



**ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA
DEL LITORAL**

Facultad de Ingeniería Eléctrica

**“ Diseño y Construcción de un Circuito
Troceador a Tiristores ”**

TESIS DE GRADO

Previa a la Obtención del Título de:

INGENIERO EN ELECTRICIDAD

Especialización: ELECTRONICA

Presentado por:

JOSE GERARDO SACARELO MELENDEZ

Guayaquil - Ecuador

1 9 8 8

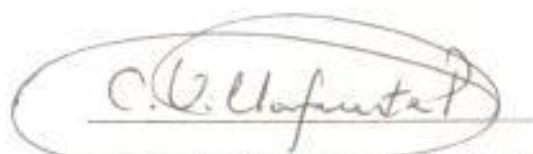
DECLARACION EXPRESA

" La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis, me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL "

(Reglamento de Exámenes y Títulos profesionales de la ESPOL)



JOSE G. SACARELO MELENDEZ

Handwritten signature of Carlos Villafuerte, enclosed in an oval.

Ing. CARLOS VILLAFUERTE
Presidente del Tribunal

Handwritten signature of Norman Chootong.

Ing. NORMAN CHOOTONG
Director de Tesis

Handwritten signature of Alberto Larco.

Ing. Alberto Larco
Vocal del Tribunal

Handwritten signature of Edgar Izquierdo.

Ing. Edgar Izquierdo
Vocal del Tribunal

AGRADECIMIENTO

Al director de la Tesis Ing. NORMAN
CHOOTONG CH. quien con su gran colaboración y
ayuda hizo posible la elaboración de este
trabajo, y a todos los profesores que con sus
conocimientos coadyuvaron a la realización de
esta Tesis.

RESUMEN

En esta tesis vamos a construir un circuito troceador a base de tiristores, que es un circuito que interrumpe el paso de potencia entre una fuente continua de voltaje y la carga, logrando controlar así la potencia promedio de salida.

Se realizarán pruebas con cargas resistivas-inductivas y luego se procederá a hacer pruebas con el motor y las realimentaciones de velocidad, a través de una pequeña resistencia conectada en serie con la carga.

INDICE GENERAL

	Pag.
RESUMEN	I
INDICE GENERAL	II
INDICE DE FIGURAS	V
INDICE DE TABLAS	VII
INDICE DE ABREVIATURAS	VIII
INTRODUCCION	1
CAPITULO I	
TEORIA BASICA DEL TIRISTOR	2
1.1.- Generalidades	2
1.2.- Características Estáticas	3
1.3.- Características Dinámicas	4
1.3.1.- Cebado del Tiristor	4
1.3.2.- Apagado del Tiristor	7
CAPITULO II	
TROCEADOR	12
2.1.- Definición	12
2.2.- Clasificación	13
2.2.1.- Troceador de Conmutación Forzada con dos Tiristores	13
2.2.2.- Troceador de JONES	16
2.2.3.- Troceador de Conmutación Forzada con tres Tiristores	18
2.2.4.- Troceador Autoconmutado	20
2.3.- Ventajas y Desventajas	22
2.4.- Aplicaciones	22

CAPITULO III

DISEÑO DEL TROCEADOR	24
3.1.- Diagrama del Circuito	24
3.2.- Cálculos	25
3.3.- Selección de los Tiristores	26
3.4.- Circuitos de Protección de los Tiristores...	27
3.4.1.- Protección contra dv/dt	27
3.4.2.- Protección contra di/dt	27

CAPITULO IV

FUENTES DE VOLTAJE D. C. NECESARIAS	29
4.1.- Fuente de Voltaje para el Troceador	29
4.1.1.- Requerimientos para el diseño	29
4.1.2.- Etapa de rectificación y filtrado	29
4.2.- Fuentes de Voltaje para Polarización	30
4.2.1.- Requerimientos para el diseño	30
4.2.2.- Etapa de rectificación y filtrado	30
4.2.3.- Regulación del Voltaje D. C.	31

CAPITULO V

APLICACION AL CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR	
D. C.	33
5.1.- Especificaciones del Motor	33
5.2.- Realimentación de Corriente	33
5.2.1.- Características	33
5.2.2.- Controlador de Corriente	33
5.3.- Realimentación de Velocidad	34
5.3.1.- Características	34
5.3.2.- Controlador de Velocidad	35

5.3.3.- Limitación de la Corriente	35
CAPITULO VI	
UNIDAD DE CONTROL	38
6.1.- Requerimientos	38
6.2.- Diagrama de Flujo del Controlador	38
6.3.- Sincronización de los Disparos	43
CAPITULO VII	
PRUEBAS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES	45
7.1.- Control del Motor D. C.	45
7.1.1.- Realimentación de Corriente	45
7.1.2.- Realimentación de Velocidad	46
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	49
BIBLIOGRAFIA	IX

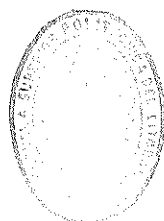
INDICE DE FIGURAS

	Pag.
1.1.- Estructura y Símbolo del Tiristor	2
1.2.- Curva característica del Tiristor	4
1.3.- Variación de t_d en Funcion de I_g	6
1.4.- Curvas de Disparo y Tiempos de Encendido ...	7
1.5.- Conmutación de Línea del Tiristor	9
1.6.- Conmutación por Carga del Tiristor	10
1.7.- Conmutación Forzada del Tiristor	11
2.1.- Representación Gráfica del Troceador	12
2.2a.- Diagrama del Troceador	13
2.2b.- Formas de Ondas del Troceador	14
2.3.- Secuencia de Funcionamiento	15
2.4a.- Diagrama del Troceador de JONES	16
2.4b.- Formas de Ondas	17
2.5.- Diagrama y Formas de Ondas del Troceador de Conmutación Forzada con tres Tiristores.....	18
2.6.- Secuencia de Funcionamiento	20
2.7.- Diagrama y Forma de Ondas del Troceador Autoconmutado	21
3.1.- Troceador de Conmutacion Forzada con tres Tiristores	24
3.2.- Circuito de Carga del Condensador	25
3.3.- Circuito Resonante	26
4.1.- Fuente de Voltaje del Troceador	29
4.2.- Fuente de Voltaje de 5 voltios	32
4.3.- Fuente de Voltaje de +15 y -15 voltios	32
5.1.- Controlador de Corriente	34

5.2.- Controlador de Velocidad	35
5.3.- Controlador Completo	37
6.1.- Diagrama de Flujo	39
6.2.- Mapas de Karnaugh de las variables	40
6.3.- Circuito del Controlador Digital	41
6.4.- Implementacion de los Contadores	42
6.5.- Circuito de Disparo del Tiristor	43
7.1a.- Voltaje de Salida del Troceador	47
7.1b.- Voltaje del Tiristor #1	47
7.1c.- Voltaje del Tiristor #2	48
7.1d.- Voltaje del Tiristor #3	48

INDICE DE TABLAS

	Pag.
I.- Ventajas y Desventajas de los Troceadores	23
II.- Valores de Corrientes Obtenidos	45
III.- Valores de Velocidad Obtenidos	46



BIBLIOTECA

INDICE DE ABREVIATURAS

A.C.	Voltaje Alterno.
C	Condensador.
Clk	Reloj.
D	Diodo.
D.C.	Voltaje Directo.
F	Fusible.
Ia	Corriente de Anodo.
Ic	Corriente de Colector.
Ig	Corriente de Puerta.
Io	Corriente de Salida.
Iref	Corriente de Referencia.
L	Inductancia.
M	Motor.
R	Resistencia.
td	tiempo de retardo.
Th	Tiristor.
toff	tiempo de apagado.
ton	tiempo de encendido.
tr	tiempo de subida.
V	Fuente de Voltaje.
Vc	Voltaje de Condensador.
Vf	Voltaje Directo A-K del Tiristor.
Vo	Voltaje de Salida.
Vr	Voltaje Inverso del Tiristor.
Wo	Velocidad de Salida.
Wref	Velocidad de Referencia.

INTRODUCCION

Habiendo trabajado con circuitos controladores de potencia continua variando el ángulo de disparo de tiristores en un puente rectificador, y teniendo conocimiento que se podía variar la potencia de salida de una fuente de voltaje continuo intercalando un circuito llamado troceador entre la fuente y la carga, se decidió construirlo.

El objetivo del presente escrito consiste en investigar el funcionamiento de un circuito troceador a base de tiristores para alimentar un motor D. C. y controlar su corriente y velocidad. Así mismo conlleva el propósito de servir como complemento para optar el título de Ingeniero Electrónico en la Escuela Superior Politécnica del Litoral.

Esta investigación se la hará revisando varios circuitos troceadores y construyendo uno de ellos.

También se diseñará el circuito de control para el disparo de los tiristores y para las realimentaciones.

De los estudios efectuados se concluye que el TROCEADOR es un circuito idóneo para lograr que la potencia de una fuente continua a la carga pueda ser controlada fácilmente, y si efectuamos las realimentaciones de velocidad y corriente, logramos un control muy significativo de las condiciones de trabajo del motor.

CAPITULO I

1.- TEORIA BASICA DEL TIRISTOR.

Este capítulo trata de los tiristores en una forma general.

1.1.- Generalidades.

El Tiristor es un conmutador casi ideal, rectificador y amplificador a la vez, es un componente idóneo en Electrónica de Potencia.

El Tiristor es un semiconductor sólido de silicio formado por cuatro capas P y N alternativamente como se vé en la figura. 1.1.



fig. 1.1.- Estructura y símbolo

Los 2 terminales principales son Anodo y Cátodo, y la circulación de corriente está controlada por un electrodo de mando llamado "puerta" ("gate" en inglés).

El Tiristor es un elemento unidireccional, una vez aplicada la señal de mando a la puerta, el dispositivo

deja pasar una corriente que sólo puede tener un sentido.

El dispositivo cumple varias misiones que podemos clasificar un poco arbitrariamente como sigue:

- * Rectificación: Consiste en usar la propiedad del funcionamiento unidireccional del dispositivo.
- * Interrupción de corriente: Usado como interruptor, el tiristor puede reemplazar contactores electro-mecánicos.
- * Regulación: La posibilidad de ajustar el momento preciso de cebado permite emplear el tiristor para gobernar la corriente o potencia media de salida.
- * Amplificación: Como la corriente de mando es nula en comparación a la corriente principal, se produce un fenómeno de amplificación en corriente o potencia.

1.2.- Características estáticas.

En la fig. 1.2 se ha dibujado la curva característica de un tiristor, representandose la corriente I_a en función del voltaje ánodo-cátodo.

Cuando es nula la tensión V , lo es también la corriente I_a . Al crecer el voltaje V_f en sentido directo, se alcanza un valor mínimo V_d que provoca el cebado y el tiristor se hace entonces conductor y cae el voltaje ánodo-cátodo mientras I_a aumenta.

Si se polariza inversamente el tiristor, aplicándole una tensión V_r observaremos la existencia de una débil corriente inversa de fuga, hasta que alcanza el punto de tensión inversa máxima que provoca la destrucción del elemento.

La aplicación de una corriente en la puerta desplaza hacia la derecha el punto de disparo V_d (V_{di}).

