

T
621.381528
CEV
e.2



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACION



PROYECTO DE GRADUACION:

**“DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN EQUIPO
DIDACTICO PARA EL ESTUDIO DE
RECTIFICADORES CONTROLADOS”**

PREVIO A LA OBTENCION DEL TITULO DE
INGENIERO EN ELECTRICIDAD
ESPECIALIZACION INDUSTRIAL

PRESENTADO POR:

YIMMY CEVALLOS PICO

JOSE ERAS LOPEZ

WLADIMIR DEL ROSARIO ALVARADO

BORIS GARCIA RIOS



GUAYAQUIL - ECUADOR



D-26743

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer en primer lugar a Dios, luego a mis padres por ser las personas que siempre me han sabido guiar por el sendero del saber y al mismo tiempo quiero dejar constancia de mi profundo agradecimiento a mis profesores por sus sabias enseñanzas que día a día nos imparten para nuestro desarrollo intelectual no solo a nivel académico sino también a nivel social, por fomentarme sabios consejos para hacer de mí un ejemplo para los futuros Ingenieros y útil ante la sociedad.



DEDICATORIA

Con mucho amor dedico este trabajo a las personas más importantes en el desarrollo y cultivo de mi persona, son las responsables constante de todo lo bueno que han sabido brindarme a lo largo de mi vida, los mismos que con abnegación y esfuerzo han hecho de mí y de mis hermanos personas de buenos principios y de una excelente formación moral.

A mis queridos Padres y hermanos que con su comprensión y Amor constituyen una invaluable alegría para mantener la felicidad y armonía en nuestro hogar.

DECLARACION EXPRESA

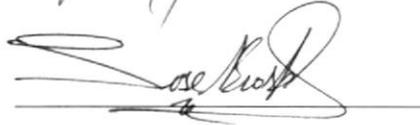
La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis, nos corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA POLITECNICA DEL LITORAL".

Nombre y firmas de los autores :

Yimmy Cevallos Pico.



José Eras López .



Boris García Rios .



Wladimir Del Rosario.



JURADO EXAMINADOR



ING. CARLOS MONSALVE

Sub-Decano de la Facultad de
Ingeniería en Electricidad y Computación



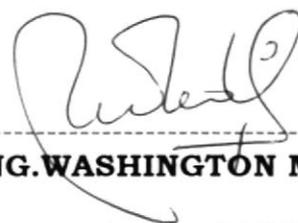
ING. NORMAN CHOOTONG

Director de Tópico



ING. ALBERTO MANZUR

Miembro del Tribunal



ING. WASHINGTON MEDINA

Miembro del Tribunal

GUAYAQUIL - ECUADOR

RESUMEN

Vamos a hablar del miembro más importante de la familia de los tiristores, es el tiristor de tres terminales conocido también como el **rectificador de silicio o SCR**.

Tal como su nombre lo sugiere, el SCR es un rectificador controlado de silicio. Su característica voltaje-corriente, con la compuerta de entrada en circuito abierto, es la misma que la de un diodo de cuatro capas (PNPN).

Lo que hace al SCR especialmente útil para el control de motores en sus aplicaciones es que el voltaje de ruptura o de encendido puede ajustarse por medio de una corriente que fluye hacia su compuerta de entrada. Cuanto mayor sea la corriente de la compuerta, tanto menor se vuelve VBO(voltaje de ruptura). Si se escoge un SCR de tal manera que su voltaje de ruptura, sin señal de compuerta, sea mayor que el voltaje en el circuito, entonces, solamente puede activarse mediante la aplicación de una corriente a la compuerta. Una vez activado, el dispositivo permanece así hasta que su corriente de compuerta caiga por debajo de la corriente de sostenimiento (IH). Además una vez que se dispare SCR, su corriente de compuerta puede retirarse, sin que afecte su estado activo. En este estado, la caída de voltaje directo a

través del SCR es cerca de 1.2 a 1.5 veces que la caída de voltaje a través de un diodo directo-oblicuo común.

Los tiristores de tres terminales o SCR, sin lugar a dudas, son los dispositivos de uso más común en los circuitos de control de potencia. Se utilizan ampliamente para cambiar o rectificar voltajes. Entre sus principales ventajas se tiene: menor costo de los elementos utilizados para control; rápida respuesta del sistema; alta confiabilidad y variedad de técnicas de control, etc.

El proyecto realizado es reconstruir y modernizar un equipo que se utiliza en el Laboratorio de Electrónica de Potencia de la ESPOL presentando facilidades para que los estudiantes puedan realizar estudios referentes a la aplicación de tiristores para el control de motores y poder sacar nuestras propias experiencias, conclusiones y solucionar problemas de falta de equipo de laboratorio.

Nuestro equipo está formado por un conjunto de integrados que proveen al sistema de un buen funcionamiento, alta confiabilidad y facilidad de uso, los amplificadores operacionales dan gran flexibilidad de control, con una alta impedancia de entrada que los dispone para señales que provienen de los transductores, posee resistencias, transistores, capacitores, y una unidad de disparo analógica compuesta de seis circuitos de disparo y seis tiristores la cual tiene sus circuitos de protección para cada tiristor.

INDICE GENERAL

	Página
RESUMEN	VI
INDICE GENERAL	VIII
INDICE DE ABREVIATURAS	XII
I TIRISTOR	15
1.1 Introducción.	15
1.2 Operación básica del rectificador de silicio (SCR)	17
1.3 Rectificadores trifásicos completos.	18
1.4 Diseño del convertidor de tiristores.	23
1.4.1 Rectificadores de media onda	23
1.4.2 Rectificadores de onda completa	24
1.5 Configuración monofásica.	24
1.5.1 El circuito rectificador monofásico de media onda.	24
1.5.2 Circuito de rectificación monofásica de onda completa	26
1.6 Configuración trifásica.	28
1.6.1 Rectificador trifásico de media onda.	28
1.6.2 Rectificador trifásico de onda completa	31
1.7 Requerimientos del convertidor	33
1.7.1 Especificaciones de carga	33
1.7.2 Aspectos de la alimentación	33
1.8 Circuitos de protección de los tiristores	34
1.8.1 Protección contra dv/dt , di/dt .	34
1.8.2 Protección contra sobre corriente y sobre voltaje.	35
1.8.3 Selección de los tiristores.	35
II CONTROL DE UN MOTOR DC	37
2.1 Control de velocidad de un motor DC.	37
2.1.1 Variando la carga.	37
2.1.2 Variando el flujo de carga.	37
2.1.3 Variando el voltaje de alimentación de la armadura.	37
2.2 Control de velocidad por armadura.	38
2.2.1 Potenciómetros en serie.	38

2.2.2	Rectificación monofásica.	38
2.2.3	Rectificación trifásica.	38
2.3	Realimentación.	39
2.3.1	Realimentación de velocidad.	39
2.3.2	Realimentación de corriente.	40
2.4	Tipos de controladores.	41
2.4.1	Controlador de corriente.	41
2.4.2	Controlador de voltaje.	48
III	UNIDAD DE DISPARO O CONTROL	51
3.1	Introducción.	51
3.2	Funcionamiento.	54
3.2.1	Generador de onda cuadrada.	54
3.2.2	Generador rampa.	57
3.2.3	Comparador y generador de pulsos.	59
3.2.4	Sincronización de los pulsos de disparo (puente trifásico).	61
3.2.5	Amplificador de pulsos.	63
IV	FUENTES REGULADAS DE VOLTAJE DC NECESARIAS PARA LA POLARIZACION	
4.1	Requerimientos para el diseño	65
V	CONSTRUCCION DEL EQUIPO	66
5.1	Lista de materiales.	66
5.2	Diseño de los circuitos impresos.	69
5.2.1	Circuito impreso de los disparadores de tiristores.	69
5.2.2	Circuito impreso de las fuentes de polarización.	70
VI	PRUEBAS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES	71
6.1	Control del motor DC.	71
6.1.1	Lazo abierto.	71
6.2	Rectificador monofásico de media onda.	73
6.2.1	Carga resistiva ($R= 149 \text{ ohm}$)	74
6.2.1.a	Angulo de disparo ($\alpha= 0^\circ$)	74
6.2.1.b	Angulo de disparo ($\alpha= 45^\circ$)	75
6.2.1.c	Angulo de disparo ($\alpha= 90^\circ$)	76
6.2.2	Carga resistiva e inductiva ($Z= 149 \text{ ohm}$)	77
6.2.2.a	Angulo de disparo ($\alpha= 0^\circ$)	77
6.2.2.b	Angulo de disparo ($\alpha= 45^\circ$)	78

6.2.3	Carga inductiva ($Z=139$ ohm)	79
6.2.3.a	Angulo de disparo ($\alpha= 45^\circ$)	79
6.3	Rectificador monofásico de onda completa, semicontrolado.	80
6.4	Rectificador monofásico de onda completa, control completo.	80
6.4.1	Carga resistiva ($r=149$ ohm)	81
6.4.1.a	Angulo de disparo ($\alpha= 0^\circ$)	81
6.4.1.b	Angulo de disparo ($\alpha= 45^\circ$)	82
6.4.1.c	Angulo de disparo ($\alpha= 90^\circ$)	83
6.4.2	Carga resistiva e inductiva ($RL= 149$ ohm)	84
6.4.2.a	Angulo de disparo ($\alpha= 0^\circ$)	84
6.4.2.b	Angulo de disparo ($\alpha= 45^\circ$)	85
6.4.2.c	Angulo de disparo ($\alpha= 90^\circ$)	86
6.5	Rectificador trifásico de media onda.	87
6.5.1	Carga resistiva ($R=149$ ohm)	88
6.5.1.a	Angulo de disparo ($\alpha= 0^\circ$)	88
6.5.1.b	Angulo de disparo ($\alpha= 45^\circ$)	89
6.5.1.c	Angulo de disparo ($\alpha= 90^\circ$)	90
6.5.2	Carga resistiva e inductiva ($RL = 149$ ohm).	91
6.5.2.a	Angulo de disparo ($\alpha= 0^\circ$)	91
6.5.2.b	Angulo de disparo ($\alpha= 45^\circ$)	92
6.5.2.c	Angulo de disparo ($\alpha= 90^\circ$)	93
6.6	Rectificador trifásico de onda completa semicontrolado.	94
6.6.1	Carga resistiva ($R=149$ ohm).	94
6.6.1.a	Angulo de disparo ($\alpha= 0^\circ$).	94
6.6.1.b	Angulo de disparo ($\alpha= 45^\circ$).	95
6.6.1.c	Angulo de disparo ($\alpha= 90^\circ$).	96
6.7	Rectificador trifásico de onda completa, control completo.	97
6.7.1	Carga resistiva ($R= 149$ ohm).	98
6.7.1.a	Angulo de disparo ($\alpha= 0^\circ$)	98
6.7.1.b	Angulo de disparo ($\alpha= 90^\circ$)	99
6.7.1.c	Angulo de disparo ($\alpha= 120^\circ$)	100
6.7.2	Carga : Motor DC	101
6.7.2.a	Angulo de disparo ($\alpha= 0^\circ$)	101
6.7.2.b	Angulo de disparo ($\alpha= 90^\circ$)	102
6.7.2.c	Angulo de disparo ($\alpha= 0^\circ$), i) salida del puente trifásico, ii) caída de tensión en el tiristor 1.	103
6.7.2.d	Angulo de disparo ($\alpha= 60^\circ$), i) salida del puente trifásico,ii) caída de tensión en el tiristor 1.	
6.7.3	Controlador de corriente	105
6.7.3.a	$K_i= 1.13$, i) referencia de corriente, ii) corriente de armadura.	105
6.7.3.b	$K_i= 1.13$, i) referencia de corriente, ii) corriente de armadura, iii) voltaje de armadura.	106

6.7.3.c	Ki= 3.54 , i) referencia de corriente, ii) corriente de armadura.	107
6.7.3.d	Ki= 0.43 , i) referencia de corriente, ii) corriente de armadura.	108
6.8	Conclusiones y recomendaciones	109

ANEXOS

- I Manual para el usuario.
- II Procedimiento para mantenimiento y reparación de averías en el equipo diseñado.
- III Características de los integrados.
- IV Bibliografía.

INDICE DE ABREVIATURAS

- A:** Ganancia normalizada del amplificador de tiristores.
- Ao, a1, a3, a4, a5:** Constantes para el arreglo de Routh-Hurwitz.
- B:** Constante de fricción viscosa normalizada.
- C:** Capacitor.
- F(s):** Función de transferencia de lazo cerrado.
- G(s):** Función de transferencia de lazo abierto.
- H(s):** Función de transferencia de realimentación.
- Hi:** Ganancia normalizada del transductor de corriente.
- Hy :** Ganancia normalizada del transductor de voltaje.
- Hw:** Ganancia normalizada del transductor de velocidad
- ia:** Corriente de armadura del motor.
- La(s):** Transformada de Laplace de la corriente normalizada.
- Ier:** Corriente de armadura en estado de reposo.
- J:** Momento de inercia del motor con carga.
- Ki:** Ganancia del controlador de corriente.
- K', ki':** Constante para la función de transferencia del lazo de corriente.
- Kb:** Constante de fuerza contraelectromotriz.
- Kt:** Constante de torque.
- Kw:** Ganancia del controlador de velocidad.
- La:** Inductancia de armadura.
- Mi:** Torque desarrollado por el motor.
- M1:** Torque de la carga.
- Mer:** Torque de estado de reposo.
- M1(s):** Transformada de Laplace del torque de la carga normalizada.
- PI:** Proporcional e integral.
- R:** Resistencia.
- Ra:** Resistencia de armadura.
- s:** Variable de Laplace.
- t:** Tiempo.
- tr:** Tiempo de subida
- ts:** Tiempo de estabilización.
- Ta:** Constante de tiempo de retardo del amplificador de tiristores.
- Tci:** Constante de tiempo del controlador de corriente.



T_{cw}:	Constante de tiempo del controlador de velocidad.
T_e:	Constante de tiempo eléctrico.
T_{eq}:	Constante de tiempo equivalente del lazo de corriente.
T_f:	Constante de tiempo del filtro.
T_m:	Constante de tiempo mecánico.
T_x, T_y, T_z:	Constantes para la función de transferencia de corriente.
V_a:	Voltaje de armadura
V_{ci}:	Voltaje de salida del controlador de corriente.
V_{cm}:	Voltaje de control máximo.
V_{cw}:	Voltaje de salida del controlador de velocidad.
V_i:	Voltaje de salida del traductor de corriente.
V_w:	Voltaje de salida del traductor de velocidad.
V_{dc}:	Voltaje continuo.
V₁:	Voltaje en la carga.
V_{max}:	Voltaje máximo.
V_n:	Voltaje de armadura nominal.
V_{refi}:	Voltaje de referencia de corriente.
V_{refv}:	Voltaje de referencia de voltaje.
V_{refw}:	Voltaje de referencia de velocidad.
V_s:	Voltaje en el secundario.
V_t:	Voltaje en el tiristor.
V_w:	Voltaje a la salida del filtro.
V_a(s):	Transformada de Laplace del voltaje de armadura normalizado.
V_{ci}(s):	Transformada de Laplace del voltaje de salida de controlador de corriente normal.
V_{cw}(s):	Transformada de Laplace del voltaje de salida del controlador de velocidad normalizado.
V_{ri}(s):	Transformada de Laplace del voltaje de referencia de corriente normalizada.
V_{rv}(s):	Transformada de Laplace del voltaje de referencia de voltaje normalizado.
V_{rw}(s):	Transformada de Laplace del voltaje de referencia de velocidad normalizado.
w:	Velocidad del motor.
W_o:	Velocidad del motor sin carga.
W_n:	Frecuencia natural del sistema.

W(s): transformada de Laplace de la velocidad normalizada.
: Angulo de disparo.
: Transformada de laplace.
: razón de amortiguamiento

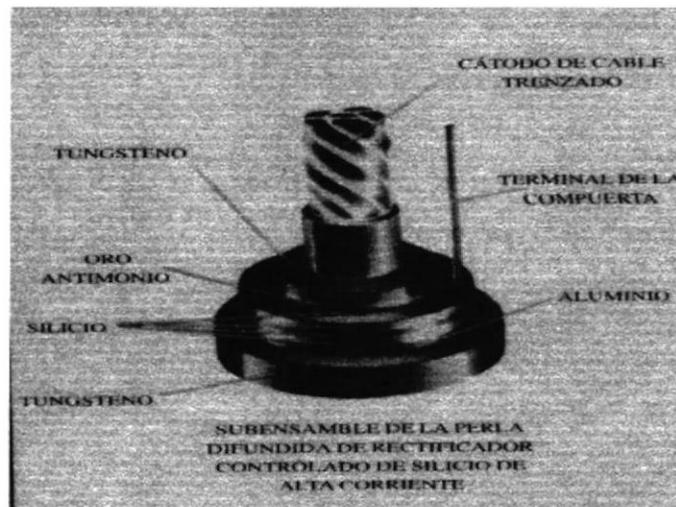


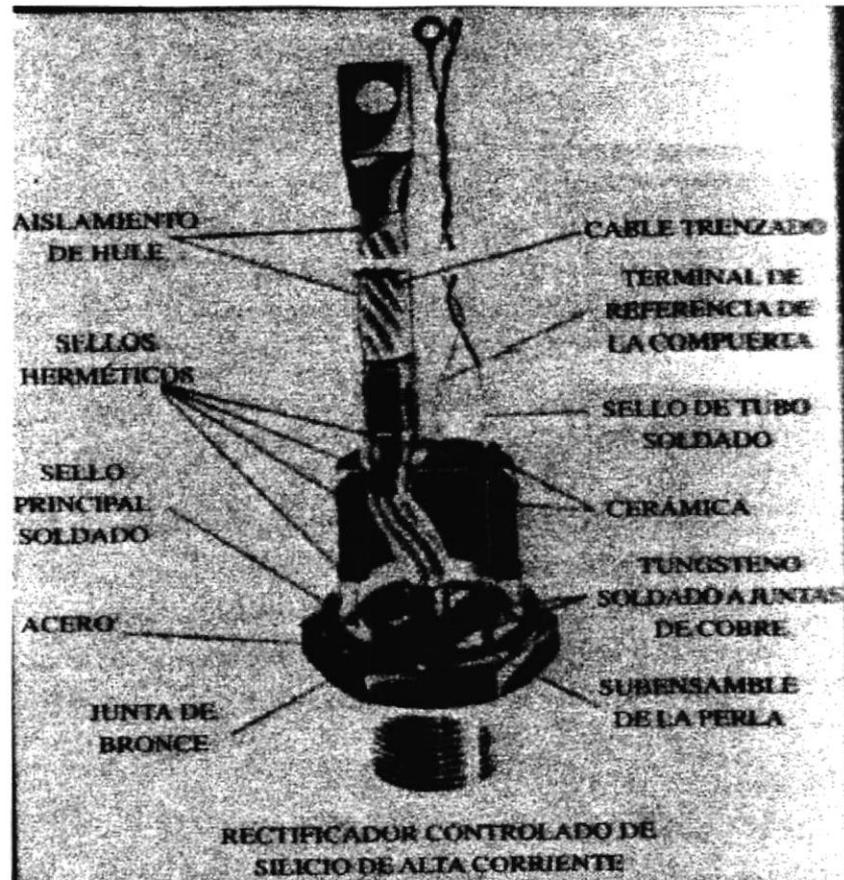
CAPITULO I

Tiristor

1.1) INTRODUCCION

La palabra tiristor viene del griego que significa *puerta*, puesto que se comporta como una puerta que se abre y permite el paso através de ella. Para comenzar, podemos pensar que el tiristor es un nuevo tipo de interruptor. Este diodo es un semiconductor de dos capas que ha llevado a dispositivos de tres, cuatro y hasta cinco capas. Se tratará primero de la familia de los dispositivos de cuatro capas pnpn: SCR(rectificador controlado de silicio). Estos dispositivos de cuatro



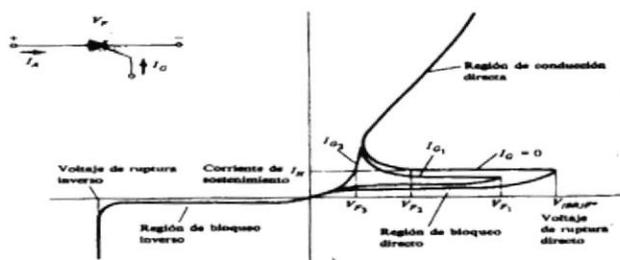


capas que poseen un mecanismo frecuentemente al SCR (rectificador controlado de silicio).

