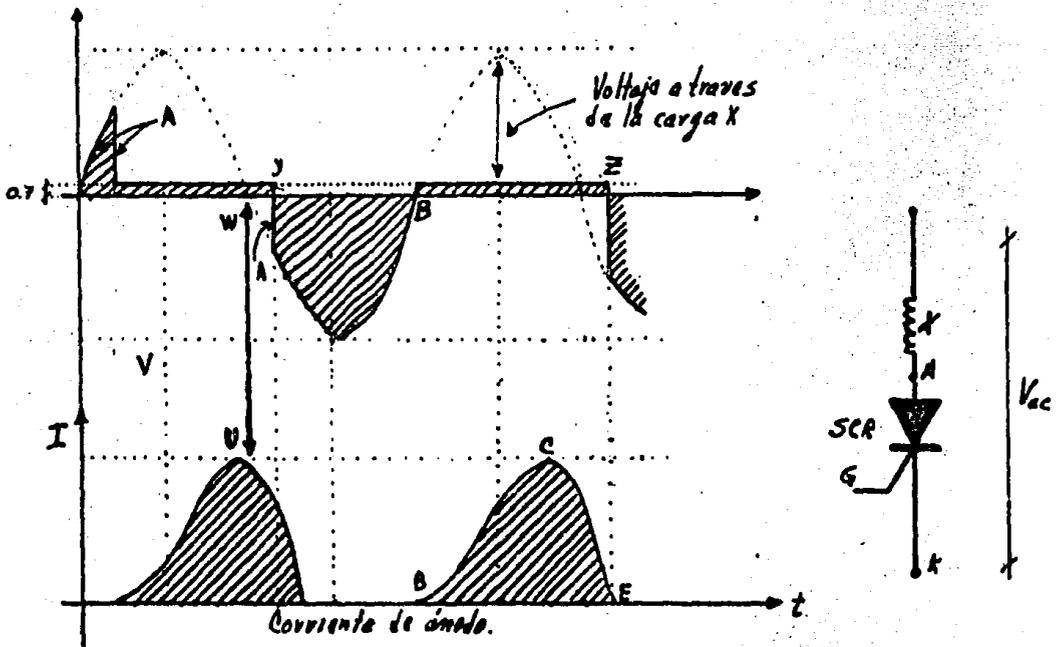


Figura 3.9.- EL SCR con carga inductiva.

3.2.5.- EL "SCR" CON DIODOS EN CIRCUITOS INDUCTIVOS DE CORRIENTE ALTERNA

Se analizará a continuación el comportamiento de un "SCR" conectado con una carga inductiva la cual tiene conectada a su vez un diodo "D" como se indica en la figura 3.10 a).- Cuando el "SCR" es disparado al inicio del ciclo, la corriente a través de X continúa incrementándose ciclo a ciclo (figura 3.10 b), hasta que la corriente es limitada por la resistencia que presenta en estado permanente la reactancia "X".- Como el diodo "D" está conectado en forma opuesta al "SCR", cualquier corriente que fluye por el "SCR", no podrá fluir al mismo tiempo por el diodo "D".- Los electrones podemos decir que fluyen del punto 5 (figura 3.10a) a través del "SCR" y la reactancia "X" hacia el punto 7 durante cada semiciclo positivo. Cuando aparece en P el semiciclo negativo de la fuente de corriente alterna, la energía almacenada en el reactor "X", genera un voltaje que es positivo en la terminal 6 de "X".- Este voltaje obliga a los electrones a pasar a través del diodo "D" hacia el punto 6.- Estos electrones fluyen a su vez a través de "X", en la misma dirección pasando a través del "SCR" y el diodo "D".- Entonces el diodo "D", permite que fluya una corriente (que dependerá del tipo de carga inductiva que se esté usando) a través de "X" durante cada semiciclo negativo y está corriente se va incrementando con cada semiciclo positivo.- La corriente final será limitada solo por la carga resistiva que presenta reactancia "X".-

Si ahora el "SCR" es disparado como en la figura 3.10 c, la corriente se incrementará solo durante el breve intervalo "R".- Durante el intervalo "Q", el diodo "D" conduce y la corriente a través del mismo disminuye lentamente debido a la resistencia y al pequeño calentamiento en este circuito.- La corriente final en la figura 3.10 c es menor que -

en la figura 3.10 b porque el disparo del "SCR" está retardado.-

Un "SCR" puesto en compañía de un diodo como se indica en la figura 3.11 para un control gradual de la corriente que circula en una carga inductiva "X" podrá ser variada mediante un control de fase de tiristor en el "SCR" y el diodo "C".- Este arreglo puede ser usado para variar la corriente en el campo de un motor o generador de corriente directa.- Si tal circuito no fuese inductivo, fluiría a través de "D" una corriente máxima la cual no podría ser influenciada grandemente por el "SCR".- El diodo "D" siempre conduce corriente durante el semiciclo positivo.- Cuando el ánodo es positivo el "SCR" solo conducirá con un pulso aplicado a la compuerta "G".- Si un "SCR" es disparado próximo a "A", el flujo de corriente fluiría firmemente a través del "SCR" y el diodo "D" - retornando nuevamente a través de "X".- La pequeña variación (más bien rizo), es presentada en la figura 3.11 a y podemos decir que experimentalmente se ve que pueden pasar muchos ciclos antes de alcanzar la gráfica de corriente de la figura.

Si el "SCR" es disparado en "B" (figura 3.11 b) mediante un circuito de retardo de fase, el flujo de corriente a través del "SCR" será solo de un cuarto de ciclo (solo de B a C) y entonces la corriente será transferida al diodo "D" en el punto "C".- El diodo "D" continuará conduciendo tres cuartas partes del ciclo o hasta que el "SCR" es disparado de nuevo. En "E" el voltaje a través de "X" continúa siguiendo la onda de voltaje de corriente alterna del voltaje de ánodo del diodo "D" (este voltaje es negativo de "E" a "F"), el cual mantiene o disminuye la corriente que fluye a través de "X", pero sin embargo esta corriente disminuirá entre "G" y "H".- Cuando el "SCR" es disparado de nuevo el voltaje "I" se incrementa y la corriente fluye, pero esta corriente no podrá al-

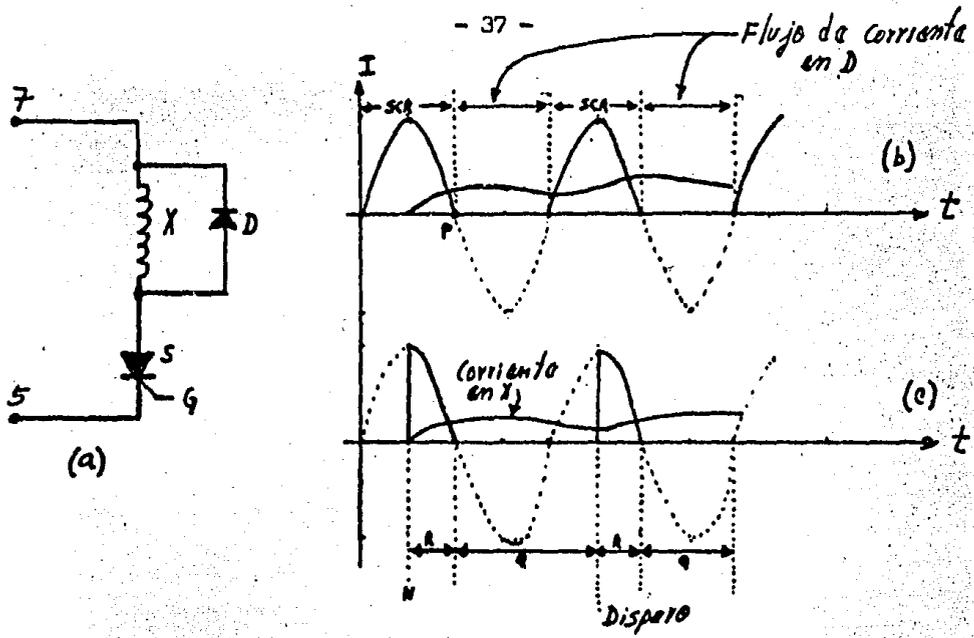


Figura 3.10.- Circuito con un diodo conectado en paralelo con la carga.

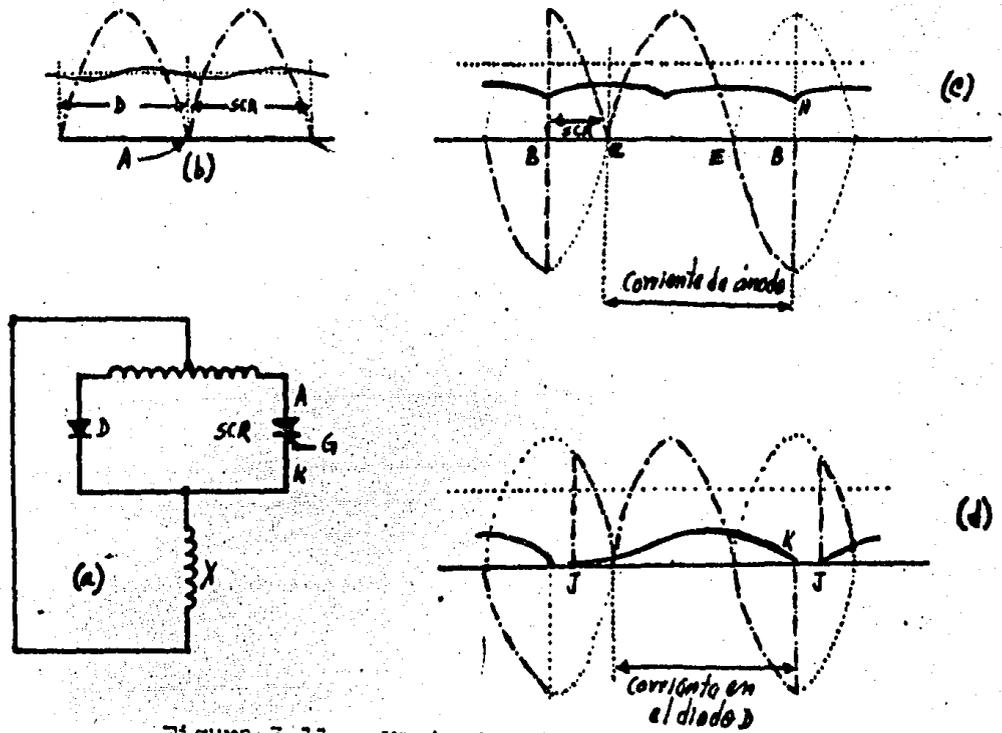


Figura 3.11.- Variación de la corriente aplicada a una carga inductiva mediante el control de fase de un SCR.

canzar su máximo valor si el "SCR" es disparado antes. La corriente media en la figura 3.11 b es menor que en la figura 3.11 a.

Si el "SCR" es disprado con más retardo (figura 3.11 c), entonces decrecerá considerablemente la corriente media de directa. La resultante sería como si solo el diodo estuviera conectado dando un voltaje como el presentado en la figura 3.11 c.

3.2.6.- VOLTAJE DE CAMBIO "dv/dt".-

Quando dos SCR son conectados espalda con espalda como en la figura 3.12a el voltaje de ánodo a cátodo del SCR 1, es también el mismo voltaje de ánodo cátodo del SCR 2.- Si añadimos un control de fase que nos retarde 90° el disparo de cada SCR, las formas de onda de corriente a través de ellos será como las presentadas en la figura 3.12.b debido a la carga inductiva que se tiene y como ya se dijo anteriormente, el SCR seguirá conduciendo corriente un cierto tiempo después (alrededor de unos 35°).

En el instante en que el SCR 1 deja de conducir corriente, el voltaje a través de los SCRs, cambia de C a D, siendo entonces el ánodo del SCR 1 más negativo y ánodo del SCR 2 más positivo.- Esta diferencia de cambio de voltaje es llamada "dv/dt" y es válida para los dos SCRs.- Cabe recalcar que la juntura NP media de un SCR (figura 3.4), actúa como circuito abierto hasta que el SCR es disparado, pero también antes de estas junturas se comportan como si fueran dos placas de un pequeño condensador que está cargado a un valor aproximado al voltaje de ánodo-cátodo.- Cuando este voltaje cambia súbitamente una corriente es inducida (igual a $C \, dv/dt$) que actúa como una corriente de compuerta capaz de disparar al SCR.- Como en la figura 3.12, este abrupto cambio de voltaje es más grande cuando la corriente de ánodo viene de una carga inductiva. Para prevenir disparos innecesarios en muchos SCRs la dv/dt no debe de exceder de 40 voltios por microsegundo (aunque algunos tipos de SCRs permiten 200 voltios por microsegundo). Para limitar tales cambios de voltaje a través del SCR en circuitos inductivos, se suele conectar un capacitor en serie con una resistencia entre el ánodo y cátodo del SCR.

3.2.7.- "RECTIFICADOR DE ONDA COMPLETA CON DOS SCRs CON CARGA INDUCTIVA Y RESISTIVA COMBINADA".

Cuando los SCRs conducen solo una cierta porción de la onda senoidal de voltaje alterno debido al control de fase, la corriente media y la forma de onda en la carga dependen de la inductancia o más bien de la razón de X_L con respecto a R, donde X_L es $= 2\pi fL$.

Considerando el rectificador de onda completa de la figura 3.13a y asumiendo que la caída de voltaje en los SCR es cero, esto es que los SCRs están siendo disparados con un retardo de fase igual a cero ($\alpha = 0^\circ$), estos solo se comportarán como simples diodos y las formas de onda de corriente resultantes serán como las presentadas en la figura 3.13.b. Para pura carga resistiva donde $WL/R = 0$, la corriente i_0 , es una onda senoidal rectificadora donde existe un valor pico con un valor de $\sqrt{2} V/R$ cuyo valor medio es:

$$I_{DC} = \frac{2}{\pi} \left(\sqrt{2} V/R \right) = 0.9V/R \dots\dots\dots (1)$$

Si añadimos carga inductiva hasta que $L = R$, la curva i_1 tendrá solo una pequeña variación y si seguimos aumentando la carga inductiva de tal manera que $WL/R = 4$ la curva de variación i_4 será menor.- Cabe hacer notar que la corriente media I_{DC} no está siendo afectada por L, pero sí por $\alpha = 0^\circ$.- Este valor de corriente de $0.9 V/R$, es llamado corriente máxima I_m .

Si el disparo de los SCRs es retardado en una carga puramente resistiva, la corriente aumentará instantáneamente a un valor proporcional al voltaje aplicado.- Para esta condición donde $WL/R = 0$, disparando los

SCRs con $\alpha = 90^\circ$, veremos que la corriente media decrecerá en un 50% y en base a ésto podemos establecer la siguiente ecuación: (fig. 3.14)

$$I_{DC} = (1/\pi) \int_{\alpha}^{180^\circ} (\sqrt{2} V \text{ Sen } \omega t) / R \, d(\omega t) \dots \dots \dots (2)$$

Para el caso en que tengamos $\alpha = 50^\circ$ y $WL/R = 1$, i_1 será cero al rededor de los 45° y por lo tanto podemos decir que la corriente media es $0.74 V/R$ (fig. 3.15).-

Para $WL/R = 4$ podemos ver que prácticamente la corriente media es un valor continuo y solo será decrementada a un valor mínimo por α , - (donde $\alpha =$ ángulo de disparo).

Cuando la carga es inductiva, el cálculo de la corriente media - I_{DC} presenta más dificultad.- Los resultados aproximados en la figura - 3.14 están expresados en términos de la corriente máxima I_m .- Con pequeños ángulos de retardo los valores de I_{DC} , pueden ser leídos en la línea ABC.-

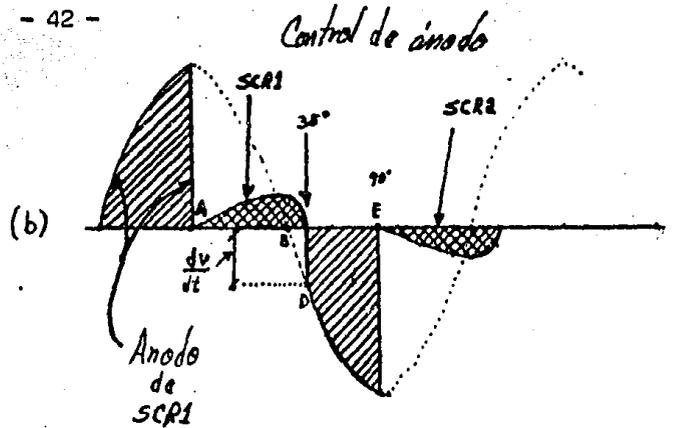
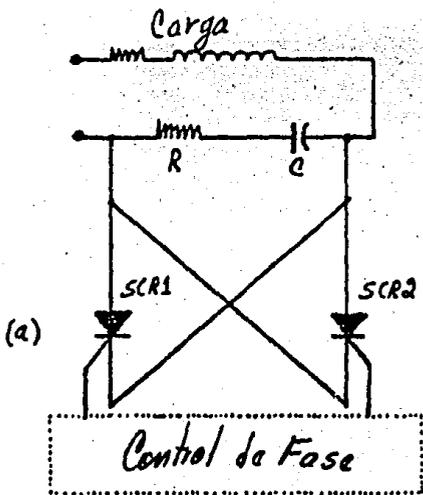


Figura 3.12.- Uso de un elemento RC para reducir el voltaje de cambio en circuitos inductivos de corriente alterna.

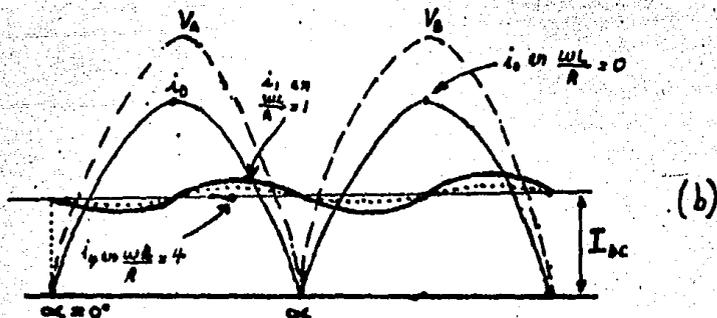
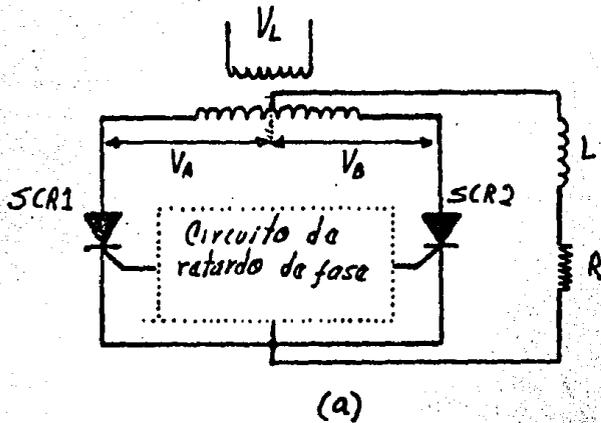


Figura 3.13.- a) Rectificador con carga inductiva y resistiva. b) Forma de onda del circuito de (a).

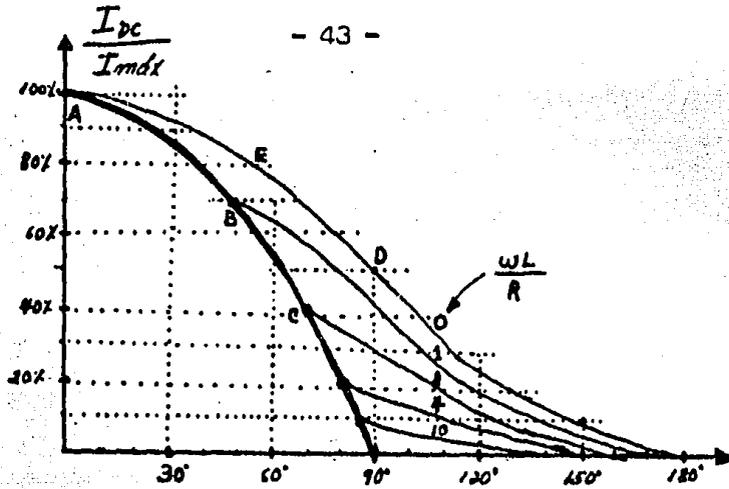


Figura 3.14.- Corriente media de la figura 3.13 contra α

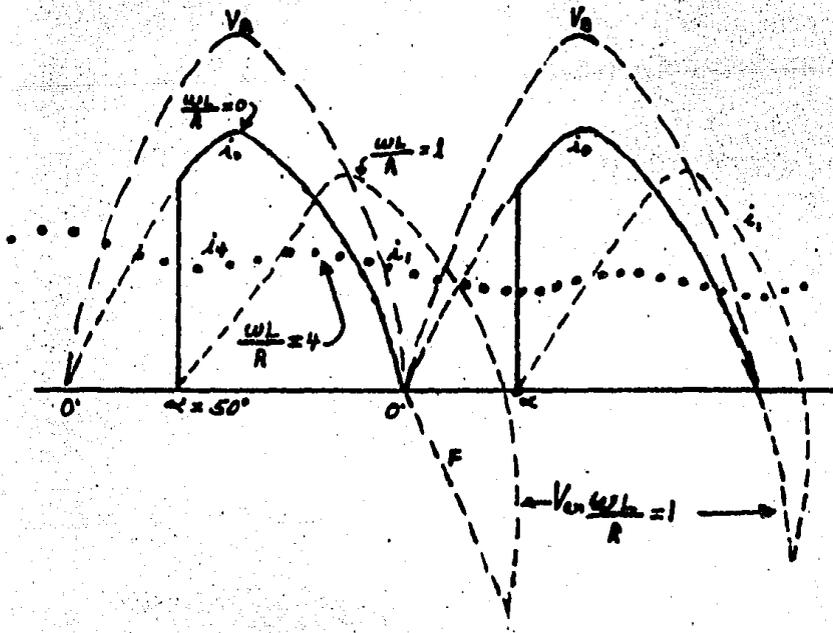


Figura 3.15.- Forma de onda de la figura 3.13 al retardar el disparo.

3.2.8.- "RECTIFICADORA DE ONDA COMPLETA CON UNA CARGA QUE PRESENTA UNA FUERZA ELECTROMOTRIZ"

En este caso tenemos conectado un rectificador de onda completa conectado a una batería o a la armadura de un motor de CD y nos vamos a concretar más específicamente al caso de un motor de CD.-

En la figura 3.17 podemos ver que cada medio ciclo es aplicado a un voltaje V a cada uno de los SCR que están conectados en serie con la armadura de un motor, el cual puede ser visto como una carga inductivo-resistiva que incluye una fuerza contraelectromotriz V_g . Si suponemos que el campo del motor está excitado independientemente y que además es constante el campo ϕ , el par del motor será proporcional a I_{DC} .- Como V_g se incrementa con la velocidad de la armadura, también se elevará el potencial en el cátodo.- Este potencial de cátodo será la diferencia entre el voltaje aplicado $v = \sqrt{2}V \text{ Sen}wt$ y $V_g + V_t$ donde V_t es una constante del silicio y es aproximadamente de 0.7 voltios.-

Si los SCR son desplazados por diodos, el ángulo de conducción α_e será igual a:

$$\alpha_e = \text{Sen}^{-1} (V_g + V_t) / \sqrt{2} V \dots\dots\dots (3)$$

También si consideramos despreciable la inductancia de armadura, la corriente no podrá circular después de α_1 (figura 3.18) y por lo tanto el ángulo total de conducción estará dado por:

$$\alpha_t = \pi - \alpha_e \dots\dots\dots (4)$$

Si cada SCR es disparado con un cierto retardo " α " y $L = 0$

la corriente media de armadura será:

$$I_{DC} = (1/\pi) \int_{\alpha}^{\alpha_t} [\sqrt{2}] V \text{ Sen } \omega t - (V_g + V_t) / R \, d(\omega t) \dots\dots\dots (5)$$

o bien:

$$I_{DC} = (1/\pi R) \left[\sqrt{2} V (\text{Cos } \alpha_g + \text{Cos } \alpha_t) - (V_g + V_t) (\alpha_t^* - \alpha_g^*) \right] \dots (6)$$

Nota: El asterisco nos está indicando que son ángulos expresados en radianes.

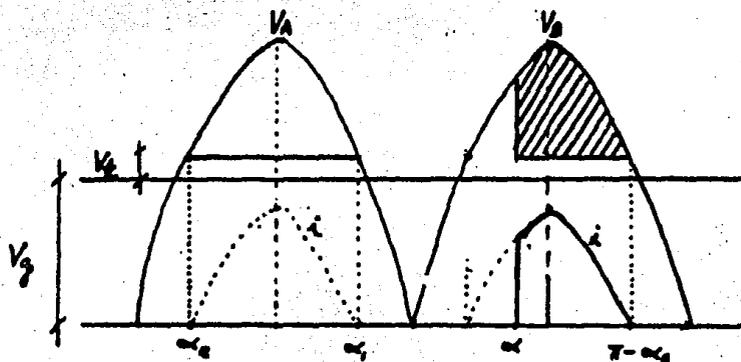
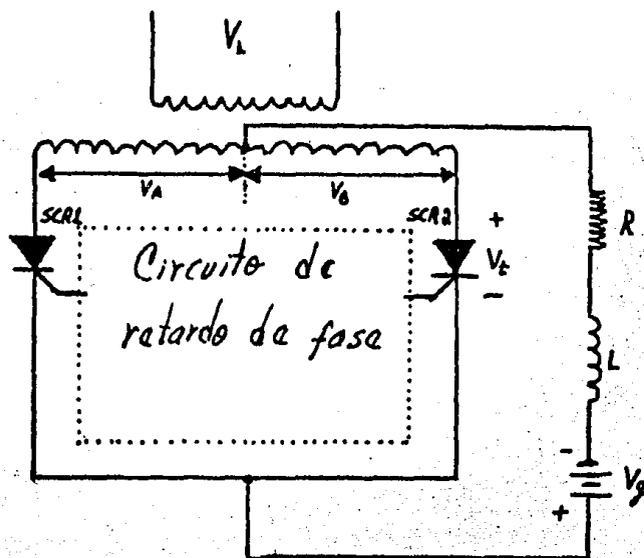


Figura 3.16.- a) Circuito de la figura 3.13 con la adición de una fem.
 b) Forma de onda del circuito.