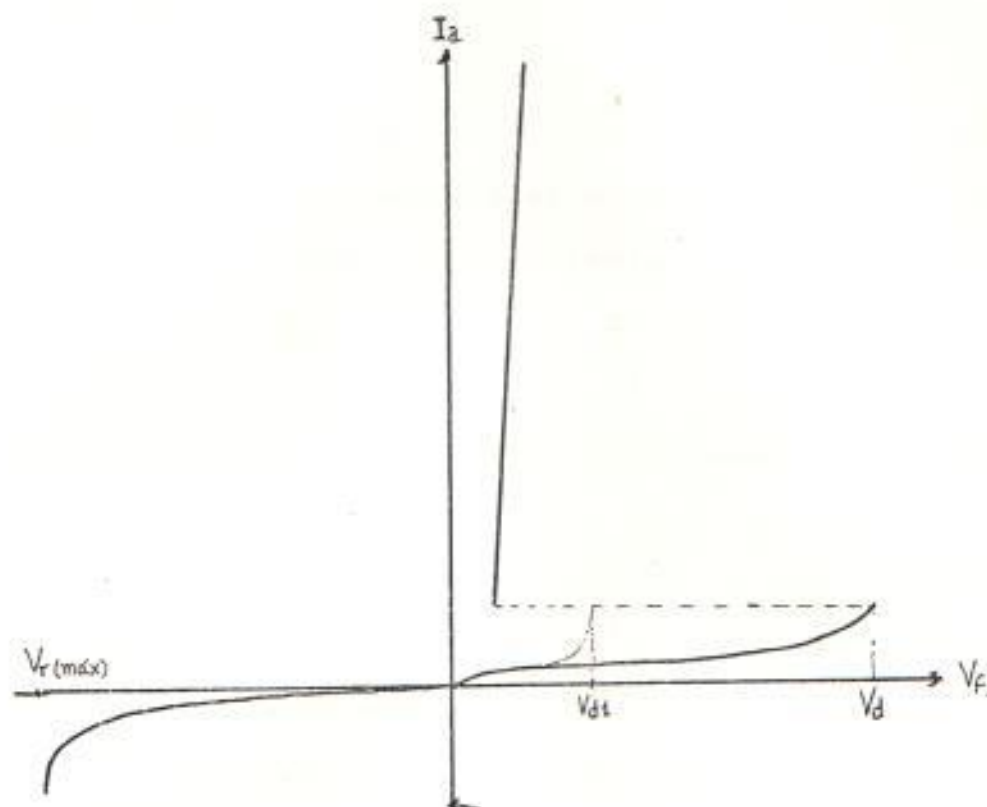


fig. 1.2.- Curva característica del tiristor.

1.3.- Características Dinámicas.

En esta parte del capítulo vamos a examinar el comportamiento dinámico, es decir el cebado y la conmutación del tiristor, por medio del método que vamos a aplicar en el circuito.

1.3.1 Cebado del tiristor.

El tiristor puede cebarse por diferentes

métodos, los más importantes son:

- La Tensión.- Si se aumenta el voltaje ánodo-cátodo del tiristor llega un momento en que la corriente de fuga es suficiente para producir un brusco aumento de la corriente I_a .

- La Derivada del Voltaje.- Como la unión PN presenta una cierta capacidad, si se hace crecer bruscamente la tensión ánodo-cátodo, esto produce una corriente

$$i = C \frac{dv}{dt}$$

y si esta corriente es suficientemente elevada, provocará el cebado del tiristor.

- La Temperatura.- La corriente inversa de fuga de un transistor de silicio aumenta al doble, aproximadamente, cada 14 grados C al aumentar la temperatura. Cuando la corriente alcanza un valor suficiente, se produce el disparo del tiristor.

- Cebado por puerta.- En la mayoría de las aplicaciones se utiliza un impulso en la puerta para poner en conducción el tiristor. Pero este impulso sólo afecta a la parte del cátodo vecina a la puerta; por consiguiente, el paso del tiristor del estado de bloqueo al de conducción está limitado en principio a esta superficie inicialmente cebada que se denomina Zona primaria de cebado.

Resulta evidente que el tiempo de cierre no, puede ser nulo se lo llama t_{on} y se lo descompono en 2

periodos que son:

* Tiempo de retardo.- Denotado por t_d por "delay time", es el tiempo que transcurre desde que el flanco de ataque de la corriente de puerta alcanza el 50% de su valor final hasta que la corriente de ánodo alcanza el 10% de su valor máximo sobre una carga resistiva.

Este tiempo depende de la corriente de mando, y sobre todo del tiempo de subida de esta corriente, pero poco depende de la tensión ánodo-cátodo si es grande; varía desde 0.2 μs para los tiristores pequeños a 1 μs para los tiristores de potencia. La fig. 1.3 muestra la variación de t_d en función de la corriente I_g , para un tiristor normal de 35A.

* Tiempo de subida.- Se lo denota por t_r y es el tiempo necesario para que la corriente de ánodo I_a pase del 10% al 90% de su valor máximo sobre una carga resistiva.

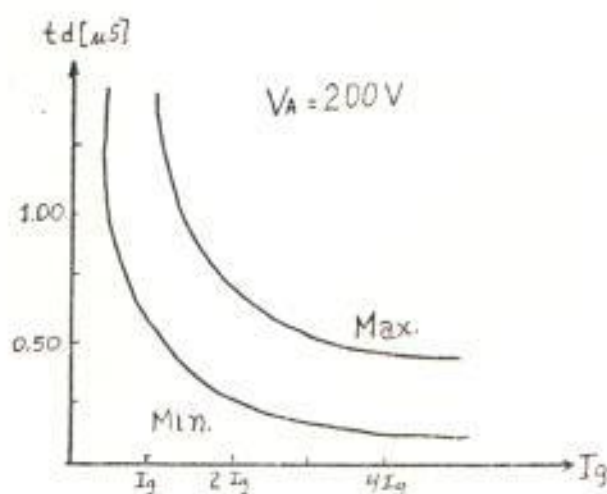


fig. 1.3 Variación de t_d en Función de I_g

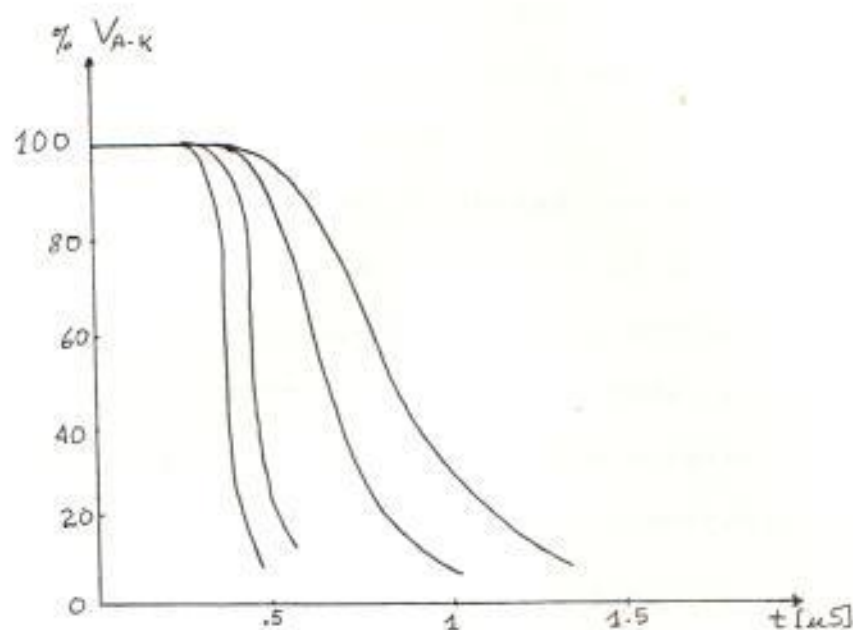


fig. 1.4 Curvas de disparo y tiempos de encendidos

Como en el caso anterior, la amplitud de la señal de puerta juega un papel importante en la duración de t_r , fig. 1.4.

La suma de $t_d + t_r$ nos da el t_{on} , transcurrido este tiempo el tiristor se satura.

1.3.2.- Apagado del tiristor.

Un transistor ideal puede ser apagado, esto es, su resistencia para corriente directa vuelve a infinito, mientras la corriente directa I_c está fluyendo, sim-

plemente reduciendo la corriente de base a cero. Este no es el caso del tiristor.

Cuando el tiristor está encendido, no puede recuperar su resistencia para corriente directa hasta que la corriente sea reducida a cero y mantenida en cero para alcanzar el tiempo de apagado.

El tiempo de apagado es el tiempo que sigue después que la corriente directa en el tiristor a cesado y se puede aplicar voltaje directo sin producir el encendido del tiristor. Cuando la conducción cesa, una alta concentración de portadores de carga aún existen en la unión central del tiristor, y si esta concentración no ha sido suficientemente reducida por recombinación, no es posible aplicar un voltaje directo sin producir el encendido del tiristor.

Por lo tanto un típico tiempo de apagado t_{off} es especificado en la hoja de datos.

Diferentes métodos pueden ser empleados para conmutar o apagar un tiristor, y el método empleado depende de la función del sistema donde está el tiristor. Los métodos más comunes son:

* Conmutación de línea.- Es empleada en circuitos alimentados por una fuente A.C. en el cual la corriente cae a cero en algún punto del ciclo, fig. 1.5.

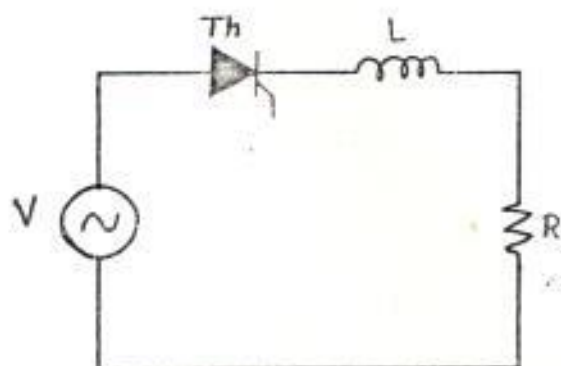


fig. 1.5 Conmutación de Línea del tiristor

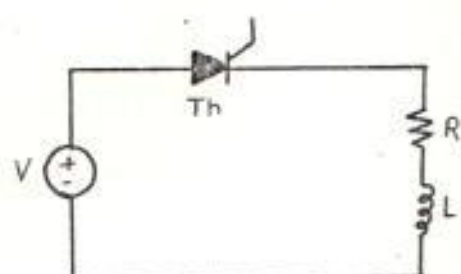
Este tipo de conmutación es también aplicada en controladores de voltaje A.C. y rectificadores controlados.

* Conmutación de carga.- Como su nombre lo indica, este tipo de conmutación depende de la naturaleza del circuito de carga, esto es, alguna tendencia natural de la corriente en el circuito a caer a cero algún tiempo después que la fuente de energía ha sido aplicada para encender el tiristor.

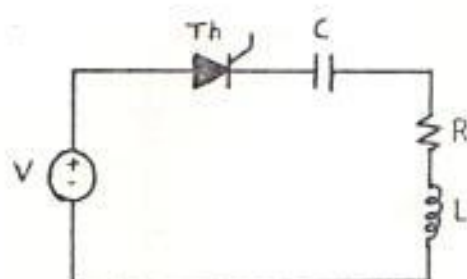
Aunque en algunos circuitos de carga excitados con A.C. la conmutación de línea puede ser empleada, la conmutación de carga es principalmente utilizada para circuitos de corriente D.C.

En la fig. 1.6.a es claro que cuando el tiristor Th esté encendido, este no puede apagarse después. Sin embargo, si alguna capacitancia en serie es sumada al circuito, como en la fig. 1.6.b, y haciendo

que la relación entre R, L, C sea tal que la corriente que fluye cuando el tiristor está encendido es oscilatoria. Esto hace que una frecuencia sea establecida y después de un semiciclo se apaga el tiristor.



(a)



(b)

fig. 1.6 Conmutación por carga del tiristor

* **Conmutación Forzada.** - Esta no es siempre la manera más conveniente o económica para producir la conmutación de la carga de un circuito RL.

Los principales elementos adicionales del

circuito requeridos para este método de conmutación forzada son mostrados en la fig. 1.7. Su propósito es para forzar el voltaje del tiristor VAK a un voltaje negativo, y así obtener la conmutación por voltaje. Un diodo de paso libre es conectado en paralelo al circuito de carga para descargar la energía almacenada en L cuando el tiristor principal Th1 es apagado. Esto se consigue cargando inicialmente el condensador C. Después de disparado el tiristor Th1 se dispara el tiristor Th2 y la corriente principal es desviada a través del condensador, haciendo que se apague el tiristor Th1.

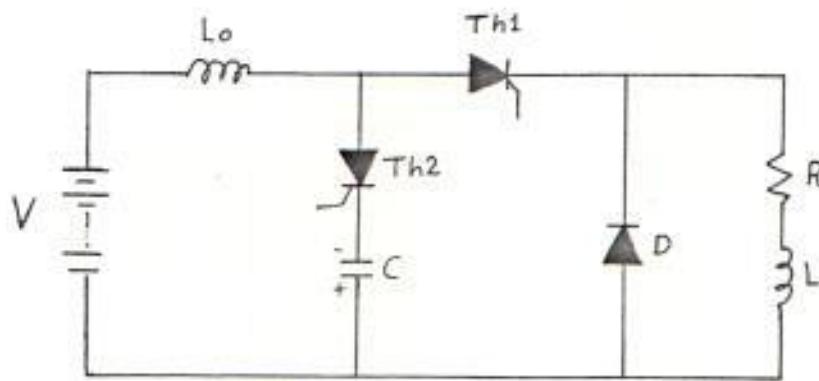


fig. 1.7 Conmutación forzada del tiristor

CAPITULO II

II.- TROCEADOR.