1.2) OPERACIÓN BÁSICA DEL RECTIFICADOR CONTROLADO DE SILICIO (SCR O TIRISTOR).

Como su nombre lo indica, el SCR es un rectificador construido con material de silicio con una tercera para efectos de control. Se escogió el silicio debido a que sus capacidades de alta temperatura y potencia. La operación básica del SCR es diferente que la del diodo semiconductor de dos capas fundamentele, es que una tercera terminal, llamada compuerta, determinada cuando el rectificador comnuta del estado del circuito abierto al de circuito cerrado. No es suficiente sólo la polarización directa del ánodo al cátodo del dispositivo. En la región de conducción la resistencia dinámica del SCR es típicamente de 0.001 a 0,1 ohmio . La resistencia inversa es típicamente de 100 K o más.

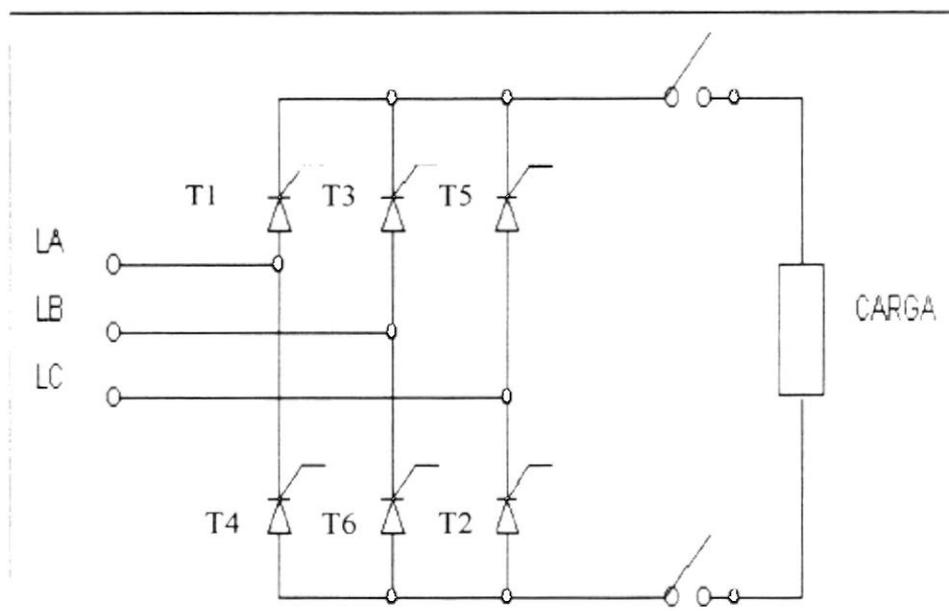
El símbolo gráfico para el SCR junto con las conexiones correspondientes a la estructura de semiconductor de cuatro capas es como se indica. Si se va a establecer la conducción directa, el ánodo debe ser positivo respecto al cátodo. Sin embargo, esto no es



suficiente para encender el dispositivo. También se debe aplicar un pulso de magnitud suficientemente grande a la compuerta para establecer una corriente de encendido de compuerta, representada simbólicamente por I_{gt}

1.3) RECTIFICADORES TRIFASICOS COMPLETOS

Los rectificadores trifásicos se utilizan ampliamente en las industrias hasta el nivel de 220 Kw, en las que se requiere de una operación en dos cuadrantes. Los tiristores se disparan a intervalos de $\pi/3$. La frecuencia de voltaje de la componente ondulatoria de salida es $6f_x$, siendo la necesidad de filtraje menor que la de los convertidores trifásico de semi y media onda. En $\omega t = \pi/6 + \alpha$, el tiristor T6 ya conduce y el tiristor T1 se activa. Durante el intervalo $(\pi/6 + \alpha) \leq \omega t \leq (\pi/2 + \alpha)$ conducen los tiristores T1 y T6 y a través de la carga aparece el voltaje línea a línea $V_{ab} = (V_{an} - V_{bn})$. En $\omega t = \pi/2 + \alpha$, el tiristor T2 se dispara y el tiristor T6 de inmediato invierte su polaridad, T6 se desactiva debido a la conmutación natural. Durante el intervalo $(\pi/2 + \alpha) \leq \omega t \leq (5\pi/6 + \alpha)$, los tiristores T1 y T2 conducen y el voltaje de línea a línea V_{ca} aparece a través de la carga. Si los tiristores se enumeran como en el gráfico mostrado a continuación, la secuencia de disparo es 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6 y 6-1.



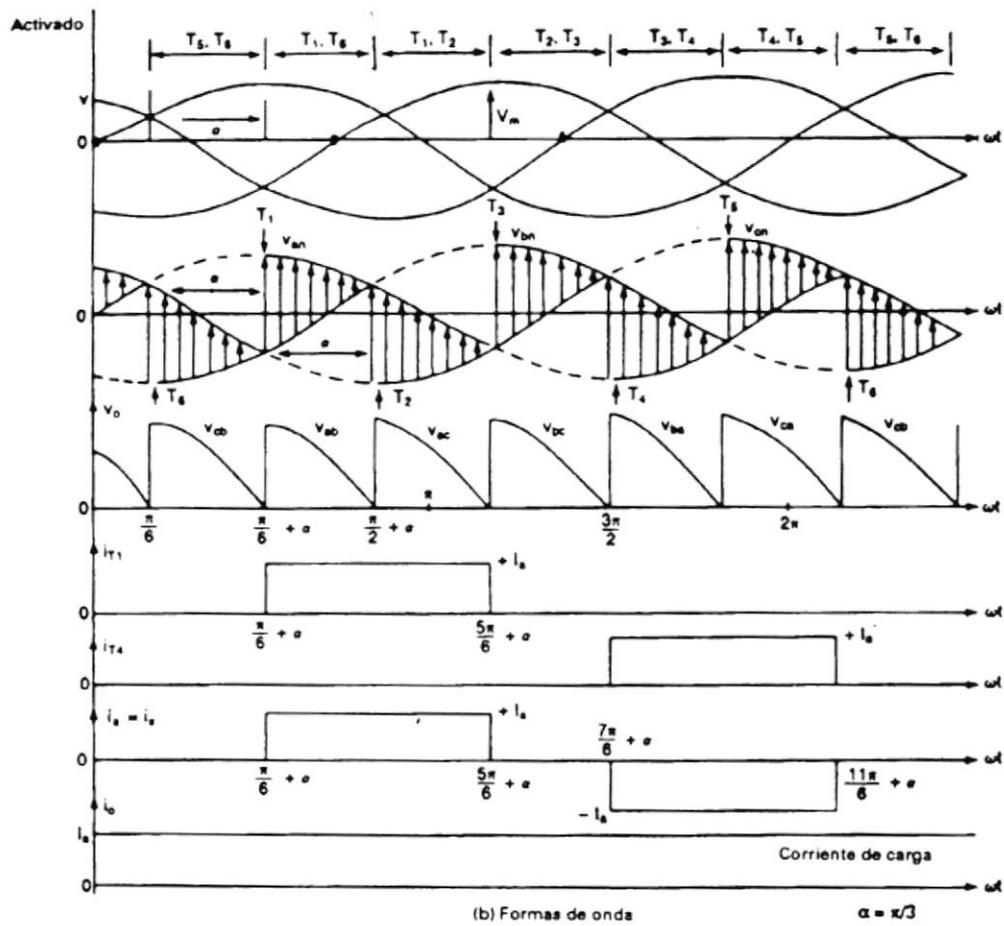


Figura 5-10 Convertidor trifásico completo.

Si los voltajes de línea a neutro se definen como

$$V_{an} = V_m \text{ sen } \omega t$$

$$V_{bn} = V_m \text{ sen } (\omega t - 5\pi/6)$$

$$V_{cn} = V_m \text{ sen } (\omega t + 2\pi/3)$$

Los voltajes de línea a línea son los siguientes

$$V_{ab} = V_{an} - V_{bn} = \sqrt{3} V_m \text{ sen } (\omega t + \pi/6)$$

$$V_{bc} = V_{bn} - V_{cn} = \sqrt{3} V_m \text{ sen } (\omega t - \pi/2)$$

$$V_{ca} = V_{cn} - V_{an} = \sqrt{3} V_m \sin(\omega t + \pi/2)$$

El voltaje medio de partida se determina a partir de

$$V_{cd} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_{ab} d(\omega t) = \left. \begin{array}{l} \beta = \alpha + 2\pi/3 \\ \alpha + \pi/3 \end{array} \right\}$$

$$V_o = \frac{3}{\pi} \int_{\pi/6 + \alpha}^{\pi/2 + \alpha} V_{ab} d(\omega t) =$$

$$V_o = \frac{3}{\pi} \int_{\pi/6 + \alpha}^{\pi/2 + \alpha} V_{ab} d(\omega t) =$$

El máximo voltaje promedio de salida, para el ángulo de retraso $\alpha = 0$ es

$$V_{dm} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m$$

Y el voltaje promedio de salida normalizado es

$$V_n = \frac{V_{cd}}{V_{dm}} (\cos \alpha)$$

El valor rms de voltaje de salida se determina a partir de

$$V_o = \left[\frac{3}{\pi} \int_{\pi/6 + \alpha}^{\pi/2 + \alpha} 3 V_m^2 \sin^2 (\omega t + \pi/6) d(\omega t) \right]^{1/2} =$$

$$V_o = \frac{\sqrt{3}}{2} V_m \left[\frac{1 + 3\sqrt{3} \cos \alpha}{4\pi} \right]^{1/2} =$$

Un puente trifásico origina un voltaje de salida de seis pulsos. Para aplicaciones de alta potencia, como la transmisión de alto voltaje y la propulsión de motores de cd, se requieren normalmente de una salida de 12 pulsos para reducir las componentes ondulatorias de salida y para aumentar la frecuencia de las mismas. Para producir una salida efectiva de 12 pulsos se puede combinar dos puentes de seis pulsos o en paralelo. Mediante la conexión de uno de los secundarios en estrella (Y) y el otro en delta(A) es posible obtener un desplazamiento de fase de 30° entre los embobinados secundarios.

❖ DISEÑO DEL CONVERTIDOR DE TIRISTORES

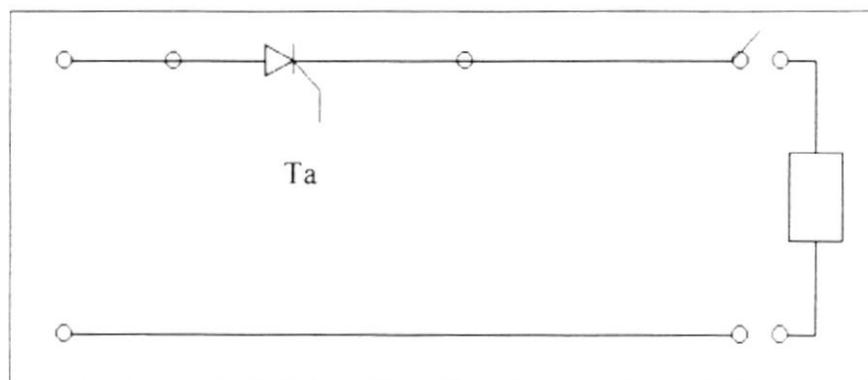
1.4) Características de conversión

Se dividen principalmente en dos grupos, denominados:

- ❑ rectificadores de media onda
- ❑ rectificadores de onda completa.

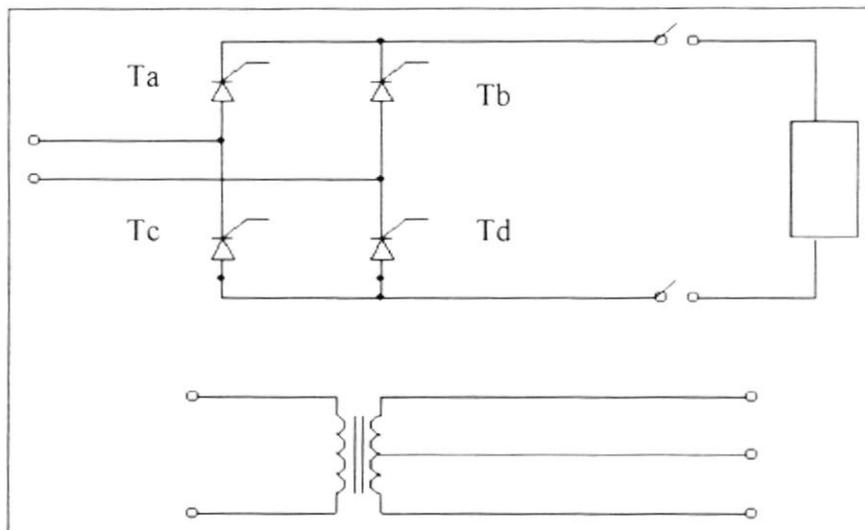
1.4.1) **Rectificadores de Media Onda**

Los rectificadores de media onda poseen un tiristor (T_a) que conduce el flujo de corriente en el medio ciclo positivo y lo detiene en el medio ciclo negativo.



1.4.2) Rectificador de Onda Completa

Los rectificadores de onda completa tienen 4 tiristores dos de los cuales (T_a, T_d) conducen en el ciclo positivo de entrada ca, mientras tanto que los otro dos (T_c, T_d) conducen en el ciclo negativo. El voltaje de salida de este circuito es más alisado que el voltaje de salida del rectificador de media onda



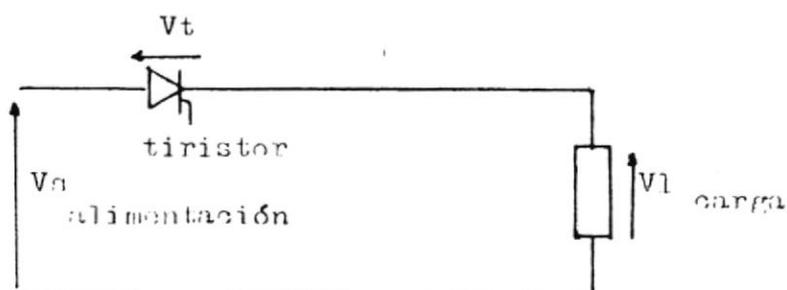
Configuración Monofásica.

1.5.1) El circuito rectificador monofasico de media onda.

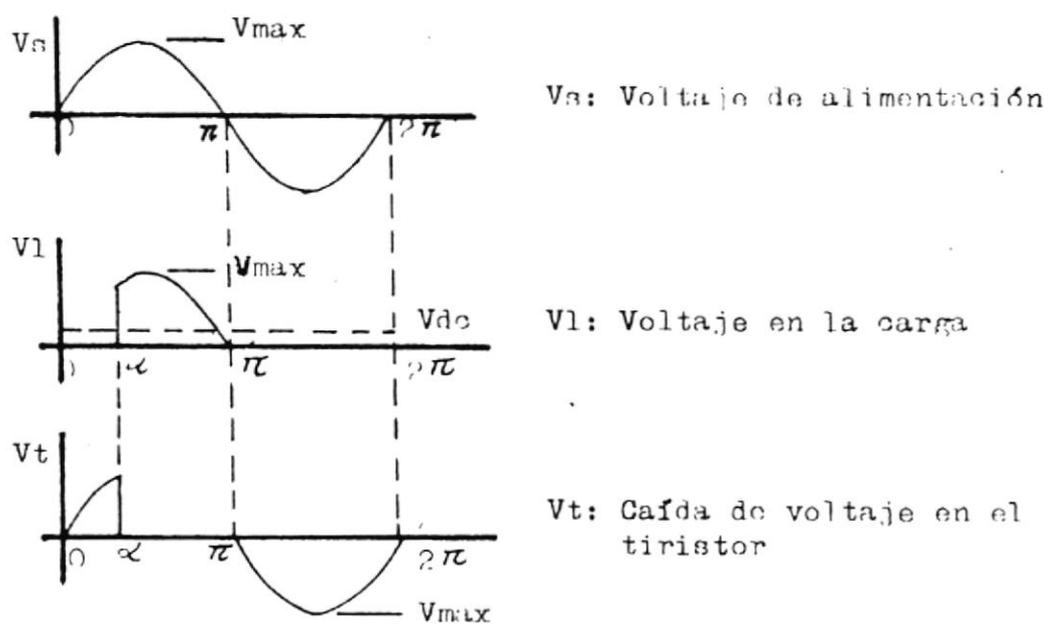
Se lo puede ver como muestra la figura de onda de voltaje en la carga y en el tiristor para ángulo de disparo comprende entre 0 y 90 grados.

La ecuación que da el voltaje de es:

$$V_{dc} = \frac{V_{max} (1 + \cos \alpha)}{2}$$



(a)



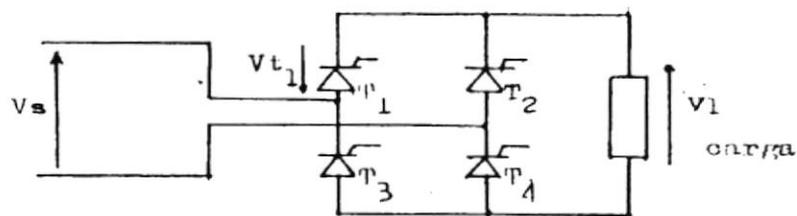
Rectificación monofásica de media onda.

a) Circuito rectificador.

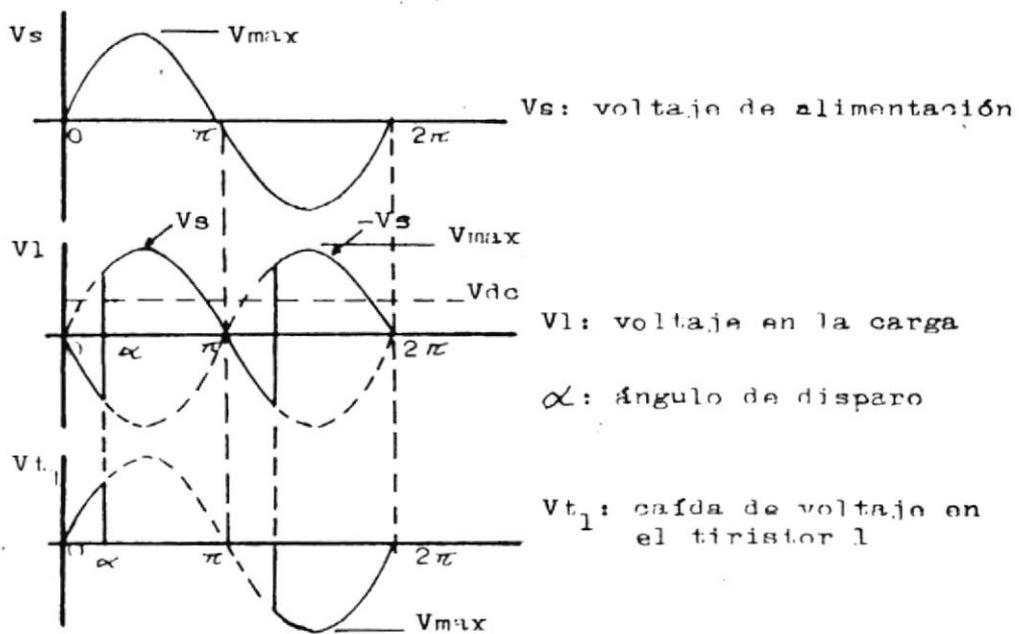
b) Angulo de disparo entre 0 y 180 grados.