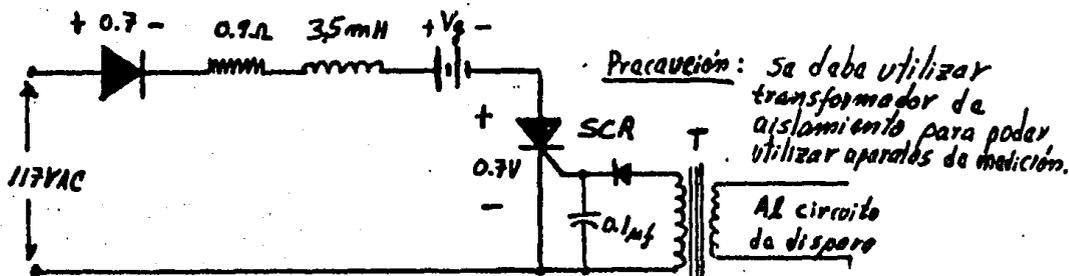


Figura 3.17.- Diagrama de medio circuito del puente rectificador.

3.2.9.- "CIRCUITO DE CONTROL DE EXCITACION DEL MOTOR DE C.D."

El diseño de un circuito que introduzca un cierto retardo α para poder controlar la corriente aplicada a la armadura de un motor de C.D., no es tan sencillo debido a que se tiene un circuito inductivo, el cual está presentando una fuerza contraelectromotriz y para poder regular la corriente aplicada en tal circuito, se necesita diseñar uno que haga parecer que los SCR's tienen conectada una carga puramente resistiva.- Sin embargo, los conceptos fundamentales antes expuestos, serán muy útiles para este fin.-

El circuito se diseñó basándose parte en el modelo de un circuito que controla a una rebobinadora que contiene un motor de 1 HP y puede verse que está constituido básicamente por un oscilador que contiene un UTJ, el cual está generando una rampa.- La variación de la pendiente de la rama nos va a dar el retardo α necesario para disparar los SCR's.- Esta variación es fijada mediante una resistencia variable (referencia)- constituida por un fotoacoplador que contiene un transistor de efecto de campo el cual está actuando como una resistencia variable controlada por la intensidad de radiación infraroja proveniente de un diodo emisor.- La señal de control procedente del convertidor digital-analógico es aplicada a este diodo emisor y es así como se logra la acción de control.-

El oscilador a su vez es modulado por los transistores Q_1 y Q_2 con las señales provenientes de la corriente de armadura I_a y la fuerza contraelectromotriz E_g del motor.- El transistor Q_2 está actuando también como una resistencia variable solo que controlada por el voltaje de error resultante de la resta de las señales de voltaje de E_g e I_a y por lo tanto la frecuencia de oscilación de UTJ está determinada por Q_2 y C_7 .

La salida del oscilador es aplicada al primario de un transformador de aislamiento y los secundario de este transformador están conectados a las compuertas de los SCR's.-

El circuito de disparo contiene además un elemento RC constituido por C_4 y R_{16} que está conectado entre la línea de alimentación positiva y la referencia, siendo su finalidad la de proveer un cierto retardo τ en la respuesta del motor durante algún transitorio inesperado (incluyendo el arranque).

La señal de corriente proveniente de la resistencia sensora conectada en serie con el motor, está alimentado a un divisor de tensión constituido por R_8 y R_9 , cuya función es la de ajustar a su valor óptimo el nivel de esta señal para que opere correctamente el circuito.- Además esta señal es filtrada por R_{13} , C_1 , C_8 y R_{15} para proveer un nivel de DC continua a la base de Q_1 .- Esto se hace debido a que la corriente I_a no está en fase con el voltaje de la línea.-

El voltaje E_g generado, también es pasado por un divisor de tensión constituido por R_2 , R_1 , R_3 y aplicado al emisor de Q_2 a través de la resistencia R_{17} .- Finalmente el punto suma de la corriente I_a , el voltaje E_g y la referencia, es realizado por Q_2 , el cual como ya se mencionó anteriormente actúa como una resistencia controlada por el voltaje de error, obteniéndose así la variación dependiente en la rampa generada por el UTJ.-

El voltaje de alimentación del circuito, es de 9.1 voltios y está fijado por el diodo zener D_2 , el cual está conectado al voltaje de línea a través de los diodos D_3 , D_4 , D_5 y D_6 .- Además el voltaje de alimentación del circuito no está filtrado debido a que el mismo está diseñado

para oscilar solo durante cada semiciclo con la finalidad de que los pulsos de disparo, estén sincronizados con el voltaje rectificado proveniente de la línea.-

Haciendo referencia a las figuras 3.17 y 3.18, la primera nos — presenta el diagrama de medio circuito del puente rectificador y la segunda representa el diagrama global del circuito de excitación y para poder controlar el campo y armadura del motor, fué necesario hacer dos circuitos idénticos.-

3.3.- "SIMULACION EN COMPUTADORA ANALOGICA DE UN MOTOR DE C.D., CONTROLADO POR CAMPO Y ARMADURA".

El poder representar un modelo físico en una computadora analógica, puede ser una herramienta muy poderosa para los diseñadores de sistemas puesto que es posible simular el comportamiento del mismo bajo diferentes condiciones de trabajo.-

El comportamiento físico de un motor de C.D. también puede ser simulado en una computadora analógica, teniéndose así la ventaja de poder analizar el comportamiento aproximado en motores de diferentes capacidades.- Cabe hacer la aclaración que debido a la baja capacidad del motor utilizado en el sistema de control, se prefirió hacer las pruebas en el mismo directamente.-

Para poder hacer la simulación primero se tienen que establecer las ecuaciones que gobiernan el funcionamiento de un motor de C.D., por lo que:

La ecuación diferencial del circuito del campo es:

$$V_f(t) = R_f i_f(t) + L_f \frac{di_f(t)}{dt} \dots\dots\dots (1)$$

La ecuación diferencial del circuito de armadura es:

$$V_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + K_a K_f \omega_m(t) i_f(t) \dots\dots (2)$$

- donde: $V_f(t)$ = Voltaje aplicado al campo
 $V_a(t)$ = Voltaje aplicado a la armadura
 $I_a(t)$ = Corriente que circula por la armadura
 $I_f(t)$ = Corriente que circula por el campo

- Ra = Resistencia de armadura
- Rf = Resistencia de campo
- Lf = Inductancia del campo
- La = Inductancia en la armadura
- $\omega_m(t)$ = Velocidad del motor
- Ka, Kf = Constantes propias de cada motor.

Las constantes Ka y K_f, se definen como:

$$K_a = \frac{(\# \text{ de conductores en la armadura})}{2} \times \frac{(\# \text{ de Polos})}{\text{Trayectorias}}$$

$$y: K_f = \frac{\text{Flujo por polo en el motor}}{\text{Corriente de campo}} = \frac{\phi}{i_f(t)}$$

Por lo que: $K_a K_f = K_{af}$

Además se sabe que el par del motor es igual a :

$$T_m(t) = K_{af} i_a(t) \dots\dots\dots (3)$$

Por otro lado el par del motor se define también como:

$$T_m(t) = f_{eq} \omega_m(t) + J_{eq} \frac{d\omega_m(t)}{dt} \dots\dots\dots (4)$$

donde:

- f_{eq} = Coeficiente de fricción viscosa equivalente del motor y carga (referida al eje).
- J_{eq} = Momento de inercia equivalente del motor y carga (referida al eje).

Si sacamos la transformada de Laplace de las ecuaciones (1), (2), (3) y (4), nos quedan como:

$$V_f(s) = (R_f + sL_f) I_f(s) \dots\dots\dots(5)$$

$$V_a(s) = (R_a + sL_a) I_a(s) + K_{af} I_f(s) W_m(s) \dots\dots\dots(6)$$

$$T_m(s) = K_{af} I_f(s) I_a(s) \dots\dots\dots(7)$$

$$T_m(s) = (f_{eq} + sJ_{eq}) W_m(s) \dots\dots\dots(8)$$

Con las ecuaciones anteriores, quedan establecidas las bases para poder realizar la simulación.- Sin embargo, para ello primero es necesario construir un reograma (figura 3.20), que nos involucre esas ecuaciones por lo cual es necesario reordenarlas.-

De las ecuaciones (5), (6), (7) y (8) se tiene que:

$$sI_a(s) = \frac{V_a(s)}{L_a} - \frac{K_{af} I_f(s) W_m(s)}{L_a} - \frac{I_a(s) R_a}{L_a} \dots\dots\dots(9)$$

$$sW_m(s) = \frac{T_m(s)}{J_{eq}} - \frac{f_{eq}}{J_{eq}} W_m(s) = \frac{K_{af} I_f(s) I_a(s)}{J_{eq}} - \frac{f_{eq}}{J_{eq}} W_m(s) \dots\dots\dots(10)$$

$$sI_f(s) = \frac{V_f(s)}{K_f} - \frac{I_f(s) R_f}{L_f} \dots\dots\dots(11)$$

Debido a que son dos variables de entrada como puede verse en la figura 3.19 y dos variables de salida que son el par y la velocidad, el sistema puede considerarse como un sistema multivariable y por lo tanto la representación matemática de la función de transferencia solo se podría hacer representándola mediante una matriz de transferencia.- El diagrama representativo del motor en computadora analógica, puede verse en la figura 3.20.-

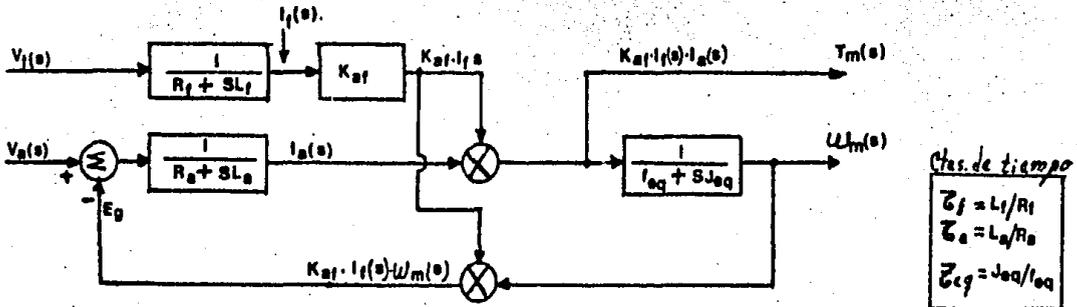


Figura 3.19.- Diagrama de bloques de un motor de C.D., controlado por campo y armadura.

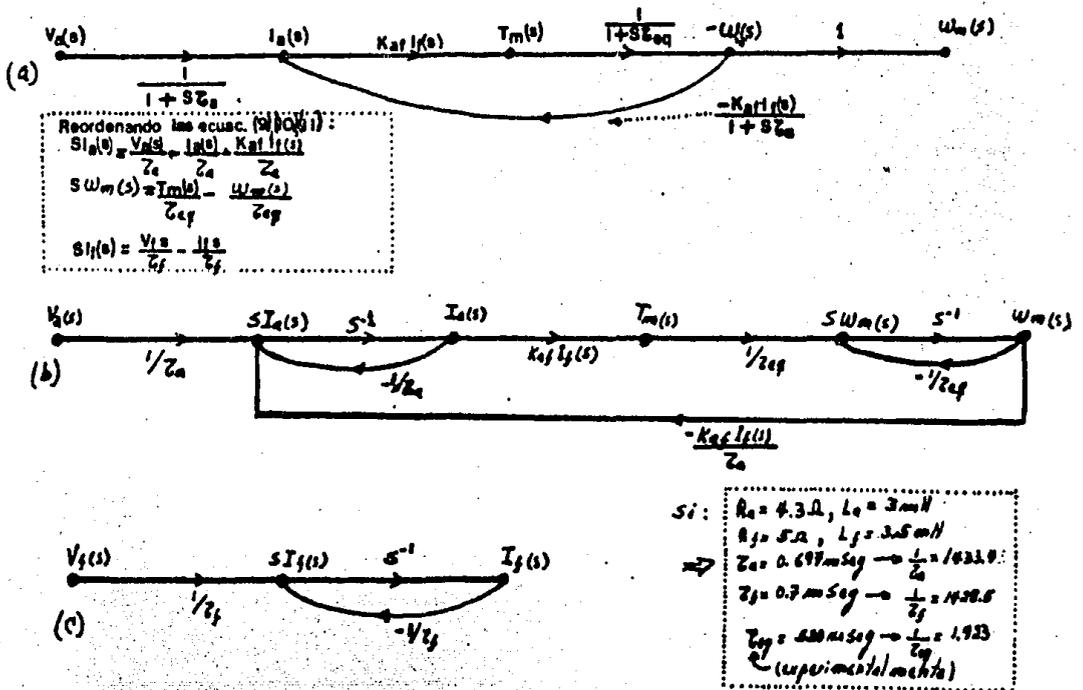
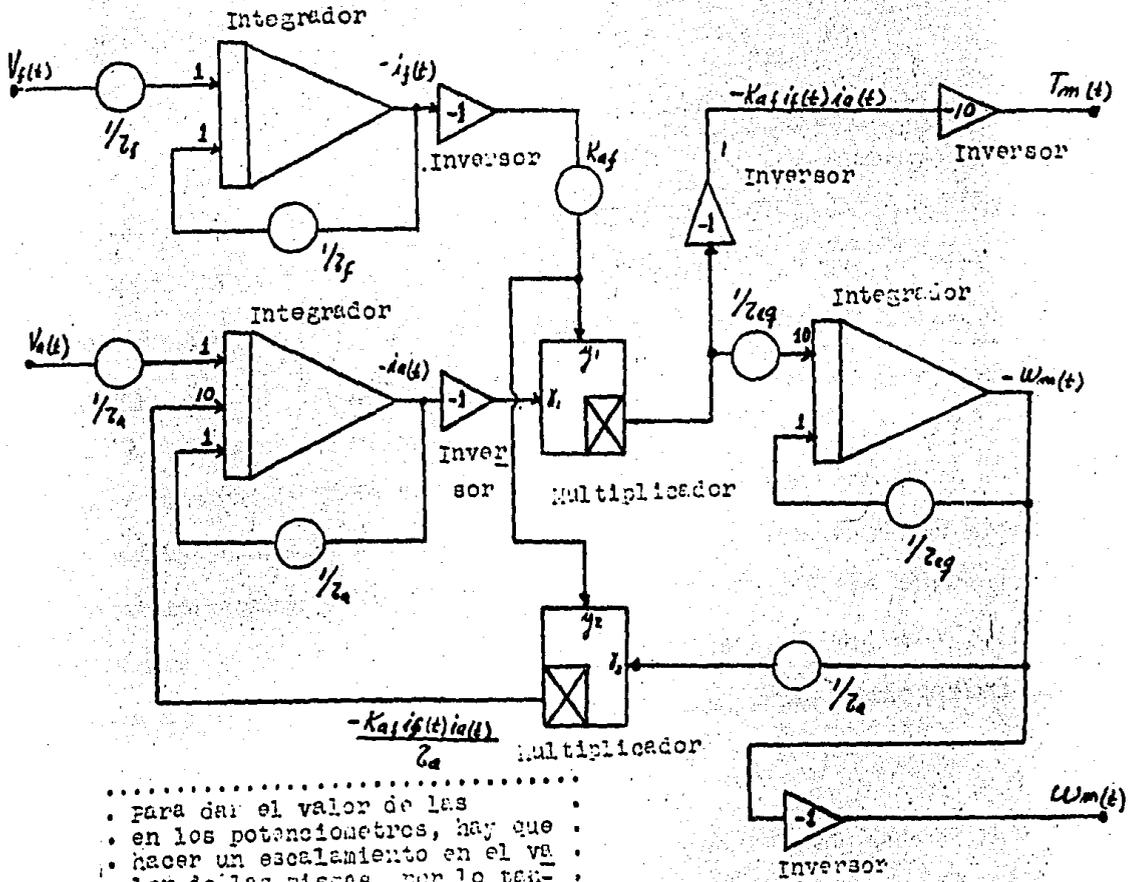


Figura 3.20.- a, b) Representan la ecuación que gobierna al motor.- c) Representa el campo.



Para dar el valor de las
 en los potenciómetros, hay que
 hacer un escalamiento en el va-
 lor de las mismas, por lo tan-
 to:
 $1/z_s = 0.142, 1/z_a = 0.143,$
 $1/z_{eq} = 0.192.$

Figura 3.21.- Representación en computador analógico de un motor de C.D., controlado por campo y armadura.

CAPITULO IV

"SISTEMA DE ADQUISICION Y TRANSFERENCIA DE DATOS".

4.1.- INTRODUCCION:

Una Computadora no siempre está equipada con sistemas que le sirvan para comprobar si un sistema analógico funciona correctamente o si es necesario hacer alguna corrección en el mismo.- Para que dicha computadora actúe sobre el sistema, es necesario usar un sistema de interfaces que nos transforman una señal analógica en una palabra digital o una palabra digital en una señal analógica y debido a ésto se diseñó un sistema de interfaces que se denominó como "Sistema de Adquisición y Transferencia de Datos".- Este sistema de interfaces fué diseñado para funcionar en combinación con el Startet Kit del microprocesador 780 (que de hecho constituye una microcomputadora) y la manera como estén conectados los componentes electrónicos que integran a estos sistemas, es función del hardware que se emplee; más adelante daré una descripción formal del hardware empleado en cada uno de estos sistemas.-

El sistema de adquisición de datos, está constituido por el convertidor analógico digital y los circuitos sensores del sistema analógico, siendo su función fundamental avisar del estado actual del sistema a la microcomputadora.- El sistema de transferencia de datos lo constituyen dos convertidores digital-analógico independientes y su función es transformar las palabras digitales que les proporcione la microcomputadora en señales analógicas capaces de actuar sobre el sistema analógico provocando alguna modificación en su comportamiento.-

Para poder hacer un análisis de estos sistemas, los vamos a dividir en dos grupos: (figura 4.1)

a) Interfases de entrada { - Convertidor analógico-digital
.- Circuitos Sensores. }

b) Interfases de salida.

4.2.- INTERFASES DE ENTRADA.

4.2.1.- "EL CONVERTIDOR ANALOGICO DIGITAL".

La función básica de un convertidor analógico-digital (A/D), es traducir el lenguaje del universo analógico, al lenguaje del universo digital.- La señal analógica se presenta a la entrada del convertidor A/D y después de un tiempo finito de conversión se dispone de la salida digital para usarse en una computadora digital.- Podemos decir que existen varios métodos de convertir las señales analógicas en digitales como son los convertidores que usan un integrador de doble pendiente, el convertidor comparador, el convertidor de aproximaciones sucesivas etc.- En el sistema de control se eligió el sistema de aproximaciones sucesivas del cual se hará una descripción de su funcionamiento más adelante.-

Para poder seleccionar un convertidor analógico-digital, se deben considerar factores como son su costo, su facilidad de manejo, velocidad de conversión, resolución y su compatibilidad con la computadora que se va a emplear.-

El convertidor analógico-digital empleado, es el ADC 809 (figura 4.2 que cuenta además con un multiplexor analógico con ocho canales de entrada, ocho bits de salida y se alambró de manera que se pudiera conec

tar directamente al bus de datos del microprocesador 280 y se eligió el puerto 94 como puerto de selección de canal analógico y el puerto 98 como puerto de entrada mediante el hardware utilizado.-

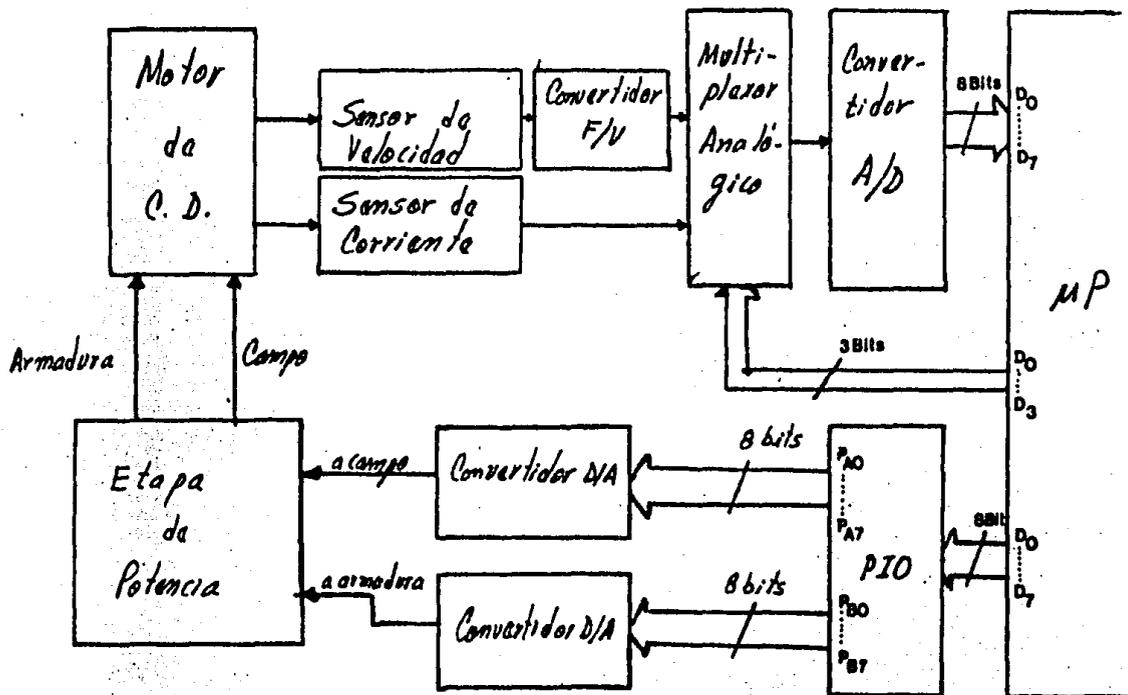


Figura 4.1.- Diagrama de bloques del sistema de control.

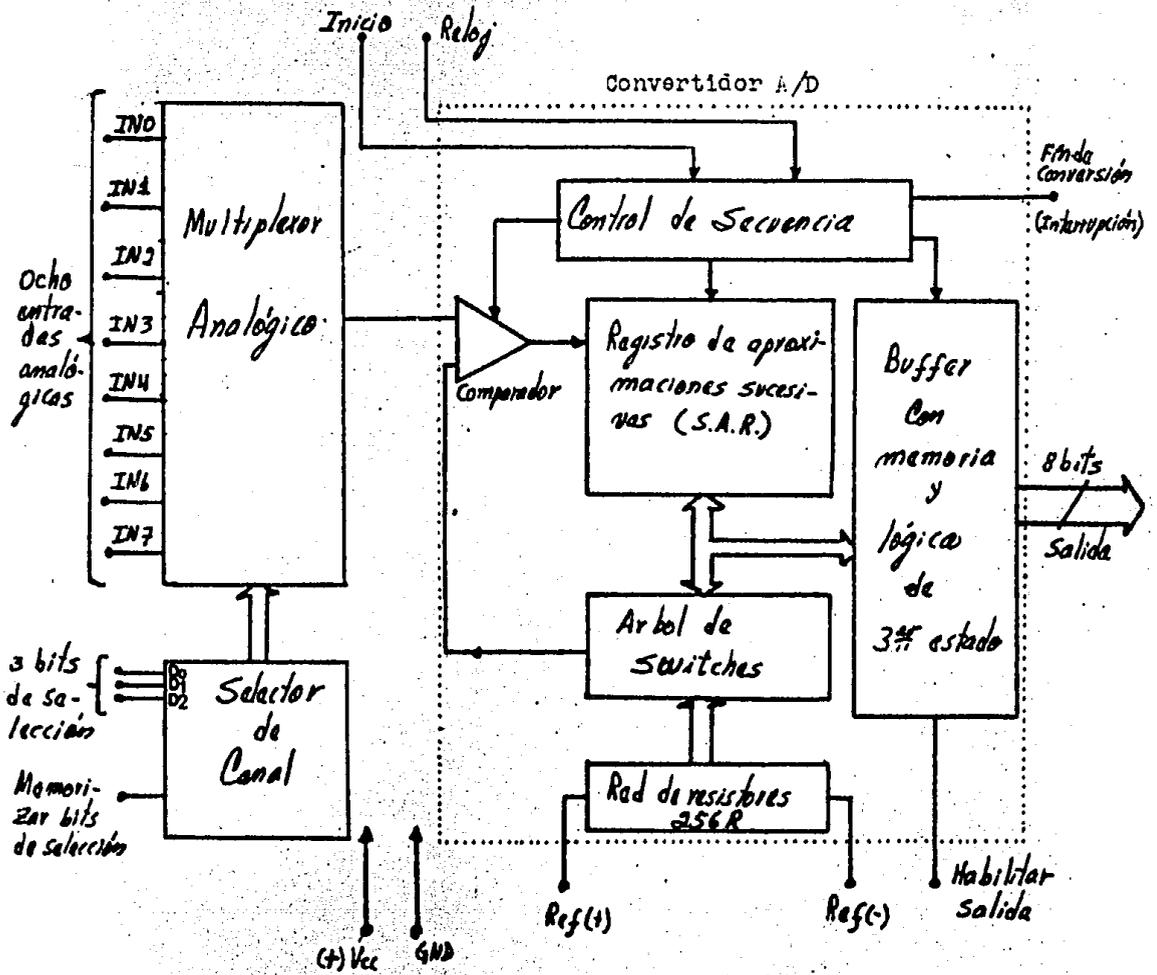


Figura 4.2.- El convertidor analógico-digital

4.2.1.1.- DESCRIPCION FUNCIONAL DEL CONVERTIDOR ANALOGICO-DIGITAL.-

El convertidor analógico digital de aproximaciones sucesivas, en pleado, podemos decir que por si solo constituye un sistema de adquisición de datos, debido a la complejidad del circuito que lo integra.- Como puede verse en la figura 4.2, el convertidor en si está dividido en cuatro secciones principales, las cuales son:

- a) La red de registros.
- b) El registro de aproximaciones sucesivas.
- c) El comparador.
- d) El multiplexor analógico.-

a) La red de resistores.-

La red de resistores (figura 4.3), está constituida por un arreglo de 256 resistores en serie que se encuentran conectados a un árbol de switches analógicos que son controlados por el registro de aproximaciones sucesivas, siendo su función la de establecer una red de comparación entre el nivel de voltaje de entrada y el voltaje de referencia. Esta red de resistores en serie, fué preferida por el fabricante en vez de la red $R/2R$ a causa de su inherente monotonicidad, lo cual nos da una mayor estabilidad en el convertidor.- Esta monotonicidad es bastante importante en sistemas de control de malla cerrada, porque de lo contrario podrían causarse oscilaciones que serían desastrosas para todo el sistema.

b) El registro de aproximaciones sucesivas.-

El registro de aproximaciones sucesivas (S.A R), ejecuta ocho operaciones para aproximar el voltaje de entrada.- Este registro a su vez, es puesto en reset por el flanco positivo del pulso de inicio de

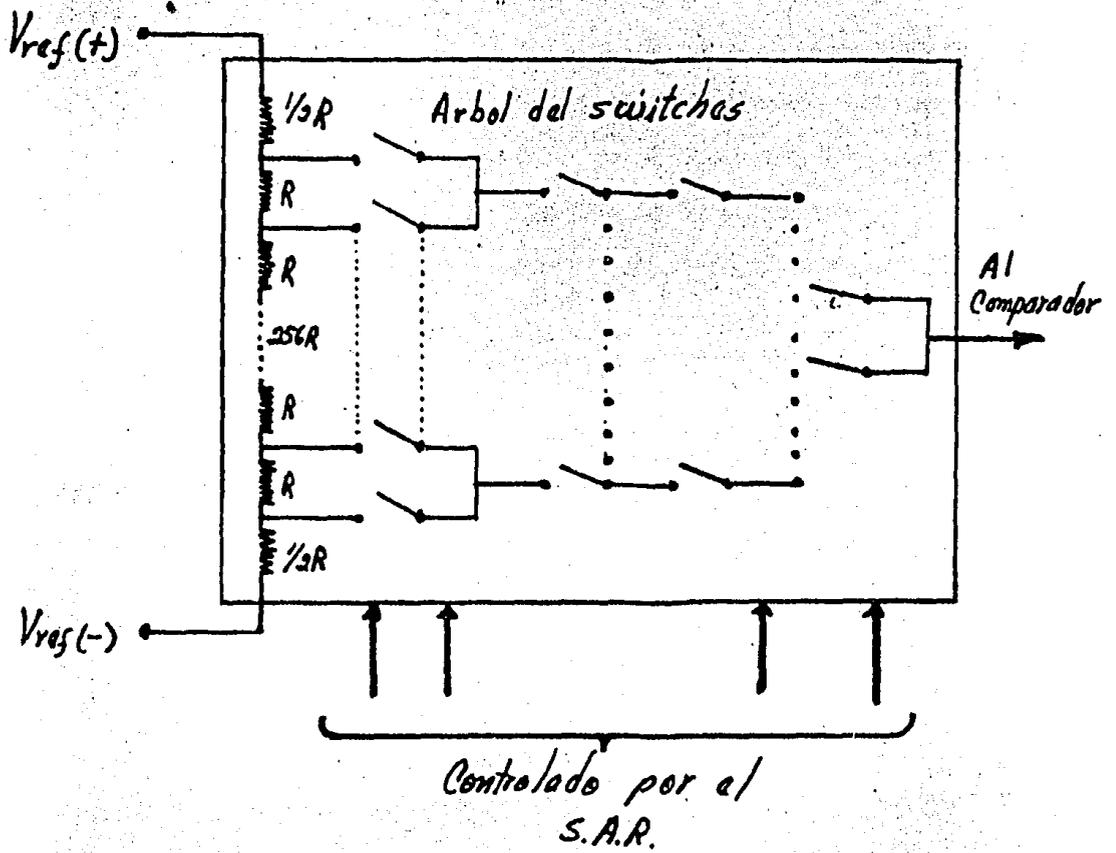


Figura 4.3.- Red de resistores y árbol de switches.

conversión (start).- La conversión se inicia con la caída del pulso de inicio (flanco negativo), la cual solo puede ser interrumpida por un nuevo pulso de inicio de conversión.- Al terminar la conversión aparecerá un pulso de fin de conversión (EOC), el cual aparece entre cero y ocho pulsos de reloj, después del pulso de inicio de conversión.- La lógica empleada en este registro, no la especifica el fabricante en el manual.-

c).- El comparador.-

Esta sección es la más importante del convertidor, ya que de esta depende mucho la precisión del dispositivo.- El método más efectivo para satisfacer los requerimientos del convertidor, es usar un comparador con chopper estabilizador que consiste en transformar una señal de CD de entrada en una señal de AC.- Esta señal posteriormente es filtrada por un amplificador de AC de muy alta ganancia y entonces el nivel de DC es recuperado.- La ventaja de esta técnica es que vuelve extremadamente insensible al circuito, de los cambios de temperatura.-

d).- El multiplexor analógico.-

El multiplexor contiene ocho canales analógicos de entrada que son seleccionados utilizando un decodificador de dirección que contiene un latch que mantiene memorizados el canal que se seleccionó, mediante un pulso positivo.- Este pulso normalmente, es el pulso de inicio de conversión.- Al dar el pulso de inicio de conversión, también se selecciona mediante software el canal que se requiere; este canal es memorizado con la transición de 0 a 1 lógico de dicho pulso.-

Este convertidor fué diseñado por el fabricante como un sistema

de adquisición de datos para sistemas de conversión radiométrica.- Podemos decir que en sistemas radiométricos la variable física que está siendo medida, es expresada como un porcentaje de la escala máxima, cosa que no es necesaria dentro de un standard absoluto. Podemos decir que el voltaje de entrada en el ADC809, está expresado por la siguiente ecuación:

$$\frac{V_{in} - V_z}{V_{fs} - V_z} = \frac{D_x}{D_{m\acute{a}x} - D_{m\acute{i}n}}$$

donde: V_{in} = Voltaje de entrada en el convertidor.

V_{fs} = Voltaje a escala máxima.

V_z = Voltaje cero.

D_x = Dato en cuestión que está siendo medido.

$D_{m\acute{a}x}$ = Límite máximo.

$D_{m\acute{i}n}$ = Límite mínimo.

También se puede mediante la siguiente ecuación, expresar la salida del convertidor, en función del voltaje de entrada.

$$N = \frac{V_{in} - V_{ref(-)}}{V_{ref(+)} - V_{ref(-)}} \times 256$$

donde: V_{in} = Voltaje de entrada. = $0.5 V_{m\acute{a}x}$

$V_{ref(+)}$ = Voltaje en la referencia positiva. = 5 voltios

$V_{ref(-)}$ = Voltaje en la referencia negativa. = 0 voltios

En base a la ecuación anterior, y de acuerdo a los rangos seleccionados, para el convertidor, la ecuación queda de la siguiente manera:

Si hacemos

$V_{in} = 5$ Voltios

$$N = \frac{5 - 0}{5 - 0} \times 256$$

$$N = 256$$

4.2.1.2.- "HARDWARE ADICIONAL EMPLEADO EN COMBINACION CON EL CONVERTIDOR A/D Y SU FUNCIONAMIENTO".-

Para poder conectar el convertidor A/D, al Started Kit del micro procesador 280, fué necesario emplear algunos circuitos adicionales, con el fin de poder dar la secuencia correcta a las señales de control.- Se utilizaron algunos de los arreglos ya implementados en el Started Kit.-

Para poder describirse el funcionamiento global del convertidor es necesario ver antes el diagrama de bloques del circuito presentado en la figura 4.4.-

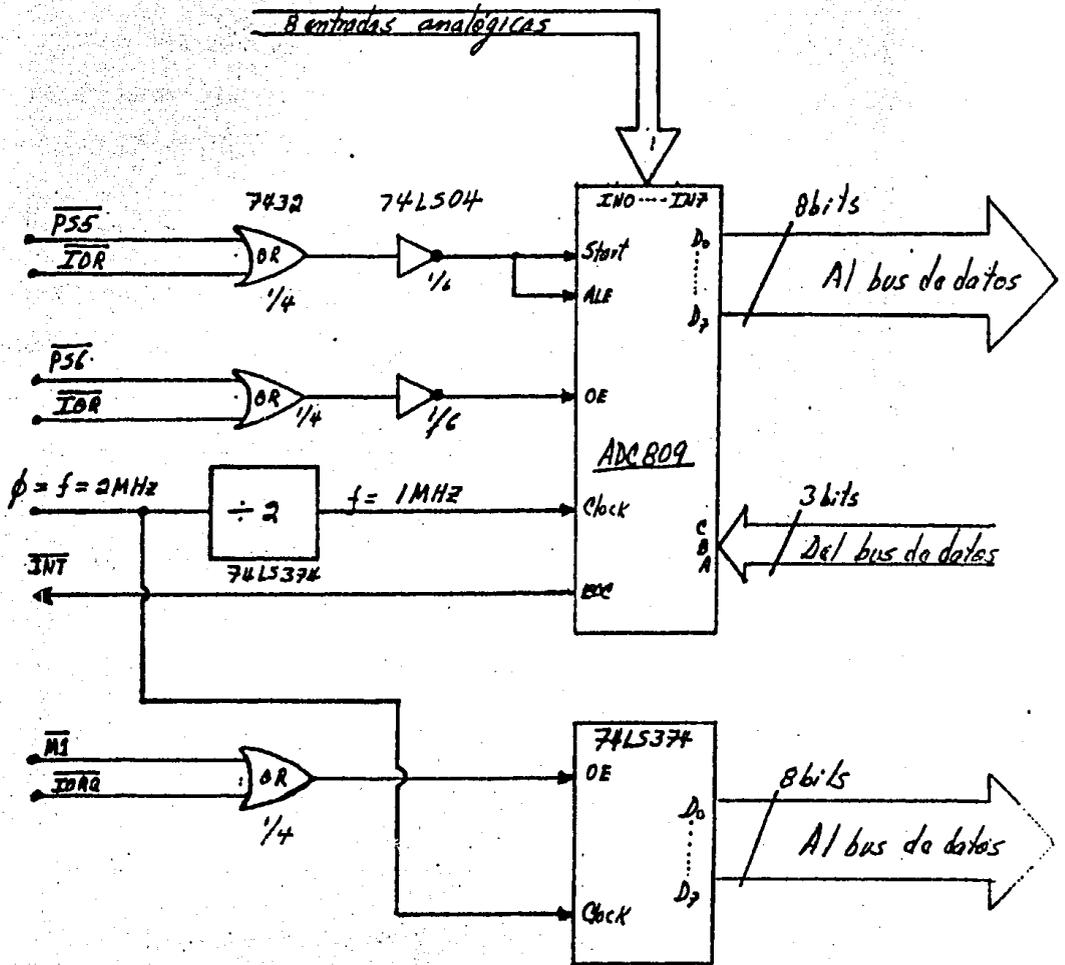


Figura 4.4.- Diagrama de conexiones del convertidor analógico-digital.

El microprocesador Z80 que es la unidad central de procesos (CPU), genera seis señales de control que le sirven para manejar los dispositivos en entrada-salida y la memoria.- De estas seis señales solo describiré las que serán útiles para el manejo del convertidor A/D.- Cabe hacer notar que todas estas señales con activo/bajo, es decir que cuando están en nivel cero lógico son activas.-

El CPU genera una señal $\overline{\text{IORQ}}$, con la cual se requiere la transferencia de información del dispositivo en cuestión y para poder diferenciar una señal de lectura de una señal de escritura, el CPU envía dos señales, las cuales son $\overline{\text{RD}}$ y $\overline{\text{WR}}$, para lectura y escritura respectivamente. Esta transferencia de información entre el CPU y los dispositivos periféricos de entrada-salida, se realiza con la ejecución de los ciclos de entrada-salida (figura 4.5).-

Las señales $\overline{\text{IOR}}$ e $\overline{\text{IOW}}$, son obtenidas por la combinación de $\overline{\text{IORQ}}$ con $\overline{\text{RD}}$ e $\overline{\text{IORQ}}$ con $\overline{\text{WR}}$ respectivamente.- Esto es realizado por medio de unas compuertas "OR" (figura 4.6), que ya vienen integradas en el Star-
ted Kit.

Otra señal que nos será de utilidad, es $\overline{\text{MI}}$ en combinación con $\overline{\text{IORQ}}$ (figura 4.6), con lo que se obtiene la señal $\overline{\text{INTA}}$ y es generada cuando hay una solicitud de interrupción del convertidor A/D.- Con esta solicitud de interrupción, el convertidor avisa al microprocesador que tiene un dato para ser leído, mediante una señal de fin de conversión (EDC), que también es activo-bajo y está conectada a la terminal $\overline{\text{INT}}$ de interrupción mascarable del CPU.- El modo de interrupción empleado para poder manejar el convertidor, es el modo 0, el cual consiste en que cuan-

do hay una solicitud del dispositivo, sólo será atendida cuando el CPU termine de ejecutar la instrucción que realizaba enviando las señales $\overline{M1}$ y \overline{IORQ} . Luego es el dispositivo el que se encarga de mandar la siguiente instrucción a realizar por el CPU.- La instrucción a realizar fué implementada mediante los circuitos adicionales empleados en el convertidor A/D.- Siendo esta instrucción el número hexadecimal "FE" con el cual se le indica al CPU que salte a la dirección indicada por el registro par \overline{HL} , preparando así los pasos necesarios para poder leer el dato en cuestión proporcionado por el convertidor.- Para poder configurar esta instrucción, se emplearon ocho flip-flops tipo D contenidos en el circuito 74LS374 de la familia TTL.- Debe hacerse la aclaración que el modo de interrupción antes mencionado, no fué necesario utilizarlo en el programa usado para el control del motor, debido a que no es un proceso rápido.

Para poder diferenciar de qué dispositivo se trata, necesitamos emplear un decodificador de las líneas "A₀ a A₇", provenientes del bus de direcciones del microprocesador Z80, obteniéndose así las líneas \overline{PSX} de selección de puerto.- El decodificador empleado, es el 74LS138 que viene ya integrado en el sistema.-

La figura 4.7 muestra el diagrama de conexiones y la tabla de verdad de este decodificador.-

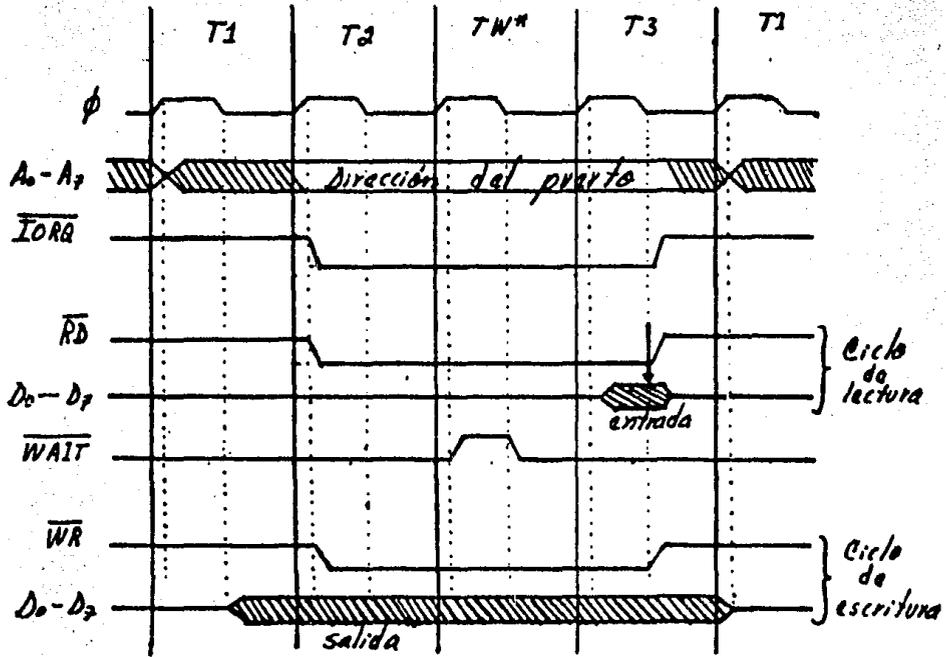
La señal generada en \overline{PSX} para selección de dispositivo, fué mezclada de la siguiente manera: La combinación de $\overline{PS5}$ con \overline{IOW} (figura 4.6), posteriormente invertida por el inversor, 7404, nos da el pulso de inicio de conversión y además el pulso necesario para memorizar mediante el Latch integrado en el circuito del convertidor el canal analógico seleccionado mediante Software.- La combinación de $\overline{PS6}$ con \overline{IDR} también in-

vertida, nos habilita al convertidor A/D para poder ser leído por el microprocesador.-

El reloj del sistema del Z80 funciona a 2MHz y fué necesario dividir esta frecuencia mediante un contador binario (74LS93), ya que la frecuencia máxima de operación del convertidor es de 1280 KHz.- A pesar de ésto se vió experimentalmente que el convertidor podía operar perfectamente a 2MHz, pero por razones de seguridad se dejó operando a 1MHz.-

Los niveles de voltaje del circuito correspondiente al convertidor A/D, operan a + 5 voltios y los rangos de voltaje en las entradas analógicas se seleccionaron de 0 a 5 voltios.- Traducido este lenguaje digital tenemos 256 estados lógicos posibles dependientes del voltaje de entrada en el convertidor.- Los ocho canales de entrada del convertidor, están protegidos con diodos Zener de 5.1 voltios a 1/2 watt entre la terminal de entrada y tierra.- Para eliminar el posible ruido de alta frecuencia que se pudiera introducir al circuito (incluyendo el ruido de 60 Hz de la línea de alimentación), se conectaron en paralelo con los diodos condensadores de 0.1 μ F.-

Todos los circuitos adicionales empleados, con el convertidor, pertenecen a la familia TTL y para la construcción del circuito impreso, fué necesario emplear una placa con circuito impreso en ambas caras, debido a la complejidad del circuito.-



- A_0-A_7 = Los 8 primeros bits del bus de direcciones.-
- \overline{IOR} = Solicitud de transferencia de información. (activo-bajo)
- \overline{RD} = Señal de lectura (activo-bajo)
- \overline{WR} = Señal de escritura (activo-bajo)
- \overline{WAIT} = Señal de espera (activo bajo)
- D_0-D_7 = Los 8 bits del bus de datos.
- ϕ = Pulsos de reloj.

Figura 4.5.- Diagrama de tiempos para los ciclos de lectura y escritura.

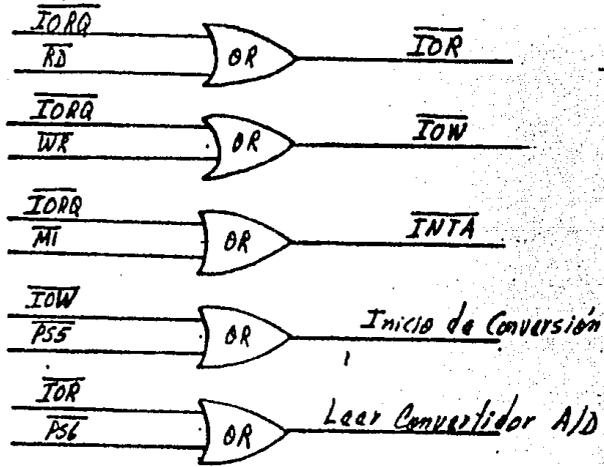
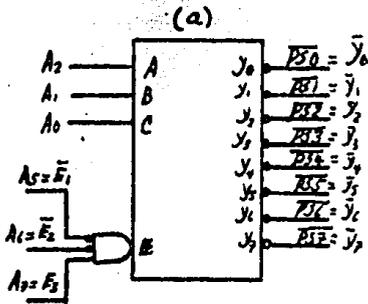


FIG. 4.6.- Obtención de las señales de control necesarias para el funcionamiento del convertidor A/D.



(b)
 H = 1 lógico
 L = 0 lógico
 X = no importa

Entrada			Salida										
H	X	X	X	X	X	H	H	H	H	H	H	H	H
X	H	X	X	X	X	H	H	H	H	H	H	H	H
X	X	L	X	X	Y	H	H	H	H	H	H	H	H
L	L	H	L	L	L	L	H	H	H	H	H	H	H
L	L	H	H	L	L	H	L	H	H	H	H	H	H
L	L	H	L	H	L	H	H	L	H	H	H	H	H
L	L	H	L	L	H	H	H	H	L	H	H	H	H
L	L	H	L	L	H	H	H	H	H	L	H	H	H
L	L	H	L	H	H	H	H	H	H	H	L	H	H
L	L	H	L	H	H	H	H	H	H	H	H	L	H
L	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L

FIG. 4.7.- Codificador de puertos, a) Diagrama de conexiones b) tabla de verdad.

4.2.2.- "LOS CIRCUITOS SENSORES".-

Los circuitos sensores empleados en el sistema de control, los podemos considerar como parte de la interfaz de entrada, debido a que estos son los que sensan y acondicionan la información del estado actual del motor.- Esta información es transformada a digital por el convertidor A/D para luego ser procesada por el microprocesador y poder mandar así la orden de control apropiada.-

Los circuitos sensores del motor están constituidos por el sensor de velocidad y el sensor de corriente.

4.2.2.1.- "EL SENSOR DE VELOCIDAD".-

La función de este sensor es sensar la velocidad del motor y transformarla a un nivel proporcional de voltaje, para poder ser manejada por el convertidor A/D.- Este sensor está constituido básicamente por los siguientes elementos: el emisor y sensor de reflejo, el amplificador el convertidor frecuencia-voltaje y el disco giratorio.-

El emisor y sensor de reflejo, es un dispositivo constituido por un diodo emisor infrarrojo y un fototransistor que está conectado a un amplificador, el cual está trabajando en la región de corte o saturación dependiendo de la señal de entrada.- Este amplificador (figura 4.8), se diseñó partiendo de una base experimental y se obtuvieron las siguientes lecturas a la salida del circuito:

En Corte (1 lógico)

$V_o = 4.2$ voltios

$I_{c3} = 100$ MA

$I_D = 16.6$ mA

En saturación (0 lógico)

$V_o = 0.25$ Voltios

$I_{c3} = 2$ mA

$I_D = 16.6$ mA

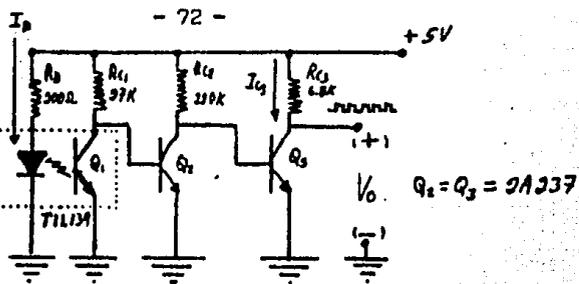


Fig. 4.8.- El sensor de velocidad.

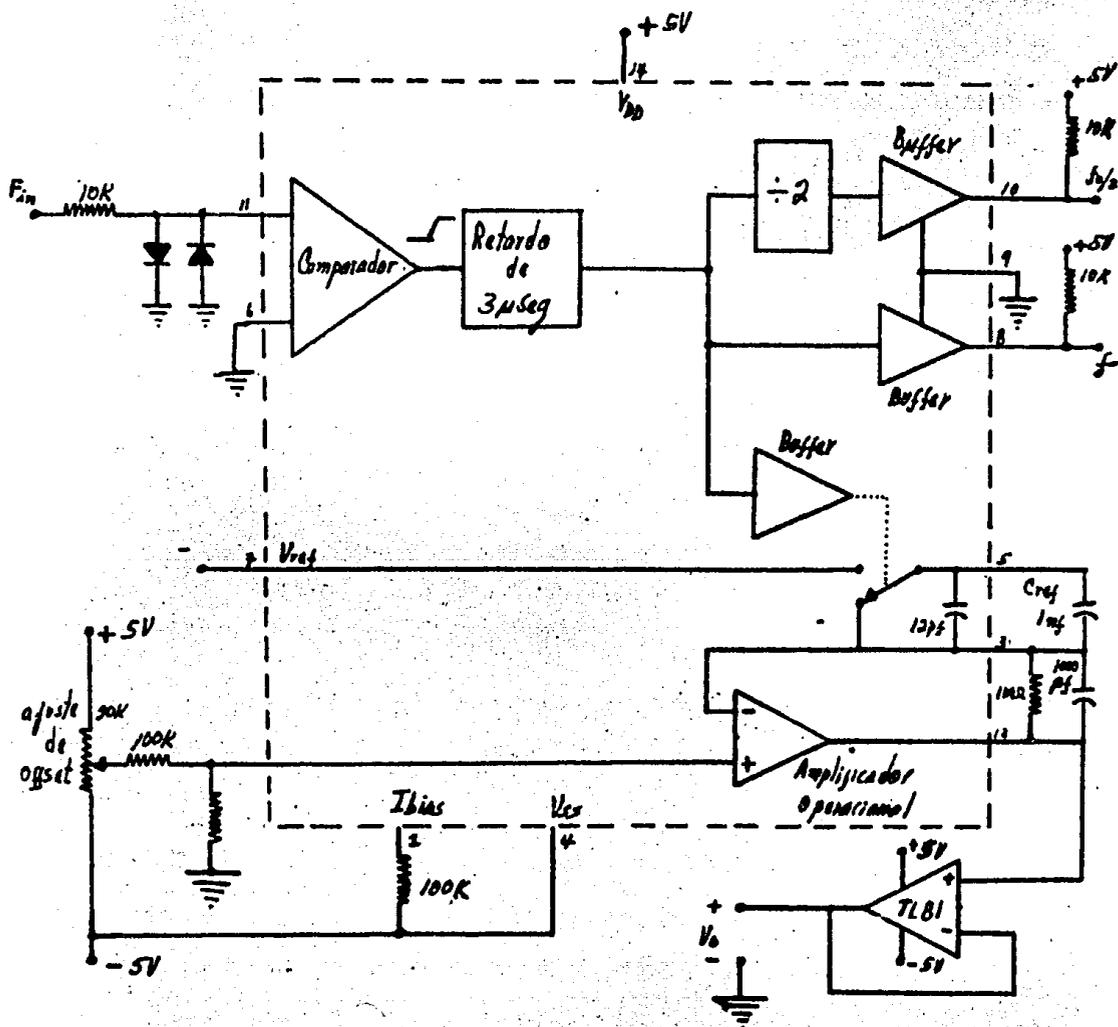


Fig. 4.9.- El convertidor frecuencia-voltaje.