2.1 Definición.

El troceador es un convertidor de corriente continua a corriente continua.

Es llamado Troceador a causa de su principio de operación, ya que es empleado para variar el valor promedio del voltaje directo aplicado a un circuito de carga.

Actúa como un interruptor situado entre una fuente de corriente continua y la carga que se cierra y abre ciclicamente.

En la fig. 2.1 aparece representada la función de un troceador y la manera en que el voltaje promedio de la carga es reducido.

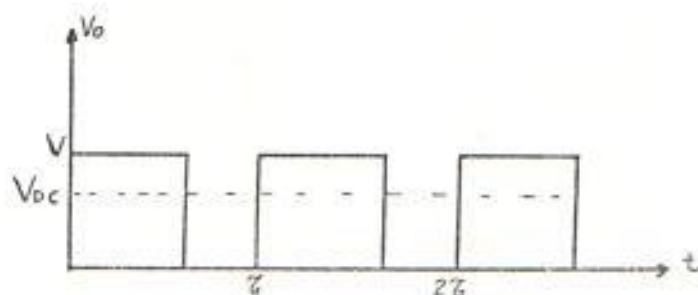
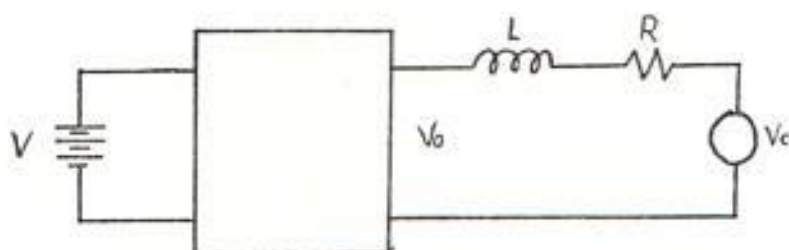


fig. 2.1 Representación gráfica del Troceador

2.2 Clasificación.

Los troceadores se clasifican en:

* Troceadores de Conmutación Forzada, los cuales utilizan tiristores auxiliares para invertir el sentido de la corriente en el tiristor principal o desviarla a través de un tiristor auxiliar.

* Troceadores con Autoconmutación, son los que utilizan un circuito resonante en serie o en paralelo con el tiristor principal. Este se bloquea cuando la corriente de resonancia se invierte, por lo que no necesita tiristor auxiliar.

Los circuitos troceadores básicos considerados en esta tesis son:

2.2.1 Troceador de Conmutación Forzada con 2 tiristores.

La fig. 2.2a representa el troceador y la fig. 2.2b sus formas de onda. En el esquema Th1 controla la corriente de carga y Th2 es el tiristor auxiliar. Siempre se debe disparar primero Th2 para iniciar la secuencia.

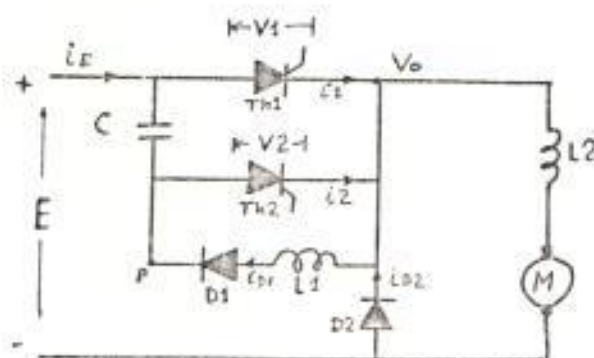


Fig. 2.2a Diagrama del Troceador

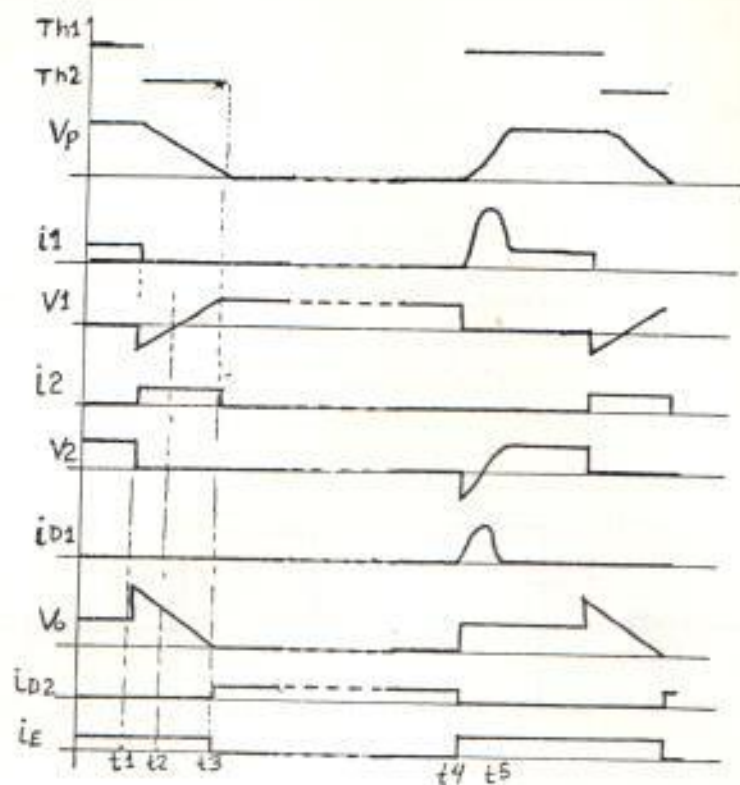


Fig. 2.2b Formas de Ondas del Troceador

Para el análisis dividimos la escala de tiempo en intervalos.

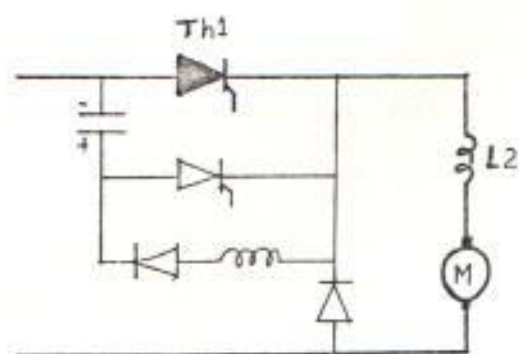
$t < t_1$.- El tiristor Th1 conduce, el condensador de conmutador se carga a la tensión de alimentación E, con la placa inferior positiva por resonancia con L1 (fig. 2.3a).

$t_1 < t < t_3$.- En este intervalo se dispara Th2, Th1 se bloquea porque la carga del condensador fuerza una corriente inversa a través de él. El disparo de Th2 hace que el voltaje de salida aumente bruscamente a $2E$, la corriente de la carga proviene de la fuente a través del condensador C1 y del tiristor Th2, de forma que C1 se descarga linealmente y disminuye el flujo de corriente a la carga

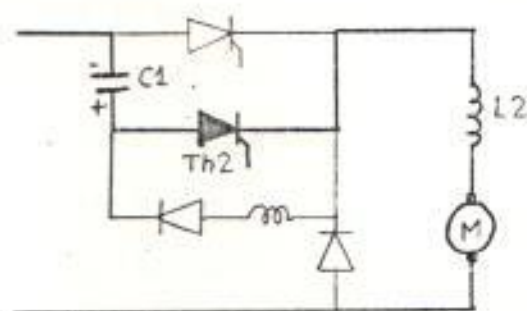
(fig. 2.3b).

$t_3 < t < t_4$.- La tensión en C1 alcanza el valor estable E. En este momento se bloquea Th2 porque la corriente es menor que la corriente de mantenimiento (fig. 2.3c).

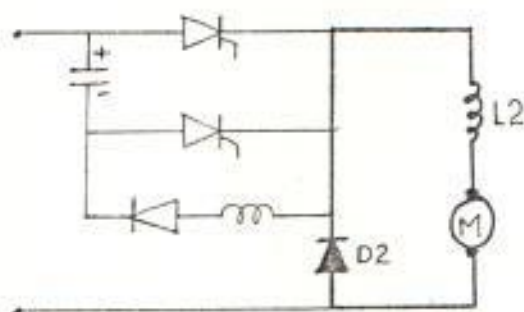
$t_4 < t < t_5$.- La tensión en C1 se invierte por resonancia al dispararse Th1 en t_4 (fig. 2.3d).



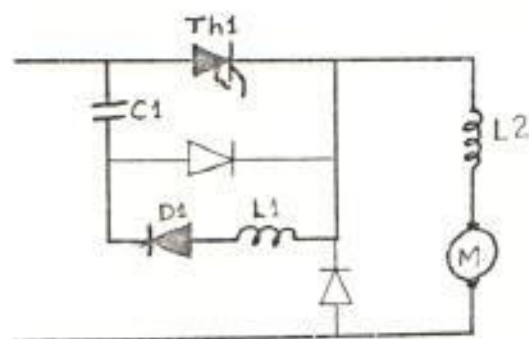
(a)



(b)



(c)



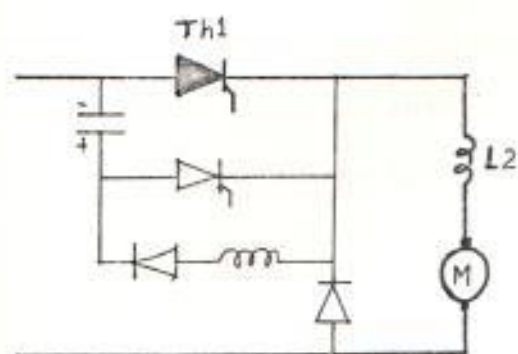
(d)

Fig. 2.3 Secuencia de Funcionamiento

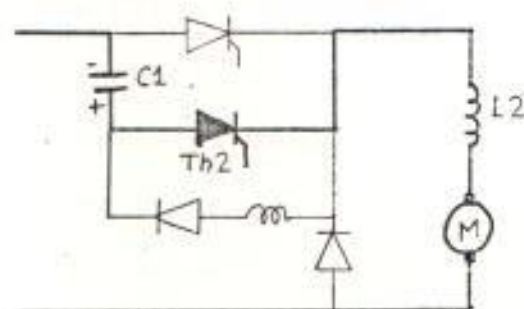
(fig. 2.3b).

$t_3 < t < t_4$.- La tensión en C1 alcanza el valor estable E. En este momento se bloquea Th2 porque la corriente es menor que la corriente de mantenimiento (fig. 2.3c).

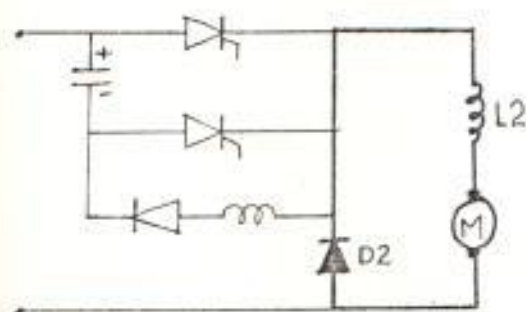
$t_4 < t < t_5$.- La tensión en C1 se invierte por resonancia al dispararse Th1 en t_4 (fig. 2.3d).



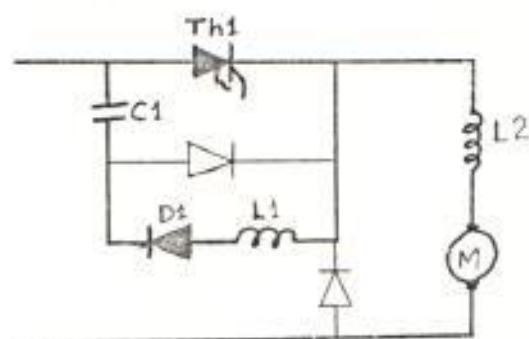
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 2.3 Secuencia de Funcionamiento

2.2.2 Troceador de Jones.

La fig. 2.4a representa al troceador de Jones y la fig. 2.4b sus formas de onda. Th1 es el tiristor principal y Th2 es el tiristor auxiliar.

$t < t_1$.- El tiristor Th1 conduce, C1 está cargado negativamente.

$t_1 < t < t_2$.- En el instante t_1 , el tiristor Th2 pasa a conducir; Th1 se bloquea, porque C1 se había cargado negativamente durante un intervalo precedente, es decir, la corriente de carga pasa de Th1 a Th2. Al descargarse C1 se produce una disminución lineal en tiempo de V_o .