1.5.2) Circuito de rectificación monofásica de onda completa.

Se utilizan cuatro tiristores para obtener control completo sobre el puente rectificador.



(a)



(b)

Rectificación monofásica de onda completa

a) Circuito rectificador

b) Angulo de disparo entre 0 y 180 grados.

En la figura 1.2.b se puede ver un circuito puente rectificador de onda completa que nos muestra las formas de onda de voltaje de alimentación, voltaje en la carga, y la caída de voltaje en el tiristores 1. En cada semionda conducen un par de tiristores, es decir, uno conduce en el camino de ida y el otro conduce en el camino de retorno. El tiristor tiene que soportar un voltaje de pico inverso igual al voltaje de pico máximo de alimentación. Se ha tomado como ejemplo un carga tipo resistiva-inductiva, de ahí el hecho de que el voltaje en la carga alcance un valor negativo, como efecto de la fem inducida en la parte inductiva de la carga.

La ecuación que da el voltaje DC en la carga es:

$$V_{dc} = \frac{2V_{max}}{\pi} \cos \alpha$$

Esta ecuación es para control completo. Si se utiliza un puente semicontrolado la ecuación es:

$$V_{dc} = \frac{2V_{max}}{\pi} (1 + \cos \alpha)$$

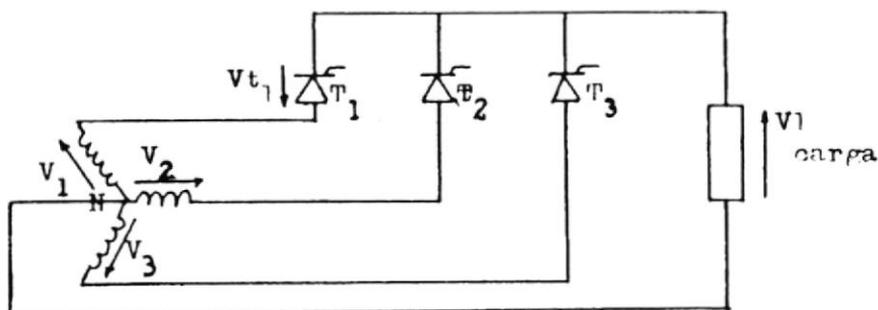
1.5) Configuración trifásica

Se muestra el circuito utilizando un puente trifásico de media onda.

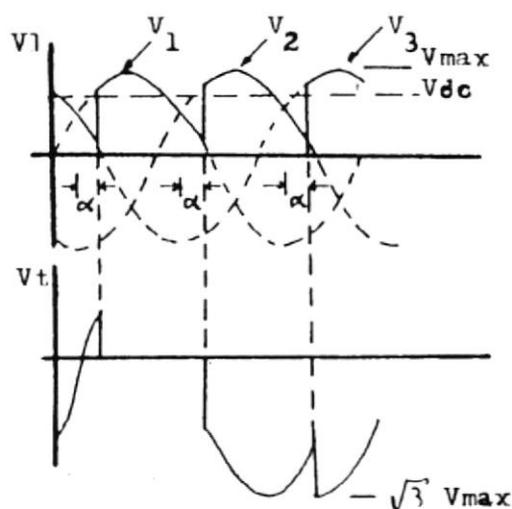
1.6.1) Rectificador trifásico de media onda

- ❑ Circuito rectificador
- ❑ Angulo de disparo entre 0 y 180 grados.

El efecto de tener 3 tiristores conectados en un punto común, es que en cualquier instante el tiristor conectado al voltaje mas alto conducirá y los otros dos tiristores serán de polarización negativa inversa. El voltaje de pico inverso en cada tiristor es $\sqrt{3}$ veces el voltaje DC pico máximo de línea a neutro de alimentación. Obsérvese que el voltaje de salida del rectificador es en todo momento, justamente, el más alto de los tres voltajes que entran también en todo momento.



(a)



V_1, V_2, V_3 : voltajes de línea a neutro de alimentación 3 ϕ

V_1 : voltaje en la carga

V_{t1} : caída de voltaje en el tiristor 1

Este voltaje de salida es más alisado que el del circuito puente rectificador de onda completa. El factor de rizado para un rectificador de esta naturaleza es de 18.3 %

En este caso se define el ángulo α de disparo como que es cero cuando el voltaje DC de salida tiene su máximo valor, esto es, como si se tuvieran solamente diodos. Así, el ángulo de disparo se lo toma en

relación al instante de conmutación natural y no desde el cero del voltaje de alimentación.

La ecuación que da el voltaje DC en este caso es:

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_{max} \cos \alpha$$

En la figura se muestra el arreglo para la configuración trifásica de onda completa, con seis elementos rectificadores en puente. Es en este tipo de configuración que se obtiene el mayor voltaje continuo, en relación a las configuraciones anteriores.



La ecuación que da el voltaje DC para control completo es:

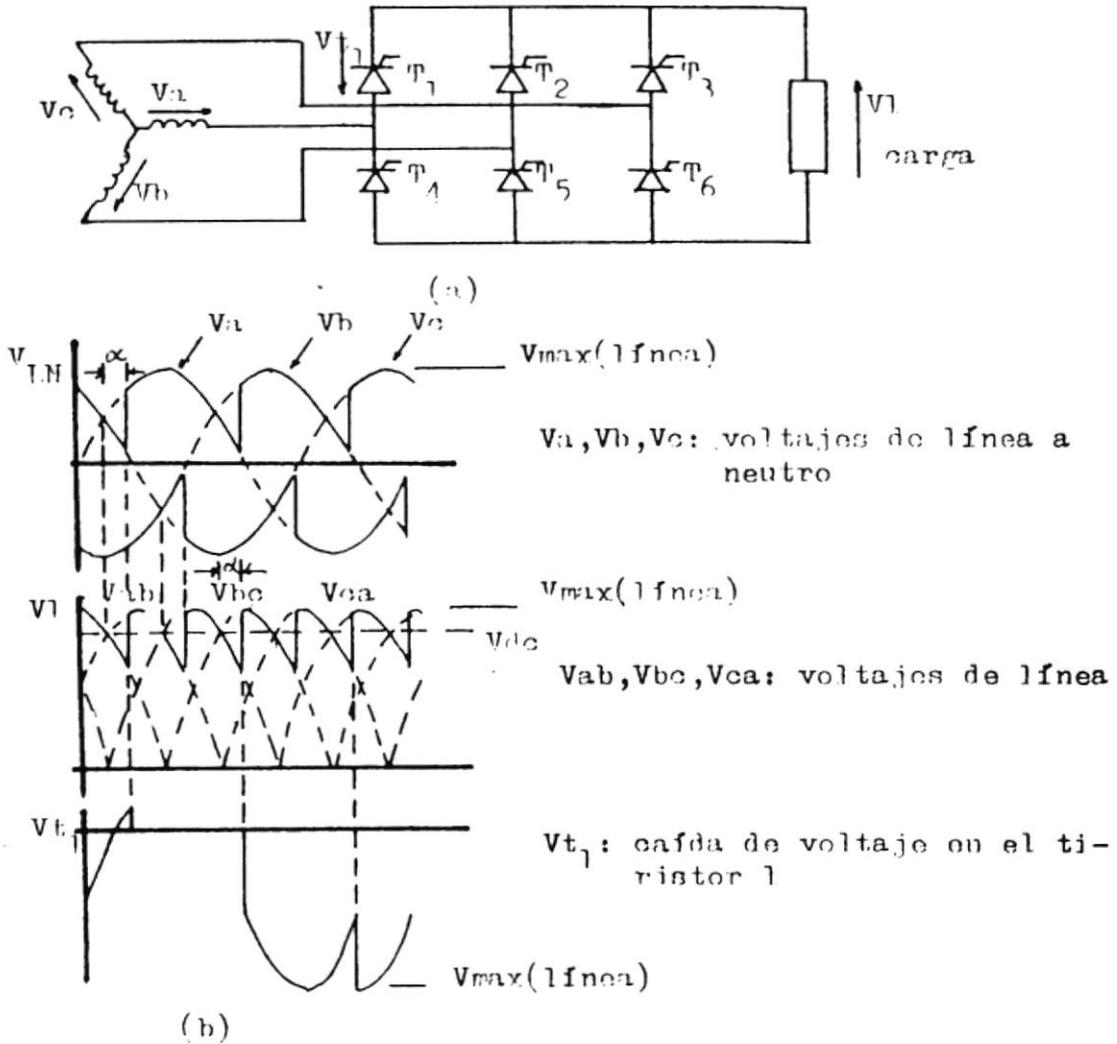
$$V_{dc} = \frac{3 V_{max}(línea)}{\pi} \cos \alpha$$

Mientras que para el puente semicontrolado es:

$$V_{dc} = \frac{3 V_{max}(línea)}{2\pi} (1 + \cos \alpha)$$



1.6.2) Rectificador trifásico de onda completa



- Circuito rectificador
- Angulo de disparo entre 0 y 180 grados

En la figura se muestra un rectificador trifásico de onda completa. Un circuito de este tipo puede, básicamente, dividirse en dos partes. Una parte del circuito se parece al rectificador trifásico de media onda y

sirve para conectar a la carga, en algún momento dado, el mayor de los voltajes trifásicos.

La otra parte del circuito consiste en tres tiristores con sus ánodos a la carga y sus cátodos conectados a los voltajes de alimentación. Esta disposición conecta a la carga en cualquier momento dado, ***el más bajo de tres voltajes de alimentación.***

Por tanto, el rectificador trifásico de onda completa siempre conectará el mayor de los voltajes trifásicos con un terminal de la carga y el menor de éstos con el otro terminal.

La salida de un rectificador trifásico de onda completa es todavía más suave que la salida de un rectificador trifásico de media onda. El componente de frecuencia de c.a. más bajo que se encuentra presente en él es 360 Hz y el factor de rizado es solamente un 4,2 %.

El voltaje de pico inverso de cada tiristor es igual al voltaje de pico máximo de línea. La frecuencia del voltaje en la carga es seis veces la de una línea. Esto permite obtener un alto VDC.

1.6) Requerimientos del Convertidor

1.7.1) Especificaciones de carga

Para las pruebas del convertidor con carga resistiva pura, se dispone en el laboratorio de un banco de resistencia de 2.2 kilovatios, 220 voltios, lo cual significa que tiene capacidad para que circule por el banco hasta 5 amperios de corriente.

Para observar el voltaje a la salida del convertidor con una carga resistiva-inductiva, se dispone además de una inductancia con un total de 360 mH, con un terminal central, para efectos de variación de la carga inductiva.

La carga principal del convertidor es un motor de corriente continua, 220 VDC, 6 amperios de corriente de armadura, acoplado con un generador.

1.7.2) Aspectos de alimentación

El tablero de trabajo se alimenta con 220V AC , trifásico y además en la parte inferior del banco de trabajo se debe realizar las siguientes conexiones: Se debe unir. 1-A, 2-B, 3-C y O-N.

Para conexión con el motor como carga del convertidor, este debe alimentarse el campo con 220V dc, este voltaje se lo obtiene de la fuente dc de 220V.

1.8. Circuitos de protección de los tiristores

1.8.1) Protección contra dv/dt , di/dt

Los transcientes de voltaje y corriente son causados por la conmutación de los tiristores. El encendido de los tiristores aún sin señal en la puerta, es acompañado por razones de elevación de corriente (di/dt) que puede destruir a los tiristores y razones de elevación de voltaje (dv/dt) que producen el encendido no deseado de los otros tiristores.

Para protegerlos contra estos transcientes de voltaje (dv/dt) es necesario un circuito RC en paralelo con cada tiristor esta red suaviza y limita el dv/dt que se genera por el cebado y proceso de recuperación de los tiristores; sirven para suprimir los picos de voltaje.

El **condensador** es para limitar la velocidad de subida del voltaje en los terminales del tiristor y las **resistencias** para limitar la descarga del condensador a través del tiristor.

El tiristor puede alcanzar valores muy elevados de corriente (di/dt) lo cual podría dañar al tiristor, para cuidar este problema se pone una

inductancia en serie la cual limita el efecto di/dt cuando el tiristor es encendido la cual deja pasar una intensidad reducida de corriente.

1.8.2) Protección de Sobrecorriente y Sobrevoltaje

Para la protección de **Sobrecorriente** se puede utilizar un breaker con límite de corriente. Este debe de ir conectado en serie con la carga. También se utiliza fusibles de acción rápida con cada tiristor para proteger contra sobre corriente y cortocircuito, los cuales dañarían a los tiristores.

Para proteger de **Sobrevoltajes** se utiliza supresores de pico que se los pone en paralelo con los tiristores, los cuales limitan los picos altos de voltajes y evitan el daño de este.

1.8.3) Selección de los tiristores

De acuerdo a las especificaciones antes mencionadas y tomando en cuenta que el destino del equipo, es para realizar experiencias, se debe sobredimensionar la capacidad de los tiristores. Una elección satisfactoria sería el escoger tiristores que soporten 65 amperios de trabajo y un voltaje de pico inverso de 400 voltios, para ello se escogio los tiristores 65A-400V.

Las características principales de estos tiristores son: Voltaje de pico inverso de 400 voltios, corriente RMS en sentido directo de 35 amperios, corriente Dc en sentido directo de 22 amperios, corriente en la puerta necesaria para disparar al tiristor: 40 mA. (Para mayores datos ver apendice A).



CAPITULO II

CONTROL DE UN MOTOR DC

2.1) CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR DC

Existen 3 formas de variar la velocidad:

- Variando el voltaje de alimentación de la armadura
- Variando la carga
- Variando el flujo de carga.

2.1.1) **Variando la carga.**- Este método no sirve para el control de velocidad, debido a que es susceptible al cambio de la carga y no puede mantener una velocidad constante.

2.1.2) **Variando el flujo de carga.**- Igual que el anterior este método no sirve para el control de velocidad, ya que es susceptible al cambio de la carga y no puede mantener una velocidad fija, usándose sólo en combinación con el control de armadura para una mayor eficiencia.

2.1.3) **Variando el voltaje de alimentación de la armadura.**- Como la velocidad es proporcional al voltaje de armadura, el control sobre este voltaje implica un control de la velocidad, una mejor manera de control del voltaje DC que alimenta a la armadura.

2.2) CONTROL DE VELOCIDAD DE ARMADURA.

Como la velocidad es proporcional al voltaje de armadura, el control sobre este voltaje implica un control de la velocidad.

Para la alimentación de un motor dc, se la obtiene rectificando la alimentación interna.

Tenemos varias maneras de controlar la alimentación de armadura:

- ❖ Con potenciómetros en serie
- ❖ Rectificación monofásica.
- ❖ Rectificación trifásica.

2.2.1) Potenciómetros en serie.- Se lo puede realizar por este método pero existe una desventaja que es pérdida de potencia y eficiencia del sistema.

2.2.2) Rectificación monofásica.- Es realizado por medio de diodos y de tiristores.

- La ventaja es que es más económico,
- La desventaja es que sirve para motores pequeños o de baja potencia.

2.2.3) Rectificación trifásica.- Es también realizado por diodos y de tiristores pero su rectificación es más compleja.

- La ventaja es que sirve para motores de mucha potencia
- La deventaja son el costo y la complicación de la sincronización.

En este proyecto se usa rectificación trifásica del tipo puente ya que permite, a mas de trabajar con motores de mayor potencia, la circulación de una corriente continua por la armadura que evita el chisporroteo del motor, el cual produce la inestabilidad de la velocidad y la disminución de la vida útil del mismo.

2.3) Realimentación

2.3.1) Realimentación de Velocidad

Esta se la utiliza para regular la velocidad del motor. La señal realimentada de velocidad con la señal velocidad referencial se compara y de allí se obtiene una señal de error, esta señal pasa por el controlador de velocidad, de donde se ordena un incremento o disminución de los ángulos de disparo de los tiristores, produciendo mayor o menor voltaje, dando un mayor o menor velocidad al motor.

- **La ventaja.-** Que no permite variar la velocidad cuando la carga o cualquier otro efecto perturbante al sistema varia (*porque al variar la carga, la velocidad tiende a variar*).

Pero como existe una señal retroalimentada, esta señal es comparada con la referencia de donde se obtiene un error, dependiendo de este valor se va poniendo el ángulo de disparo adecuado, llevándose al motor a la velocidad deseada, así en forma continua, la señal retroalimentada es chequeada, lográndose una velocidad prácticamente constante.

- **La desventaja.-** Que por mantener una velocidad alta puede suceder que por efecto de carga, el motor absorba excesiva corriente y podría quemarse.

En este proyecto se usa termistores que evitan la sobre corriente, ya que el fusible se abre cuando la corriente pasa del límite permisible.

2.3.2) Realimentación de corriente

La señal retroalimentada se compara con la señal de corriente de referencia y se obtiene un error, éste error entra a un controlador de corriente de donde se obtiene un incremento o disminución de los ángulos de disparos y por ende la disminución o incremento de la corriente de armadura. El control de la corriente prácticamente mantiene un determinado torque constante.