El disco giratorio está acoplado al eje del motor y contiene seis marcas metálicas que son sensadas por el emisor y sensor de reflejos, correspondiendo al "0" lógico, el momento en que son sensadas las marcas metálicas y el "1" lógico al momento en que no hay ninguna marca. La razón de que el disco tenga seis marcas, es aumentar la precisión del circuito sensor de velocidad y el rango máximo de velocidad del motor es de 10,000 rpm.- Debido a que el disco giratorio está ranurado, la frecuencia máxima de salida en el amplificador, es de 1 KHZ o sea 60,000 pulsos por minuto.- Esta frecuencia es transformada a un nivel de voltaje por el convertidor frecuencia-voltaje, cuya frecuencia puede ser de 0 a 5 voltios, dependiendo de la velocidad del motor.-

El convertidor frecuencia-voltaje (figura 4.9), utilizado, es el 9400 que está fabricado con las técnicas MOS y bipolares.- Al alambrar el circuito integrado se protegió la entrada de este con diodos y a la salida se le conectó un amplificador operacional con ganancia unitaria para aislarlo.- La función de transferencia correspondiente al circuito de la figura 4.9, es la siguiente:

$$V_{\text{ovt}} = (-V_{\text{ref}})(C_{\text{ref}})(R_{\text{int}})(F_{\text{in}})$$

Siendo F_{in} la frecuencia de entrada, V_{ref} el voltaje de referencia, V_{ovt} el voltaje de salida. C_{ref} es la capacitancia de referencia y R_{int} que en combinación con C_{int} (que no aparece), y el amplificador operacional constituyen un integrador.- Cada cruce por cero en el comparador de entrada, causa que el condensador C_{ref} se cargue con una constante de carga $q = C_{\text{ref}} \times V_{\text{ref}}$.- Esta carga es sumada con el voltaje de offset en el integrador, obteniéndose así a la salida un voltaje de CD proporcional a la frecuencia de entrada.-

Para poder utilizar este convertidor F/V de acuerdo a nuestros fines, hubo que calcular algunos de los parámetros presentes en la función de transferencia anterior, lo cual se hizo de la siguiente manera: se fijó como frecuencia máxima de entrada 1KHZ, el voltaje máximo de salida en 5 voltios y para facilitar más los cálculos se fijaron también -
Vref = - 5 voltios Rint = 1M , Cint = 1000 pf, quedándonos entonces por calcular Cref cuyo valor es:

$$C_{ref} = \frac{V_{ovt}}{(-V_{ref})(R_{int})(F_{in})} = \frac{5}{(5)(1 \times 10^6)(1 \times 10^3)} = 1 \mu f$$

4.2.2.2.- "EL SENSOR DE CORRIENTE".-

El sensor de corriente transforma la señal de corriente proveniente de la armadura del motor a un nivel proporcional de voltaje que sea a el adecuado para ser usado por el convertidor A/D y está constituido esencialmente por dos resistencias de 1.8 Ohms en paralelo con una capacidad de disipación de potencia igual a 10 watts cada una, lo que nos dá una resistencia equivalente de 0.9 Ohms a 20 watts.- La señal proveniente de este sensor, no es un nivel continuo de DC y es necesario transformarla a un nivel continuo de voltaje positivo y ésto se logra mediante un integrador.- Este integrador está constituido por un amplificador operacional en combinación con algunos elementos pasivos (condensadores y resistencias) como se indica en la figura 4.10 y su función de transferencia es la siguiente:

$$\frac{V_{oi}}{V_i} = \left(\frac{1}{1 + sC_1 R_2} \right) \left(- \frac{R_2}{R_1} \right)$$

Donde: V_{oi} es el voltaje a la salida del amplificador operacional siendo su voltaje máximo de salida, igual a 5 voltios y V_i que es el voltaje proveniente de la resistencia sensora de corriente.-

La corriente máxima que se puede sensor, es de 3 amperes a los cuales corresponde el voltaje máximo de 5 voltios en la salida del integrador y cabe aclarar que el voltaje de entrada proveniente del sensor, es invertida por el amplificador operacional.- Esto se hizo para que fuera más fácil de manejar la señal de corriente.-

La fuente de voltaje que alimenta al circuito correspondiente al amplificador operacional, nos proporciona un voltaje de ± 8.9 voltios.- El voltaje a la salida de Q₁ y Q₂ está fijado por los diodos Zener más el voltaje base emisor de los transistores.-

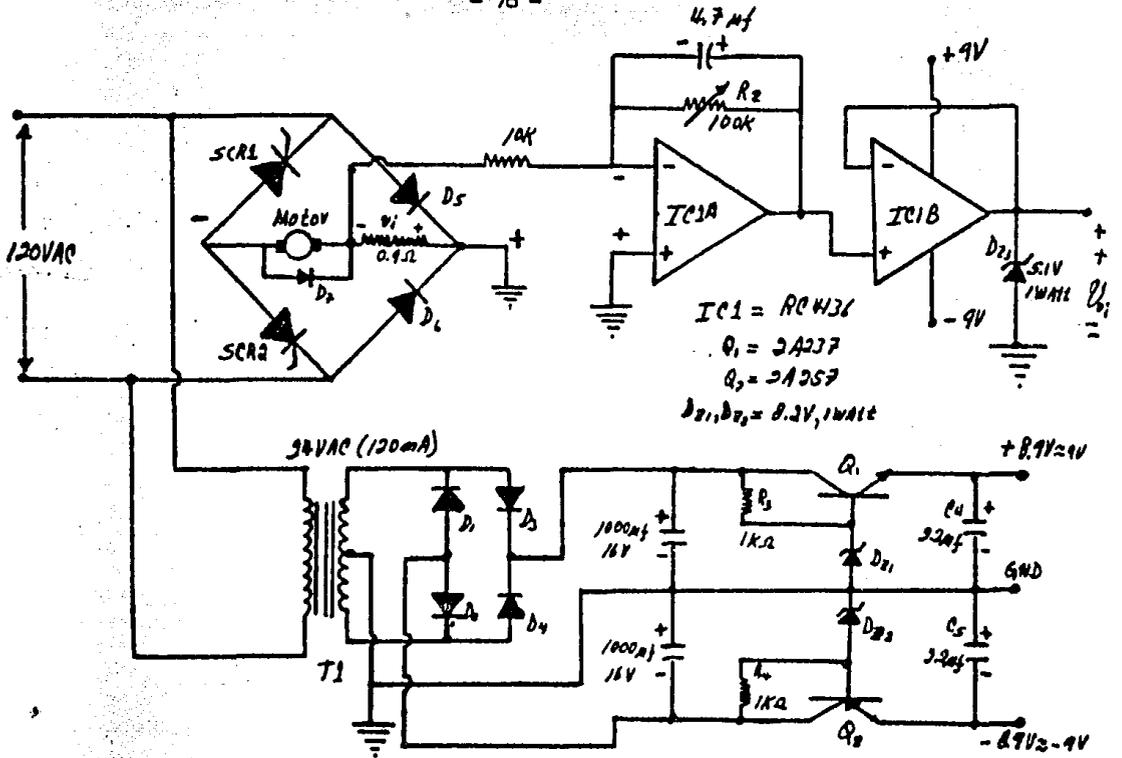


Fig. 4.10.- El sensor de corriente.

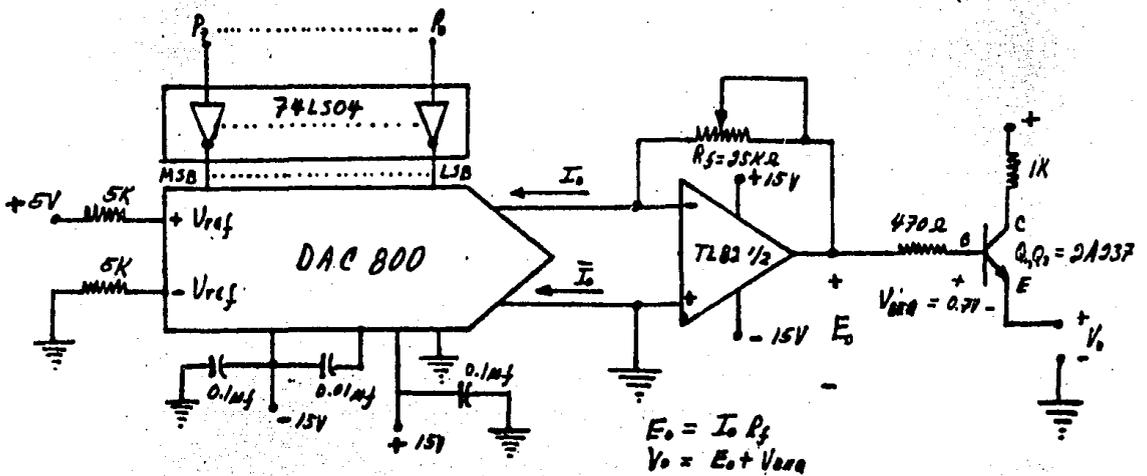


Fig. 4.11.- Diagrama del convertidor Digital-Analógico.

4.3.- "LA INTERFASE DE SALIDA".-

El Started kit del Z80, contiene una interface programable que - aunque al hablar de la interface de salida no nos estamos refiriendo precisamente a ella, podemos decir que puede ser usada para la adquisición y transferencia de datos en paralelo.- Dicha interface programable (PIO) contiene dos puertos de entrada-salida de datos.- El CPU puede configurar a los puertos de entrada-salida para ser usados con una gran variedad de dispositivos periféricos sin necesidad de emplear alguna lógica externa al circuito.- Para los fines de control del sistema, se configuraron como puertos de salida de datos mediante el software para llevar - las señales digitales de control de par y velocidad a los convertidores digital-analógico transformándose así estas señales en señales analógicas capaces de actuar sobre el control de excitación del motor.-

4.3.1.- "LOS CONVERTIDORES DIGITAL-ANALOGICO".-

En el sistema de control de par y velocidad se usaron dos convertidores digital-analógico, los cuales están conectados con otros circuitos adicionales para acondicionar las señales digitales de entrada y las señales analógicas de salida; ambas configuraciones son exactamente iguales.-

Un problema que se presentó con la interface programable del started kit del Z80, es que al momento de encenderse el sistema microcomputador en los puertos A y B de esta interface, aparecen "1" lógicos, lo cual haría que tuviéramos máximo voltaje en la salida del circuito de - los convertidores y por consiguiente, máximo voltaje en la armadura y en el campo del motor, lo cual sería bastante peligroso.- Este problema se solucionó poniendo compuertas inversoras TTL en las entradas de los convertidores.-

El convertidor D/A empleado es el DAC800 con 8 bits en paralelo de entrada el cual nos entrega niveles de corriente proporcionales a la palabra digital proporcionada por el CPU a través del PIO. Este nivel de corriente es transformado a un nivel de voltaje positivo por un convertidor corriente-voltaje que está constituido por un amplificador operacional tipo de Bifet.- El voltaje máximo de salida es posible ajustarlo variando la ganancia del amplificador operacional, pudiendo elegir un voltaje máximo entre 0 y + 15 voltios. Para poder manejar un nivel más elevado de potencia a la salida del amplificador operacional se conectó un transistor tipo NPN.- El circuito mostrado en la figura 4.11 nos indica el circuito empleado con el convertidor D/A.-

El voltaje "Eo" de salida, es proporcional a la corriente de salida "Io" del convertidor multiplicada por la resistencia Rf y el voltaje de salida "Vo" por lo tanto será el voltaje Eo más el voltaje base emisor del transistor.-

CAPITULO

"SOFTWARE".

5.1.- INTRODUCCION.-

En este capítulo se hará una descripción del software empleado en el sistema de control, su estructura y cuáles son las funciones que realiza.-

El Software empleado con el microprocesador Z80, lo constituyen todos los programas escritos en lenguaje máquina con una secuencia predestinada por el programador para que realice una función determinada y por lo tanto se puede decir, que el microprocesador en combinación con los programas empleados constituyen la inteligencia del sistema.-

Los programas le dan al microprocesador la capacidad de ser independiente y de tomar decisiones basadas en la información recibida por medio de sus sensores.-

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

- 1.- Programa principal.
- 2.- Subrutinas de incremento y decremento.
- 3.- Subrutina Delay.-

La forma como se interrelacionan estos programas del sistema, puede verse en el diagrama de flujo presentado en la figura 5.1, siendo su función principal la siguiente: a).- El programa principal pone las condiciones iniciales en el campo y la armadura del motor y además pone en marcha el sistema monitoreando continuamente la velocidad y el par; -

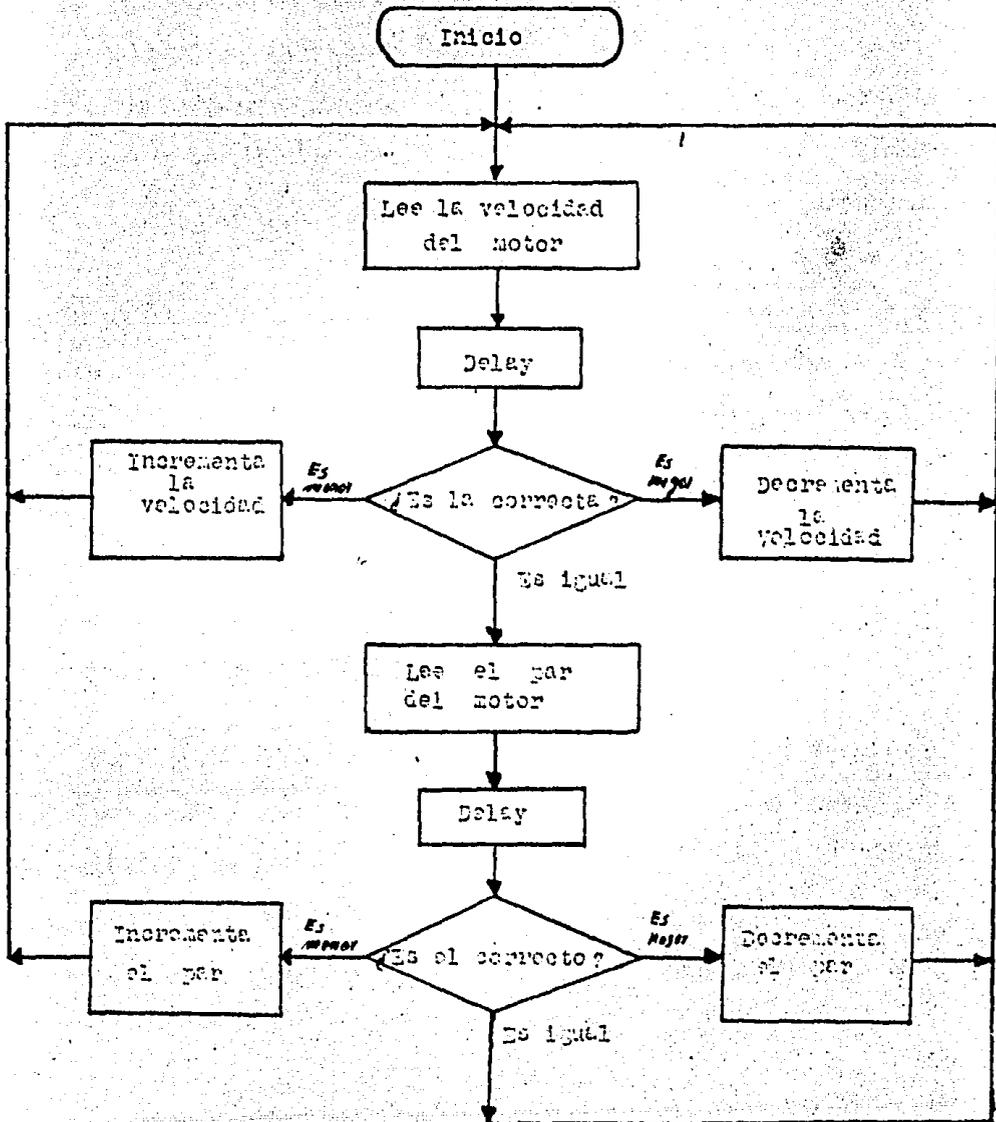


Fig. 5.1 Diagrama de flujo del programa.

En el caso de que no sean las deseables, llama a las subrutinas de incremento y decremento y además también llama a una subrutina de retardo (Delay), que permite al motor estabilizarse con los incrementos y decrementos realizados.- b).- Las subrutinas de incremento y decremento, su función principal es la de mandar la orden de control al campo y la armadura del motor para poder establecer la velocidad y el par asignados.- c).- La subrutina delay tiene una doble función muy importante que es la de dar tiempo a que el convertidor analógico-digital realice la conversión a digital de un dato proporcionado por los sensores y la de dar un tiempo de retardo suficiente para que el motor se estabilice.- Si este tiempo de retardo fuere muy pequeño, la velocidad y par del motor tenderían a oscilar peligrosamente.-

Podemos observar que existe un sistema de malla cerrada formado por el microprocesador, el motor y los sensores cuyo diagrama de bloques está referido en la figura 5.2.-

El sistema de control es capaz de sensar un error el cual es igual a la diferencia entre la velocidad deseada y la velocidad real y el par deseado con el par real.- Este error es utilizado por el algoritmo de control para generar proporcionalmente al error la señal de corrección con la cual se variará el ángulo de conducción de los tiristores y como resultado de esto, la variación del par y la velocidad.-

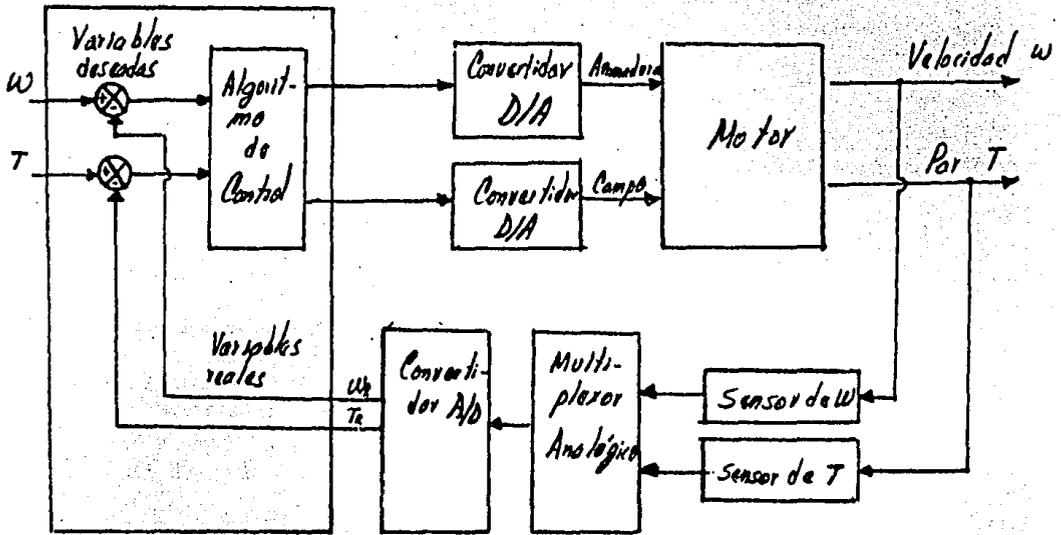


FIG. 3.2.- Diagrama de bloques del sistema.

5.2.- "PROGRAMAS DEL SISTEMA".-

Se puede decir que hasta la fecha no existe un algoritmo de control que resuelva cualquier problema de control en forma exacta, pero sin embargo existen una gran variedad de métodos que se basan en aproximaciones.-

Existen dos formas posibles de darle solución al problema; Una de ellas es plantear el problema como uno de programación lineal, lo cual complica mucho el algoritmo de control, la otra es la de utilizar medios Heurísticos que es la más usada por los diseñadores de sistemas de control y fué la que usé en este sistema.-

El algoritmo empleado lo desarrollé utilizando como base las respuestas que presentaba el motor en malla abierta bajo diferentes niveles de excitación con lo cual puedo decir que lo realicé en base a métodos de experimentación.-

A continuación presento con más detalle cada uno de los programas que forman el algoritmo de control junto con sus diagramas de flujo y los objetivos principales.- Después presentaré el listado de cada uno de ellos.

5.2.1.- "PROGRAMA PRINCIPAL".-

Sus objetivos principales son:

- 1.- Configurar los puertos del PIO como puertos de salida de datos.
- 2.- Poner el campo al máximo y la armadura a cero.
- 3.- Comenzar a incrementar el voltaje aplicado a la armadura del motor, para que se incremente la velocidad hasta el valor deseado.-

- 4.- Observa por medio del convertidor A/D el estado actuales de la velocidad y llama a las subrutinas de incremento y decremento de velocidad y la subrutina Delay para estabilizar el motor.-
- 5.- Guarda el estado leído por el convertidor en la localidad destinada a condiciones iniciales, con lo cual es posible comprobar si el motor dió el valor fijado.-
- 6.- Una vez establecida la velocidad, comienza a monitorear el par del motor y a comparar si el par es el correcto por medio del convertidor A/D.-
- 7.- Llama las subrutinas de incremento y decremento de par y a la subrutina Delay para estabilizar el motor.-
- 8.- Modifica las localidades destinadas a condiciones iniciales de par con la última orden de control dada en las subrutinas.-
- 9.- Regresa al punto 4.-

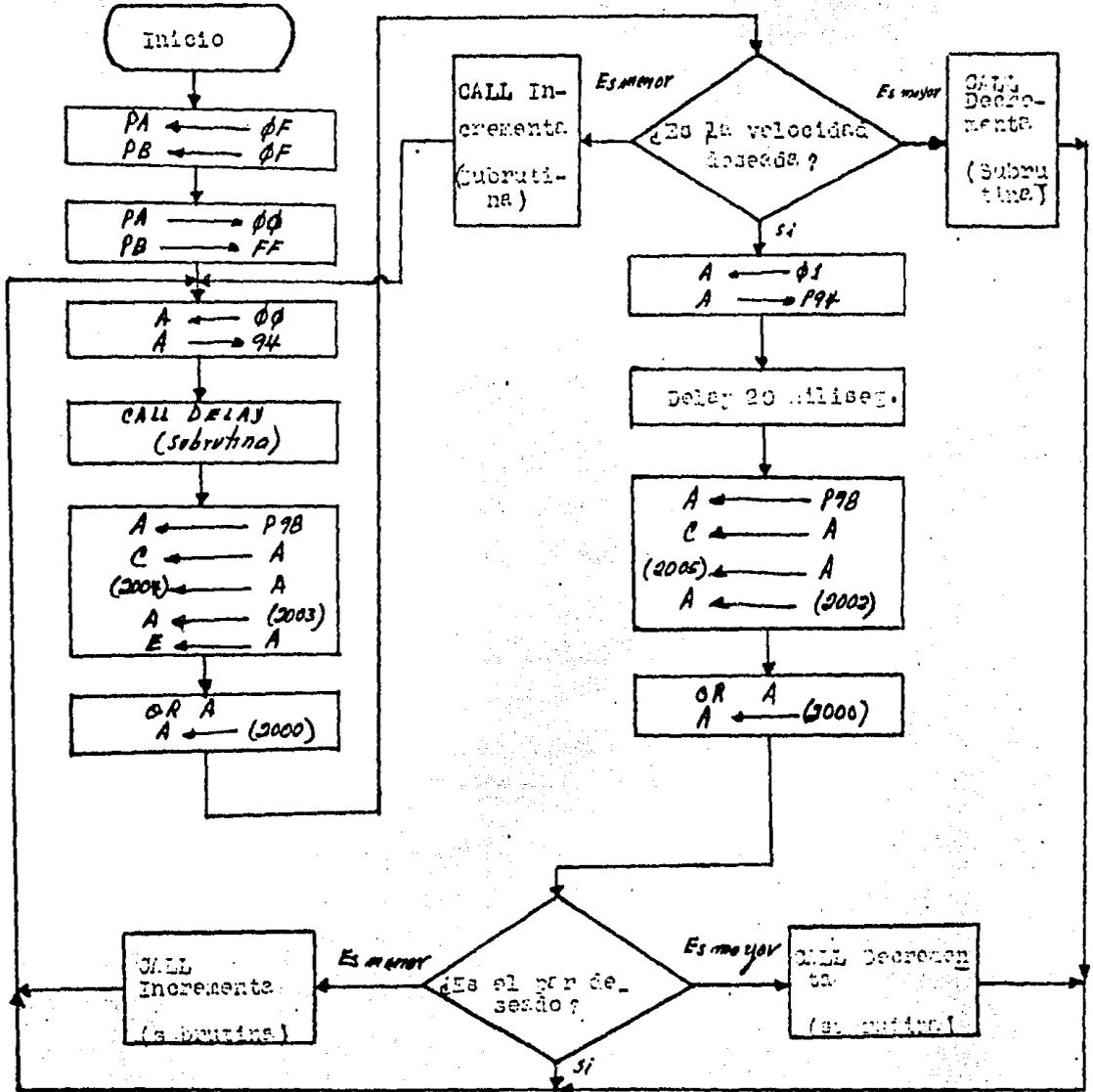


Fig. 5.3.- Diagrama de flujo del programa principal.