$t_2 < t < t_3$.- En este intervalo, V_o ha llegado a 0. Debido a la energía magnética $1/2 L_1 I_o$ almacenada en la inductancia de conmutación, tiene lugar un cuarto de periodo de resonancia, durante el cual la corriente en L1 disminuye considerablemente hasta 0, L2 obliga al diodo volante D2 a conducir, de modo que la corriente de resonancia puede circular a través de C1, Th2, L1, D2 y vuelve a C1 a través de la fuente.

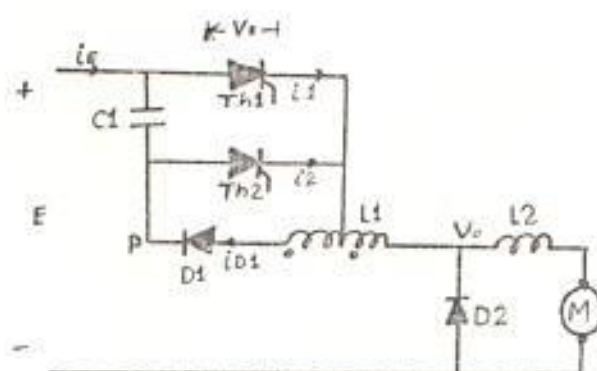


Fig. 2.4a Diagrama del Troceador de Jones

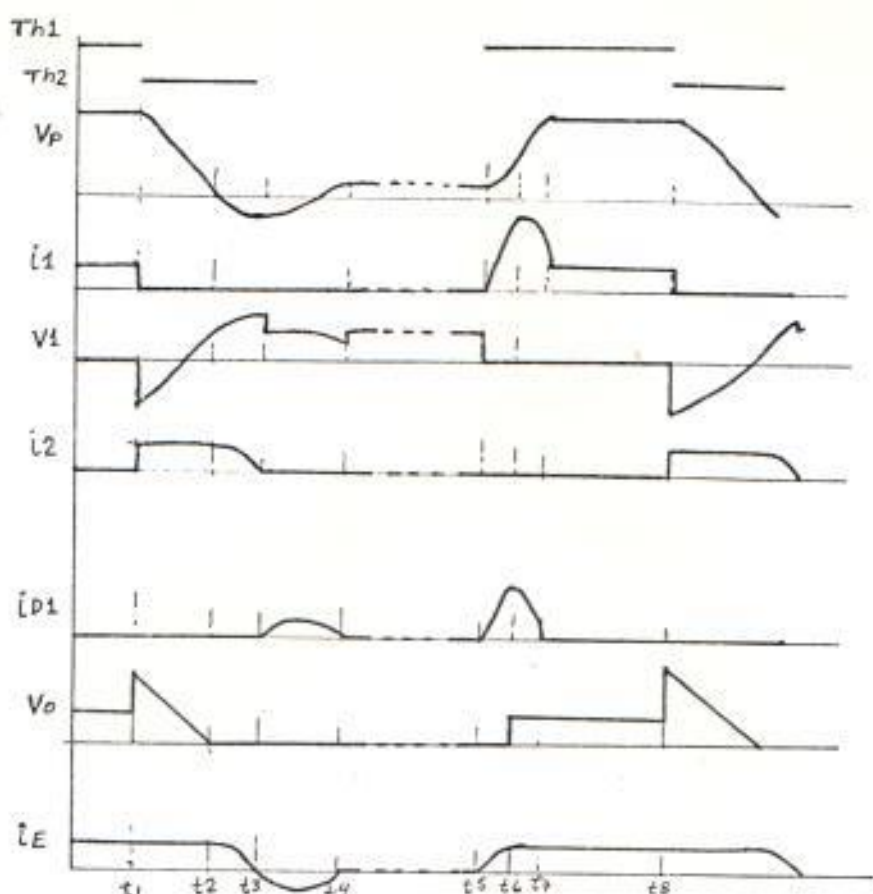


fig. 2.4b Formas de Onda

$t_3 < t < t_5$.- En el instante t_3 , Th_2 se bloquea por autoconmutación.

Asumiendo que la fuente de C.C. acepte una corriente regenerativa,, sigue un semiperiodo de resonancia, por intermedio de C_1 , la fuente D_2 , L_t y D_1 .

Entre t_4 y t_5 D_1 evita que la corriente se invierta.

$t_5 < t < t_6$.- En t_5 se dispara Th_1 y se aplica la tensión de alimentación E a la inductancia L_1 , así la corriente en L_1 aumenta linealmente hasta el valor de la corriente de carga I_o .

En el secundario se produce un impulso de tensión rectangular nE (n es la relación de vueltas

secundario/primario), este impulso carga $C1$ a través de $D1$ con la placa inferior positiva.

2.2.3.- Troceador de Conmutación Forzada con 3 Tiristores.

En este troceador la conmutación se consigue por medio de un tiristor adicional y no sufre la influencia de la carga. En la fig. 2.5 se encuentran el circuito y

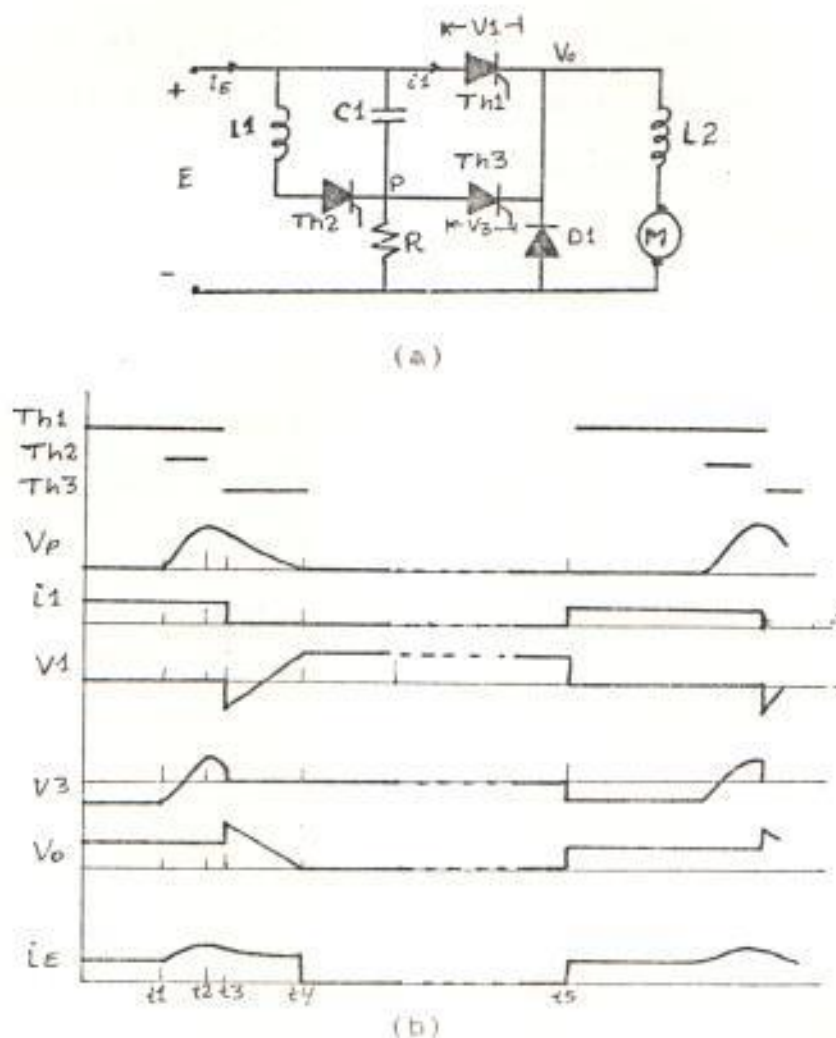


fig. 2.5 Diagrama y formas de onda

sus formas de onda. Th1 es el tiristor principal, Th2 conmuta la tensión de C1 y Th3 bloquea a Th1.

Analizando sus formas de onda, vemos que:

$t < t_1$.- El condensador se encuentra cargado con un voltaje E y la corriente de carga está circulando a través de Th1 (fig. 2.6a).

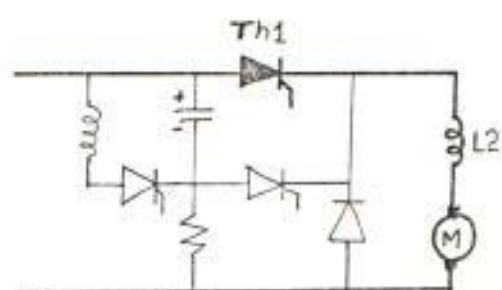
$t_1 < t < t_2$.- Mientras Th1 conduce se dispara Th2 en el instante t_1 y la tensión en C1 se invierte por resonancia con L1.

Como en el instante t_2 , Th2 se bloquea por autoconmutación, el intervalo de conducción de Th2 es igual a un semiperiodo de la resonancia (fig. 2.6b).

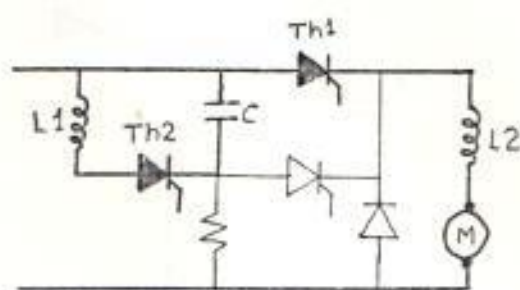
$t_2 < t < t_3$.- Dado que Th3 todavía no se ha disparado, C1 empieza a descargarse a través de R1.

$t_3 < t < t_4$.- En el instante t_3 se dispara Th3 y se bloquea Th1 por la tensión de C1. La corriente de carga I_0 pasa de Th1 a Th3, de tal manera que C1 se descarga linealmente (fig. 2.6c).

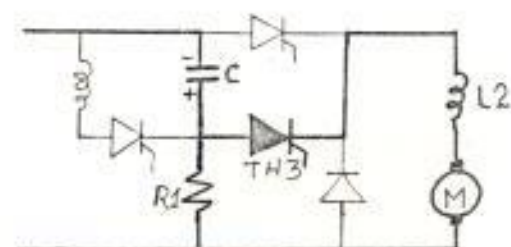
$t_4 < t < t_5$.- En el instante t_4 , Th3 se bloquea debido a la falta de corriente directa. El condensador C1 queda cargado con el voltaje de la fuente (fig. 2.6d).



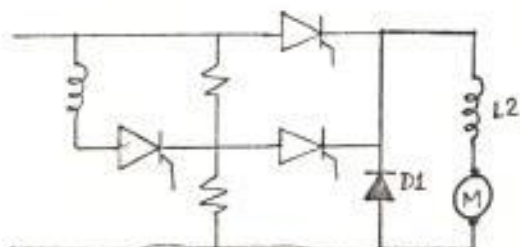
(a)



(b)



(c)

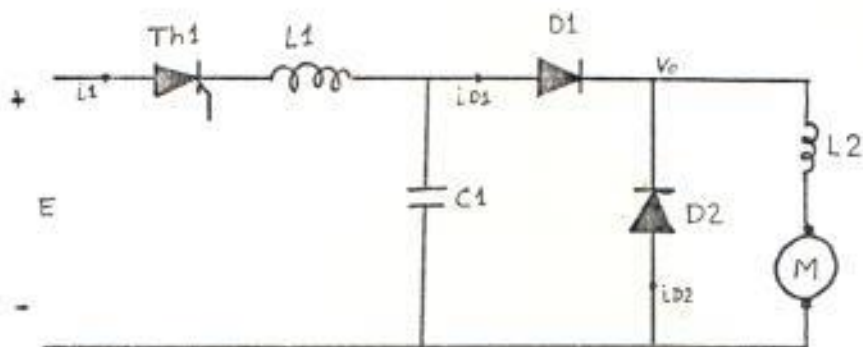


(d)

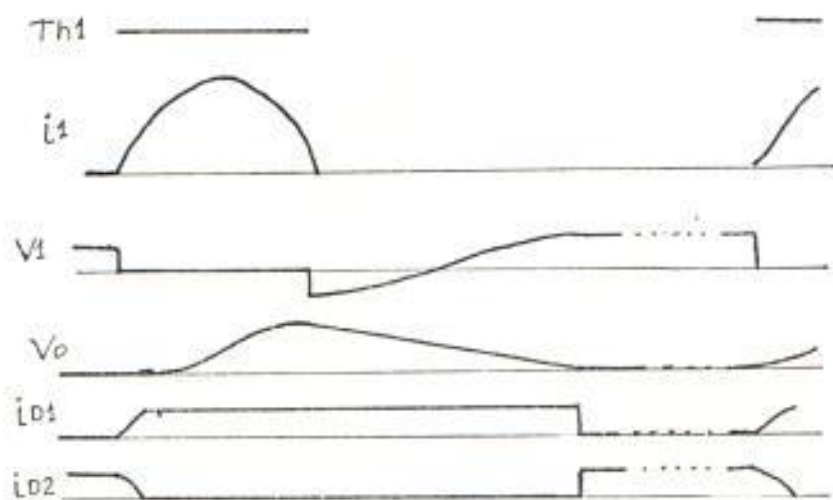
Fig. 2.6 Secuencia de funcionamiento

2.2.4 .- Troceador Autoconmutado.