□ **Las ventajas**

- Evita el cortocircuito en la línea, ya que cualquier falla se detecta por retroalimentación de la corriente.
- Al usar el lazo de retroalimentación de corriente como lazo combinado con una retroalimentación de la velocidad.
- ***la ventaja consiste en la rapidez con que actúa sobre la velocidad.***

2.4) TIPOS DE CONTROLADORES

- **Controlador de corriente**
- **Controlador de voltaje**

2.4.1) Controlador de corriente

La ganancia del transductor de corriente es V_i/i_a . Experimentalmente se mide que es de 0.2 V/A

La ganancia normalizada del transductor (H_i) es:

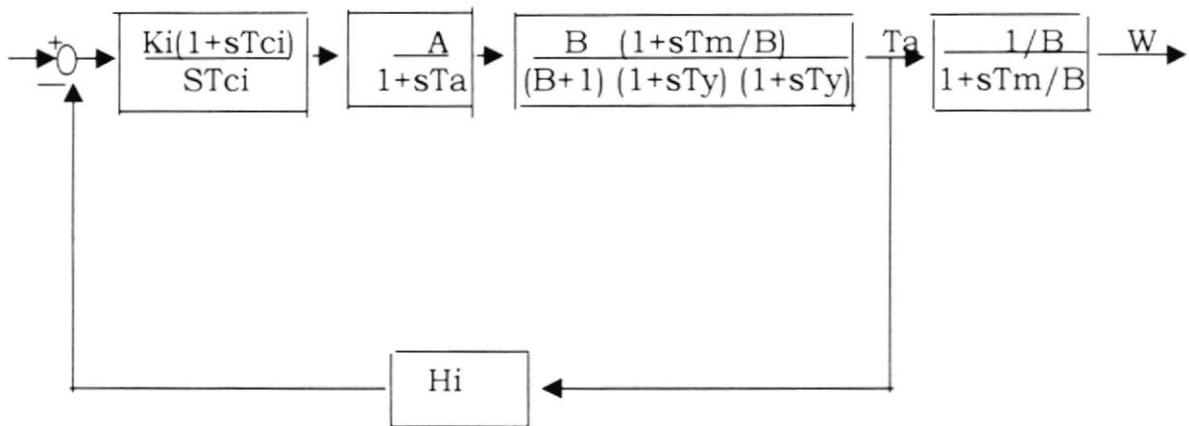
$$H_i = \frac{V_i/V_{cm}}{I_a/I_{er}} = 0.2 (70,96)/15 = 0.946$$

$$I_a/I_{er}$$

Para un controlador PI la función de transferencia es la siguiente:

$$\frac{K_i(1 + sT_{ci})}{sT_{ci}}$$

Diagrama de bloque



La función de transferencia en lazo abierto $G_i(s)$ es:

$$G_i(s) = \frac{K_i A B (1+sT_{ci})(1+sT_{m/B})}{T_{ci}(B+1) s(1+sT_a)(1+sT_y)(1+sT_z)}$$

De acuerdo a la realimentación se obtiene:

$$\mathbf{H_i(s) = H_i}$$

Puesto que T_m/B es grande comparado con T_y , T_z y T_a se puede aproximar:

$$G_i(s) = \frac{K_i A B (1+sT_{ci}) s T_m / B}{T_{ci}(B+1) s(1+sT_a)(1+sT_y)(1+sT_z)}$$

Simplificando esta expresión se tiene:

$$G_i(s) = \frac{K_i A T_m (1+sT_{ci})}{T_{ci}(B+1) (1+sT_a)(1+sT_y)(1+sT_z)}$$

$$G_i(s) = \frac{K_i A T_m H_i (1+sT_{ci})}{T_{ci}(B+1) (1+sT_a)(1+sT_y)(1+sT_z)}$$

Se reemplaza el factor $K_i A T_m H_i$ por K'

Se escoge T_{ci} de tal forma que compense al sistema haciendolo de segundo orden. Puesto que T_a es menor, se debe escoger T_{ci} entre T_y y T_z de tal modo que haya una mayor ganancia del controlador, ya que la precisión aumenta con el valor de K' .

Se tiene:

$$G_i(s) = \frac{K' / H_i}{(1+sT_a)(1+sT_x)}$$

$$G_i H_i (s) = \frac{K'}{(1+sT_a)(1+sT_x)}$$

$$F_i'(s) = \frac{G_i(s)}{1+G_iH_i(s)}$$

$$F_i'(s) = \frac{\frac{K' / H_i}{(1+sT_a)(1+sT_x)}}{\frac{K'}{(1+sT_a)(1+sT_x)} + 1}$$

$$F_i'(s) = \frac{K' / H_i}{S^2 (T_a + T_x) + s(T_a + T_x) + (1+K')}$$

$$F_i'(s) = \frac{K' / H_i T_a T_x}{S^2 + s (T_a + T_x) / T_a T_x + (1+K') / T_a T_x}$$

$$F_i'(s) = \frac{100,989 \cdot 10^3}{S^2 + 731,41s + 267,478 \cdot 10^3}$$

Esta función es similar al sistema de segundo orden:

$$\frac{K_p W_n^2}{S^2 + 2 \xi W_n S + W_n^2}$$

Donde ξ es la razón de amortiguamiento y W_n es la frecuencia natural del sistema.

La respuesta óptima del sistema a una entrada escalón se obtiene con

$$\xi = 0.707$$

$$W_n^2 = \frac{1+K'}{T_a T_x}$$

$$2 \xi W_n = \frac{T_a + T_x}{T_a T_x}$$

$$\xi = 0,707 = (T_a + T_x) / 2 (T_a T_x)^{1/2} (1 + K')^{1/2}$$

de donde

$$K' = \frac{T_a^2 + T_x^2}{2 T_a T_x}$$

De esta ecuación se observa que K' aumenta al aumentar el valor de T_x , por esta razón se escoge $T_x = T_y$ lo cual implica $T_{ci} = T_z$

Reemplazando se tiene:

$$T_a = \frac{16,6 \text{ ms}}{12} = 1,38 \text{ ms}$$

$$K' = \frac{(1,38)^2 + (147,67)^2}{2(138)(147,67)} = 53,508$$

$$K_i = \frac{K' T_{ci} (B + 1)}{A T_m H_i} =$$

$$K_i = \frac{(53,508)(30,107 \cdot 10^{-3})(0,7696335079 + 1)}{4,333 (294 \cdot 10^{-3}) (2,6)}$$

$$K_i = 0,861 \text{ (Ganancia del Controlador de I)}$$

La función de transferencia del controlador es :

$$\frac{K_i (1 + sT_{ci})}{s T_{ci}}$$

La capacitancia en el circuito de realimentación del OPAMP se escoge

$C_i = 1,3 \mu\text{f}$, Por tanto:

$$R_i C_i = T_{ci} = T_z$$

$$R_i = \frac{T_z}{C} = \frac{30,107 * 10^{-3}}{1.3 * 10^{-6}} = 23,16 \text{K}\Omega$$

$$R_i = 23,16 \text{K}\Omega$$

Ganancia

$$K_i = \frac{R_i}{R_{if}} \quad \Rightarrow \quad R_{if} = \frac{R_i}{K_i}$$

$$R_{if} = \frac{23,16 \text{K}\Omega}{0,861} = 23,229 \text{K}\Omega$$

$$R_{if} = 23,229 \text{K}\Omega$$

Para una corriente máxima de armadura de 7.5A

$$\frac{V_{cw, sat}}{R_{ir}} = \frac{(i_{a, max}/I_{er}) H_i}{R_{if}}$$

$$I_{er} = 70,96$$

$$R_{ir} = \frac{V_{cw, sat} (I_{er}) (R_{if})}{V_{cm} (i_{a, max}) H_i} =$$

Donde $V_{cw, sat}$ es el voltaje de saturación del controlador de velocidad.

$$R_{ir} = \frac{13,6 (194,7)(23,229 * 10^3)}{15(10) (2,6)} = \Rightarrow R_{ir} = 157,714 \text{K}$$

Ya que existe otra ganancia debido a R_{ir} , ésta es igual a R_{if}/R_{ir} , la cual debe ser incluida en la salida de V_{cw} . As

La función de transferencia es:

$$F_i(s) = \frac{R_{if}}{R_{ir}} = \frac{23,229 \text{ K}\Omega}{157,714 \text{ K}\Omega}$$

Reemplazando se tiene:

$$F_i(s) = \frac{I_a(s)}{V_{cw}(s)} = 0.1472$$

El controlador de corriente ha sido optimizado por el método del módulo de Hugging.

Según esta aproximación, la constante de tiempo equivalente T_{eq} es igual a $2T_a$:

$$\mathbf{T_{eq} = 2T_a=}$$

La función aproximada del lazo es :

$$F_i(s) = \frac{K_i'}{1 + sT_{eq}} \quad \text{donde } K_i' = \frac{R_{if}}{R_{ir} H_i}$$

T_r : tiempo de subida hasta alcanzar el 100% del valor

T_s : tiempo hasta alcanzar el estado estacionario

Reemplazando los valores, la función aproximada de lazo cerrado de corriente es:

$$\frac{-1}{T_z} = \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{B}{T_m} + \frac{1}{T_e} \right) + \left[\left(\frac{B}{T_m} + \frac{1}{T_e} \right)^2 - \frac{4(B+1)}{T_m T_e} \right]^{1/2} \right\}$$

$$T_e = \frac{L_a}{R_a}$$

$$T_e = 26,76 \text{ ms} \quad T_m = 294 \text{ ms} \quad T_m/B = 382 \text{ ms} \quad B = 0.7696335079$$

$$T_{z2} = 147,67 \text{ ms}$$

$$T_y = T_{z2} = 142,67 \text{ ms}$$

$$\mathbf{T_z = 30,107 \text{ ms}}$$

2.4.2) Controlador de Voltaje

Para la realimentación del lazo de voltaje se va a utilizar un controlador Pi que provee un error estado estable igual a cero. Debido a la naturaleza del voltaje de armadura, es necesario utilizar un filtro para obtener un voltaje continuo que sea proporcional al voltaje de armadura.

En la práctica es común utilizar el mismo controlador electrónico que se usa para velocidad, de tal manera que se ahorran componentes y el trabajo simultáneo más común económico. En este caso también es necesario utilizar un divisor de voltaje para efectos de realimentación. Experimentalmente se escoge el divisor que provee un buen funcionamiento del lazo. Un análisis riguroso de las funciones de

tansferencia no s de interes práctico en este caso, sin embargo, a continuación se procederá a analizar en forma breve la alternativa de utilizar para el lazo de voltaje el mismo controlador y filtro que se utiliza en el lazo velocidad.

El lazo interno es equivalente

$$\frac{\frac{A_{ki} (1 + sT_{ci})}{sT_{ci} (1 + sT_a)}}{1 + \frac{A_{ki}H_iB (1 + sT_{ci}) (1 + sT_m/B)}{sT_{ci} (B+1) (1+sT_a) (1+sT_y) (1+sT_z)}}$$

Simplificando la expresión anterior se tiene:

$$\frac{A_{ki}H_iB (1 + sT_{ci})(B+1) (1 + sT_y)}{sT_{ci} (B+1) (1+sT_a) (1+sT_y) (1+sT_z) A_{ki}H_iB (1 + sT_m/B)}$$

Por lo tanto:

$$G_v(s) = \frac{K_i' (R_f/R_r) A_{ki} (1 + sT_{ci})(B+1) (1 + sT_y) (1 + sT_{cw})}{S^2T_{ci} T_{cw} (B+1) (1+sT_a) (1+sT_y) + A_{ki}H_iBT_{cws} (1 + sT_m/B)}$$

$$H_v (s) = \frac{H_v}{sT_f + 1}$$

Escogiendo un divisor de voltaje formado por resistencia de 160 K y 10 K se obtiene el valor H_v :

$$H_v = \frac{1/V_{cm} \cdot 10}{1/V_n \cdot 160 + 10} = 165$$

Hv = 165

La función de transferencia del lazo es:

$$Fv(s) = \frac{Gv(s)}{1 + Gv H_v(s)}$$

Reemplazando los parámetros se obtiene que el denominador de $Fv(s)$ es:

$$(1 + sT_f) S^2 T_{ci} T_{cw} (B+1) (1+sT_a) (1+sT_y) + A_k i H_i B T_{cw} s (1 + sT_m/B) + H_v K_i' (R_{if} / R_{ir}) A_k i (B+1) (1+sT_{cw}) (1+sT_y) (1+sT_{ci})$$

Reemplazando los valores y simplificando:

$$6.6 * 10^{-9} s^5 + 1.5 * 10^{-5} s^4 + 26.9 * 10^{-3} s^3 + 3.07 s^2 + 28.37 s + 57,24$$

En el apéndice B se describe el arreglo de Routh- Hurwitz para un sistema de quinto orden. Aplicando el criterio de Routh-Hurwitz se tiene:

$$a_0 = 6.6 * 10^{-9}$$

$$a_1 = 1.5 * 10^{-5}$$

$$a_2 = 26.9 * 10^{-3}$$

$$a_3 = 3.07$$

$$a_4 = 28.37$$

$$a_5 = 57,24$$

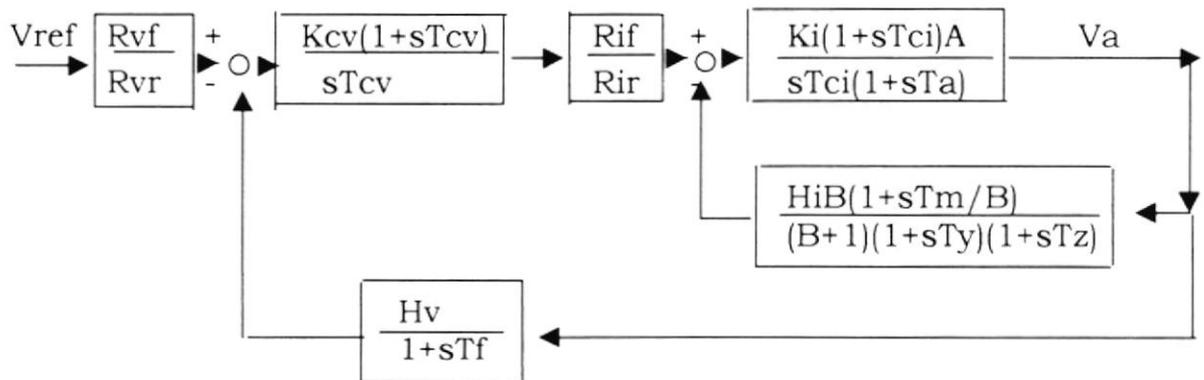


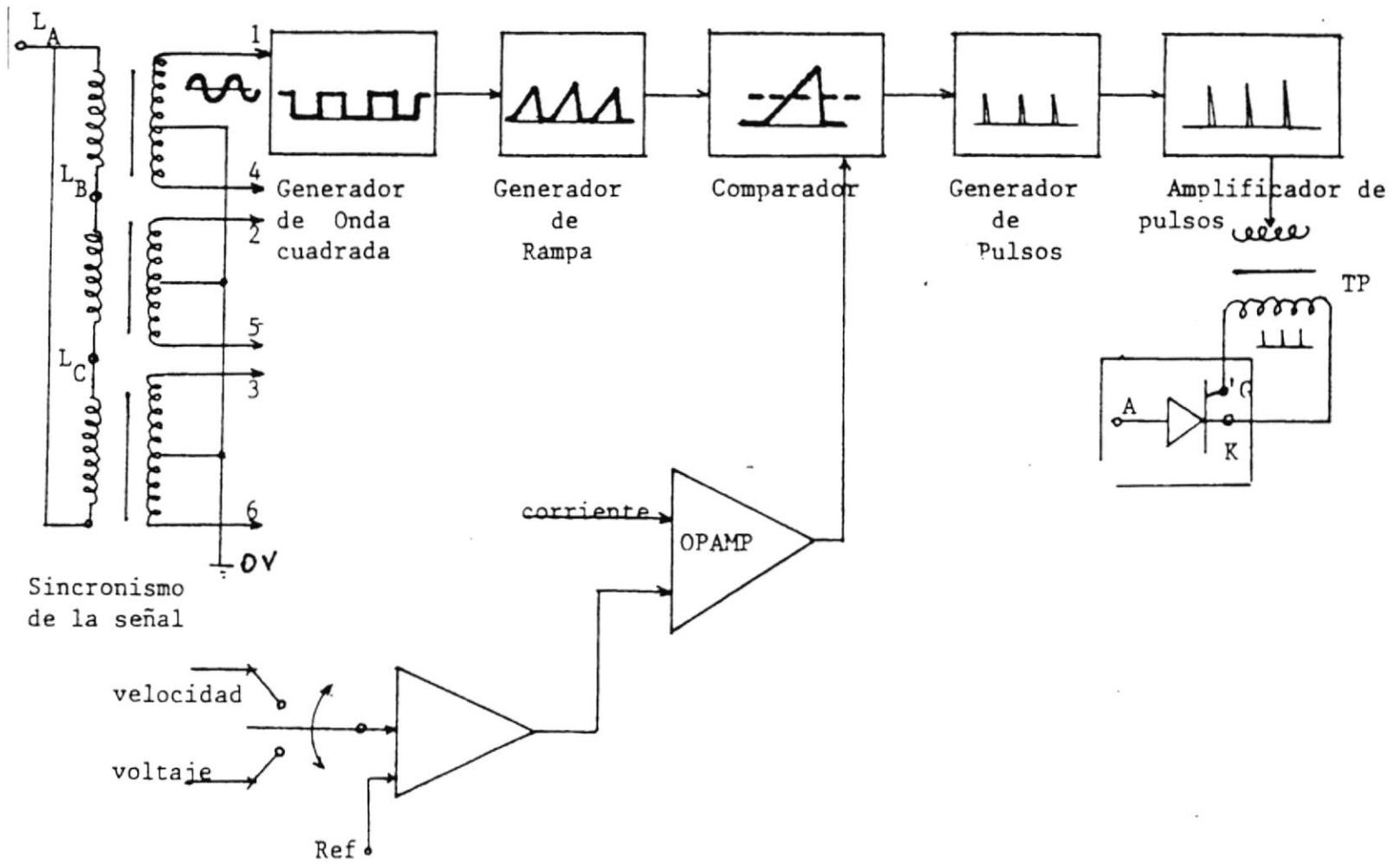
Diagrama de bloque del lazo de voltaje

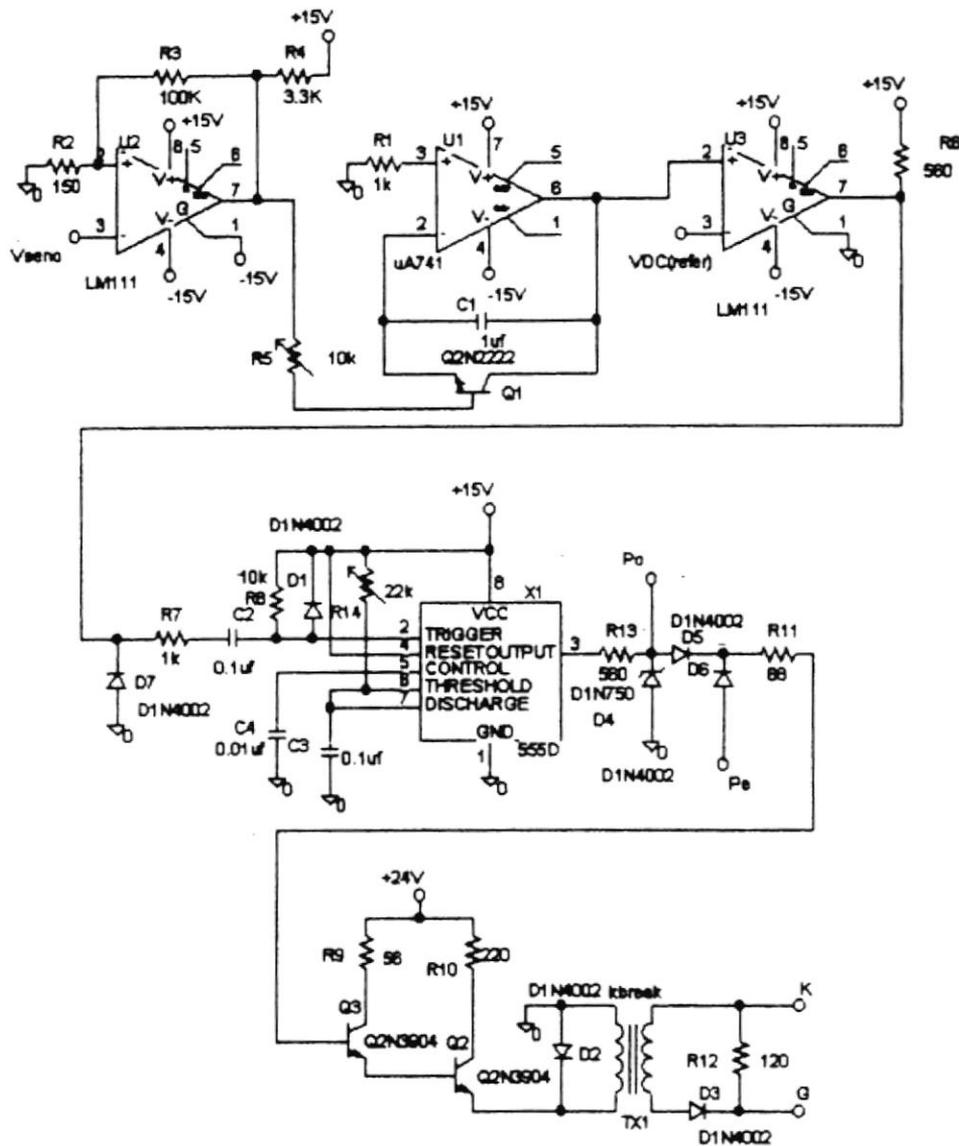
CAPITULO III

UNIDAD DE DISPARO O CONTROL

3.1) INTRODUCCION

Se muestra el diagrama esquemático en bloque de la configuración del circuito de disparo. Se usarán seis unidades transistorizadas, una para disparar a cada tiristor. Se utilizan transformadores para reducir el voltaje de alimentación y para sincronizar a los circuitos de disparo con las fases correspondientes de cada línea. UN generador de onda cuadrada marca el rango de fase de disparo de cada circuito y su señal de salida es aplicada a un generador de rampa, cuya salida determinará el nivel de voltaje al cual se producirá un pulso de disparo. La pendiente positiva de la señal rampa representa la linealidad entre el ángulo de disparo y el voltaje de salida del controlador de corriente. El comparador indica el ángulo de disparo y el generador produce un pulso en cada período de la línea. Ya que la corriente necesaria para encender al tiristor es de 40 miliamperios, debe utilizarse un amplificador que aumente la potencia, debe utilizarse un amplificador que aumente la potencia de los pulsos por el generador de pulsos. Para aislar los pulsos se utilizan transformadores de pulsos, cuyos secundarios se conectan a las puertas de los tiristores.