5.2.2.- SUBROUTINA "INCREMENTO DE VELOCIDAD".-

Sus objetivos principales son:

- 1.- Establecer un rango inferior de selección de velocidad, es decir, - que si se encuentra la velocidad dentro de ese rango, no haga ningún incremento.- El rango de selección de velocidad es necesario debido a que el convertidor A/D no puede tener la suficiente resolución debido al gran rango de velocidad y a la zona muerta presente en los fotoacopladores (del orden de 1.5 voltios).- Si no existiera este rango el motor siempre estaría oscilando alrededor del valor deseado.-
- 2.- Traer de la localidad correspondiente a condiciones iniciales la última orden de control dada a la armadura.-
- 3.- Comprobar si no se encuentra dentro de la escala máxima posible, de lo contrario, un decremento más nos haría caer la salida del convertidor D/A a la escala mínima y como resultado de ello, dejaría subitamente sin corriente a la armadura. (A la escala máxima de salida - en los puertos del PIO corresponderá la mínima salida posible a la salida del convertidor D/A y viceversa.)-
- 4.- Decrementar a un estado lógico el puerto de salida con lo cual se incrementará en un estado lógico el dato recibido por el convertidor D/A.-
- 5.- Guardar esta orden de control dada en la localidad correspondiente a condiciones iniciales.-
- 6.- Regresar al programa principal.-

5.2.3.- SUBROUTINA "DECREMENTO DE VELOCIDAD".-

Sus objetivos principales son:

- 1.- Establecer un rango superior de selección de velocidad y comprobar - si la velocidad se encuentra dentro de ese rango.-
- 2.- Traer de la localidad de condiciones iniciales la última orden de control dada.-
- 3.- Comprobar si no se encuentra dentro de la escala mínima porque de lo contrario un incremento más haría que la salida del convertidor D/A, tomara la máxima salida de voltaje haciendo que la armadura adquirie se subitamente el máximo valor de corriente.-
- 4.- Incrementar en un estado lógico el puerto de salida, decrementándose así la velocidad del motor.-
- 5.- Guardar esa orden de control en la localidad de condiciones iniciales.-
- 6.- Regresar al programa principal.

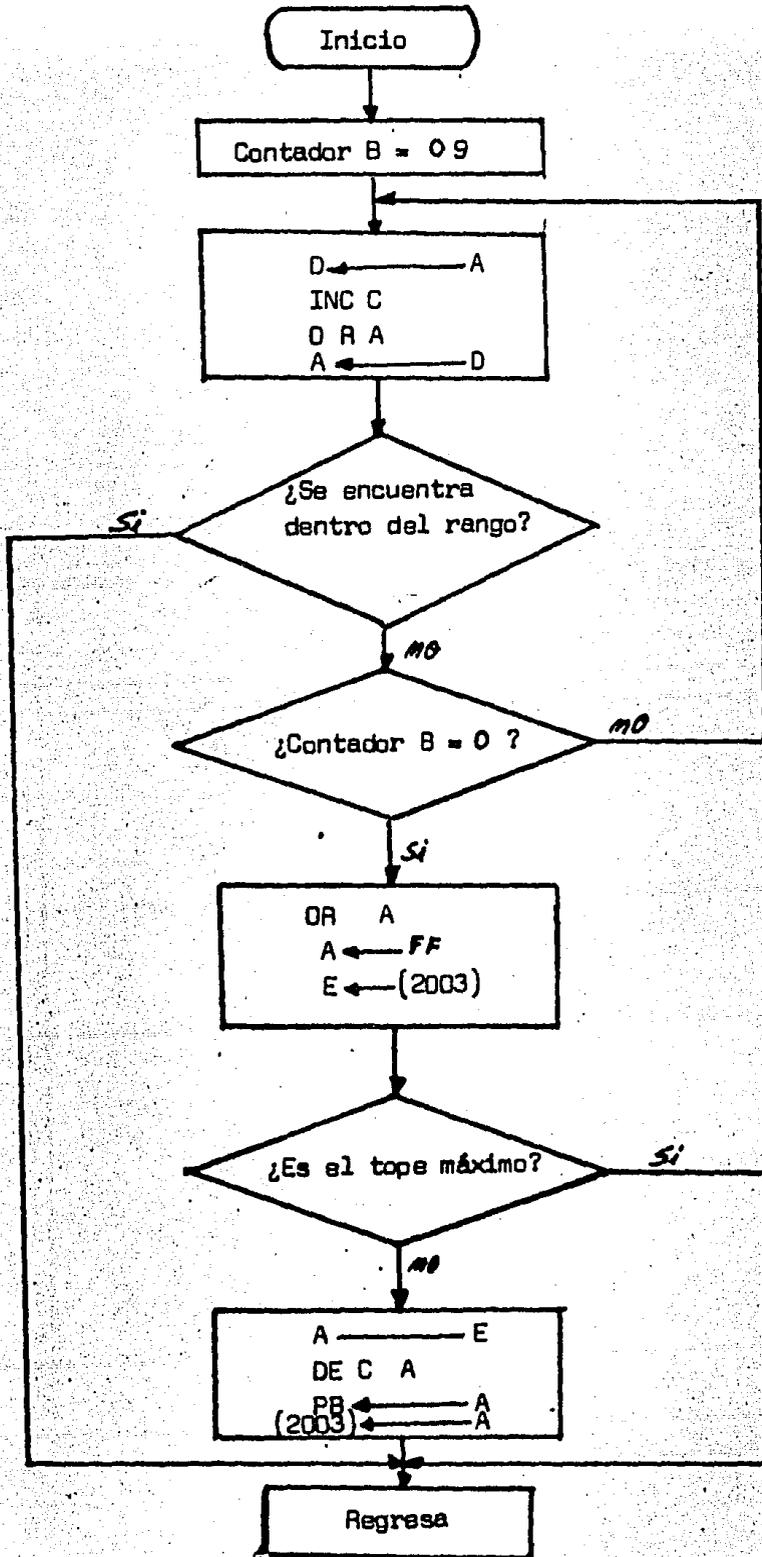


Fig. 5.4.- Diagrama de flujo de la subrutina incremento de velocidad.

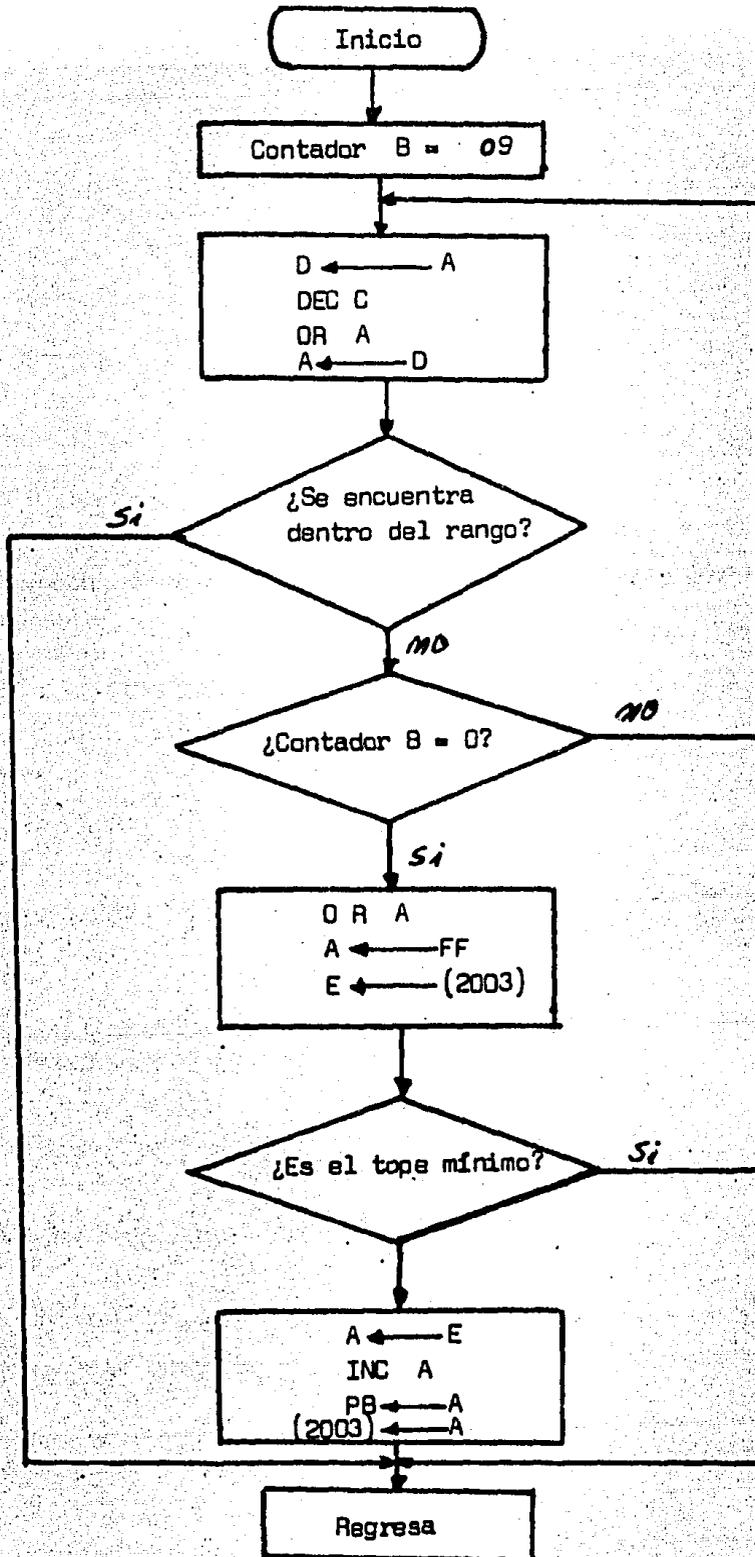


Fig. 5.5.- Diagrama de flujo de la subrutina Decremento de Velocidad.

5.2.4.- SUBROUTINA "DECREMENTO DE PAR".-

Sus objetivos principales son:

- 1.- Establecer el rango superior de selección de par, no haciendo así ninguna modificación del par si se encuentra dentro del rango.-
- 2.- Traer de la localidad de condiciones iniciales la última orden de control dada.-
- 3.- Comprobar si esta no es igual a la escala máxima del convertidor D/A, de lo contrario un incremento más dejaría peligrosamente sin campo al motor lo cual nos haría tener par máximo y máxima corriente.-
- 4.- Incrementar en un estado lógico al puerto de salida, decreméntándose así el par del motor.-
- 5.- Guardar esta orden de control en la localidad de condiciones iniciales.-
- 6.- Regresar al programa principal.-

5.2.5.- SUBROUTINA "INCREMENTO DE PAR".-

Sus objetivos principales son:

- 1.- Establecer el rango inferior de selección de par no haciendo así modificación alguna del par si se encuentra dentro del mismo.-
- 2.- Traer de la localidad de condiciones iniciales la última orden de control dada.

- 3.- Comparar si ésta no es igual a la escala mínima de salida del convertidor, de lo contrario un incremento más haría tener subitamente máxima salida en el convertidor D/A, disminuyendo así bruscamente el par a un valor mínimo.-
- 4.- Decremento en un estado lógico al puerto de salida incrementándose así el par.-
- 5.- Guardar esta orden de control en la localidad de condiciones iniciales de campo.-
- 6.- Regresar al programa principal.-

Nota: La máxima corriente aplicada al campo implicará una corriente mínima en armadura y por lo tanto un par mínimo y viceversa.-

5.2.6.- "SUBROUTINA DELAY".-

Sus objetivos principales son:

- 1.- Hacer que el sistema sea críticamente amortiguado, asegurando así que el sistema sea estable.-
- 2.- Dar tiempo al convertidor A/D a que realice su conversión.-
- 3.- Regresar al programa principal.-

Nota: Esta subrutina Delay a su vez está constituida por varias subrutinas de 20 milisegundos y está implementada en el Started Kit del Z80 y lo único que hice fué llamarla cuantas veces fué necesario.

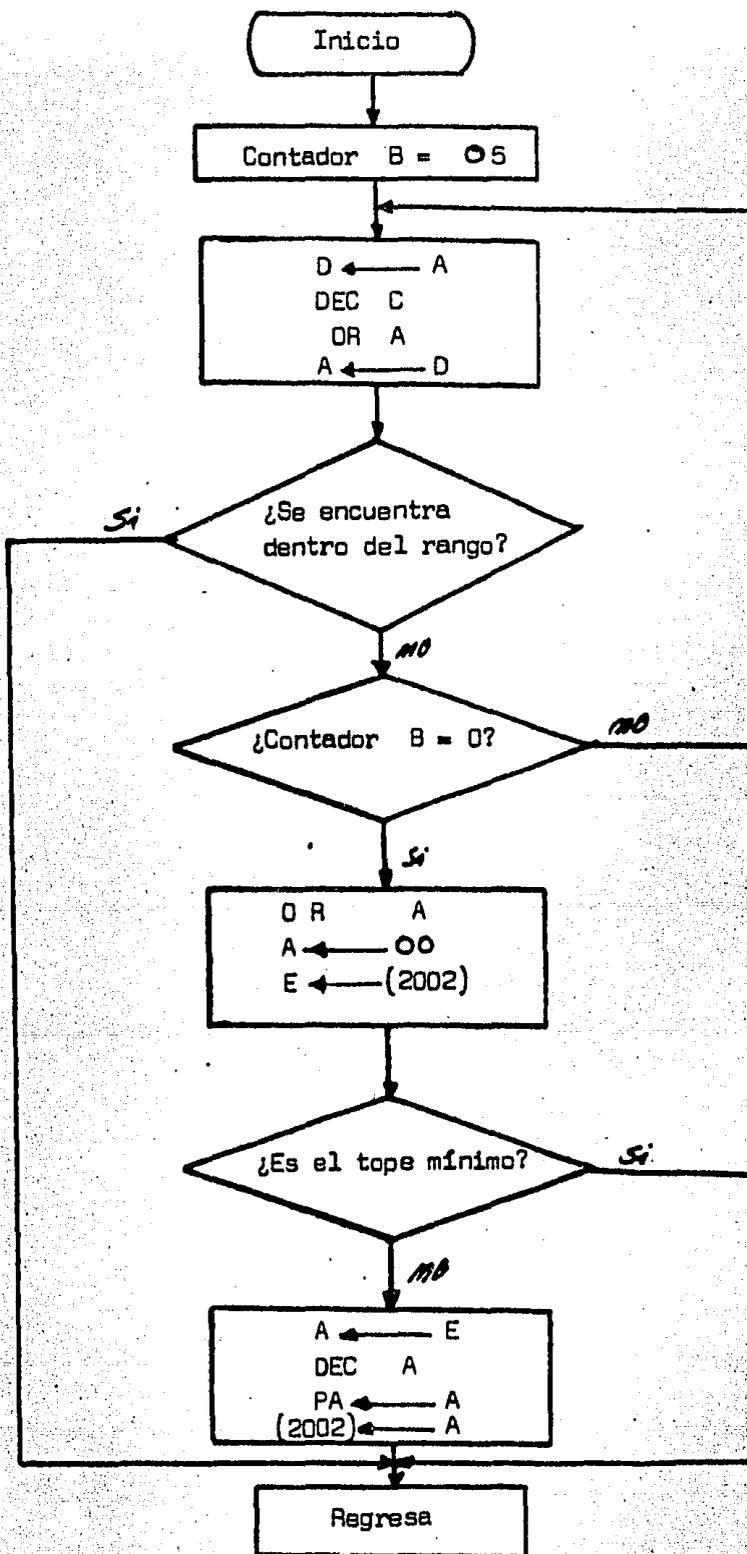


Fig. 5.6.- Diagrama de flujo de la subrutina Decremento de Par.

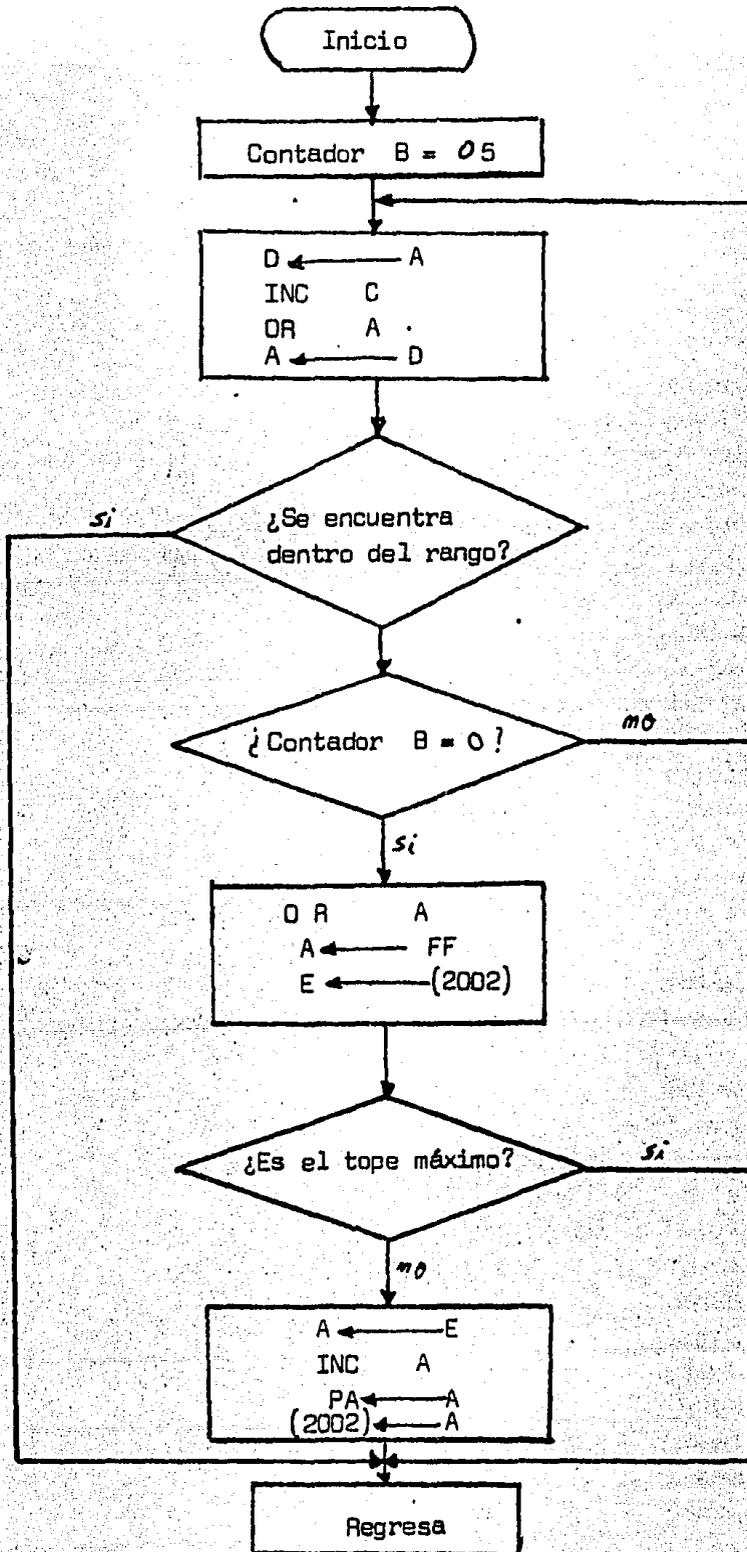


Fig. 5.7.- Diagrama de flujo de la subrutina incremento de Par.

5.3.- Listado de Programas.

" Programa Principal "

<u>Dirección de memoria.</u>	<u>Código de operación</u>	<u>Nemónico</u>	<u>Comentarios</u>
2010	3E 0F	LDA, 0F	Inicializa los puertos
2012	03 82	ouT(82), A	A y B del PID como
2014	03 83	ouT(83), A	puertos de salida de - datos.
2016	3A 02 20	LDA, (2002)	Carga el puerto A con
2019	03 80	ouT(80), A	las condiciones inicia les de campo (campo al máximo).
201B	3A 03 20	LDA, (2003)	Carga el puerto B con
201E	03 81	ouT(81), A	las condiciones inicia les de armadura (al m _i nimo).
2020	3E 00	CONV1 LDA, 00	Selecciona el canal 00
2022	03 94	ouT(94), A	del convertidor analó- gico-digital.
2024	00 00 21	CALL DELAY	Llama la subrutina "De lay" para realizar un
2027	00 00 21	CALL DELAY	retardo.
202A	08 98	INA, (98)	Lee el dato del conver tidor A/D.
202C	4F	LDC, A	Salva el dato de la ve locidad real en C.
202D	32 04 20	LD(2004), A	Guarda el dato también en la localidad 2004.
2030	3A 03 20	LDA, (2003)	Obten la última orden
2033	5F	LDE, A	de control dada a la - armadura del motor y - copiala en E.
2034	87	OR A	Limpia el registro F - de banderas de estado.
2035	3A 00 20	LDA, (2000)	Obten la velocidad de- seada.
2038	89	CPC	Comparala con la velo- cidad real.
2039	04 80 20	CALL NC, 2080	Si 'A' > C llama a la sub rutina incremento.

<u>Dirección de memoria.</u>	<u>Código de operación</u>	<u>Nemónico.</u>	<u>Comentarios</u>
203C	DC 00 20	CALL C, 2000	Si $A < C$ llama a la subrutina decremento.
203F	28 02	JRZ, CONV2	Si $A = C$ Salta y sigue con el programa.
2041	18 00	JR, CONV1	Salta y vuelve a chequear todo lo anterior.
2043	3E 01	CONV2: LDA, 01	Selecciona el canal 01 del convertidor - A/D.
2045	03 94	OVT (94), A	
2047	0D 4F 06	CALL D 20 MS	Realiza un retardo de 20 m seg.
204A	0B 98	INA, (98)	Obten el par real del motor.
204C	4F	LDC, A	Salvalo en el Registro C.
204D	32 05 20	LD (2005), A	Salvalo en la localidad 2005.
2050	3A 02 20	LDA, (2002)	Obten la última orden de control dada al campo y copiala en H.
2053	67	LDH, A	
2054	87	OR A	Limpia el registro F de banderas.
2055	3A 01 20	LDA, (2001)	Obten el par deseado.
2058	89	CPC	Comparalo con el real.
2059	04 90 20	CALL NC, 2090	Si $A > C$ llama la subrutina incremento.
205C	DC 70 20	CALL C, 2070	Si $A < C$ llama la subrutina decremento.
205F	C3 20 20	JP, CONV1	Vuelve a chequear la localidad.
2062		END	

Subrutina "Incremento de Velocidad".

<u>Dirección de memoria.</u>	<u>Código de operación</u>	<u>Nemónico</u>	<u>Comentarios</u>
20B0	06 09	LDB, 09	Contador del rango inferior.
20B2	57	<u>COMP</u> : LDD, A	Salva el acumulador en D.
20B3	0C	INC C	Incrementa C.
20B4	B7	OR A	Limpia el registro F - de banderas de ado.
20B5	7A	LDA, D	Recupera el dato <u>salva</u> do en D a A.
20B6	B9	CPC	Compara si está dentro del rango.
20B7	28 0F	JRZ, <u>REGRE</u>	Si es igual salta y <u>re</u> gresa al programa prin cipal.
20B9	10 F7	DJNZ, <u>COMP</u>	Si $B \neq 0$ salta y vuelve a comparar.
20BB	B7	OR A	Limpia el reg. F de -- banderas de ado.
20BC	3E 00	LDA, 00	Prueba si la última or den de control dada es igual a la escala máxi ma.
20BE	BB	CPE	
20BF	28 07	JRZ, <u>REGRE</u>	Si $A = E$ salta y <u>regre</u> sa al programa princi pal.
20C1	7B	LDA, E	Copia en A la última - orden dada al D/A.
20C2	30	DEC A	Decrementa A.
20C3	03 81	OVT (81), A	Manda A al D/A de arma dura.
20C5	32 03 20	LD (2003), A	Guarda esa orden en la localidad 2003.
20C8	C9	<u>REGRE</u> : RET	Regresa al programa -- principal.

Subrutina "Decremento de Velocidad".

<u>Dirección de memoria.</u>	<u>Código de operación</u>	<u>Néonico</u>	<u>Comentarios</u>
2000	06 09	LDB, 09	Contador del rango superior.
2002	57	<u>COMP</u> : LDD, A	Salva el acumulador en D.
2003	00	DEC C	Decrementa C.
2004	B7	O R A	Limpia el registro F - de banderas de edo.
2005	7A	LDA, D	Recupera el dato <u>salva</u> do en D a A.
2006	B9	CPC	Compara si está dentro del rango.
2007	28 0F	JRZ, <u>REGRE</u>	Si es igual salta y <u>re</u> gresa al programa.
2009	10 F7	DJNZ, <u>COMP</u>	Si B ≠ 0 salta y <u>vuel</u> ve a comparar.
200B	B7	ORA	Limpia F.
200C	3E FF	LDA, FF	Prueba si la última <u>or</u> den de control dada es
200E	88	CPC	igual a la escala <u>míni</u> ma.
200F	28 07	JRZ, <u>REGRE</u>	Si A = E salta y <u>regre</u> sa al programa.
20E1	7B	LDA, E	Copia en A la última - orden dada al D/A.
20E2	3C	INC A	Incrementa A.
20E3	03 81	OVT (81), A	Manda A al D/A de arma <u>du</u> ra.
20E5	32 03 20	LD (2003), A	Guarda esa orden en la <u>localidad</u> 2003.
20E8	C9	<u>REGRE</u> : RET	Regresa al programa.

Subrutina "Decremento de Par".

<u>Dirección de memoria</u>	<u>Código de operación</u>	<u>Nemónico</u>	<u>Comentarios</u>
2070	06 03	LDB, 03	Contador del rango superior.
2072	57	<u>COMP</u> : LDD, A	Salva el acumulador en D.
2073	00	DEC C	Decrementa C.
2074	B7	ORA	Limpia F.
2075	7A	LOAD	Recupera el dato <u>salva</u> do.
2076	B9	CPC	Compara si está dentro del rango.
2077	28 0F	JRZ, <u>REGRE</u>	Si es igual <u>regresa</u> al programa.
2079	10 F7	DJNZ, <u>COMP</u>	Vuelve a comparar.
207B	B7	ORA	Limpia F.
207C	3E	LDA, 00	Prueba si la última <u>or</u> den dada es igual a la
207E	BC	CPH	escala mínima.
207F	28 07	JRZ, <u>REGRE</u>	Si A = H <u>salta</u> y <u>regre</u> sa al programa.
2081	7C	LDA, H	Copia H en A.
2082	3D	DEC A	Decrementa A.
2083	03 80	DVT (80), A	Manda A al D/A de cam- po.
2085	32 02 20	LD (2002), A	Guarda A en la locali- dad (2002).
2088	C9	<u>REGRE</u> : RET	Regresa al programa.