La salida del troceador autoconmutado sólo puede controlarse variando el periodo de repetición de los impulsos. El diagrama del circuito aparece en la fig. 2.7a y el diagrama de tiempo en la fig. 2.7b.



(a)



(b)

Fig. 2.7 Diagrama y formas de ondas del Troceador Autoconmutado

$t_1 < t < t_2$.- Después del disparo del tiristor, el voltaje de salida no aumenta hasta que la corriente en el tiristor

se hace igual a la corriente de carga I_o .

$t_2 < t < t_3$. - La fuente de C.C. produce un aumento en la corriente del tiristor, seguido de un semiperíodo de resonancia.

$t_3 < t < t_4$. - El condensador empieza a descargarse en resonancia y la corriente del tiristor disminuye sinusoidalmente hasta cero.

$t_4 < t < t_5$. - En el instante t_4 se invierte la corriente en T_{H1} de modo que el tiristor tiene que bloquearse. La corriente de carga lo descarga el condensador a régimen constante.

$t > t_5$. - Con tensión cero la salida, se mantiene la corriente de carga por L_2 , haciendo conducir a D_2 .

2.3 Ventajas y desventajas.

En la tabla I aparecen las ventajas y desventajas de los circuitos troceadores descritos en este capítulo.

2.4 Aplicaciones.

Los Troceadores electrónicos tienen un amplio campo de aplicaciones debido a las ventajas que ofrecen como:

- * Alimentaciones de Potencia variable en C.C., con o sin estabilización de la salida.
- * Cargadores de Batería.
- * Sistemas de control para motores de C.C.

TABLA I
VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS TROCEADORES

TROCEADOR	VENTAJAS	DESVENTAJAS
CONMUTACION FORZADA CON 2 TIRISTORES	Conveniente cuando se tiene una carga fija.	El tiempo de bloqueo depende de la carga. El tiristor TH2 debe dispararse primero. No debe desconectarse la carga porque el condensador deja de consultar.
DE JONES	La secuencia de disparo carece de importancia	Su accionar depende de la carga. No es adecuado para cargas pequeñas.
CONMUTACION FORZADA CON 3 TIRISTORES	Funcionamiento seguro con independencia de la carga. Cualquier tiristor puede dispararse primero. La corriente de conmutacion no pasa por el tiristor principal.	La dv/dt del tiristor principal es muy elevada tras el bloqueo y es preciso colocar una red amortiguadora RC en paralelo a TH1.
AUTOCOMUTADO	Ideal para los motores de baja inductancia. Es uno de los mas simples que se ha diseñado.	Solo puede controlarse variando el periodo de repeticion de los impulsos con carga.

CAPITULO III

DISEÑO DEL TROCEADOR

Según las características de los Troceadores vistos, escogemos el más conveniente para implementarlo.

El control que vamos a usar es el de variación de la duración de los pulsos, manteniendo el periodo constante.

3.1.- DIAGRAMA DEL CIRCUITO.

El circuito que vamos a utilizar aparece en la fig. 3.1 y usa 3 tiristores.

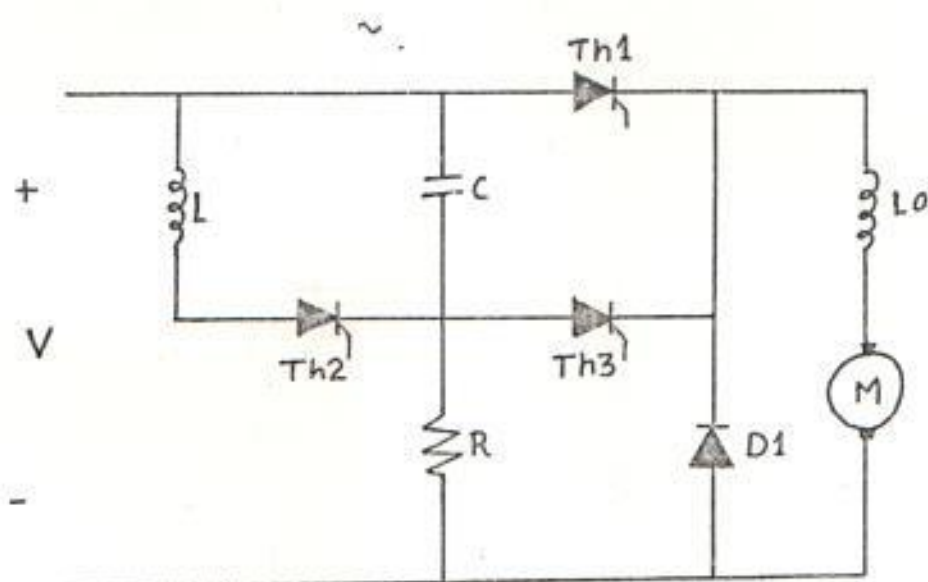


Fig. 3.1 Troceador de Conmutación Forzada con tres Tiristores.

En el diagrama no aparecen los circuitos de protección de los tiristores.

3.2.- CALCULOS.

Vamos a usar una frecuencia para el troceador de 215Hz, escogemos este valor porque para el disparo vamos a usar un circuito digital y dividimos el período total en 32 divisiones de 150 us cada una, es decir, la duración de los pulsos va a variar desde 150 us hasta 4.8 ms, dependiendo de los requerimientos del motor.

El condensador es de 1 uF y la resistencia de 2K .

Inicialmente el circuito que tenemos es el de la fig. 3.2, cuya respuesta es:

$$V_c = E/RC \int_0^t e^{-t/\tau} dt$$

de donde $V_c = E[e^{-t/\tau} - 1]_{\tau}^t$; $\tau = 2000$ us

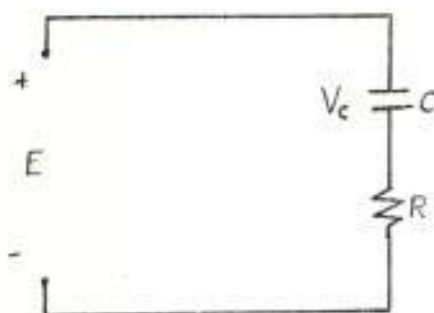


fig. 3.2 Circuito de carga del condensador

Para el circuito de oscilación usamos un período de 250 us. El circuito aparece en la fig. 3.3

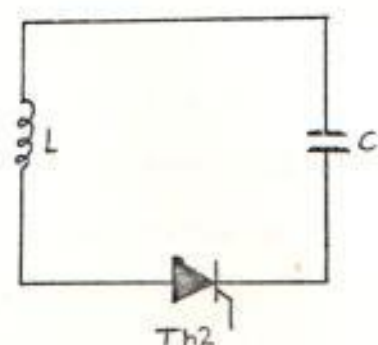


fig. 3.3 Circuito resonante

Como el semiperíodo de resonancia es igual a 250 μ s, y el valor de la capacitancia es 1 μ F, el valor de L es, igual a 6.3 mH, este valor lo obtuvimos de la fórmula:

$$t = \pi \sqrt{LC}$$

3.3.- SELECCION DE LOS TIRISTORES.

Como vamos a usar el troceador para un motor de corriente continua de 7 A nominales, y considerando que el troceador va a servir para experiencias en el lab. de Controles Industriales Electrónicos, podemos considerar tiristores que soporten unos 20 A_{dc} y un voltaje de pico de 600 V.

Se consiguieron tiristores tipo S6420M cuyas características principales son:

* Voltaje inverso de pico	600 V
* Corriente Directa	22 A
* Corriente de Compuerta	40 mA
* Ton	3 μ s

3.4.- CIRCUITOS DE PROTECCION DE LOS TIRISTORES.

3.4.1.- Protección contra dv/dt .

Una velocidad excesiva de crecimiento del voltaje aplicado entre Anodo y Cátodo del tiristor bloqueado puede provocar el disparo del tiristor en ausencia de la señal de compuerta.

Para proteger al tiristor contra las variaciones de voltaje se coloca un circuito RC en paralelo con cada tiristor. El condensador es para limitar la velocidad de subida del voltaje. Para limitar la corriente de descarga del condensador al dispararse el tiristor, usamos una resistencia en serie con el condensador.

Los valores más usados de estos componentes son de 0.01 a 1 μF y de 20 a 100 Ω . *SL*

3.4.2.- Protección contra di/dt .

Si hay riesgos de aparición de di/dt elevadas, será necesario asegurarse que esta variación de corriente no sea muy brusca.

Debido al di/dt , la potencia instantánea del tiristor puede alcanzar valores muy elevadas, lo cual podría dañar al tiristor.

La mejor manera de proteger a los tiristores del di/dt es colocándole una pequeña inductancia en serie, esta inductancia debe ser saturable, ya que mientras no esta saturada solo deja pasar una intensidad reducida de corriente, una vez saturada se convierte en un cortocircuito. Los valores típicos de inductancias varían de

50 a 100 μH .

En nuestro circuito no va a ser muy crítica esta situación, ya que vamos a usarlo para alimentar un motor y este presenta una inductancia propia.

CAPITULO IV

FUENTES DE VOLTAJE D.C. NECESARIAS

En este capítulo procedemos al diseño de las fuentes, tanto para el troceador como para el sistema de control.

4.1.- Fuente de voltaje para el troceador.

4.1.1.- Requerimientos para el diseño.

La fuente de voltaje debe ser de 220 Vdc ya que el motor que vamos a utilizar es de un voltaje nominal de 220Vdc y una corriente de 7A.

4.1.2.- Etapa de rectificación y filtrado.

Vamos a utilizar el circuito que aparece en la fig. 4.1., el cual consta de seis diodos, usamos una inductancia y un condensador para disminuir el rizado.

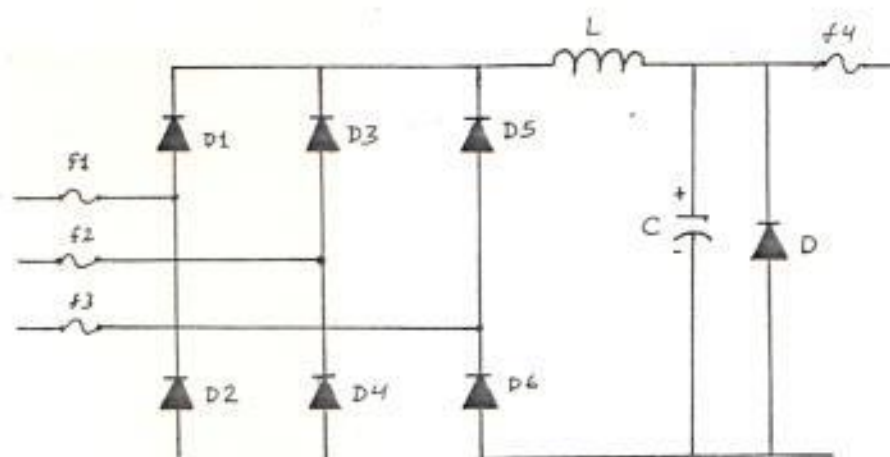


Fig. 4.1 Fuente de Voltaje del Troceador

El voltaje obtenido por medio de los seis diodos es

$$V_{dc} = 3 V_{max} (\text{línea})$$

es decir, el voltaje máximo de línea que debe alimentar a

la fuente es de 230 V, es decir 163 Vrms.

4.2.- Fuentes de voltaje para polarización.

4.2.1.- Requerimientos para el diseño.

Se desean construir tres fuentes, una de 5 Vdc para el circuito de disparo, una de 15 Vdc y una de -15 Vdc para polarización de los Op-amps. El diseño lo hacemos para que nos de 1 A.

4.2.2.- Etapa de rectificación y filtrado.