3.2) FUNCIONAMIENTO

Para rectificar un voltaje alterno se utiliza un puente de tiristores para que funcionen en forma sincronizada. Los pulsos generados vienen de integrados pero estos no van directamente a los tiristores, porque no hay suficiente corriente para disparar a estos y además se

lo debe de separar de altos y bajos voltajes capaces de dañar el tiristor. Para resolver estos problemas existen 5 etapas.

- Generador de onda cuadrada
- Generador de Rampa
- Comparador y generador de pulsos
- Sincronización de pulsos de disparo.
- Amplificación de pulsos.

Para reducir el voltaje alterno se utilizan transformadores de reducción que sirven además para sincronizar las fase de las líneas.

Luego vienen las 5 etapas.

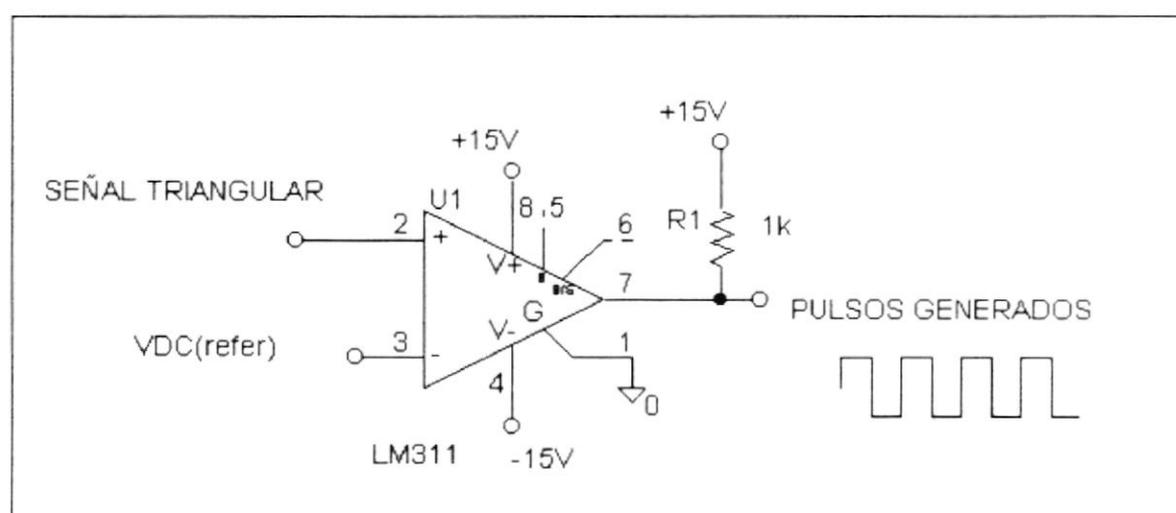
3.2.1) Generador de onda cuadrada

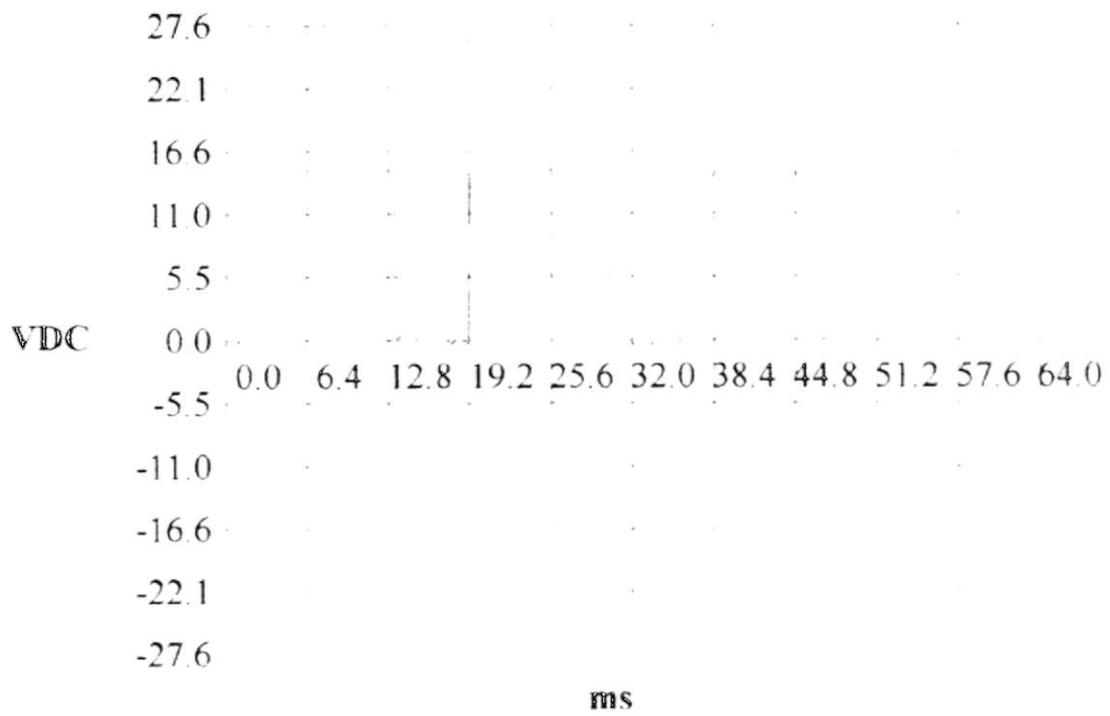
Para generar la onda cuadrada hemos utilizado un integrado LM 311N la cual transforma la señal sinusoidal a una señal cuadrada.

Esta onda cuadrada tiene la misma frecuencia que el voltaje de línea.

La salida del generador es de + 15V y 0V aproximadamente, la onda cuadrada determina el rango de fase en que puede generarse un pulso de disparo.

La figura muestra el circuito generador de onda cuadrada. El sincronismo con el voltaje de alimentación se lo realiza por medio de un transformador reductor que tiene una relación de transformación de 181.86 voltios a 28 voltios RMS.





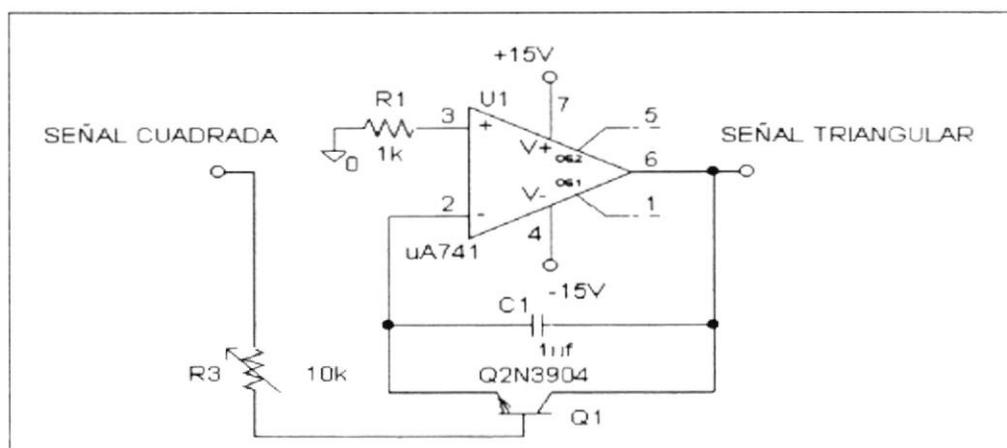
CIRCUITO DE CONTROL DE DISPARO DE TIRISTORES ONDA SENO TRANSFORMADA EN ONDA CUADRADA

La figura muestra el circuito generador de onda cuadrada. El sincronismo con el voltaje de alimentación se lo realiza por medio de un transformador reductor que tiene una relación de transformación de 220 voltios a 9 voltios RMS

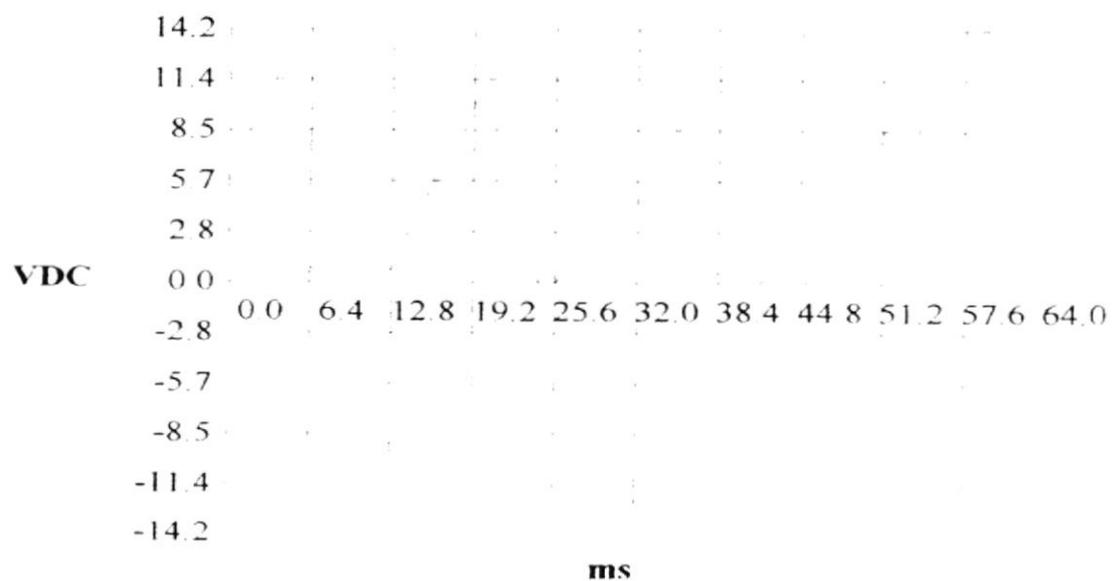
3.2.2) Generador de Rampa

Para generar una señal triángular utilizamos un integrado LM 741 la señal es la que determina que el ángulo de disparo varíe linealmente con el voltaje de control V_{ci} proveniente del controlador de corriente. La característica de la onda es una recta con pendiente positiva en el gráfico voltaje versus tiempo, Se obtiene 0 voltios durante el semiciclo positivo de la señal de entrada, mientras que los 15 voltios corresponden al semiciclo negativo del voltaje aplicado al tiristor. La pendiente de la rampa puede variarse de acuerdo al voltaje de control V_{ci} máximo que se escoja en el controlador.





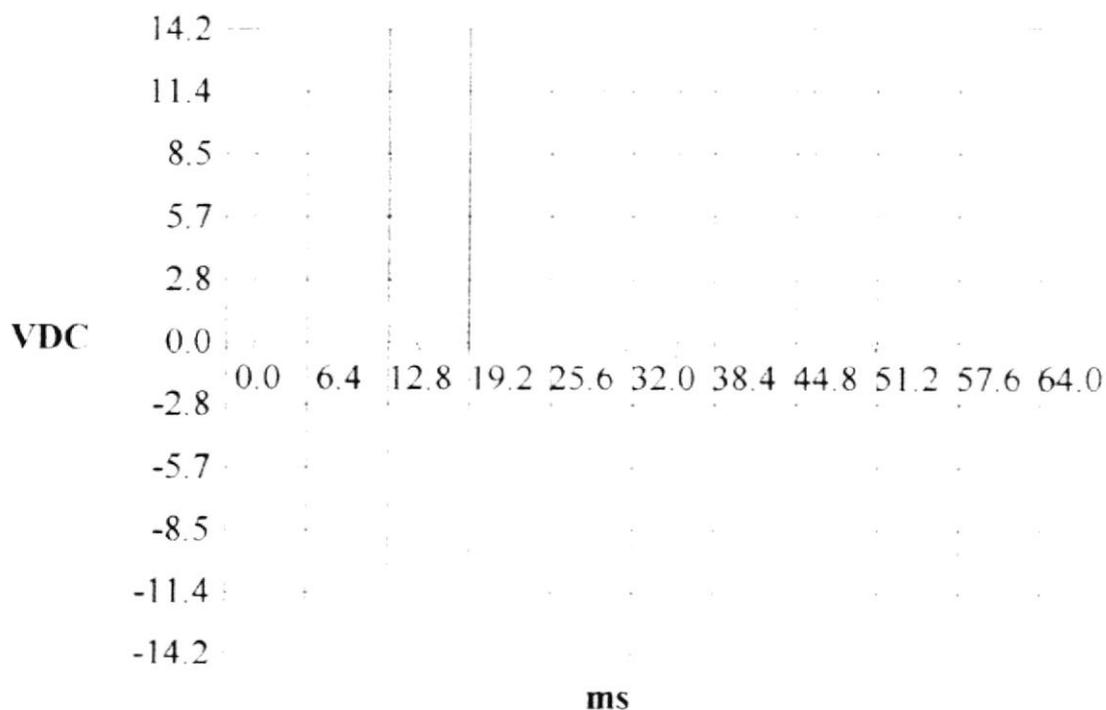
ONDA CUADRADA TRANSFORMADA EN ONDA TRIANGULAR DE CONTROL DE DISPARO DE TIRISTORES



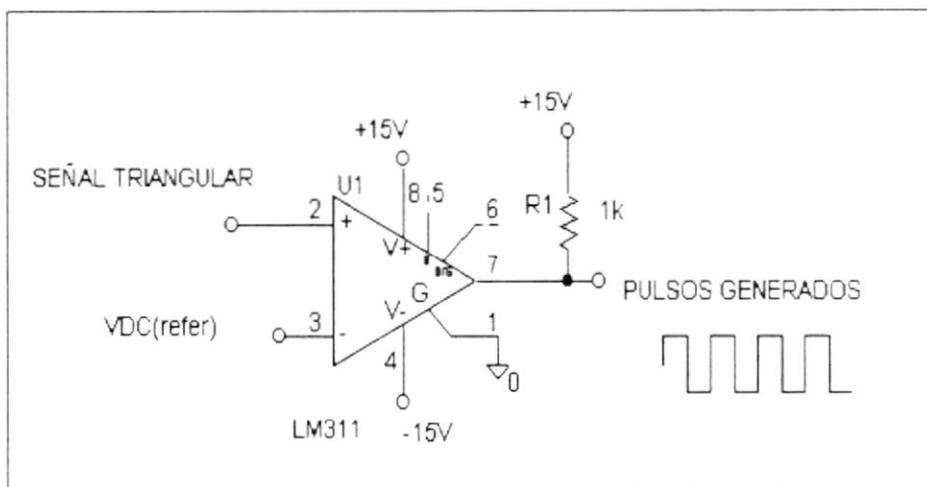
3.2.3) COMPARADOR Y GENERADOR DE PULSOS

Para la parte de generación se utilizo un LM 311N .

El comparador determina el instante en el cual debe producirse un pulso de disparo. La comparación se realiza entre la rampa y el voltaje proveniente del controlador de corriente, y el comparador debe indicar el instante en el cual ambos voltajes tiene el mismo valor absoluto, ya que se ajusta la rampa para que varíe entre 0 y +15 voltios, y el controlador proporciona un voltaje entre 0 y + 15V

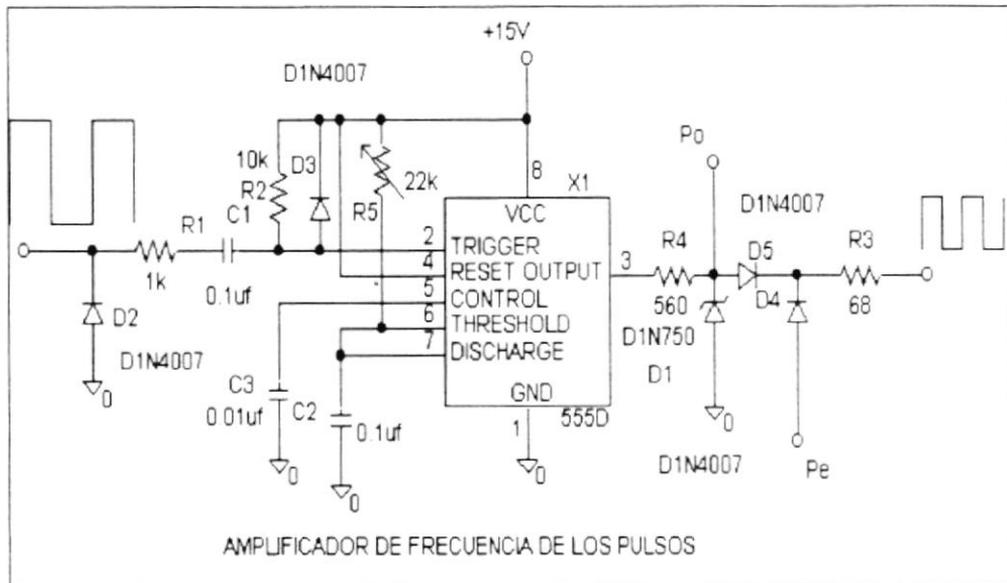


**CIRCUITO DE CONTROL DE DISPARO DE TIRISTORES
SALIDA DEL COMPARADOR**



Amplificación de la frecuencia de los pulsos de disparo

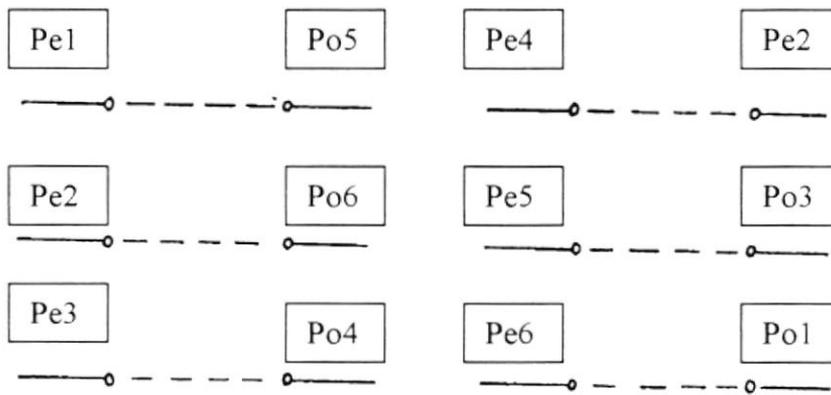
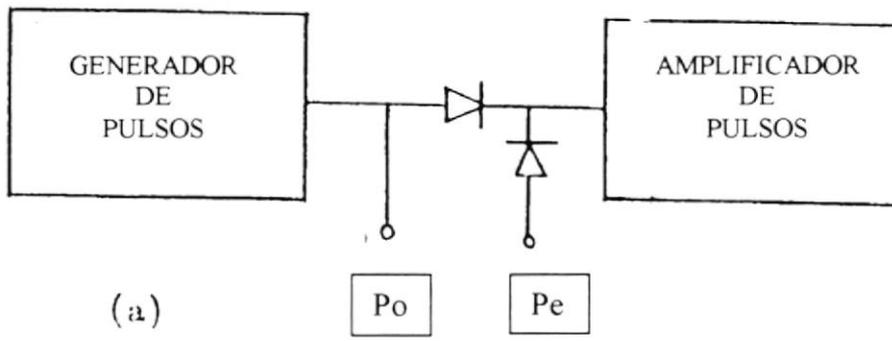
Para amplificar la frecuencia de los pulsos que alimentaran a los tiristores, se utilizó un 555, configuración astable. La razón para amplificar los pulsos se debe a que los transformadores de pulso, trabajan con frecuencias altas en nuestro caso 400khz. A continuación se indica en circuito amplificador de frecuencia.