Subrutina "Incremento de Par".

<u>Dirección de memoria.</u>	<u>Código de operación</u>	<u>Nemónico</u>	<u>Comentarios</u>
2090	06 03	LDB, 03	Contador del rango inferior.
2092	57	COMP: LDD, A	Salva A en D.
2093	0C	INC C	Incrementa C.
2094	B7	O R A	Limpia F.
2095	7A	LDA, D	Copia D en A.
2096	89	OPC	Compara si está dentro del rango.
2097	28 0F	JRZ, <u>REGRE</u>	Si es igual regresa al programa.
2099	10 F7	DJNZ, <u>COMP</u>	Vuelve a comparar.
2098	B7	O R A	Limpia F.
209C	3F FF	LDA, FF	Prueba si la última orden dada es igual a la escala máxima.
209E	BC	CPH	
209F	28 07	JRZ, <u>REGRE</u>	Si A = H regresa al programa.
20A1	7C	LDA, H	Copia H en A.
20A2	3C	INC A	Incrementada A.
20A3	D3 80	OUT (80), A	Manda A al D/A de campo.
20A6	32 02 20	LD (2002), A	Guarda A en la localidad (2002).
20A8	C9	<u>REGRE:</u> RET	Regresa al programa.

Subrutina "Delay".

<u>Dirección de memoria.</u>	<u>Código de operación</u>	<u>Nemínico</u>	<u>Comentarios</u>
2100	CD 0F 06	CALL D20 MS	Realiza un retardo de 20 m Seg.
2103	CD 4F 06	CALL D20 MS	Realiza un retardo de 20 m Seg.
2106	CD 4F 06	CALL D20 MS	Realiza un retardo de 20 m Seg.
2109	CD 4F 06	CALL D20 MS	Realiza un retardo de 20 m Seg.
210C	CD 4F 06	CALL D20 MS	Realiza un retardo de 20 m Seg.
210F	CD 4F 06	CALL D20 MS	Realiza un retardo de 20 m Seg.
2112	CD 4F 06	CALL D20 MS	Realiza un retardo de 20 m Seg.
2115	C9	RET	Regresa al programa - principal.

Localidades destinadas a:

2000	Especificar la velocidad deseada en el motor.
2001	Especificar el par deseado en el motor.
2002	Especificar las condiciones iniciales (Campo igual a 00 o sea al máximo).
2003	Especificar las con iniciales (armadura igual a FF o sea al mínimo).
2004	Localidad destinada a almacenar la velocidad real del motor.
2005	Localidad destinada a almacenar el par real del motor.

CAPITULO VI

"EL SISTEMA DE CONTROL EN FORMA EXPERIMENTAL".-

6.1.- INTRODUCCION.-

En este capítulo se tratarán los aspectos relativos al sistema de control en malla abierta,- la respuesta del sistema en malla cerrada, los aspectos relativos al acoplamiento de cada una de las etapas, los ajustes que fueron necesarios hacer para que el sistema fuera estable y las gráficas obtenidas en base a las mediciones realizadas.-

Para dar más facilidad de manejo al sistema, se construyeron cinco módulos independientes, los cuales al ser conectados entre si, integran el sistema de control.- Estos módulos son los siguientes:

- 1.- La fuente regulada de + 5 voltios.
- 2.- El Started Kit del Z80.
- 3.- El sistema de adquisición y transferencia de datos.
- 4.- El sistema de control de excitación.
- 5.- El motor de corriente directa.

La ventaja de tener módulos independientes es que se pueden hacer diferentes esquemas de control sin necesidad de hacer modificación alguna a los circuitos del sistema.-

A continuación se hará una breve descripción funcional de cada uno de estos módulos.- Más adelante se describirá el sistema en malla abierta, en malla cerrada y los resultados obtenidos.-

6.2.- MODULOS DEL SISTEMA:-

6.2.1.- "LA FUENTE REGULADA DE + 5 VOLTIOS".-

La función de esta fuente es dar la alimentación de voltaje necesaria para que el Started Kit del Z80 pueda operar correctamente, evitando así que pueda haber variaciones de voltaje, las cuales podrían hacer que la base de datos del sistema microcomputador se perdiera.-

Aunque el diagrama del circuito de esta fuente no se incluyó en capítulos anteriores, esta está constituida por un transformador de doce voltios de salida con una capacidad máxima en corriente de 2 amperes.- Luego este voltaje es rectificado por un rectificador de onda completa y posteriormente filtrado por dos capacitores electrolíticos de 4700 μ f, conectados en paralelo.- La salida de éstos alimenta a un regulador integrado (el 7805), de + 5 voltios y finalmente la salida de éste es nuevamente filtrada para evitar el posible ruido que se pudiera inducir.- El diagrama de la misma puede verse en la figura 6.1.-

6.2.2.- "EL STARTER KIT DEL Z80".-

Este sistema microcomputador que tiene como unidad central de procesos el microprocesador Z80 como ya se dijo anteriormente, constituye la parte más importante del sistema de control, ya que se encarga de tomar las decisiones de control en base a un programa establecido.-

Más adelante se hará una breve descripción de la arquitectura de este sistema, pero por ahora solamente me concretaré a decir que la tarjeta en la cual se encuentra el sistema, fué metida para su protección en una caja de acrílico (fig. 6.2) cuyas dimensiones son de 32 X 40 X 7-cm. y además para poder conectar con más facilidad los otros módulos se alambraron a las terminales del circuito líneas conectadas a unos peines conectores.-

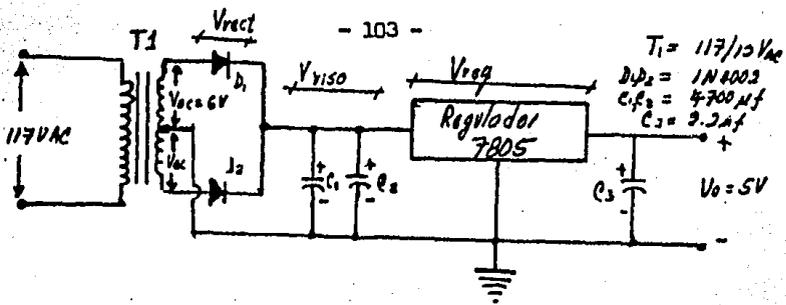


Fig. 6.1.- Fuente regulada de + 5 voltios.

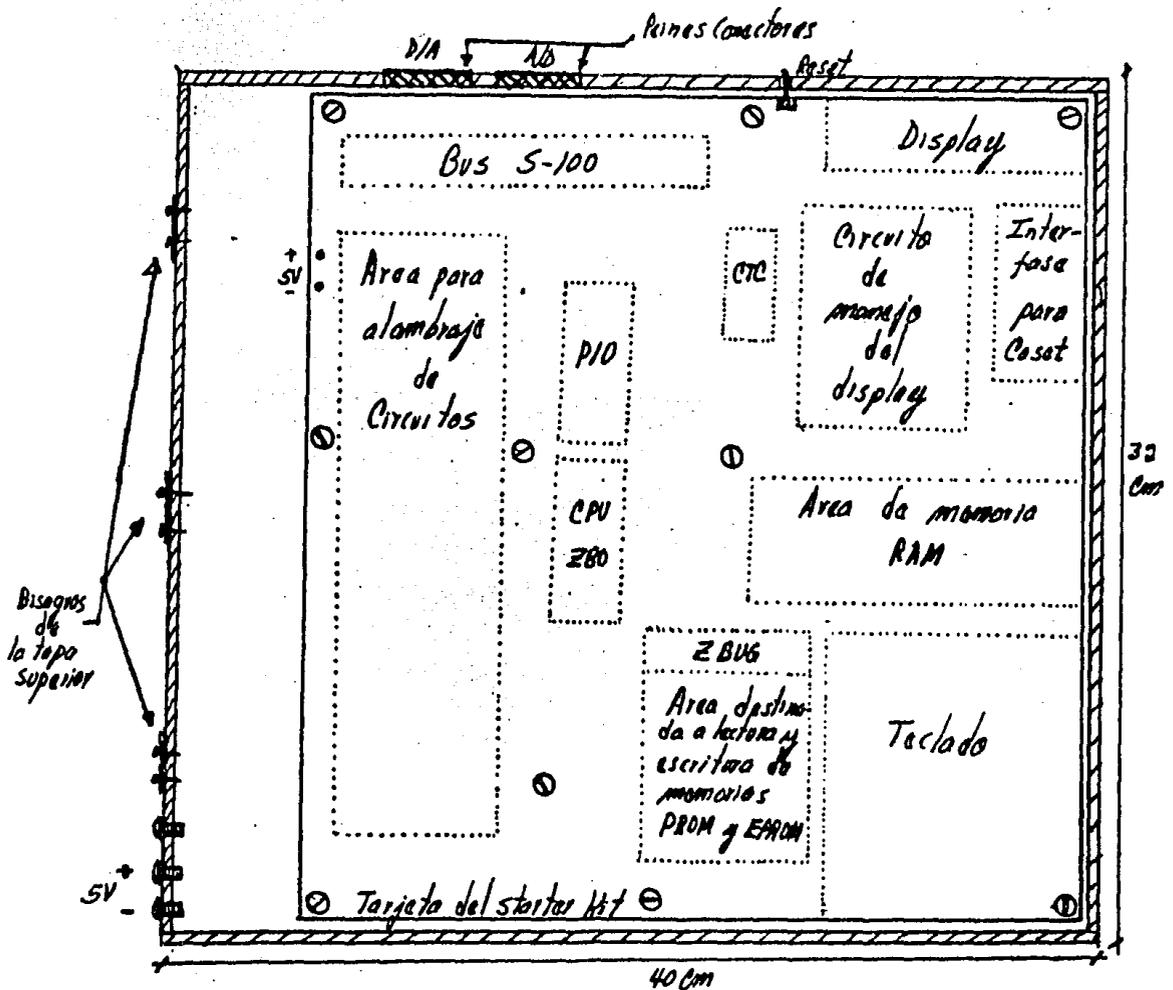


Fig. 6.2.- El Starter Kit del Z80.-

6.2.3.- "EL SISTEMA DE ADQUISICION Y TRANSFERENCIA DE DATOS".-

Dentro de este módulo se encuentran el convertidor analógico-digital, los convertidores digital-analógico, el convertidor frecuencia-voltaje, el convertidor voltaje-frecuencia (que no se usa en este sistema de control) y una fuente de voltaje de ± 15 voltios y ± 5 voltios.- La disposición dentro del módulo puede verse en la figura 6.3.-

Tanto el convertidor frecuencia-voltaje como el convertidor voltaje-frecuencia tienen dos perillas de las cuales una sirve para selección de escala y la otra para ajuste de offset.- Con esta última se calibra la salida de los convertidores para que no haya ninguna salida sin haber entrada.-

Los convertidores digital-analógico tienen una perilla de ajuste de escala máxima de salida con la cual es posible hacer compatible a dichos convertidores con niveles de voltaje de entrada de cualquier sistema.-

El convertidor analógico digital se alambrió de tal manera que fuera fácil tener acceso a sus ocho entradas multiplexadas, mediante conectores banana.-

Uno de los ajustes que se tuvo que hacer a este sistema fué en el convertidor frecuencia-voltaje para que diera un nivel máximo de 5 voltios de acuerdo a las escalas máximas seleccionadas por la perilla de rango.- Además fué necesario (figura 6.3), poner un filtro RC a la salida de este convertidor debido a que ésta presentaba un rizo en el voltaje bastante considerable, lo cual hacía que el sistema funcionara erróneamente.- La función de transferencia de este filtro fué la siguiente:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{s+1}$$

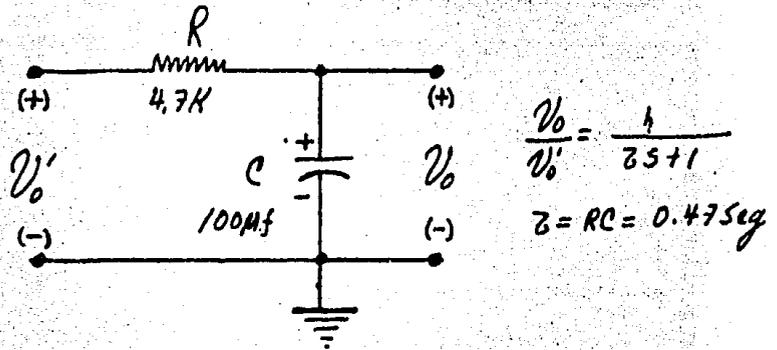


Fig. 6.3.- Filtro RC de Primer Orden.

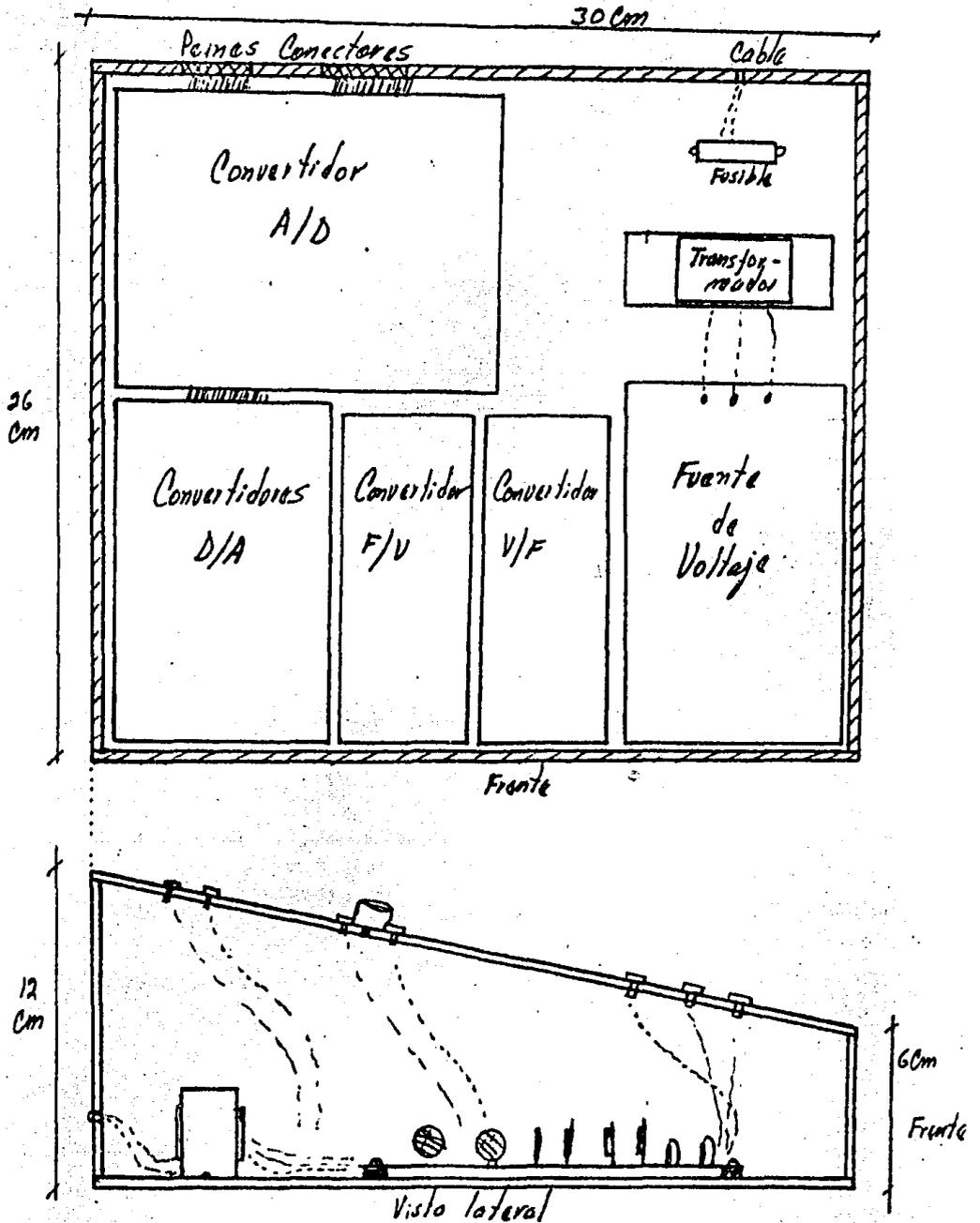
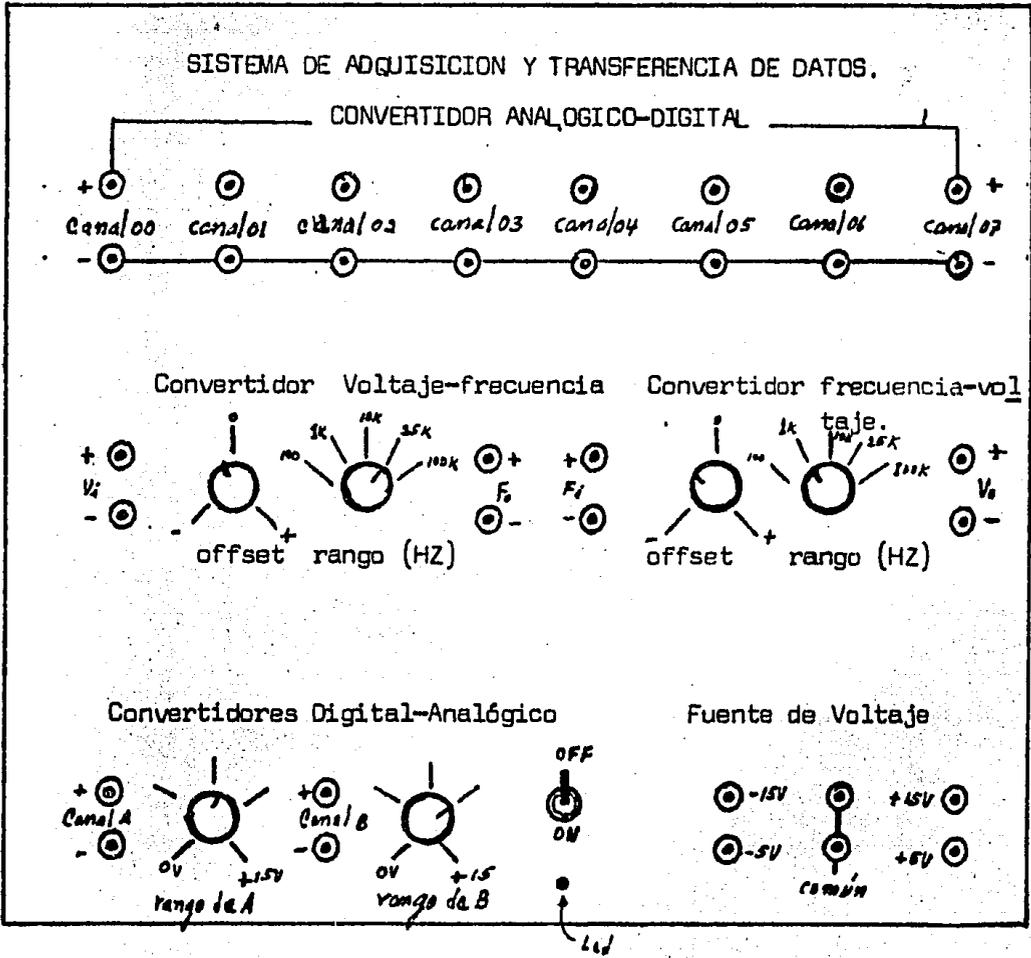


Fig. 6.4.- Vista superior y lateral del sistema de adquisición y transferencia de datos.



6.2.4.- "EL SISTEMA DE CONTROL Y EXCITACION":

Dentro de este módulo se encuentran las etapas de potencia para el campo y la armadura, así como el sensor de voltaje y el sensor de corriente de armadura.- La disposición de los mismos puede verse en la figura 6.6.-

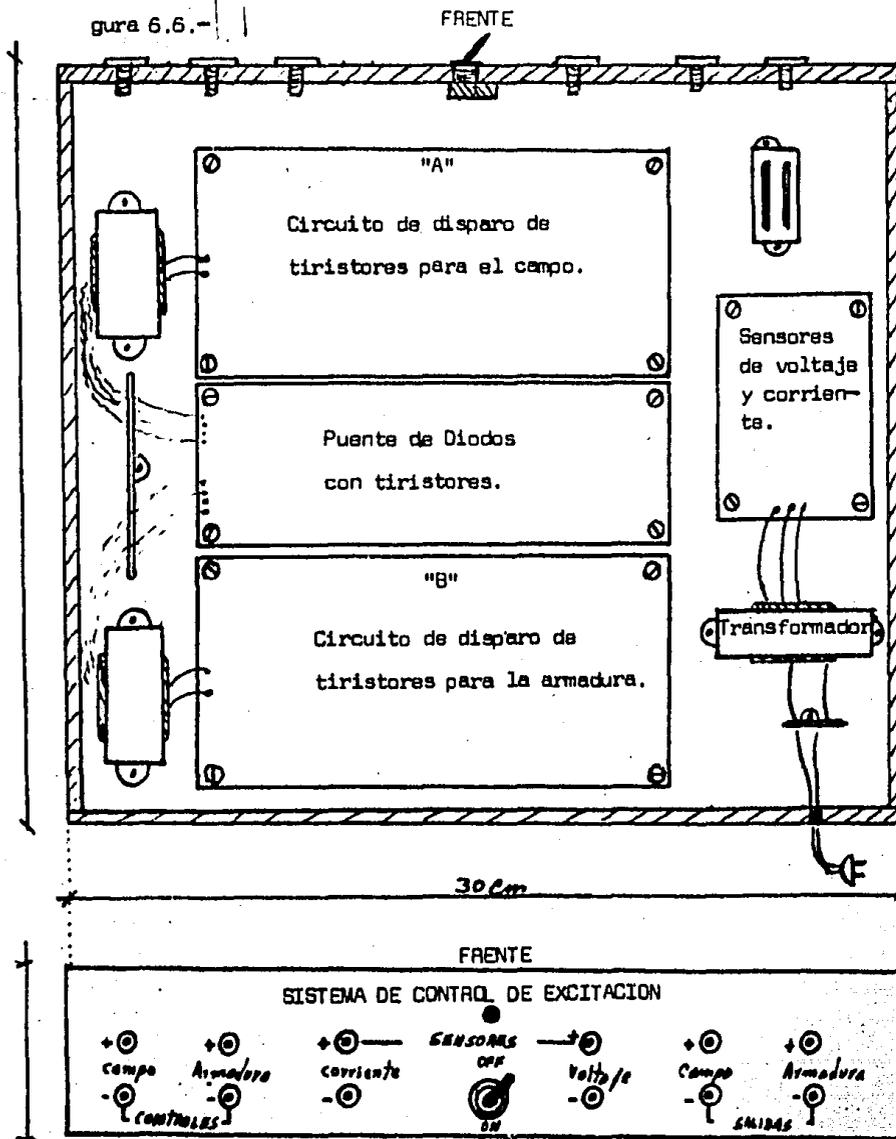


Fig. 6.6.- Vista superior y frontal del sistema de control de excitación.

6.2.5.- "EL MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA".-

Este módulo es la parte fundamental de la planta a controlar y además contiene al disco giratorio y el circuito sensor de velocidad.- La salida del circuito sensor de velocidad, entrega un tren de pulsos proporcionales a la velocidad del motor.- Para que no hubiera problemas de acoplamiento y de impedancias entre ambos circuitos, fué necesario poner un condensador de aislamiento cuyo valor fué de $.01 \mu F$.- La disposición de los mismos puede verse en la figura 6.7.-

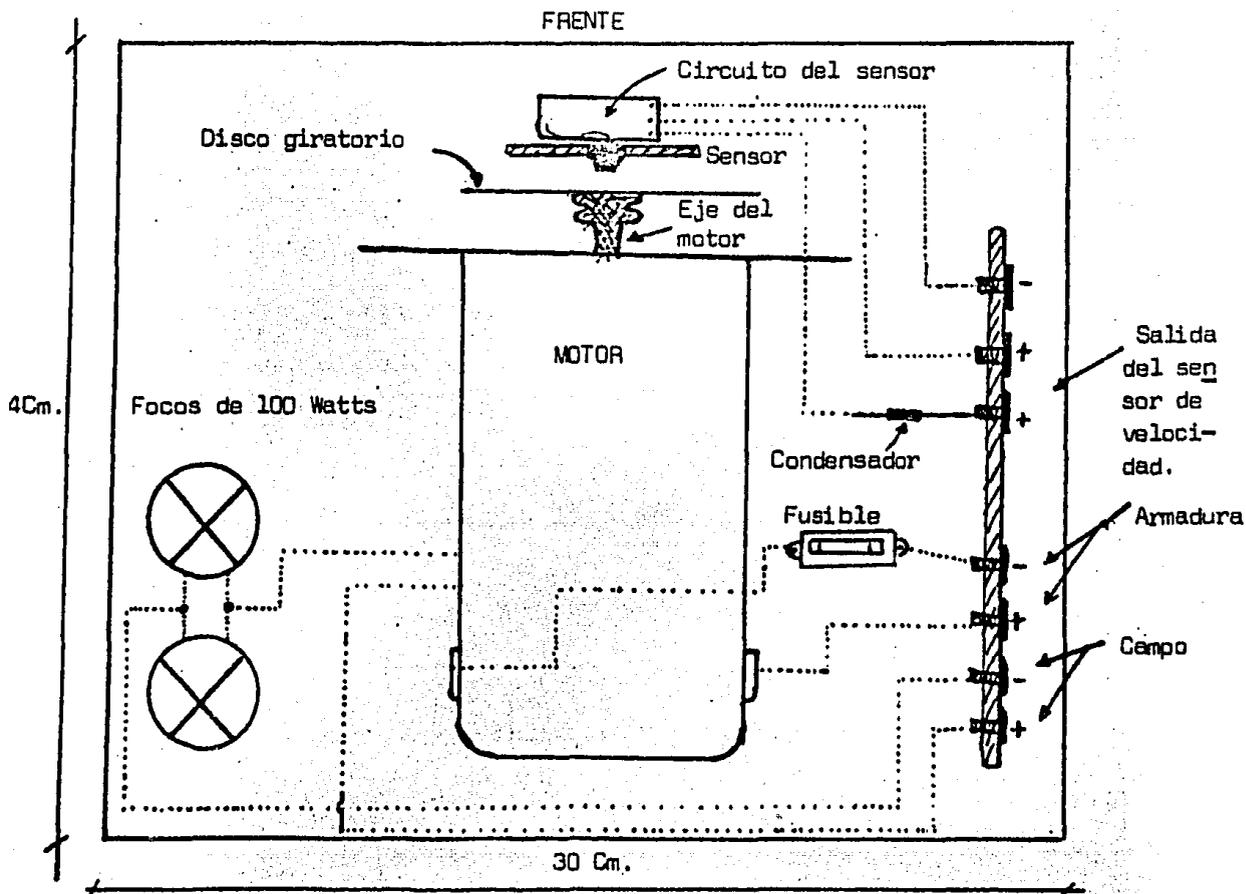


Fig. 6.7.- Vista superior del módulo del motor de corriente directa.