Para el diseño de la fuente de 5 V vamos a utilizar a la salida un regulador de 5 V; el cual tiene como característica un voltaje mínimo de entrada de 7.3 Vdc.

Del secundario del transformador usamos un voltaje de 9 Vrms. Para la rectificación usamos un puente de diodos, y para filtrar la señal de entrada al regulador usamos un condensador de 2200 uF.

Haciendo los siguientes cálculos obtenemos el voltaje mínimo que entra al regulador con una corriente de 1 A.

$$V_r(\text{máx}) = \sqrt{3} \frac{2.4 \text{ IDC}}{C}$$

$$V_{IN}(\text{mín}) = V_m - 2V_r(\text{máx})$$

donde:

- * $V_r(\text{máx})$ es el voltaje máximo de rizado,
- * IDC es la corriente expresada en miliamperios,
- * C es la capacitancia expresada en microfaradios.

- * V_m es el voltaje máximo de la fuente.
- * $V_{IN}(\min)$ es el voltaje mínimo que entra el regulador.

Considerando una corriente de 1 A, obtenemos:

$$V_r(\max) = 1.9 \text{ V.}$$

$$V_b = 12.7 \text{ V}$$

$$V_{in}(\min) = 8.9 \text{ V.}$$

lo que nos asegura que el voltaje de entrada al regulador es mayor que el voltaje mínimo requerido para obtener a la salida los 5 V.

Para las fuentes de +15 V y -15 V utilizamos un voltaje de 16Vrms, un puente rectificador y un condensador de 2200 uF para cada una.

El voltaje mínimo de entrada a los reguladores es de 17.7 V y -17.7 V respectivamente. Haremos el cálculo del voltaje mínimo que entra a los reguladores con una corriente de 1 A.

$$V_r(\max) = 1.9 \text{ V}$$

$$V_m = 22.6 \text{ V}$$

$$V_{in}(\min) = 18.8 \text{ V}$$

lo que nos asegura que vamos a obtener el voltaje deseado a la salida del regulador.

4.2.3.- Regulación del voltaje D.C.

La regulación del voltaje se lo realiza por circuitos integrados y a la salida colocamos un condensador de 1 uF como filtro

Los circuitos reguladores son:

Tipo	Votaje de Salida	Voltaje Minimo de entrada
7805	+ 5 V.	+ 7.3 V.
7815	+ 15 V.	+ 17.7 V.
7915	- 15 V.	- 17.7 V.

En las figuras 4.2 y 4.3 aparecen los circuitos completos de las fuentes.

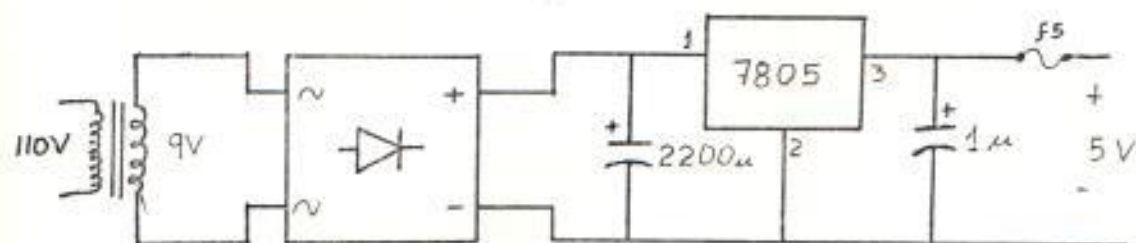


Fig. 4.2 Fuente de Voltaje de 5 voltios

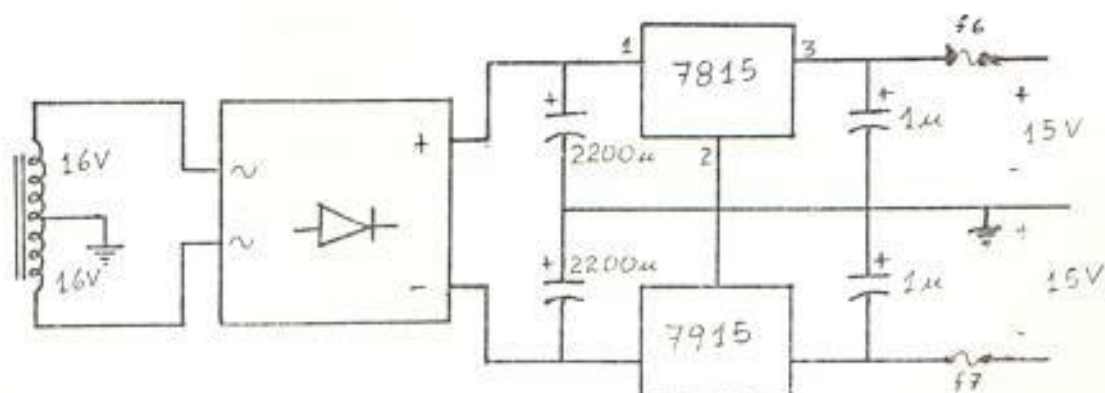


Fig. 4.3 Fuente de Voltaje de +15 y -15 voltios

CAPITULO V

APLICACION AL CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR D.C.

5.1.- Especificaciones del Motor.

V. Armadura = 220 Vd.c.

I. Armadura = 7 A

Velocidad = 2500 R.P.M.

Potencia = 1.12 KW

Constante de Tacometro $K = 42$ ($K=V/W$)

5.2.- REALIMENTACION DE CORRIENTE.

5.2.1.- Características.

Para la realimentación de corriente usamos una pequeña resistencia en serie con la armadura del motor. Esta resistencia es de un valor de 0.076 , lo que nos da un valor de $0.7V$ cuando la corriente es de $10 A$.

Para fijar una corriente de referencia usamos un potenciómetro y esto nos convierte la señal de voltaje en referencia de corriente.

5.2.2.- Controlador de Corriente.

Vamos a usar un controlador PI, este controlador nos da un error en estado estable mínimo. El circuito utilizado aparece en la fig. 5.1.

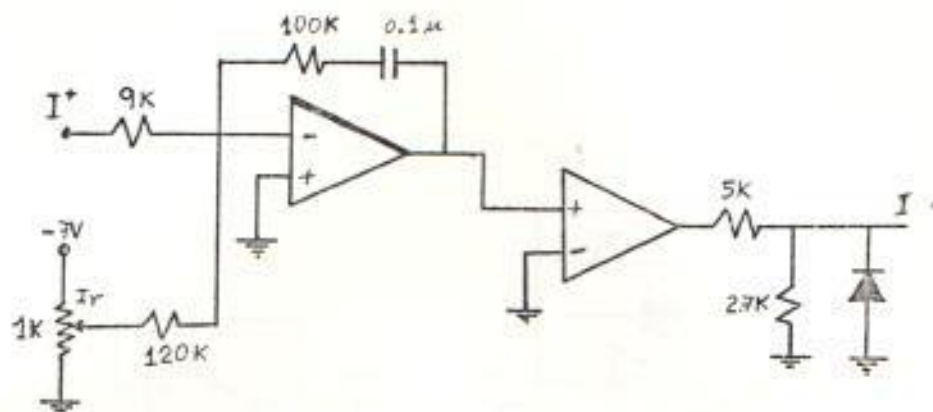


fig. 5.1. Controlador de Corriente

El segundo Op-amp nos sirve para convertir la señal analógica de salida en una señal de control digital para el circuito de disparo de los tiristores.

5.3.- REALIMENTACION DE VELOCIDAD.

5.3.1.- Características.

La realimentación de velocidad la hacemos por medio del tacómetro acoplado al eje del motor, el cual nos da una señal de voltaje determinada por la velocidad del motor. La señal de referencia la fijamos por medio de un potenciómetro.

5.3.2.- Controlador de velocidad.

Usamos un controlador PI. El circuito utilizado aparece en la fig. 5.2.

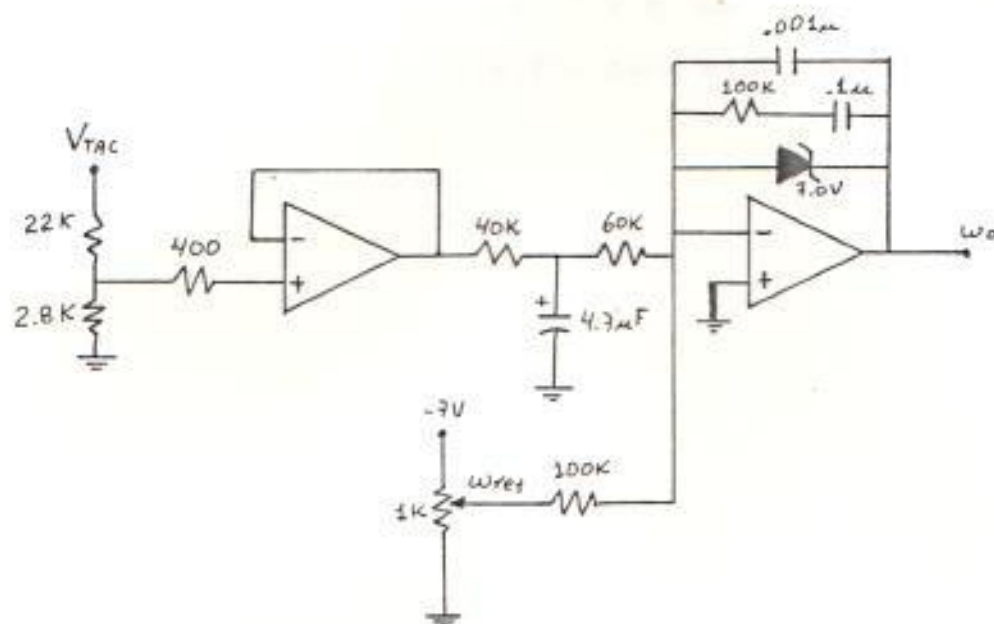


fig. 5.2. Controlador de Velocidad

Limitamos la salida por medio de un zener de 7V ya que la señal debemos enviarla a un circuito limitador de corriente.

5.3.3.- Limitación de la corriente.

Para la limitación de la corriente usamos el circuito controlador de corriente, colocando la señal ω_o como la corriente de referencia, lo que nos limita la corriente de carga a 7A.

En el gráfico de la fig. 5.3 aparece el circuito completo del controlador analógico de velocidad y corriente, y sus salidas para el circuito de disparo. Los Op-Amp's 1 y 2 sirven como acopladores de impedancia, los Op-Amp's 6, 7 y 8 nos sirven para obtener niveles de voltaje TTL para el circuito digital de disparo.