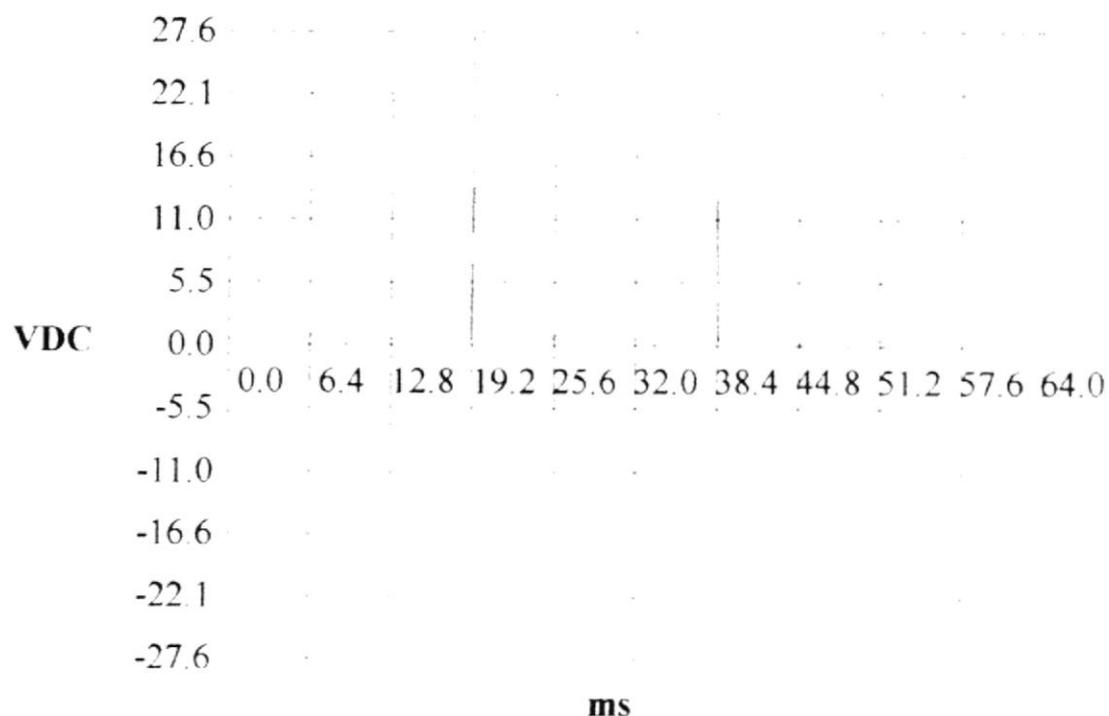
3.1.4) Sincronización de los pulsos de disparo (puente Trifásico)

Cuando se utiliza un puente de tiristores rectificador de onda completa, es necesario sincronizar los pulsos entre los diferentes circuitos de disparo, ya que la conducción se realiza por pares de tiristores y los pulsos deben llegar simultáneamente a ambos.

La figura muestra la secuencia de disparo para un puente trifásico de seis tiristores, mostrado en la figura. El sincronismo del disparo se lo realiza por medio de los terminales Po y Pe, disponibles en cada uno de los circuitos de disparo. En la figura se muestra la localización de los terminales y las Conexiones que deben realizarse para la secuencia mostrada en la figura.



(h)

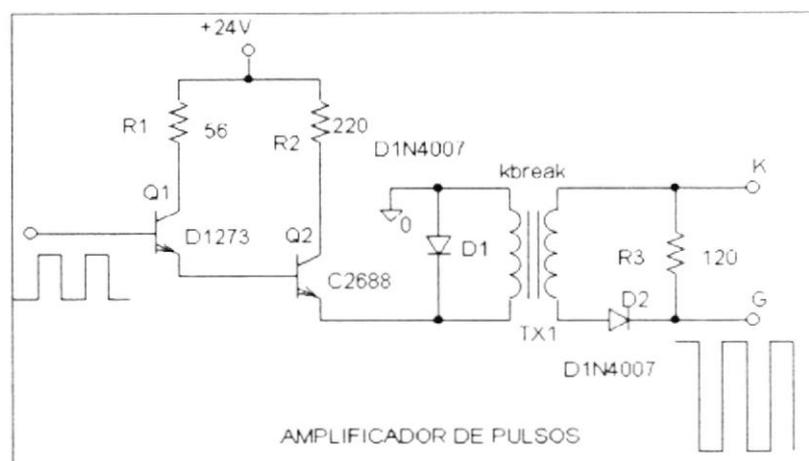


CIRCUITO DE CONTROL DE DISPARO DE TIRISTORES SALIDA POR EL 555

3.2.5) AMPLIFICADOR DE PULSOS

El amplificador de pulsos tiene por finalidad aumentar el tamaño y la potencia de los pulsos que se obtiene a la salida del generador de pulsos. A la entrada del amplificador se encuentra el terminal Pe, disponible para la entrada de pulsos provenientes de otro de los circuitos de disparo, para efectos de la sincronización de los pulsos.

Los transformadores de pulsos se utilizan para aislar las puertas de los tiristores del amplificador.



CAPITULO IV

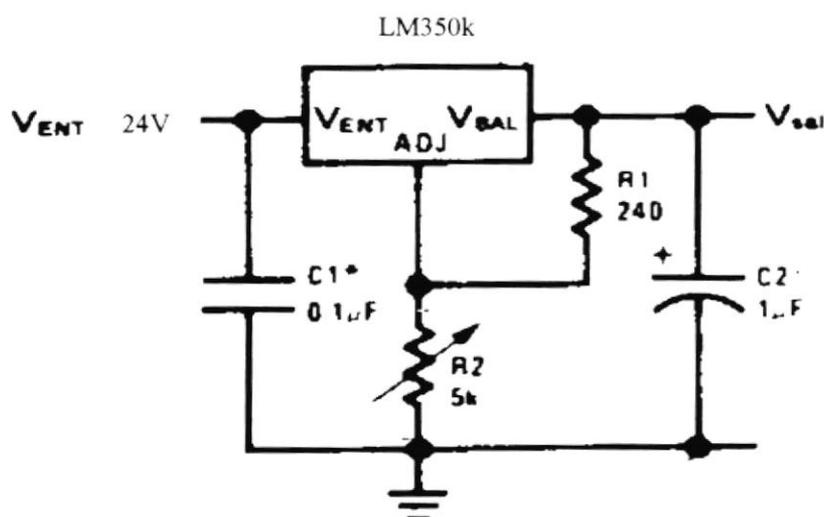
FUENTES REGULADAS DE VOLTAJE DC NECESARIAS PARA POLARIZACION

4.1 Requerimientos para el diseño

En este diseño hemos utilizado para cada circuito en las seis tarjetas una polarización de +15 voltios DC y en conjunto la corriente que debe entregar la fuente (medida experimentalmente) es aproximadamente 1 amperios.

Para polarizar a los amplificadores operacionales, cuatro en total, se necesitan fuentes de + 15, - 15, +24 voltios, capaces de entregar una corriente aproximadamente 3 amperios cada una.

Regulador ajustable de 1.2 V - 25 V



CAPITULO V

CONSTRUCCION DEL EQUIPO

5.1 Lista de materiales

Los elementos utilizados para la unidad de disparo esta compuesto por seis circuitos y son:

Resistencias

- 12 resistencias de $1k\Omega, 1/2W$
- 6 resistencias de $150 \Omega, 1/2W$
- 6 resistencias de $100 K\Omega, 1/2W$
- 6 resistencias de $3.3 \Omega, 1/2W$
- 6 potenciómetro de $10 k\Omega, 1/2W$
- 6 resistencias de $560 \Omega, 1/2W$
- 6 resistencias de $10 K\Omega, 1/2W$
- 6 resistencias de $56 \Omega, 1/2W$
- 6 resistencias de $220 \Omega, 1/2W$
- 6 resistencias de $68 \Omega, 1/2W$
- 6 resistencias de $120 \Omega, 1/2W$
- 6 resistencias de $560 \Omega, 1/2W$
- 6 potenciómetro de $22 k\Omega, 1/2W$

Diodos

- 36 diodos D1N4007
- 18 diodos D1N750 (zener)

Integrados

- 12 INTEGRADOS LM311
- 6 INTEGRADOS μ A741
- 6 INTEGRADOS 555D

Transistores

- 6 Transistores Q2N3904
- 6 Transistores D1273
- 6 Transistores C2266

Capacitores

- 6 Capacitores DE 1 μ f
- 12 Capacitores DE 0,1 μ f
- 6 Capacitores DE 0,01 μ f

Transformadores

- 6 transformadores de pulsos

Fuentes

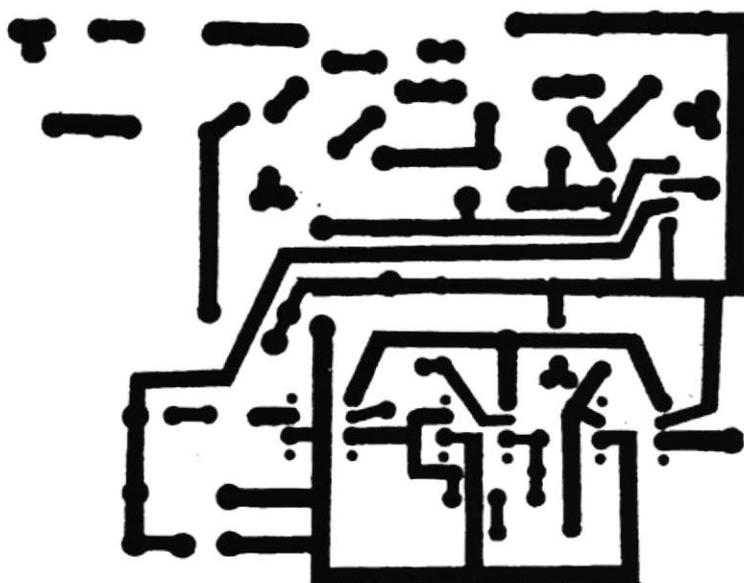
- 1 Fuente regulada de +15 V
- 1 Fuente regulada de -15 V
- 1 Fuente regulada de + 24 V

FUENTES DE VOLTAJE CADA UNA

- Un transformador 120-24 v (3 amp)
- Un puente rectificador 3 Amp
- 1 Capacitor de 1500 uf - 50 V
- Regulador de voltaje LM350k
- 1 potenciómetro de 5 k Ω
- 1 Resistencia de 240 Ω

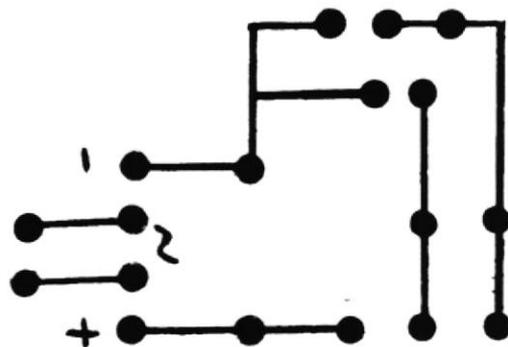
5.2 Diseño de los circuitos impresos

5.2.1 Circuito impreso de cada disparador o controlador de tiristores



CIRCUITO IMPRESO DE LAS TARJETAS DE DISPARO

5.2.2 Circuito impreso de las fuentes de polarización



CAPITULO VI

PRUEBAS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

6.1 CONTROL DEL MOTOR *dc*

6.1.1 Lazo abierto

Cuando se hace trabajar al motor sin ninguna retroalimentación, el control del ángulo de disparo de los tiristores se lo realiza por medio de un voltaje de referencia que puede ser variado entre 0 y -10 voltios, en vez del voltaje v_{ci} del controlador de corriente. Se debe tener la precaución de arrancar al motor con el ángulo de disparo máximo, ya que de no serlo así la corriente de arranque del motor hará que baje el interruptor de protección.

Una vez que se fija el ángulo de disparo a un valor determinado, la velocidad y corriente del motor dependerán de la carga acoplada.

La tabla muestra la característica de velocidad versus corriente de armadura para el caso de conducción

discontinua, y la figura muestra la regulación de la velocidad versus corriente para el mismo caso

V = 1400 rpm

E(v)	17,3	92,4	136,6	156,8	173,9	184,1	186,2
If(v)	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.55

V = 1200 rpm

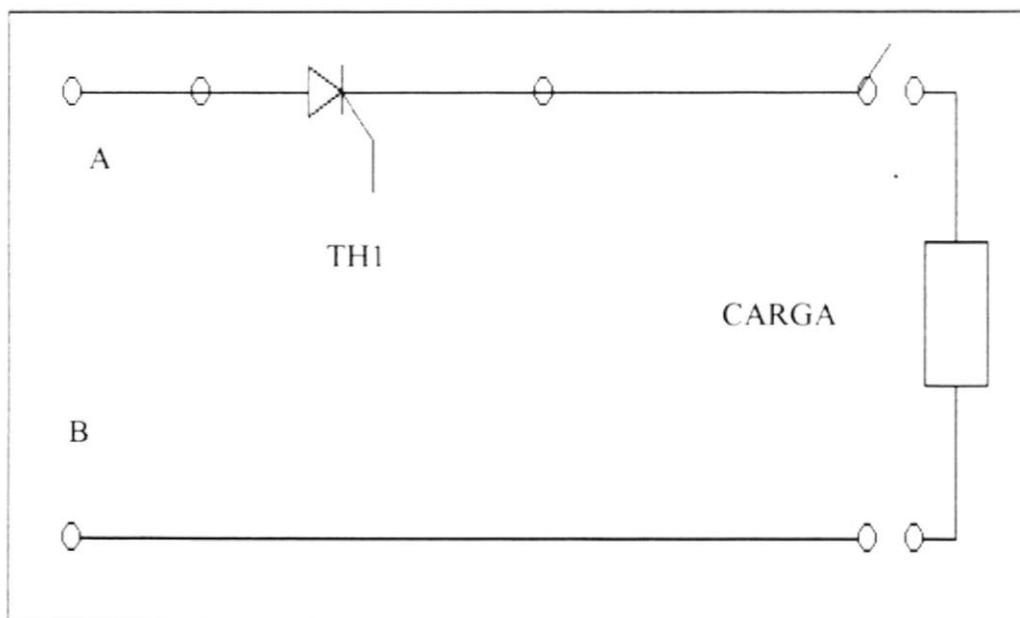
E(v)	14,7	27,9	105,6	134,0	146	146,1	154,9
If(v)	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.55

TACOGENERADOR

V(RPM)	1700	1500	1300	1100	900	700	500	300	100	0
Volt tacog	34.8	30.3	26.2	22	18.1	13.9	9.6	5.8	1.6	0

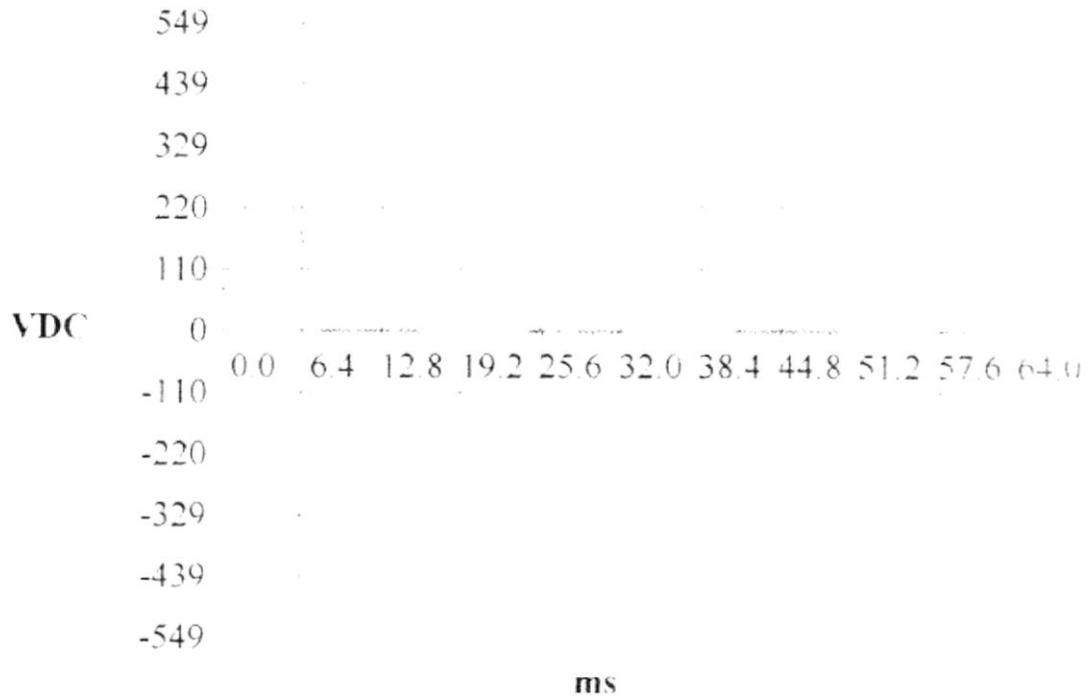
❑ 6.2 Rectificador monofásico de medio Onda

Se muestra las conexiones que deben realizarse. Es necesario polarizar los circuitos de disparo con +24 voltios. Para control el ángulo de disparo se debe utilizar una fuente de voltios de variable entre 0 y -10 voltios, conectada a los terminales V_{α} y 0.