6.3.- "EL SISTEMA DE CONTROL EN MALLA ABIERTA".-

Los sistemas de control de malla abierta son sistemas de control en los cuales la salida no tiene ningún efecto sobre la acción de control, es decir, que la salida del sistema no se está comparando con la entrada del mismo para generar alguna acción de control y por lo tanto para cada entrada corresponde una condición de operación fija.- Así la exactitud del sistema depende de la calibración y en presencia de perturbaciones, no será capaz de cumplir su función asignada.- En la práctica solo se puede usar el control de malla abierta si la relación entre la entrada y salida es conocida y si no hay perturbaciones externas o internas.-

Para el sistema en cuestión el haberlo hecho trabajar en malla abierta sirvió para establecer los rangos máximos de operación del sistema, para calibrar el sensor de corriente y el convertidor F/V con respecto a la señal proveniente del sensor de velocidad y para calibrar las escalas de los convertidores D/A de acuerdo con las respuestas máximas del motor.-

La manera de establecer los máximos de operación fué la siguiente:

- a).- Hacer trabajar al motor a su máxima velocidad sin campo.
- b).- Calibrar los sensores de corriente y velocidad, para obtener las máximas escalas de voltaje.- ($V = 5$ Voltios) para que sean compatibles con las entradas del convertidor A/D.-
- c).- Establecer una relación equivalente de la máxima escala de corriente con la máxima escala de par motor, mediante la ecuación.

En base a lo anterior, a continuación presento los máximos valores obtenidos, así como las mediciones y cálculos adicionales para obtener dichas escalas.

- a).- Para poder medir la corriente de armadura primero se midió el valor real de las dos resistencias de 1.8Ω conectadas en paralelo entre si y en serie con la armadura, cuyo valor medido fué de 1.05Ω , y mediante la ecuación $I = V/R$ se supo que la corriente I_a máx fué de 2.381775 amperes.
- b).- Al calibrar el convertidor frecuencia -voltaje con la señal proveniente del sensor de velocidad, se vió que la velocidad máxima fué de 10000 rpm.
- c).- Para obtener el par máximo se tuvieron que tomar los valores de resistencia de armadura ($R_a = 4.3 \Omega$), que por cierto el valor leído resulta ser mucho más grande de los valores promedio en otros motores.- La razón de ésto puede deberse a que probablemente el motor tiene otro segundo campo en serie con la armadura.- En base al valor de R_a y al valor del voltaje de línea V_t se estableció que el valor del voltaje de éste era de $E_g = 109.75$ voltios y se pudieron establecer las siguientes ecuaciones, con las que se obtuvo el par máximo.-

$$T_{\text{máx}} = \frac{(E_g I_a \text{ máx})}{2 N_{\text{máx}}} \frac{(4500)}{746} = 0.0250975 \text{ Kg.m}$$

$$T_{\text{máx}} = 2.50975 \text{ Kg. cm.}$$

La relación existente entre los 255 estados lógicos posibles del convertidor A/D y las escalas máximas de los sensores, es la siguiente:

A "N" le corresponden 39.21 rpm/estado lógico.

A "T" le corresponden 0.00984215 Kg. Cm./estado lógico.

A Ia le corresponden 9.34029 m A/estado lógico.

El sensor de voltaje que tiene el circuito del control de excitación no se utilizó debido a que se consideró más sencillo establecer una relación entre corriente y par.-

Las mediciones realizadas se obtuvieron sin carga mecánica debido a la imposibilidad de conectarle al motor una carga estable.-

6.4.- "EL SISTEMA DE CONTROL EN MALLA CERRADA".-

La condición para que un sistema de control de malla cerrada sea estable, es que la realimentación del mismo debe ser negativa.- Pues bien en base a lo analizado en capítulos anteriores, el sistema de control en cuestión, cumple con lo mencionado anteriormente.-

Las características dinámicas de la mayoría de los sistemas de control no son constantes por diversas razones como pueden ser el deterioro de los componentes al transcurrir el tiempo, las modificaciones de los parámetros, los cambios en el medio ambiente etc.- Por lo tanto, al planear el diseño, puede ser complejo.-

El sistema diseñado, es un sistema adaptivo ya que tiene la capacidad de autoajustarse de acuerdo con las modificaciones imprevisibles del medio o estructura.-

Al alambrar el sistema por primera vez, se presentaron problemas relativos a la estabilidad del sistema, los cuales se pueden clasificar dentro de dos grupos:

a).- Problemas relativos a los acoplamientos.

b).- Problemas relativos al software.-

Dentro de los problemas referentes a acoplamientos, tenemos los que se presentaron a las salidas del sensor de corriente y del convertidor frecuencia-voltaje, con los cuales el sistema se hacía inestable, debido a que las salidas presentaron un rizo bastante considerable.- La manera de solucionar esto fué utilizando un filtro pasa-bajas del tipo RC. También el sensor de velocidad presentó problemas de acoplamiento debido a que la impedancia de salida del mismo, no era compatible con la impedancia de entrada del convertidor frecuencia-voltaje y la manera como se solucionó esto, fué utilizando un condensador de acoplamiento entre ambas etapas del sistema.-

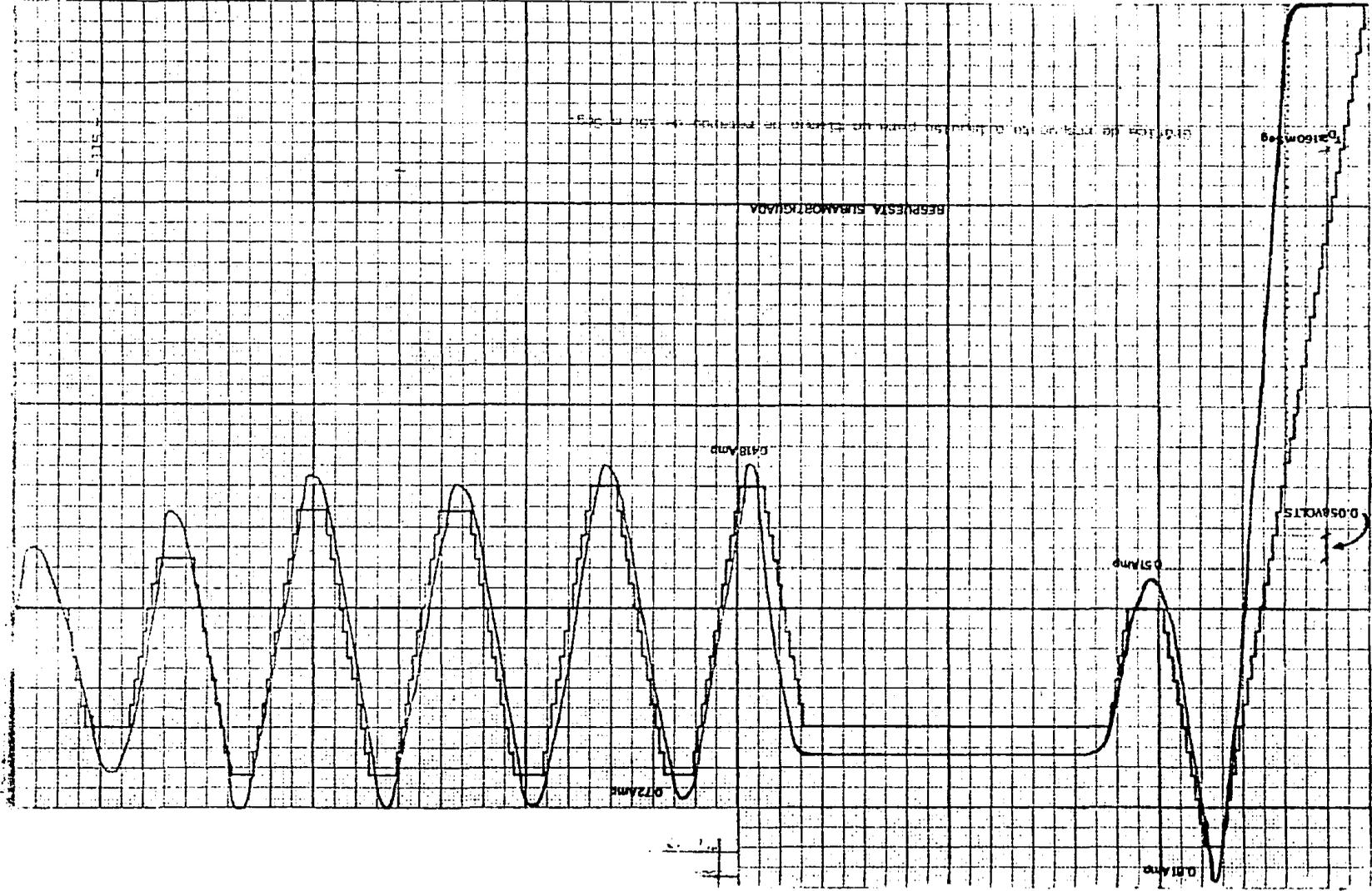
Los problemas relativos al software empleado, fueron debido a la estructura del primer programa utilizado, lo cual hizo que el sistema fuera un sistema oscilante.- En un principio se pensó que esto se debía a que la microcomputadora no tenía los suficientes tiempo de retardo (Delays) para que el sistema se estabilizara, pero después se le dieron más retardos y se vió que el sistema seguía oscilando más lentamente, lo cual hizo pensar que la reestructuración del programa sería muy compleja.- Sin embargo, la conclusión fué que: el rango de velocidad del motor era muy grande, la resolución del convertidor A/D no era lo suficientemente buena debido a ese rango y los incrementos y decrementos dados por el convertidor D/A, no coincidían con los incrementos deseados en las variables de salida.- La solución a lo expuesto anteriormente fué la de -

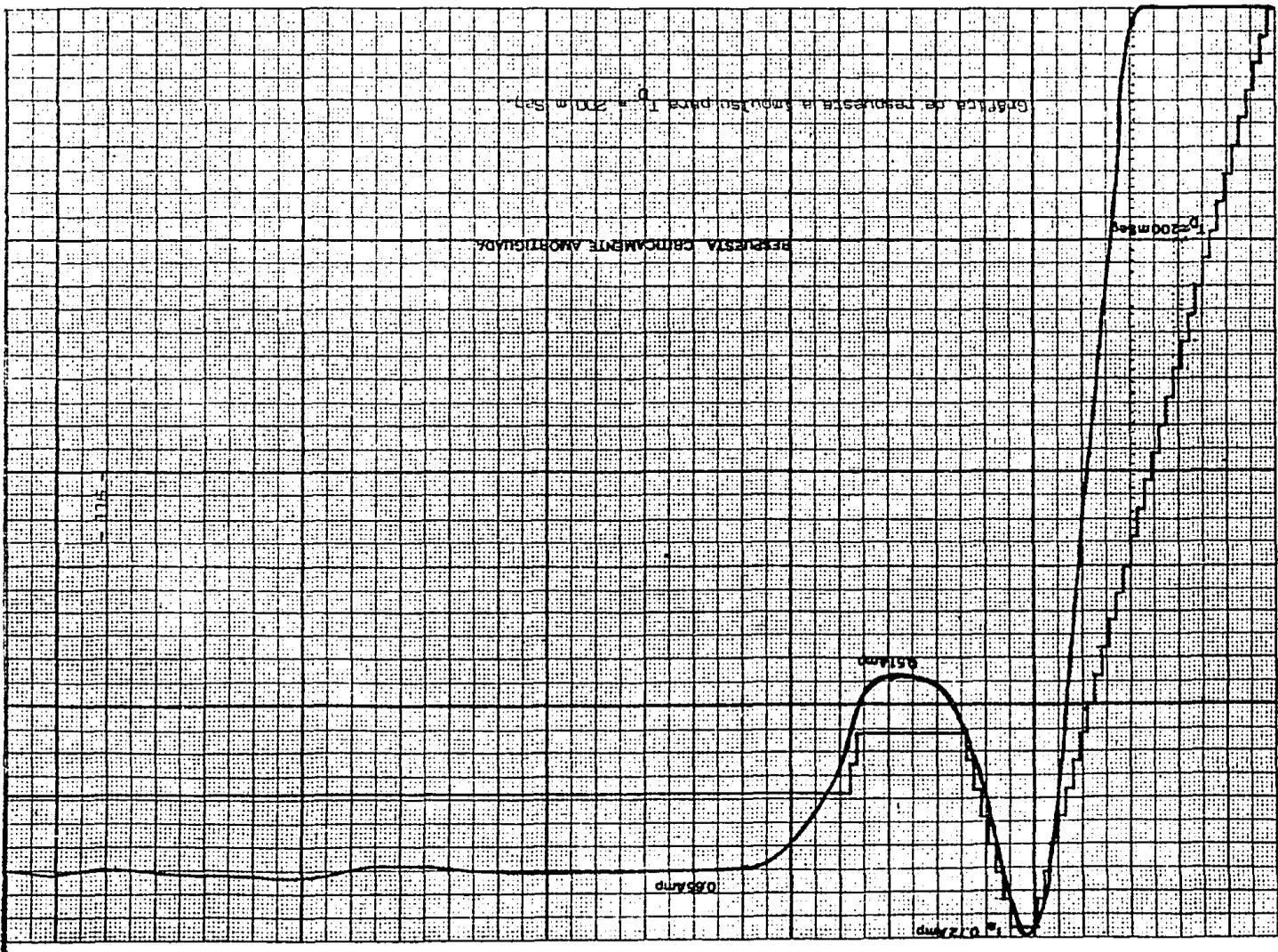
dar rangos de valores en la vecindad de ω y T dentro de los cuales se considera que el sistema está dando los valores de velocidad y par T deseados.- Este rango de valores se puede decir que es equivalente al rango de captura de un PLL (Phase Locked Loop).- Los rangos de valores para que el sistema fuera estable, fueron de ± 9 estados lógicos para la velocidad y de ± 2 estados lógicos para el par.-

El último problema de software que se presentó fue a causa de que el par desarrollado por el motor presenta niveles de saturación para cada valor de velocidad establecido, haciendo que la salida del puerto que controla el campo tenga la máxima salida (FF hexadecimal) o la mínima salida (00 hexadecimal), lo cual haría que un incremento o decremento más del puerto, nos dejara al motor sin campo o con el máximo campo súbitamente y como resultado de ello, un incremento o decremento brusco en la corriente de armadura.- Para solucionar este problema se estableció mediante software un tope superior y un tope inferior al programa que actúa sobre el control de par y velocidad.-

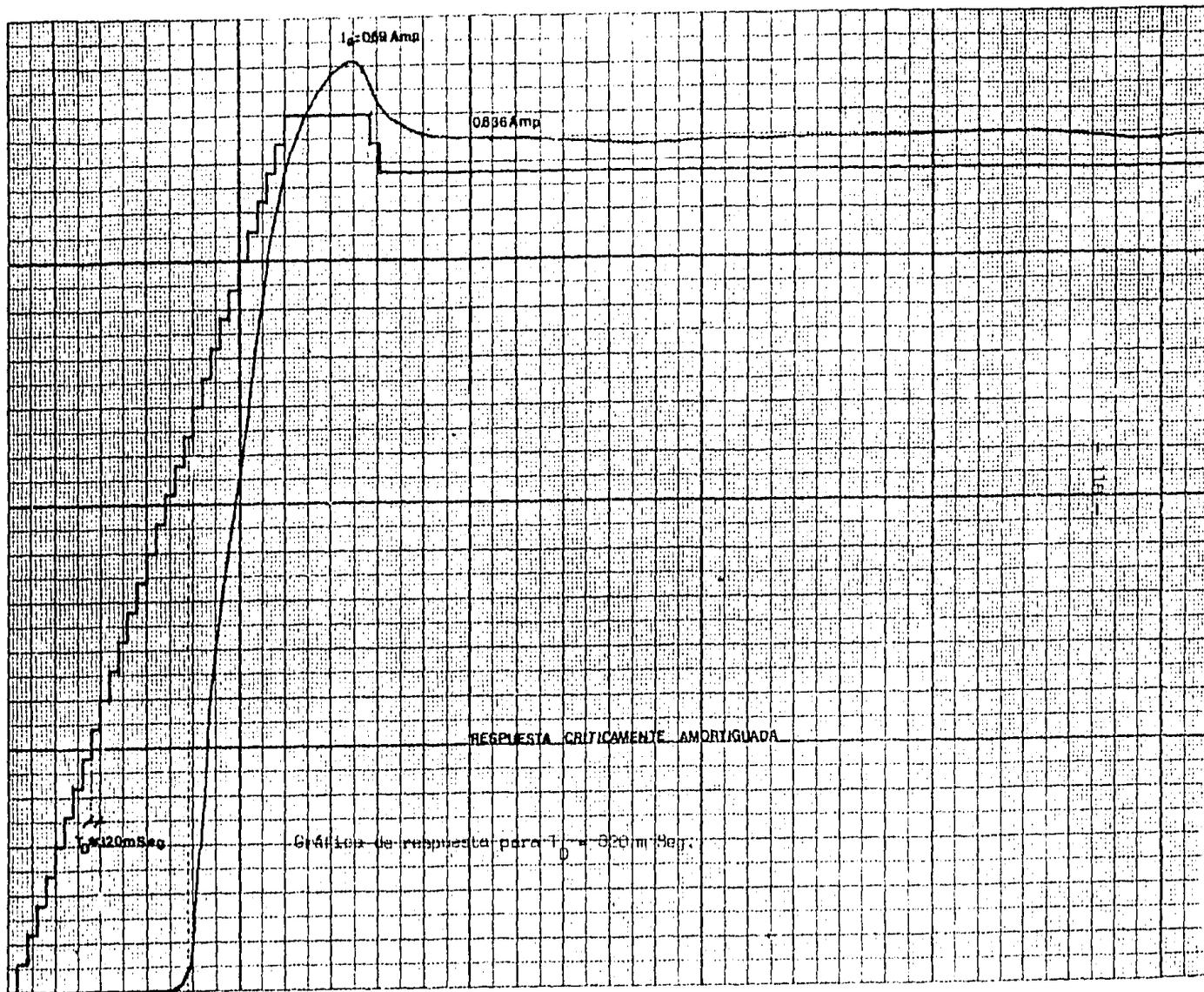
6.5.- "GRAFICAS DE RESPUESTA OBTENIDAS DEL SISTEMA".-

A continuación presentaré las gráficas obtenidas del sistema para diferentes valores de tiempos de retardo, con los cuales el sistema se hace subamortiguado, críticamente amortiguado y sobre amortiguado, así como la gráfica de par contra corriente de armadura.-