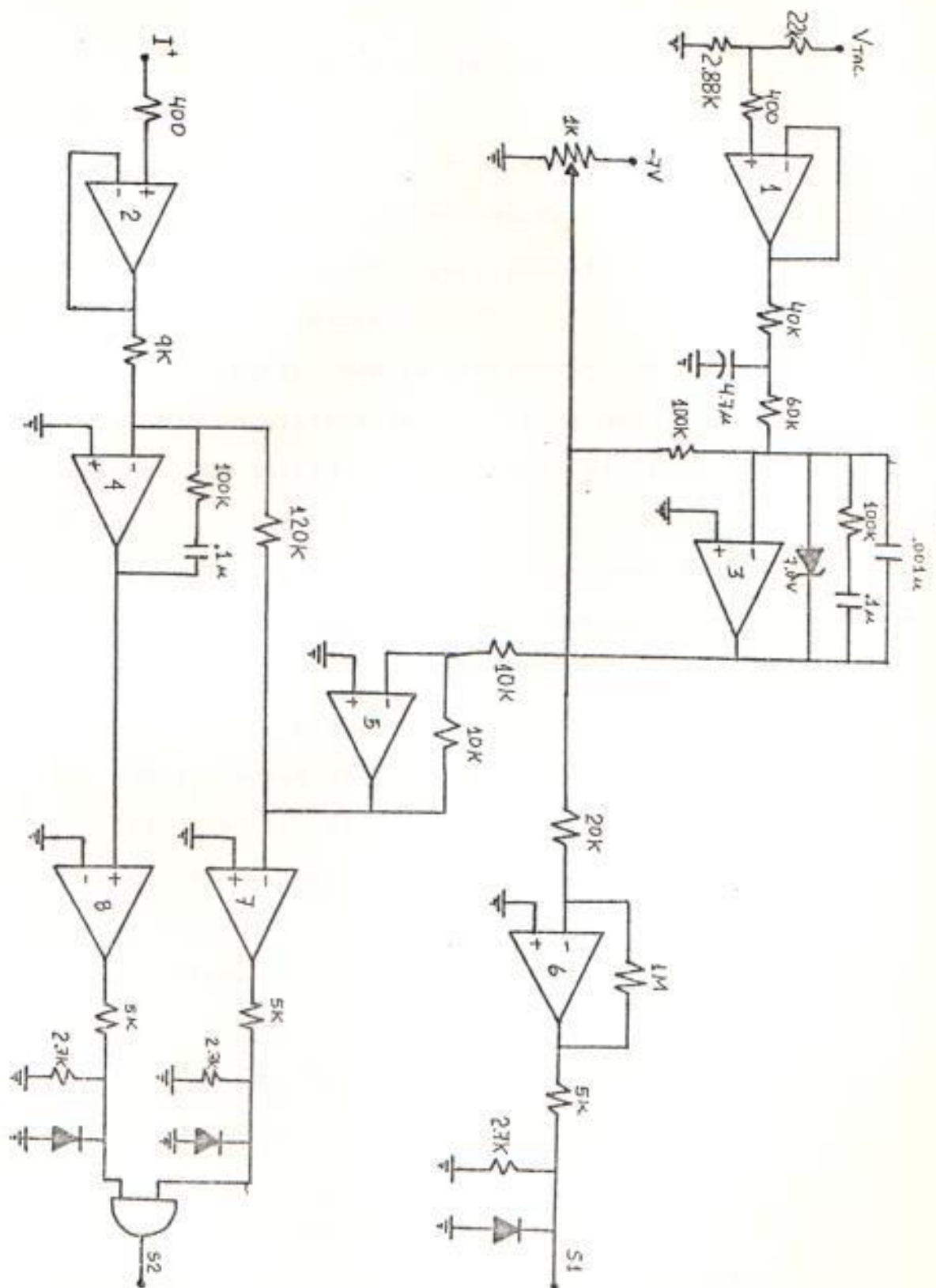


Fig. 5.3.- Controlador Completo

CAPITULO VI

UNIDAD DE CONTROL

6.1.- REQUERIMIENTOS.

Deseamos que nuestro sistema de control nos permita el disparo de los tiristores secuencialmente, dando el tiempo suficiente para permitir el apagado o encendido de los tiristores.

Para lograr que la frecuencia sea de 215 Hz, hemos diseñado un sistema de reloj para que después de 32 oscilaciones se inicie el nuevo ciclo de disparo de los tiristores.

Las señales de reloj las obtenemos de los circuitos Inversores SN7404 conectados como osciladores.

6.2.- DIAGRAMA DE FLUJO DEL CONTROLADOR.

En la fig. 6.1 aparece el diagrama de flujo y en la fig. 6.2 los mapas de Karnaugh de las variables.

El reloj del sistema controlador es 5 veces más rápido que el que genera las señales de disparo de los tiristores.

Para implementar los mapas de Karnaugh usamos multiplexores.

En la fig. 6.3 aparece el circuito resultante de la implementación del diagrama de flujo y las ecuaciones obtenidas.

Para la determinación del número de divisiones usamos contadores binarios, conectados en cascada, con un período de reloj de 150 us, gobernado por la señal C del

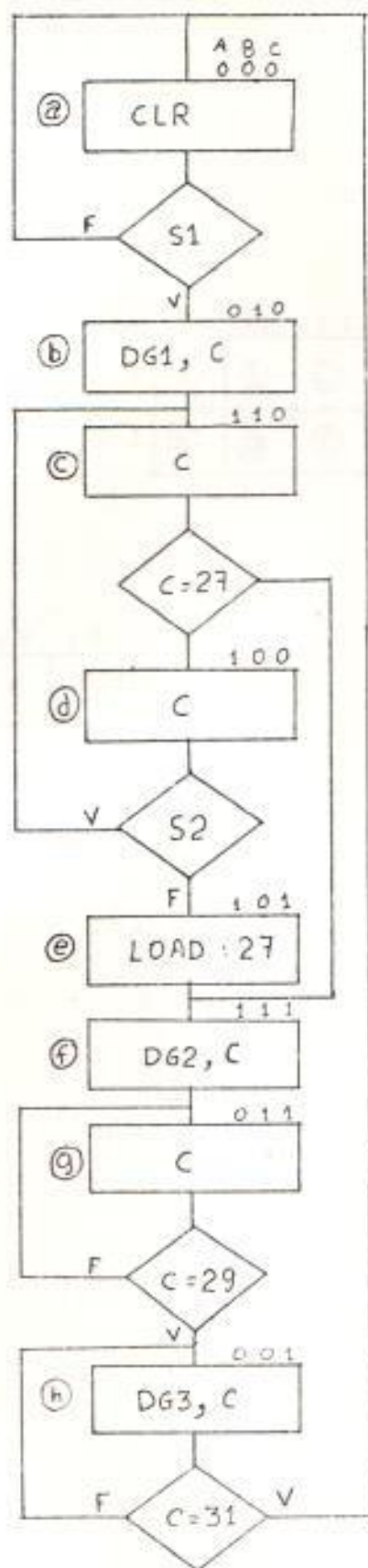


Fig. 6.1 Diagrama de Flujo.

		A B		00	01	11	10
		C	0	a	b	c	d
		C	1	h	g	f	e

		A B		00	01	11	10
		C	0	0	1	1	1
		C	1	0	0	0	1

		A B		00	01	11	10
		C	0	S1	1	C=27	S2
		C	1	0	$\overline{C=29}$	C1	1

		A B		00	01	11	10
		C	0	0	0	C=27	S2
		C	1	$\overline{C=31}$	1	1	1

DG1 = b

DG3 = h

DG2 = f

CLR = a

LOAD = e

$$C = b + c + d + f + g + h$$

Fig. 6.2 Mapas de Karnaugh de las Variables.

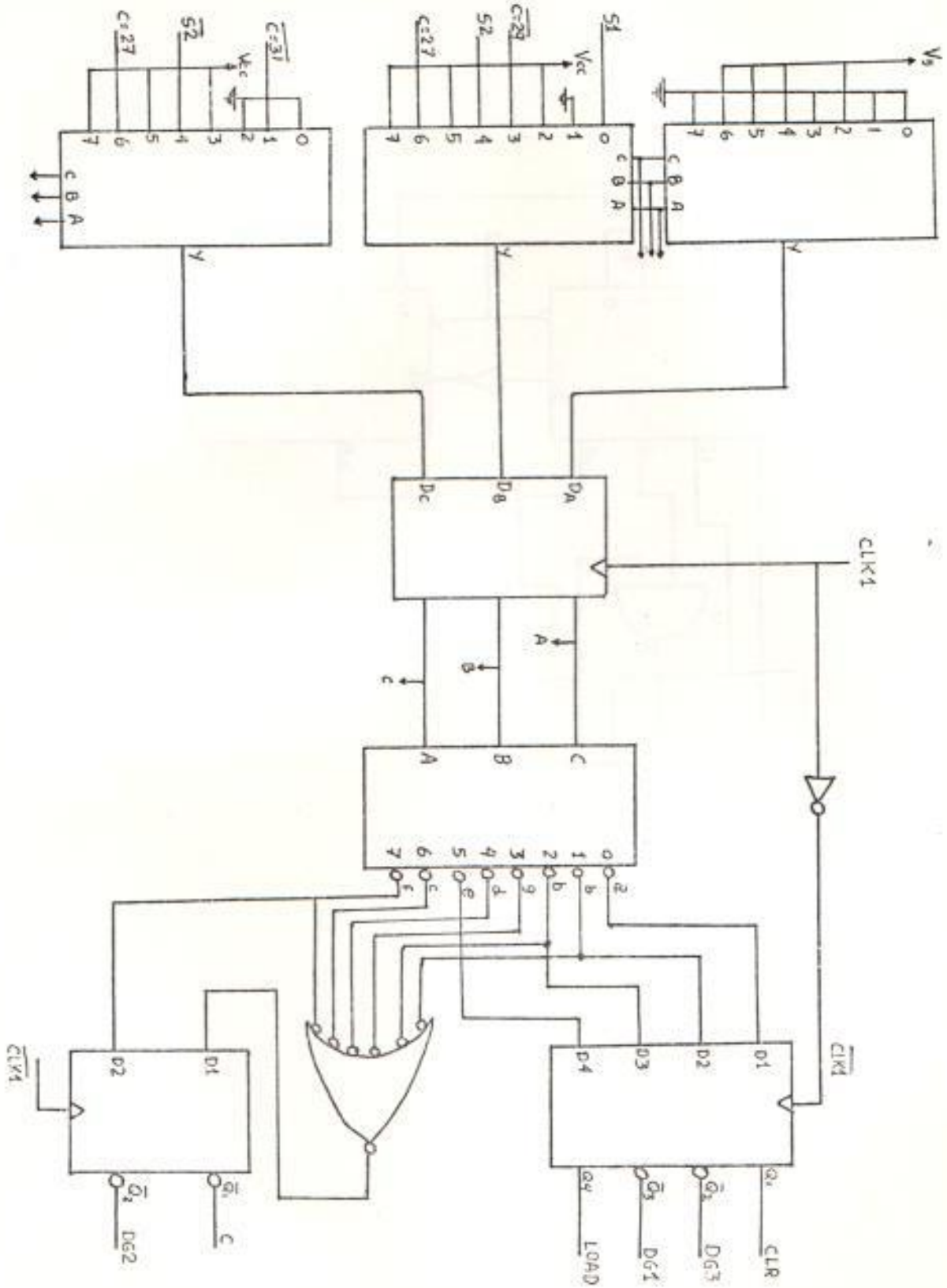


Fig. 6.3 Circuito del Controlador Digital.

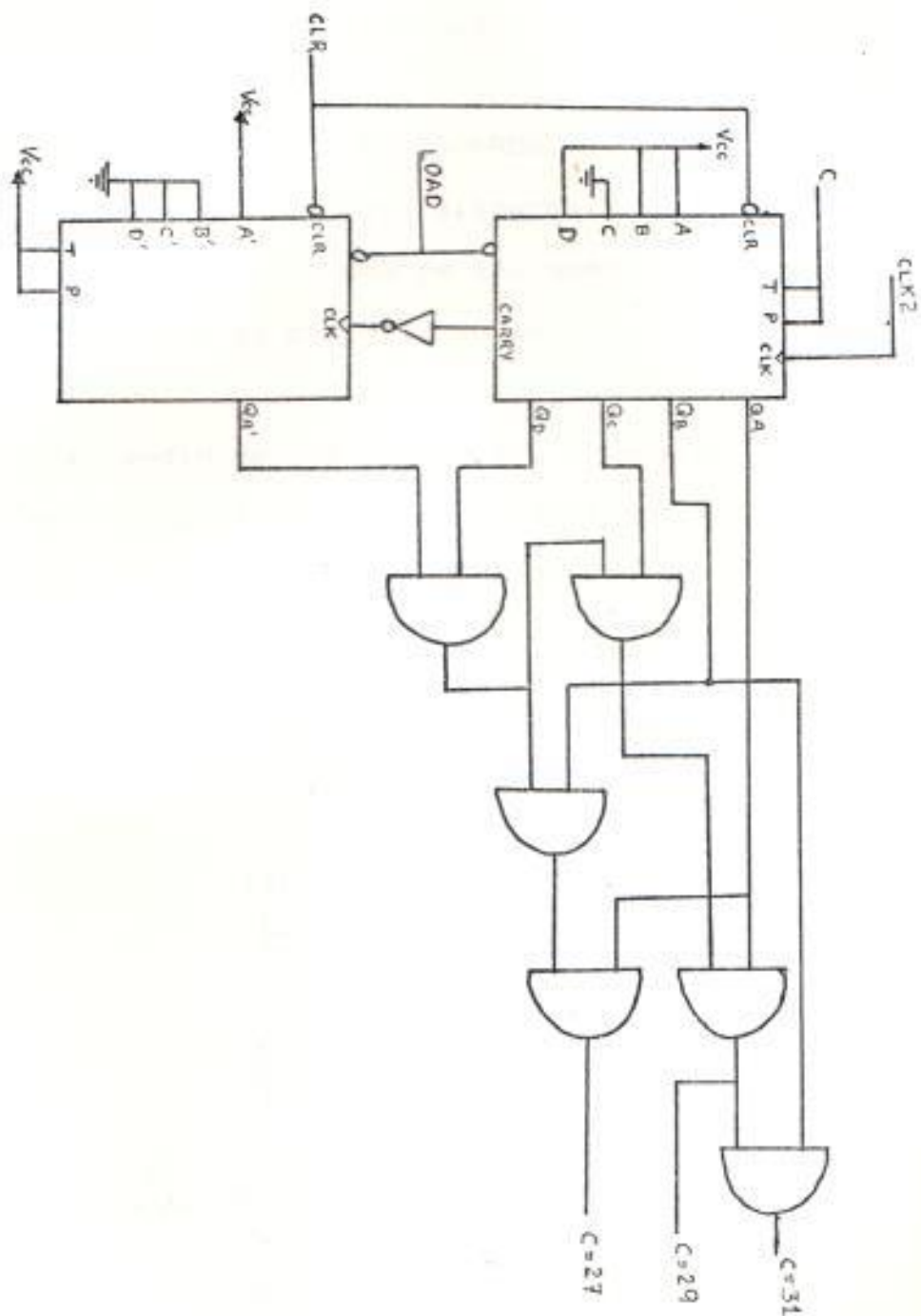


Fig. 6.4 Implementación de los Contadores.

diagrama de flujo.