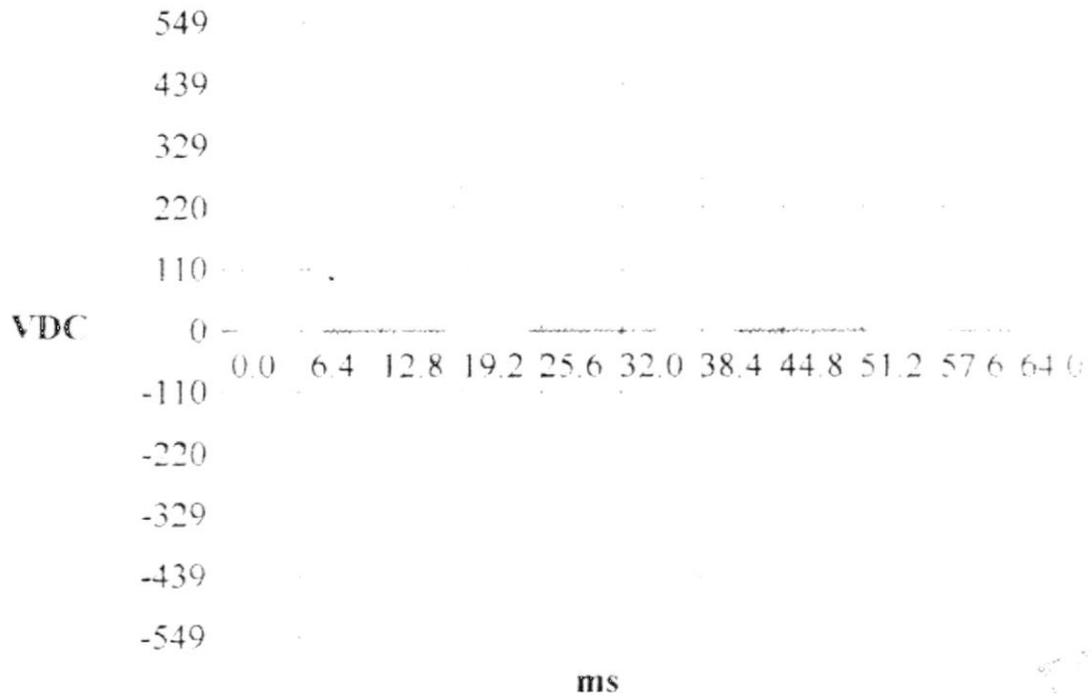


❖ 6.2.1 Grafica con carga Resistiva ($R = 149 \Omega$)

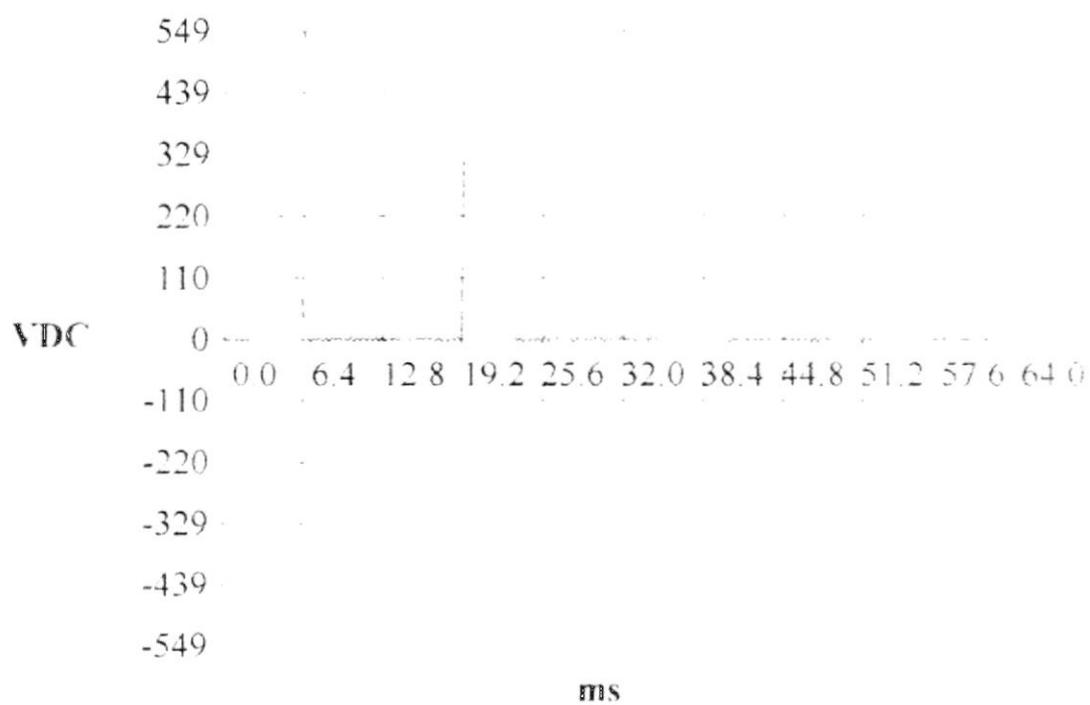
● 6.2.1.a Angulo de disparo ($\alpha = 0^\circ$)



☉ 6.2.1.b) ángulo de disparo ($\alpha = 45^\circ$)

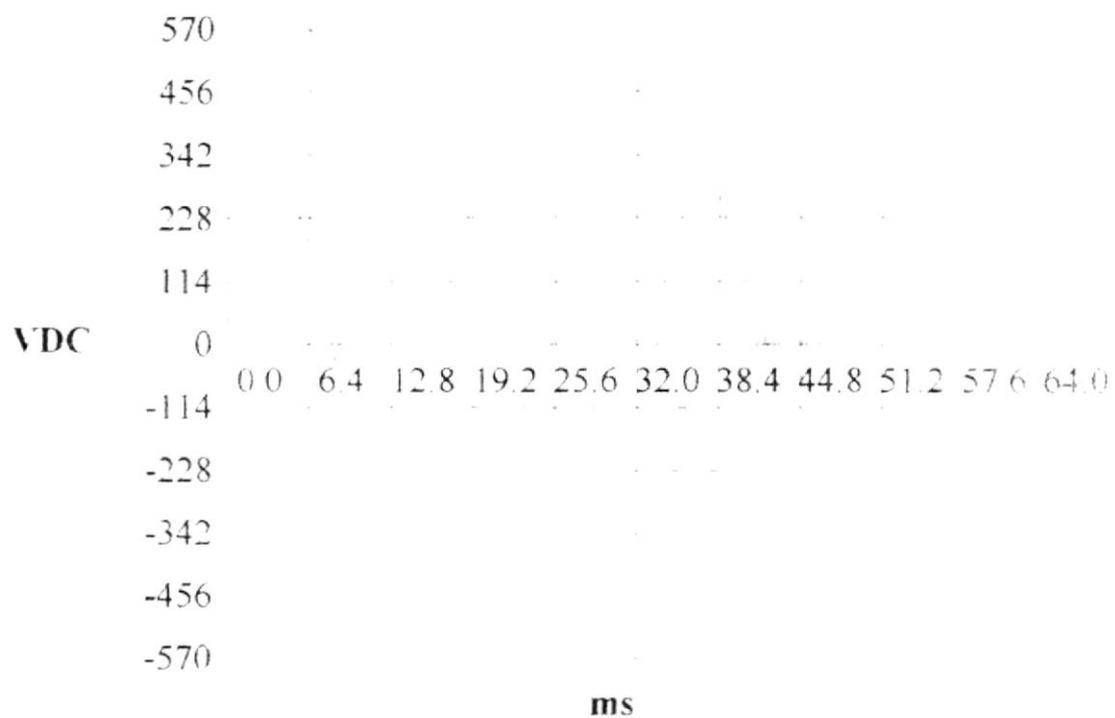


⊙ 6.2.1.c) ángulo de disparo es ($\alpha = 90^\circ$)

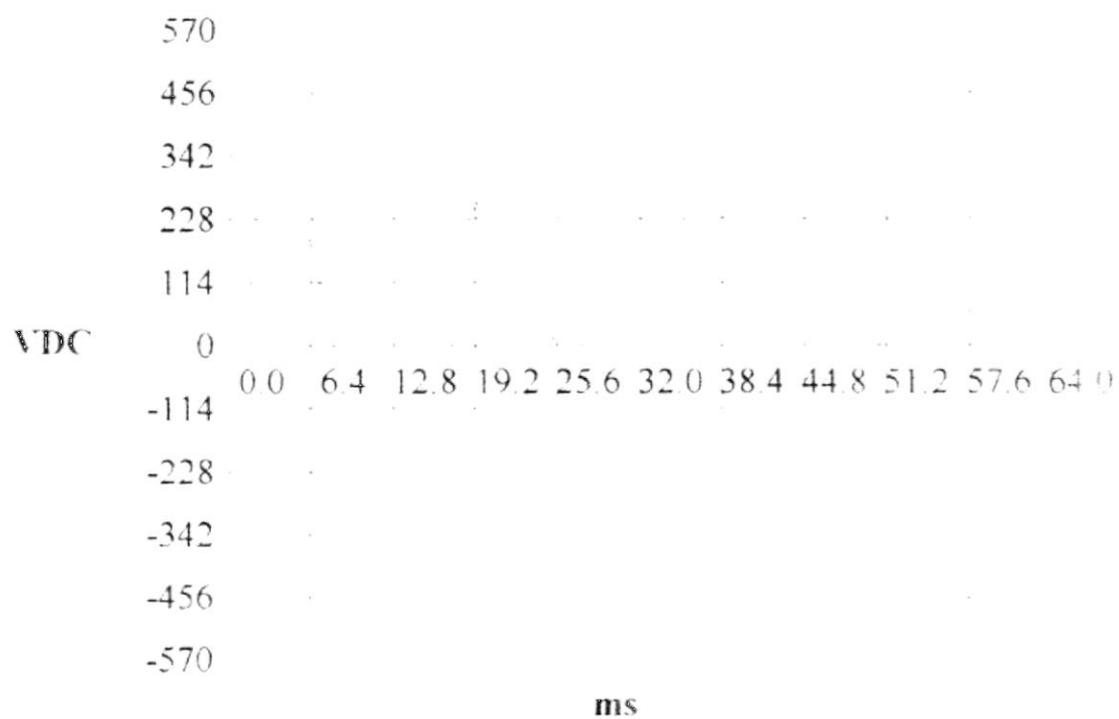


6.2.2 CARGA : RESISTIVA E INDUCTIVA ($R_L = 149 \Omega$)

- 6.2.2.a) ángulo de disparo ($\alpha = 0^\circ$)

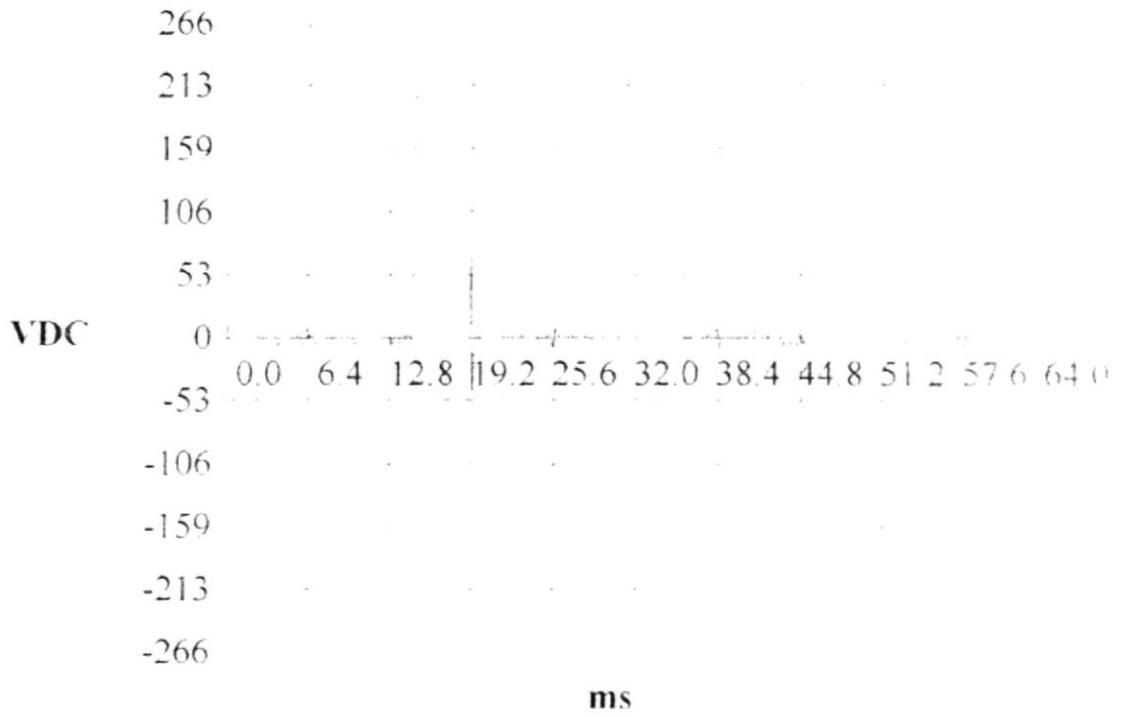


⊙ 6.2.2.b) ángulo de disparo ($\alpha = 45^\circ$)



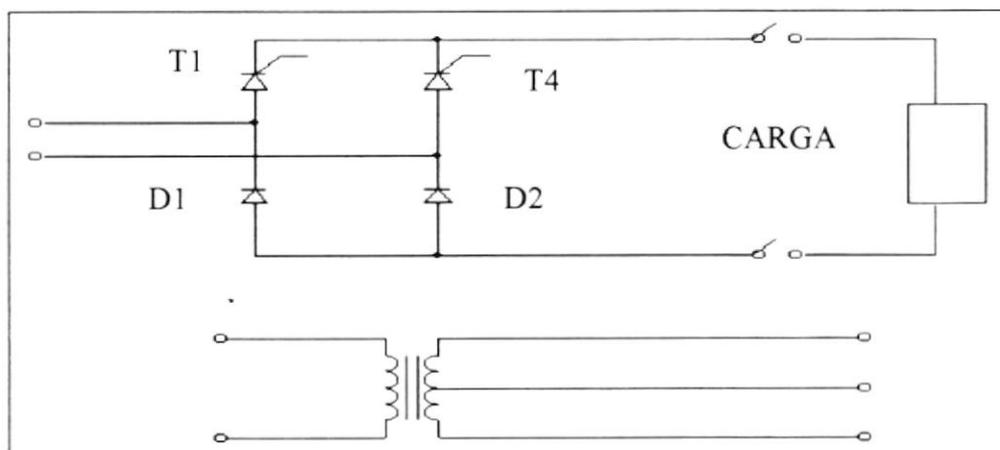
6.2.3 CARGA : INDUCTIVA ($L = 149 \Omega$)

● 6.2.3.a) ángulo de disparo es ($\alpha = 45^\circ$)



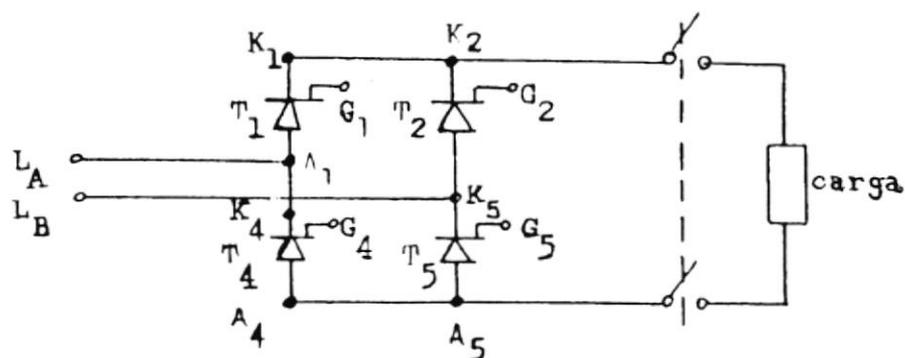
6.3 Rectificador monofásico de onda completa semicontrolado

Se muestra las conexiones que deben realizarse en el rectificador monofásico de onda completa semicontrolado. Se utiliza un transformador de sincronismo con los 3 terminales del secundario.



6.4 Rectificador monofásico de onda completa, control completo.

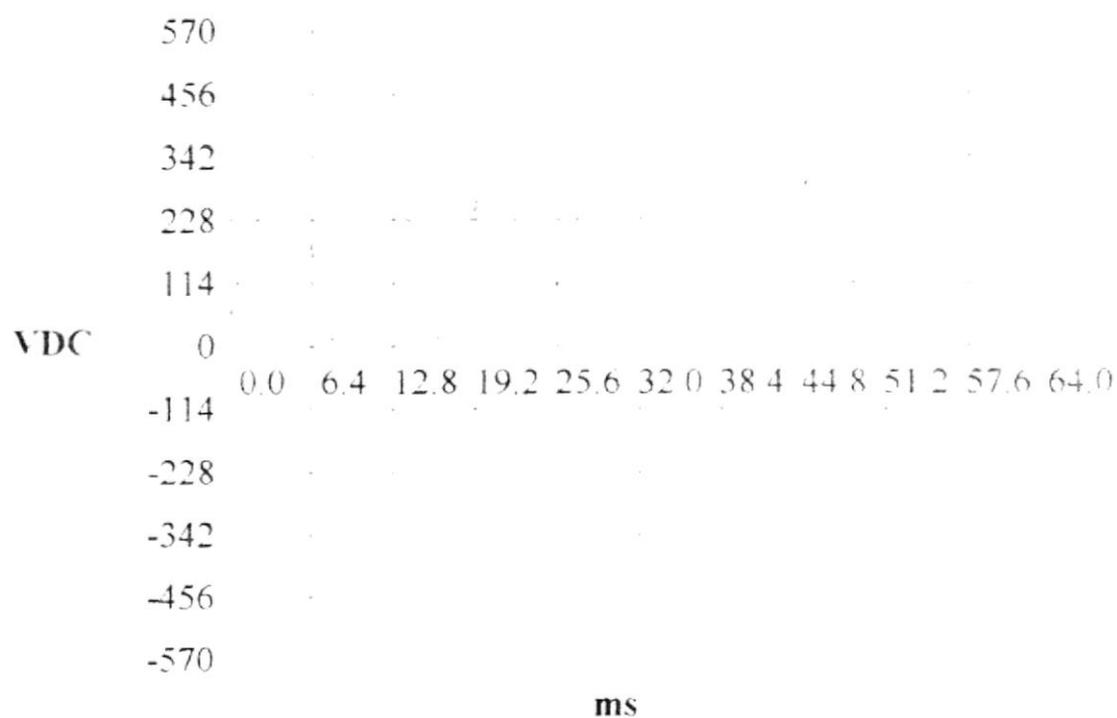
Se muestra las conexiones que deben realizarse en el rectificador monofásico de onda completa controlado completamente. Se utilizan 4 tiristores y sólo se necesita un transformador de sincronismo (T. S.). En este caso los tiristores trabajan por pares y los pulsos de disparo deben llegar simultáneamente a ambos.