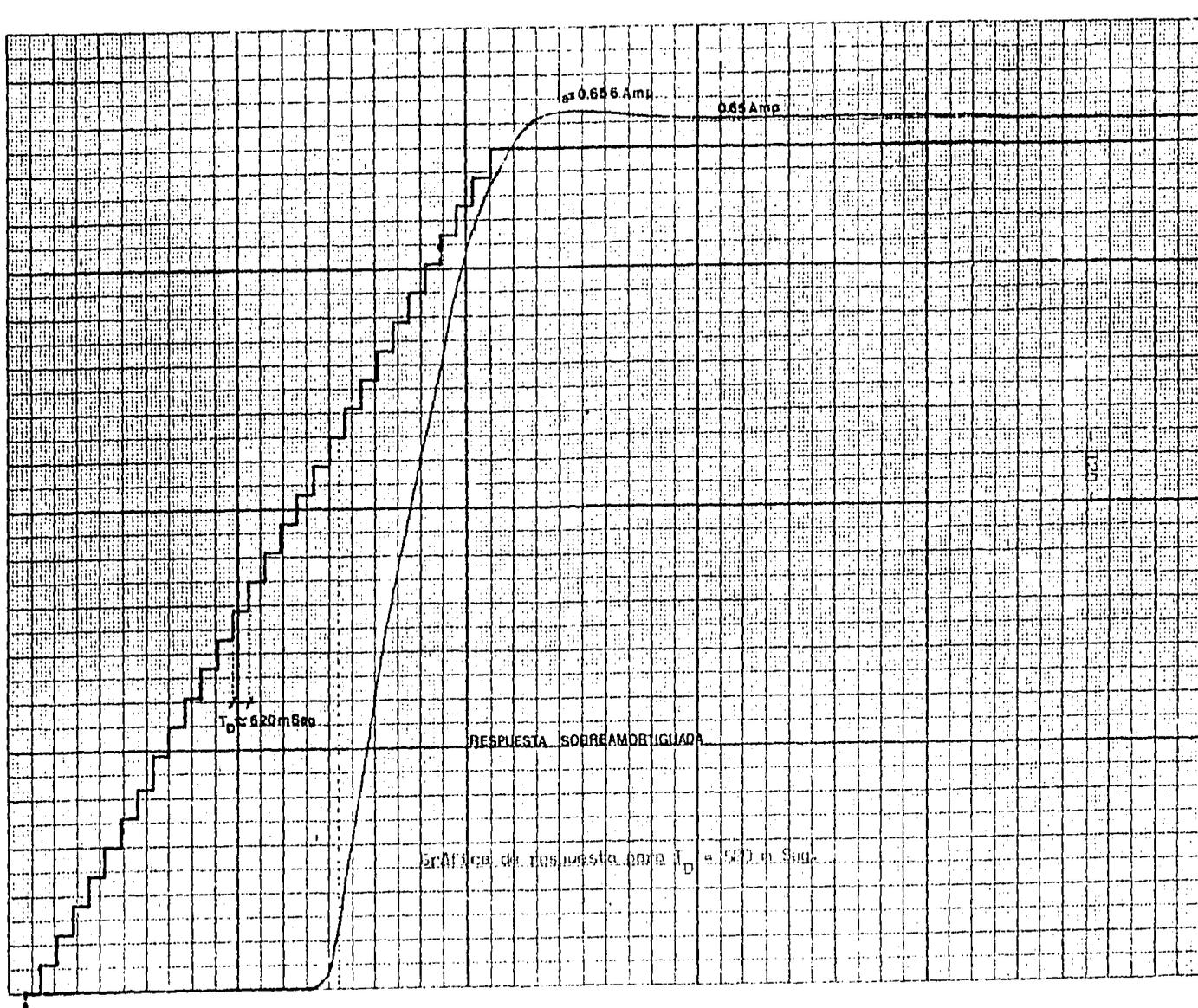


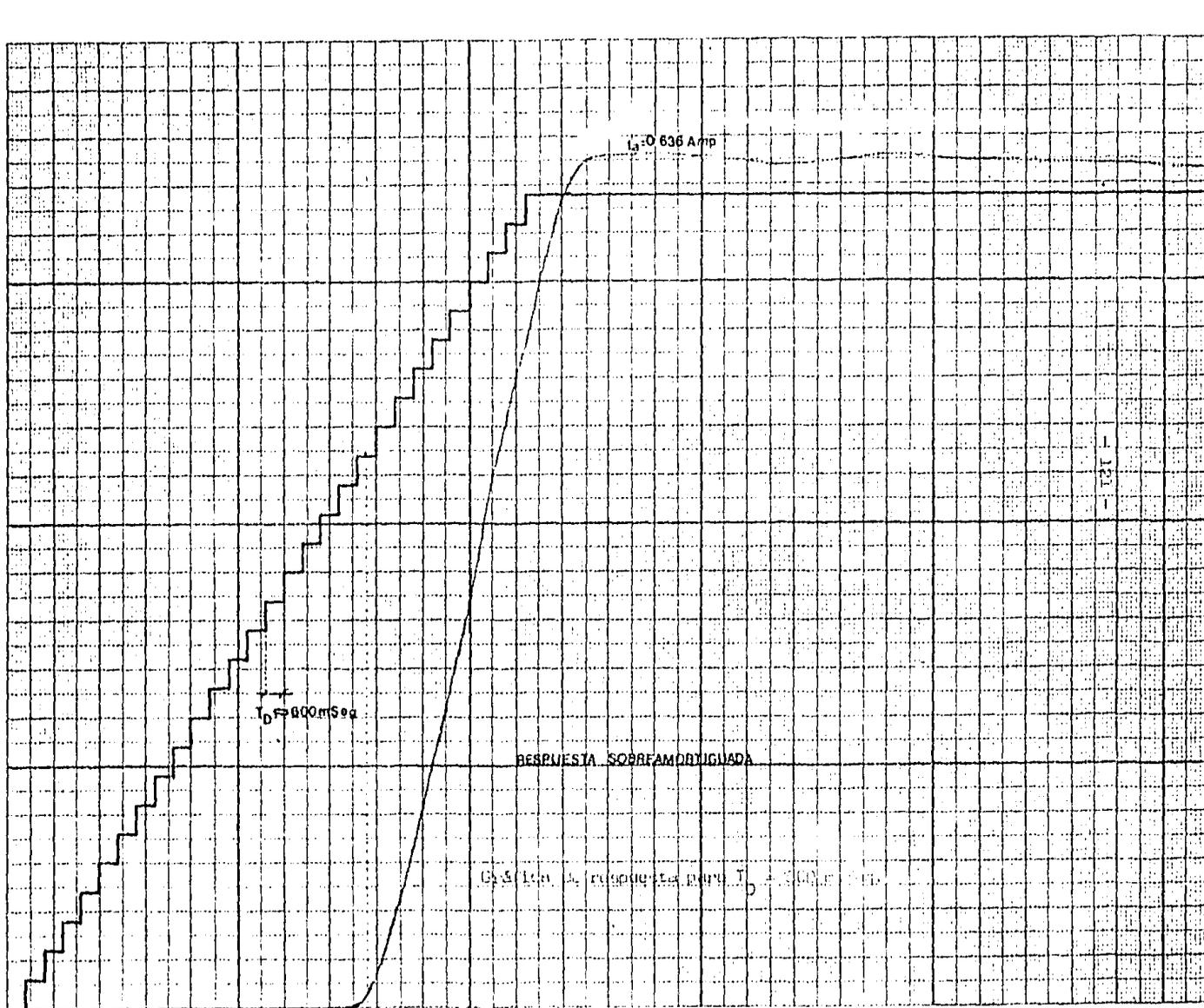




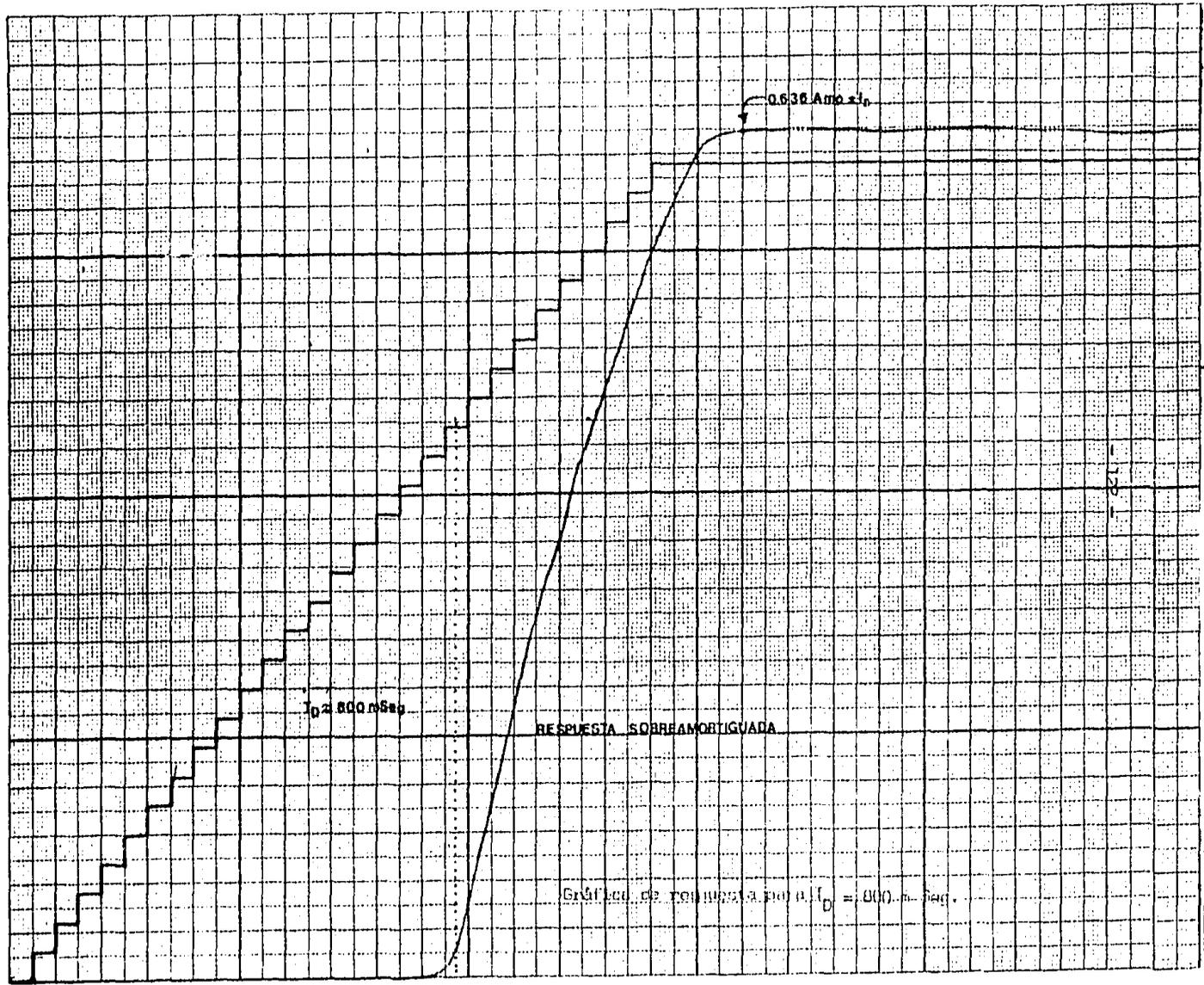




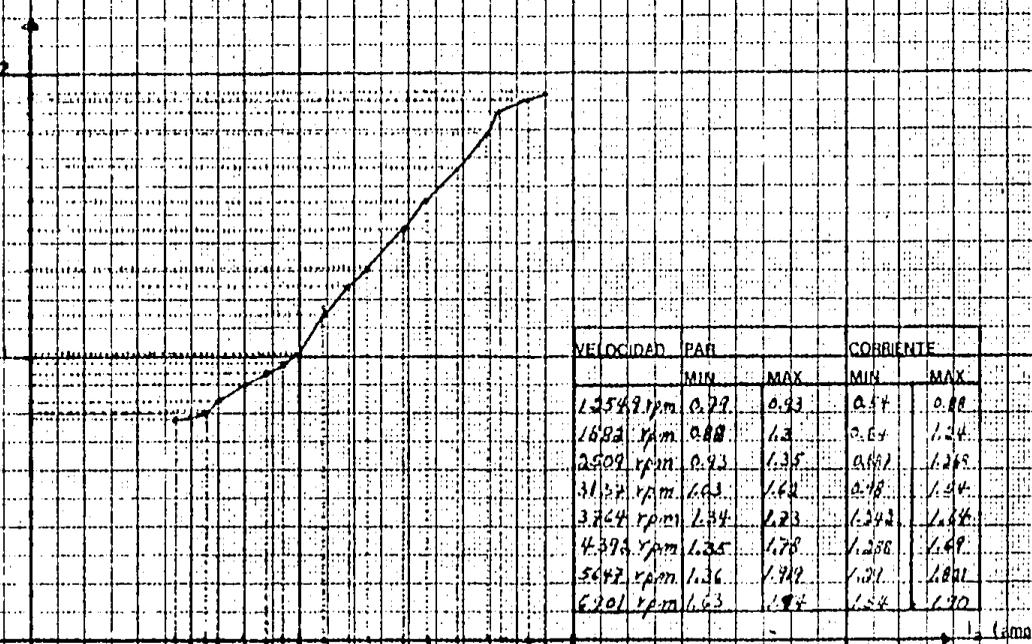




Gráfica de respuesta para $T_D = 600 \text{ mSec}$.



T_m (Kg-Cm)



Gráfica de par contra corriente de armadura.

D I S C U S I O N .

Aunque existen diferentes diseños de control de par y velocidad en motores de corriente directa, generalmente asociados a compañías transnacionales, la idea fundamental del trabajo consistió en el control de un motor universal de baja capacidad con la finalidad de hacer un prototipo industrial.- Sin embargo para poder ser usado a nivel industrial -- existen algunas consideraciones que se mencionan a continuación.

- 1.- Diferencia de los sensores a nivel industrial.
- 2.- El microprocesador o microcomputadora utilizado y su facilidad de manejo.
- 3.- Modificaciones hechas al sistema para lograr que éste fuera estable y posibilidades de mejorar el programa del algoritmo de control.
- 4.- Componentes utilizados.

El uso de sensores en cualquier diseño se puede prestar a discusiones muy diversas, debido a que pueden existir a veces muchas maneras de construir un sensor.- Sin embargo se pretende que dicho sensor sea -- siempre el más barato y confiable.- Como ya se indicó anteriormente el sistema de control cuenta con dos sensores que quizá no sean lo más indicados para obtener una máxima eficiencia del sistema, pero sin embargo -- el funcionamiento de este fué bastante aceptable.-

Por lo que respecta al sensor de corriente (integrado por dos resistencias), se puede decir que se logró hacer un sensor equivalente al que se utilizaría industrialmente.- Industrialmente el sensor de corriente podría estar constituido por una barra de cobre de dimensiones conoci

das, la cual presentaría entre los extremos de la misma una cierta resistencia ohmica que nos sería útil para saber cual es la corriente que circula por el conductor.- La desventaja de este método de sensar corriente, es que el resto del sistema no queda aislado de la línea de alimentación y por lo tanto sería un peligro latente para los operadores del sistema.- En la actualidad se construyen algunos sensores de corriente basados en el principio de medición del campo a través del conductor con los cuales se logra que el resto del sistema si quede aislado de la línea.-

Por lo que respecta al sensor de velocidad, también existen muchas formas de sensar la velocidad de un motor. El sensor utilizado en el sistema no es el más conveniente debido a que requiere muchos cuidados en el ajuste del convertidor frecuencia voltaje, pero tiene la ventaja de ser más barato que otras y de poder ser procesada su salida por un convertidor analógico digital.- Otras formas de solucionar este problema es utilizar algún tacogenerador acoplado a la flecha del motor o algún circuito contador.-

El microprocesador utilizado es el Z80 el cual como ya se sabe está asociado a un conjunto de circuitos adicionales con los cuales está constituyendo una microcomputadora.- La razón por la que se utilizó este microprocesador, fué debido a que es uno de los más versátiles. No obstante se podría haber utilizado cualquier otro microprocesador más barato.- Sin embargo también se pudo haber utilizado un sistema de control a base de PLL_s (Phase, Locked, Loop) con el cual se hubiera logrado un resultado más o menos similar, pero se prefirió utilizar microprocesador, debido a que ese era el objeto de esta tesis.- Además las condiciones de trabajo del sistema utilizando un microprocesador, pueden ser más fácilmente cambiadas modificando el programa asociado al mismo.-

También se tuvieron que hacer algunas pequeñas modificaciones a la salida de los sensores de par (corriente) y velocidad, debido a que el nivel de corriente directa de salida de estos presentaba un rizo muy considerable y ésto volvía inestable el sistema.- La solución a lo anterior se logró mediante la utilización de filtros AC a la salida.

Los componentes utilizados en este sistema se procuró que fueran baratos y de fácil adquisición y dado que se trata de un prototipo industrial, se puede decir que muchos de los problemas que se presentaron en su diseño, serían los que se podrían presentar en la realidad y por lo tanto el diseño de modelo destinado a una aplicación industrial real, requeriría varias modificaciones como son el rediseñar el puente rectificador para que acepte alimentación de una línea trifásica, aumentar su capacidad de manejo de corriente, rediseñar el circuito de disparo de los SCA_s y hacer algunas pequeñas modificaciones al algoritmo de control para que su respuesta sea más eficaz.-

Por último cabe mencionar que las pruebas del motor se tuvieron que hacer sin carga mecánica debido a que fué imposible conectarle una carga estable al mismo.- Sin embargo se observó que al frenar la flecha del motor este tendía a corregir la velocidad y el par casi instantáneamente.-

C O N C L U S I O N

El desarrollo de este proyecto abarca varias ramas de la Ingeniería como son la electrónica, computación, eléctrica y control, lo cual hace que éste sea un modelo de aplicación interdisciplinaria. En su desarrollo presentó una serie de dificultades que se fueron solucionando - paso a paso, dándome ésto un aliciente de superación para continuar con el estudio, diseño y construcción de sistemas de control digital.-

Dentro de los resultados obtenidos en esta tesis, se pueden mencionar:

- 1.- El ahorro de energía.- Esto se logra por medio de un circuito electrónico a diferencia de la forma tradicional de control.-
- 2.- Control de par y velocidad según los requerimientos de algún proceso.-
- 3.- Diseño electrónico en base a componentes comerciales de adquirir.- *(debe decir: de fácil adquisición)*
- 4.- La importancia del estudio de la teoría de control de sistemas lineales, aunque si bien la respuesta del sistema era no lineal y fué linealizada mediante el control del mismo.-
- 5.- El uso del microprocesador en el control en tiempo real de un sistema.-
- 6.- El modelo construido es un prototipo bastante aceptable para su aplicación a nivel industrial en cualquier motor de corriente directa.-

R E F E R E N C I A S .

CAPITULO I.-

- Ingeniería de Control Moderna de Ogatta.
- Análisis de Sistemas Dinámicos y Control Automático de Roberto Canales y Renato Barrera. Edit. Limusa.
- Phase-Locked Loops for Motor-Speed Control (Industrial Control) by I.E.E.E. April 1973.
- Mundo Electrónico de Boixarem Editores (Vol. 107 y 109), Junio y Agosto de 1981.

CAPITULO II.-

- Electrotecnia de Gray/Wallace.
- Conversión de Energía Electromecánica de Gourishankar.

CAPITULO III.-

- Digital Control de Bejamín Kuo.
- Ingeniería de Control Moderna de Ogatta.
- Electronics in Industry de Chute and Chute.
- Conversión de Energía Electromecánica de Gourishankar.
- Thyristor-Retifiers de General Electric.
- Optoelectronics de General Electric.
- The Power Data Book de Texas Instruments.

CAPITULO IV.-

- Z80 Microprocesador programing and Interfacing de Nichols and Rony.
- Linear Data Book 1980 de National Semiconductor.
- The Optoelectronics Data Book de Texas Instruments.
- Manual de Circuitos TTL de Texas Instruments.

CAPITULO V.-

- Programing the Z80 de Rodney Zacks.
- Z80 Microprocesor programing and Interfacing de Nichols, Nichols and Pony.
- Programación del Z80 de Octavio F. Garcia Narcia.

A P E N D I C E .

EL STARTER KIT DEL Z-80.

Este Sistema Microcomputador presentado en las figuras A.1, A.4 y A.5, fué diseñado para familiarizar al estudiante o al experimentador más exigente con el uso de microprocesadores.- De hecho la diversidad de usos que se le pueda dar al sistema solo puede estar limitada por la imaginación del usuario.- Podemos decir que la arquitectura del Starter Kit corresponde a la estructura básica de una microcomputadora, ya que cuenta con una unidad central de procesos (CPU), sus puertos de entrada-salida, el generador de reloj, su memoria RAM y ROM, un teclado, su display, etc.-

La Unidad Central de Procesos (figura A2), está constituida por el microprocesador Z-80, el cual cuenta con tres buses a través de los cuales se comunica con los demás elementos que integran al Starter Kit.- Estos buses son:

- a) Un bus de direcciones de 16 bits el cual nos permite hacer el direccionamiento de 65,536 localidades diferentes.
- b) Un bus de datos bidireccional de 8 bits que transporta datos entre cualesquiera de las 65,536 localidades y el microprocesador.
- c) Un bus de control con el cual es posible comunicar las señales de control y sincronización entre cualesquiera de los elementos de la microcomputadora.

La base de tiempo de sistema está operando aproximadamente a 2 MHz y ésta se obtiene de un oscilador que contiene un cristal de cuarzo a una frecuencia de 3.9936 MHz.- La frecuencia de salida de este oscilador es dividida entre dos y aplicada así al resto del sistema,

Para que el usuario pueda generar programas se tienen 2 K de memoria RAM ya instaladas dentro del Starter Kit.- Sin embargo, en el sistema se tiene la posibilidad de aumentar la capacidad de memoria haciendo algunas pequeñas variantes en el circuito.- Además el sistema tiene la posibilidad de poder programar o leer memorias ROM o EPROM. La figura A.3 nos muestra un mapa de la distribución de la memoria usada en el sistema.-

El diagrama global de todo el Hardware utilizado en la construcción del sistema puede verse en las figuras A.4 y A.5.-

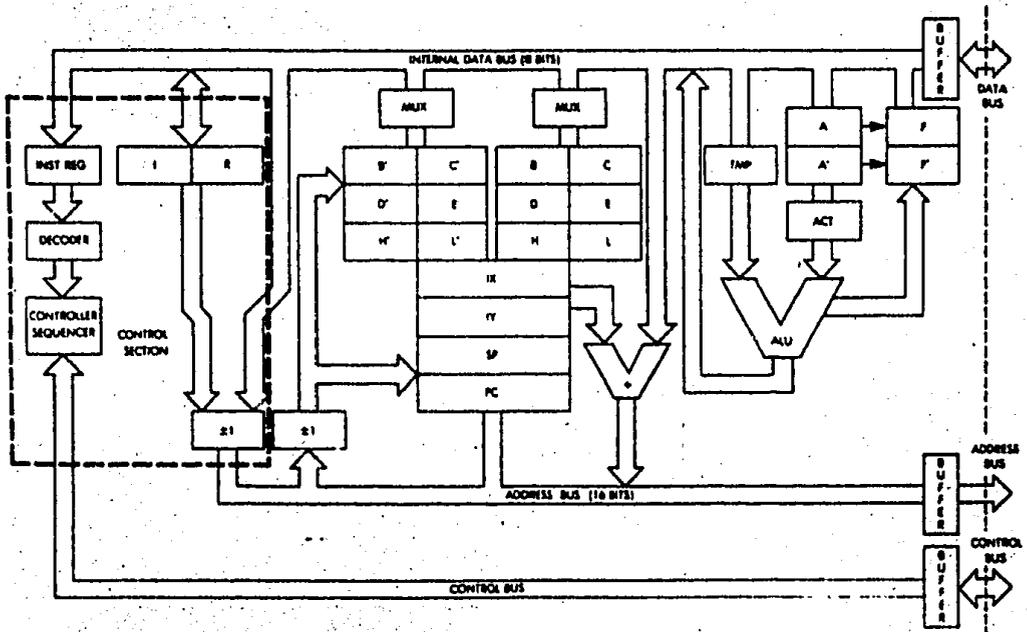


FIGURA A.2 Organización interna del Microprocesador Z-80.

- 134 -	
2800H	UNUSED
27FFH	OPTIONAL RAM
2400H	1K BYTES U16-U23
23FFH	ZBUG SCRATCH RAM
AND	
23C1H	BREAKPOINT TABLES
23C0H	USER'S REGISTER MAP
23A9H	
23A8H	ZBUG STACK
2390H	WORKING AREA
238FH	RAM AVAILABLE TO USER
2000H	
1FFFH	UNUSED
1800H	
17FFH	PROM PROGRAMMER
1000H	PROM2 SOCKET (U34)
0FFFH	PROM1 SOCKET (U33)
0800H	
07FFH	ZBUG MONITOR
0000H	

FIGURA A.3

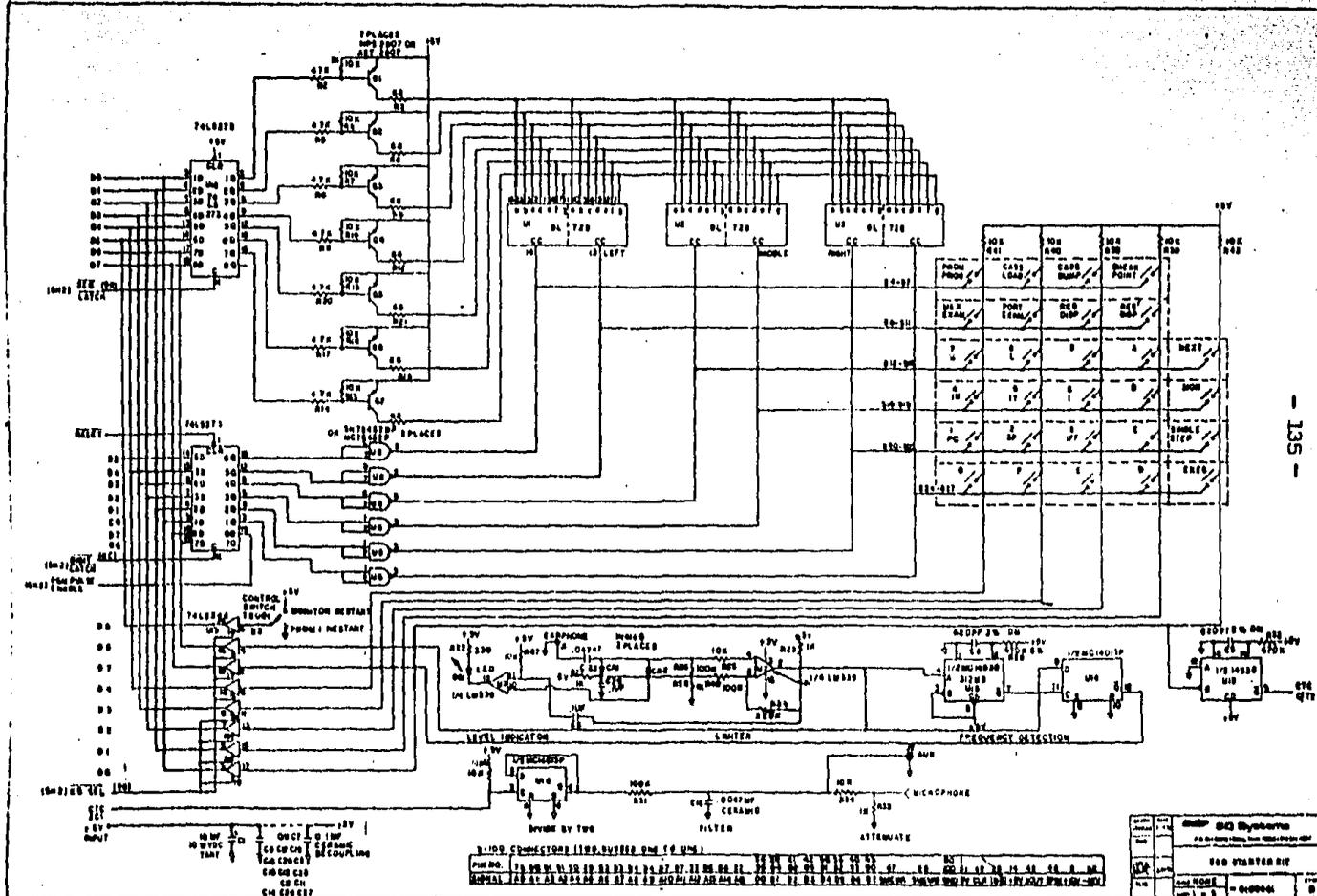


FIGURA A.4

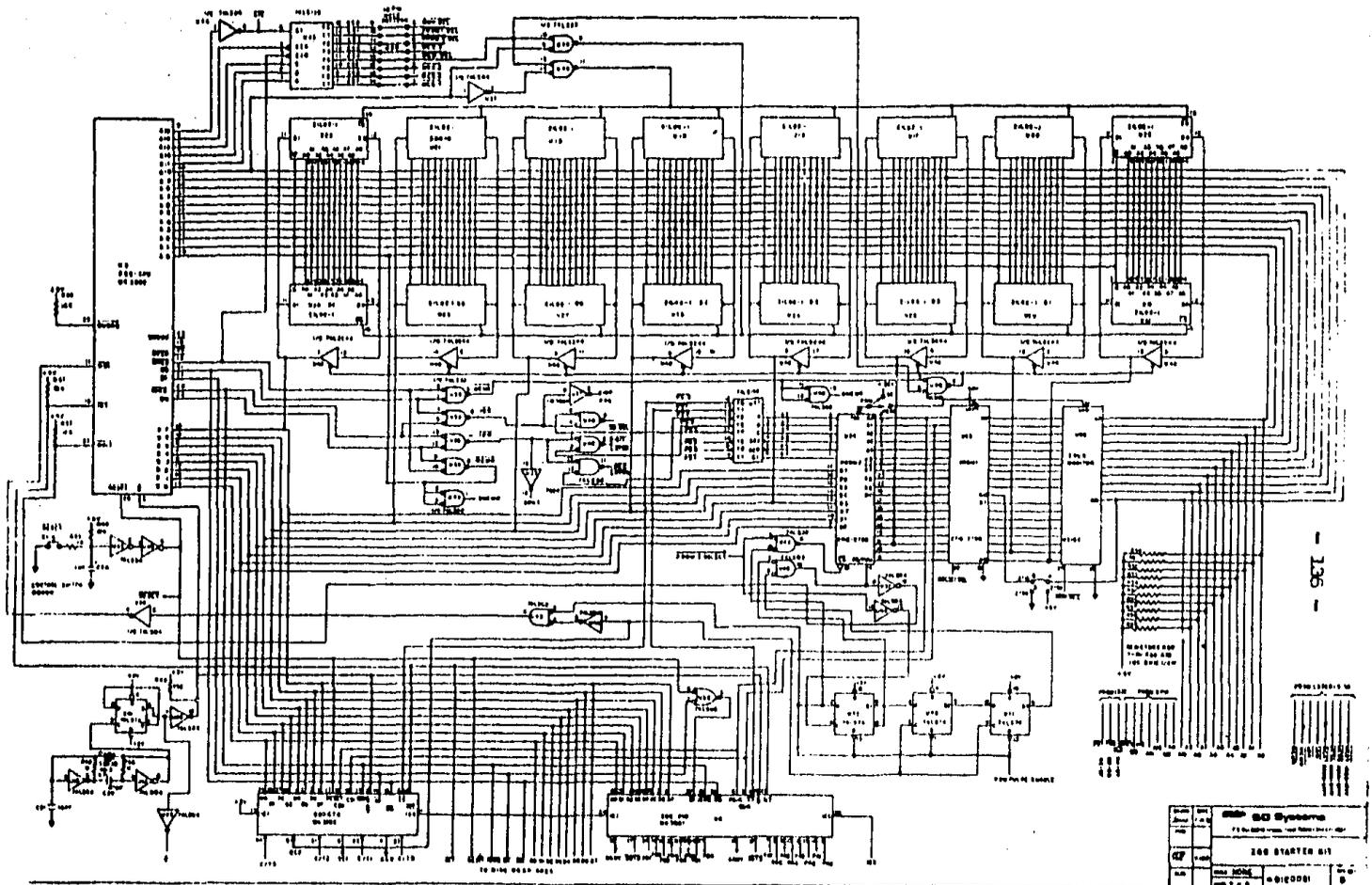


FIGURA A.5

SGS Systems P.O. Box 1000, 1211 Geneva, Switzerland	
Z80 STARTER KIT	
Part No. 81C0001	Rev. 0