La implementación hecha con los contadores y señales necesarias para el circuito de control aparecen en la fig. 6.4.

6.3.- SINCRONIZACION DE LOS DISPAROS.

Para sincronizar los disparos, usamos transformadores de pulsos a cada una de las puertas de los tiristores para aislar el circuito de control del circuito de fuerza.

Por medio de una puerta AND obtenemos los pulsos de disparo de los tiristores y lo enviamos al circuito amplificador y después al primario de los transformadores de pulsos. En la fig. 6.5 aparece el circuito para el disparo de un tiristor.

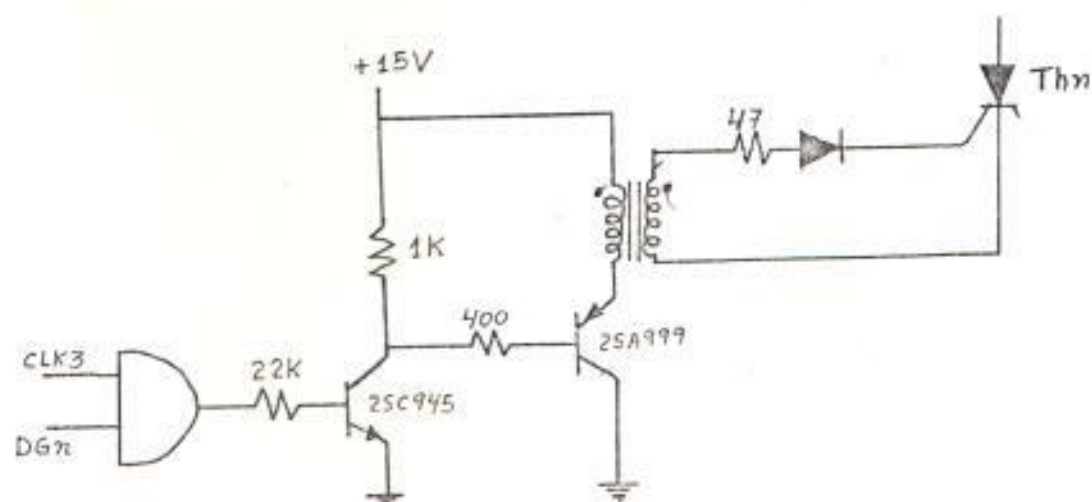


Fig. 6.5 Circuito de Disparo del Tiristor

El reloj CLK3 que aparece multiplicando a la señal de disparo es de una velocidad mucho más elevada (280KHz), por lo tanto el tiristor se enciende por tren de pulsos y no por pulso único de disparo.

CAPITULO VII

PRUEBAS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

7.1.- CONTROL DEL MOTOR D.C.

Una vez realizadas las pruebas con diferentes cargas resistiva-inductivas, y la simulación de realimentación, tanto de corriente como velocidad, iniciamos las pruebas con el motor y sensando sus condiciones de corriente y velocidad obtenemos los siguientes resultados.

7.1.1.- Realimentación de Corriente.

Variando la referencia de corriente y, observando la salida al variar la carga conectada al generador acoplado al motor, logramos los siguientes resultados:

TABLA II

VALORES DE CORRIENTES OBTENIDOS

$I_{ref}(V)$	$I_o(A)$	$I_o/I_{ref}(\%)$
2.0	1.9	95
2.5	2.6	104
3.5	3.4	97
4.0	4.1	102
4.5	4.6	102
5.0	5.0	100

Es decir, haciendo un promedio del porcentaje de error, logramos un control efectivo del 97.3% de la corriente de salida.

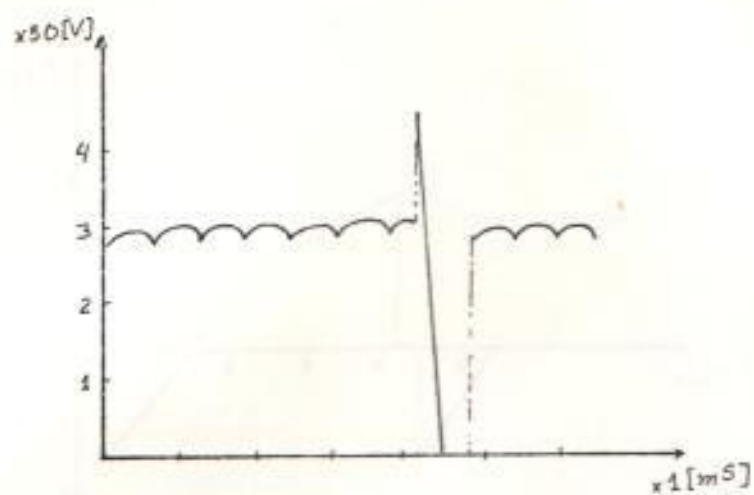


Fig. 7.1a Voltaje de Salida del Troceador

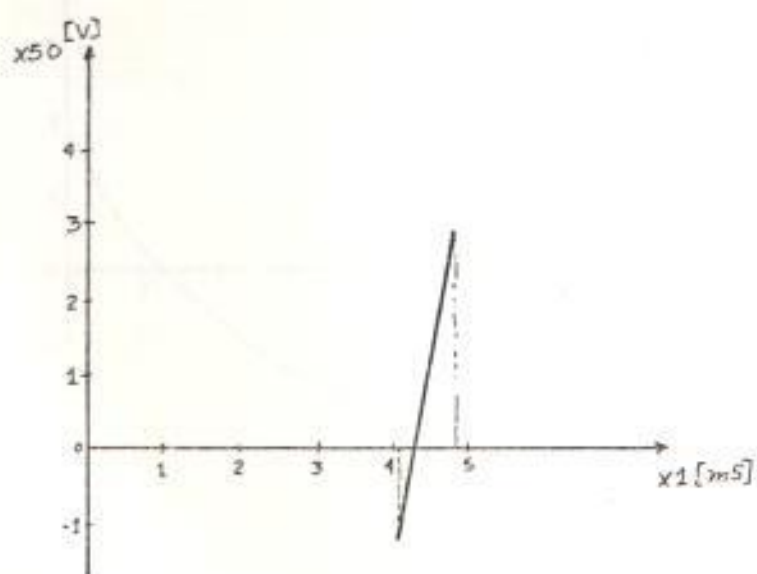


Fig. 7.1b Voltaje del Tiristor #1

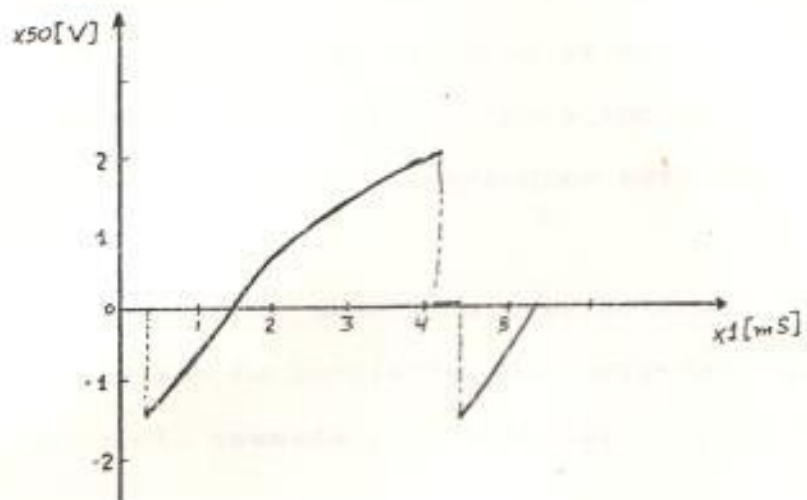


Fig. 7.1c Voltaje del Tiristor #2

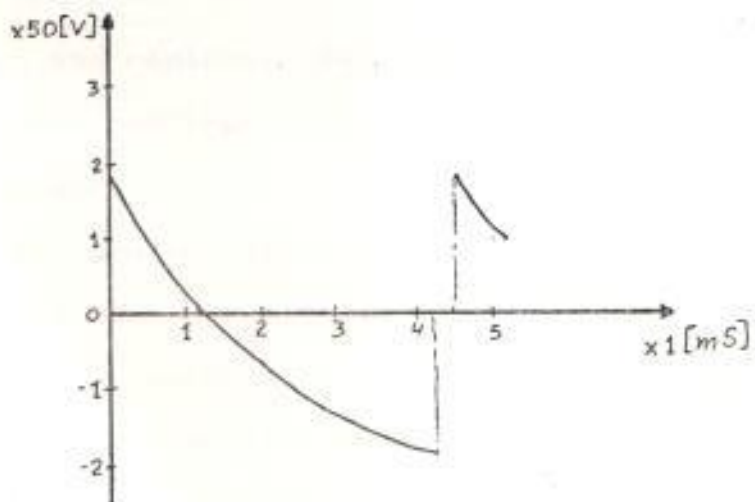


Fig. 7.1d Voltaje del Tiristor #3

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1.- El problema más difícil de resolver fué el de la sincronización de los disparos ya que se necesitaba un valor preciso de inductancia para lograr que el troceador trabaje adecuadamente, lográndose esto después de varias pruebas.

2.- De los datos obtenidos, se determina que para la realimentación de corriente, el porcentaje de error entre la corriente deseada y la obtenida varía entre + 4 a - 5%.

3.- Para la realimentación de velocidad, el porcentaje estuvo entre + 2 a - 2%.

4.- Se observa, después de las pruebas, que el troceador es confiable pues no depende de la carga aplicada.

a.- Se puede mejorar el circuito de fuerza usando tiristores más rápidos, es decir, con tiempo de encendido y apagados mínimos obteniendo un control más eficaz del troceador.

b.- Se podría dar un mejor resultado disminuyendo el período del circuito de control se podría mejorar dividiendo el período oscilante para lograr que el troceador trabaje a mayor frecuencia.

c.- El circuito de control se podría mejorar dividiendo el período del troceador en más intervalos como por ejemplo 64 ó 128, obteniendo un mejor control del voltaje de salida.

d.- También se podría incluir convertidores A/D para las realimentaciones de corriente y velocidad y compararlas con las de referencia.

BIBLIOGRAFIA

1. Henri Lilen, TIRISTORES Y TRIACS (Barcelona: MARCOMBO S.A., 1981).
2. M. Kaufman y A. Seidman, MANUAL PARA INGENIEROS Y TECNICOS EN ELECTRONICA (México: McGRAW-HILL de MEXICO S.A., 1982).
3. S.B. Dewan and A. Straughen, POWER SEMICONDUCTOR CIRCUITS (U.S.A.: WILEY-INTERSCIENCE, 1975).
4. R. Boylestad and L. Nashelsky, ELECTRONIC DEVICES AND CIRCUIT THEORY (third edición; New Jersey: PRENTICE-HALL, INC., 1982).
5. W. Wayt & J. Kemmerly, ANALISIS DE CIRCUITOS EN INGENIERIA, (México: Mc. Graw-Hill de México S. A., 1975).
6. " Circuitos Chopper Básicos con Tiristores ", REVISIA MINIWATT, Vol. 11, No. 1.
7. Willian McMurray, " Thyristor Conmutation in DC Choppers-A Comparative Study ", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APLICATIONS, Vol. IA-14, No. 6, Nov./Dec. 1978.