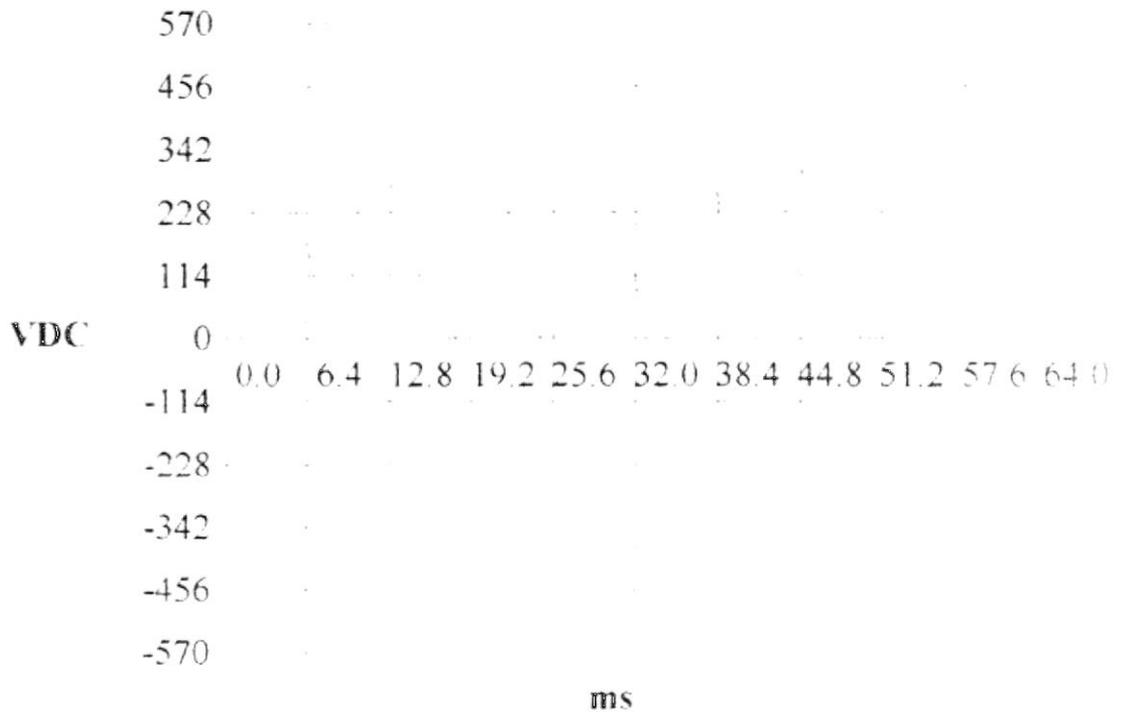
Realizar las siguientes conexiones adicionales:

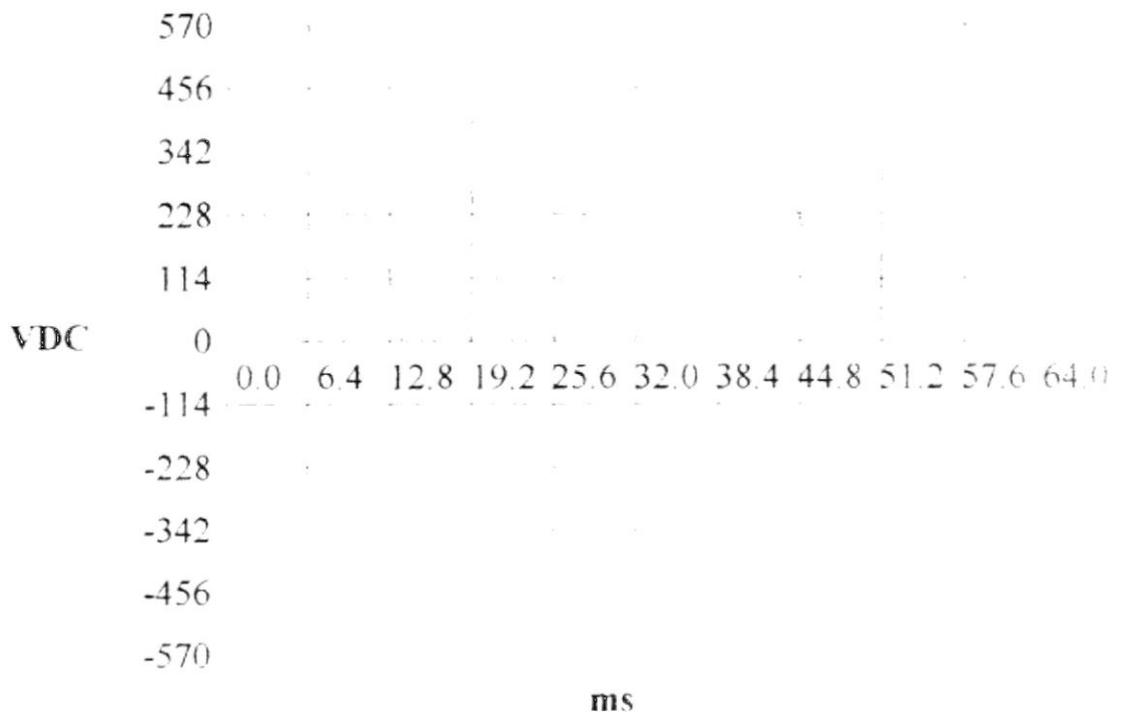
Po1_____Pe5

Po4_____Po2

6.4.1 CARGA: RESISTIVA R (149 Ω)6.4.1.a) ángulo de disparo es ($\alpha = 0^\circ$)

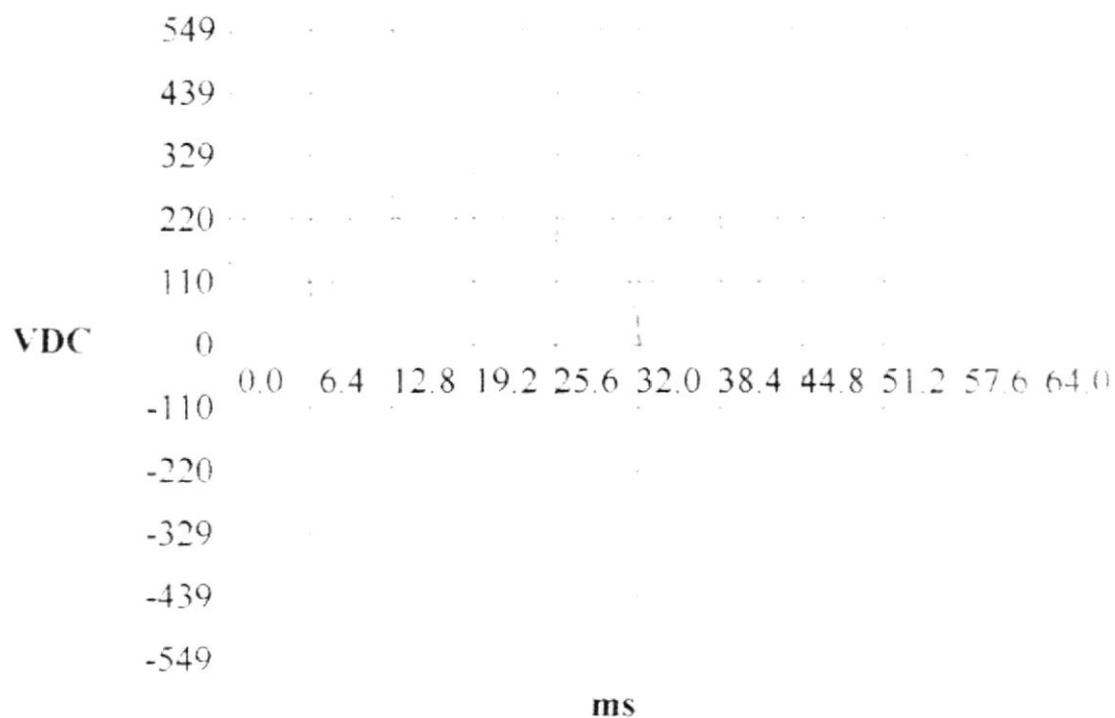
6.4.1.b) ángulo de disparo es ($\alpha = 45^\circ$)

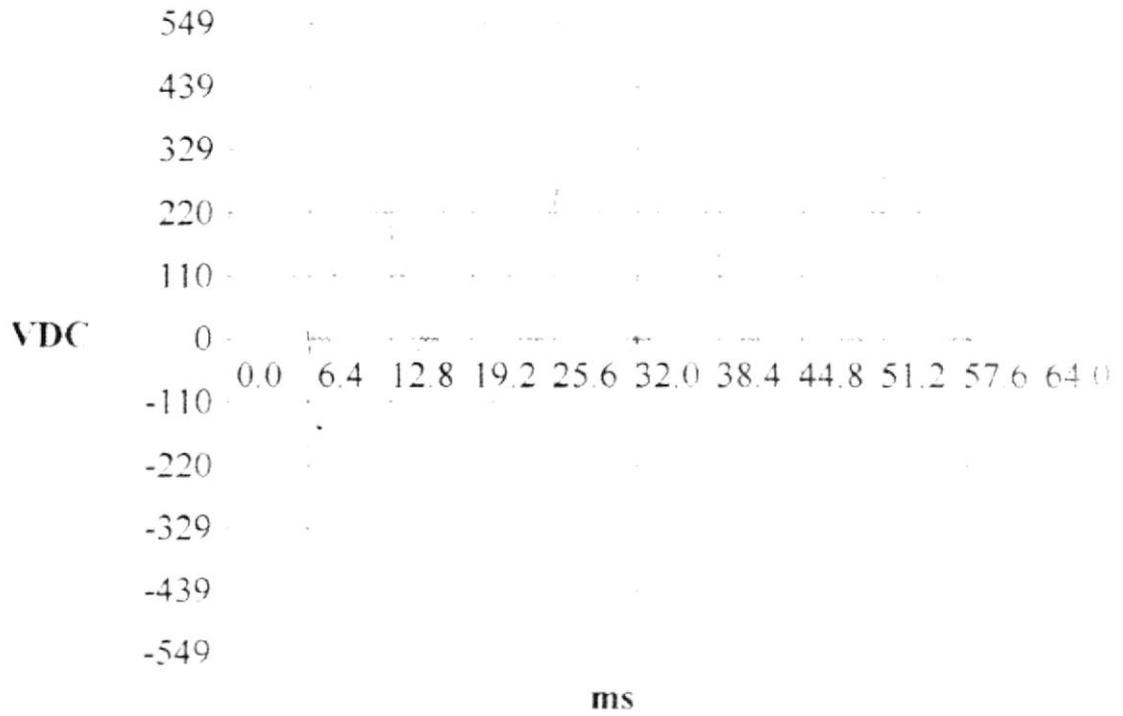


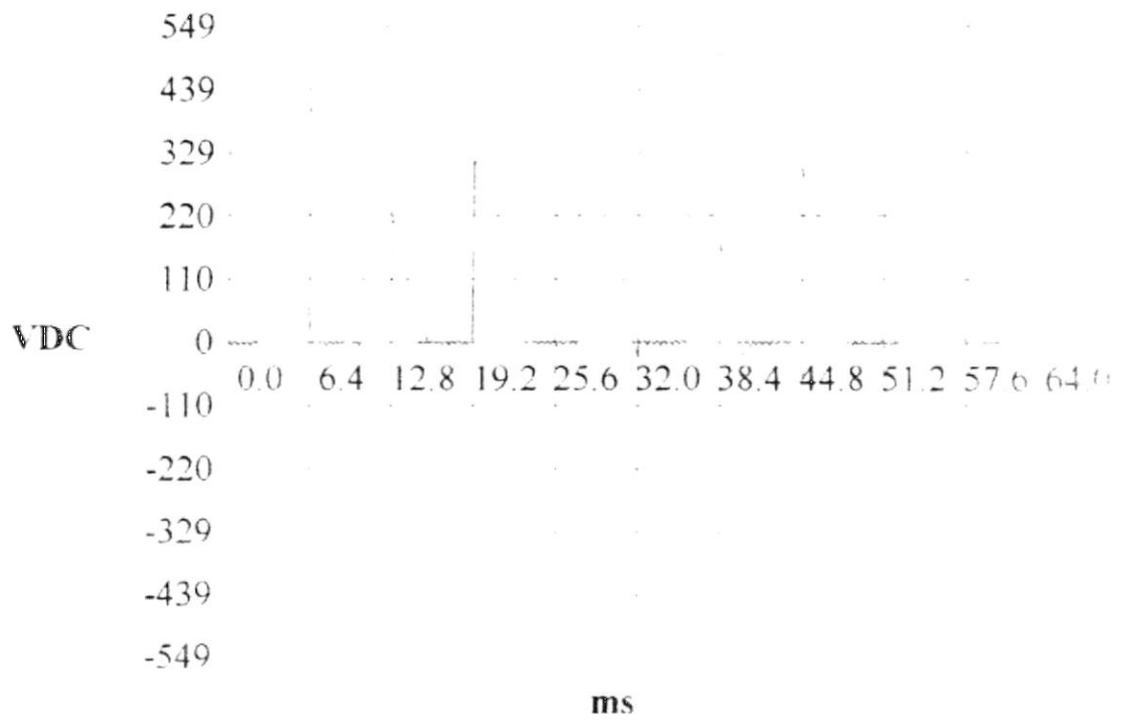
6.4.1.c) ángulo de disparo es ($\alpha = 90^\circ$)

6.4.2 CARGA: RESISTIVA E INDUCTIVA ($R_L = 149 \Omega$)

6.4.2.a) ángulo de disparo es ($\alpha = 0^\circ$)

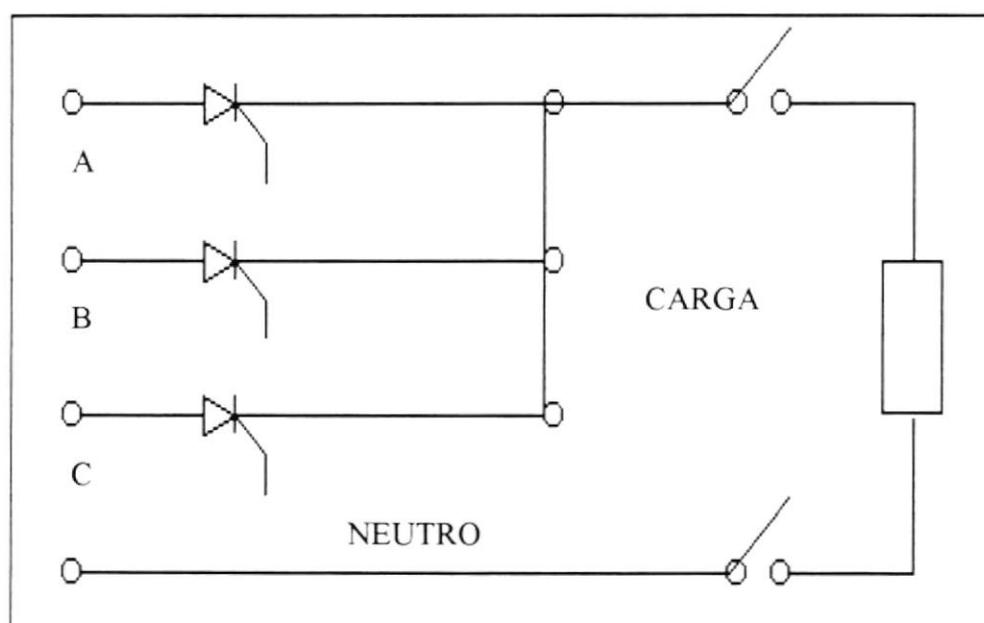


6.4.2.b) ángulo de disparo es ($\alpha = 45^\circ$)

6.4.2.c) ángulo de disparo ($\alpha = 90^\circ$)

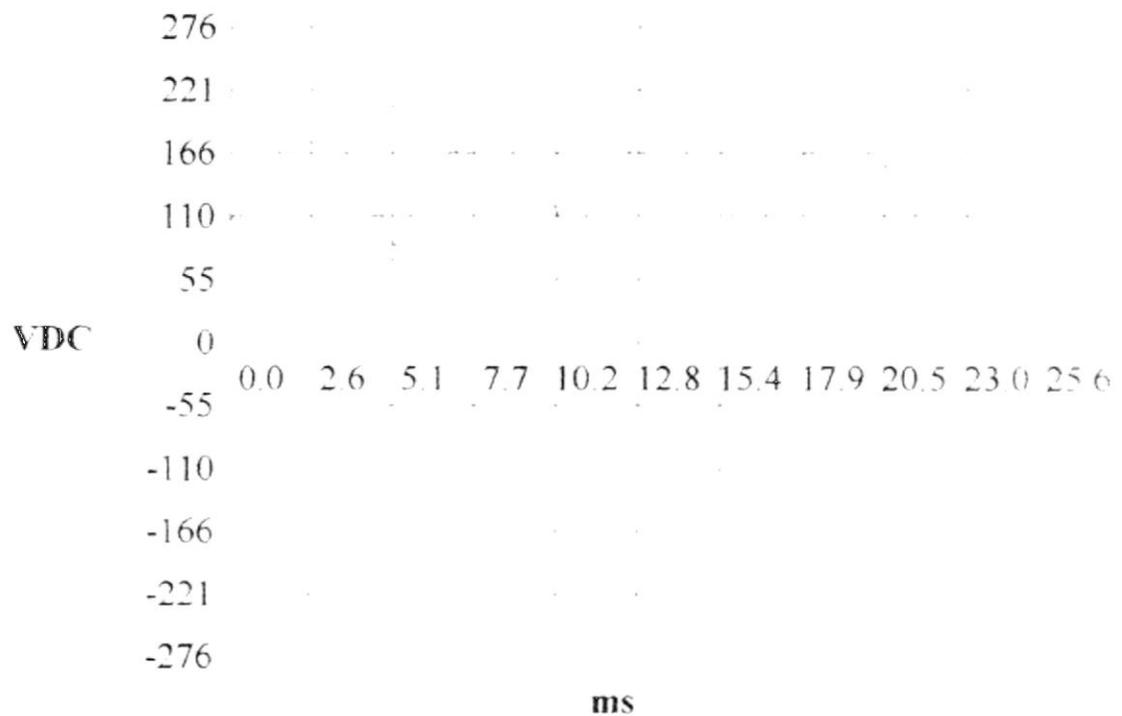
6.5 Rectificador trifásico de media onda.

Se muestra las conexiones necesarias para este caso. Los transformadores de alimentación deben tener los secundarios en estrella para poder obtener un neutro de retorno en la carga.

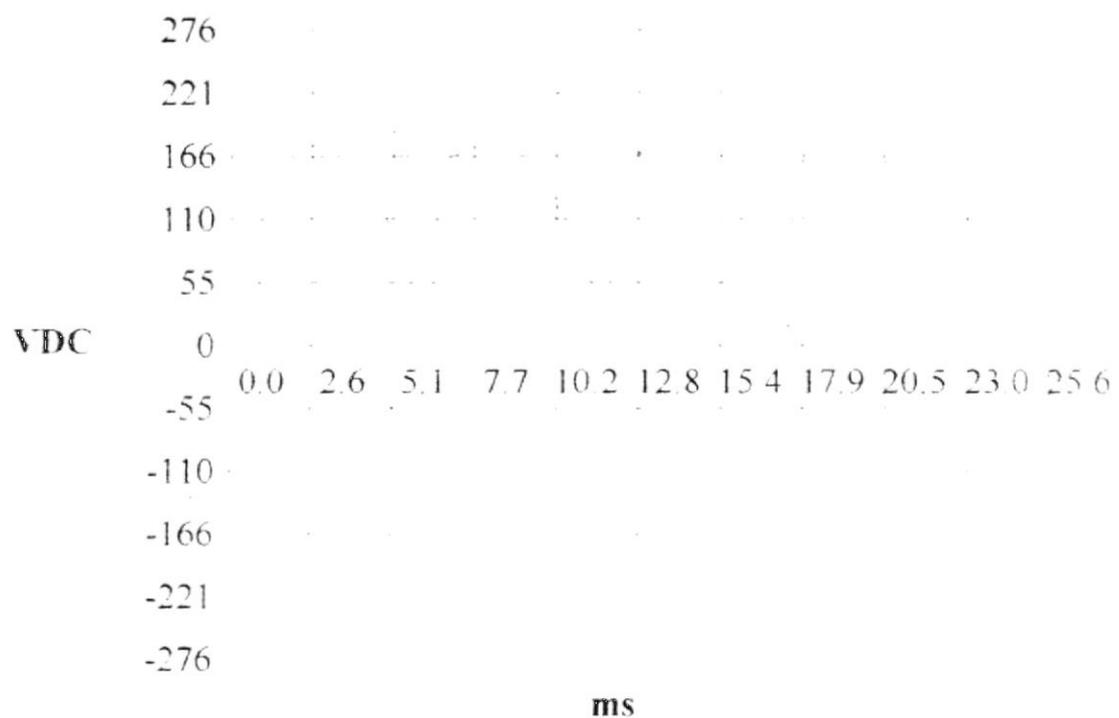


6.5.1 CARGA:RESISTIVA (R = 149 Ω)

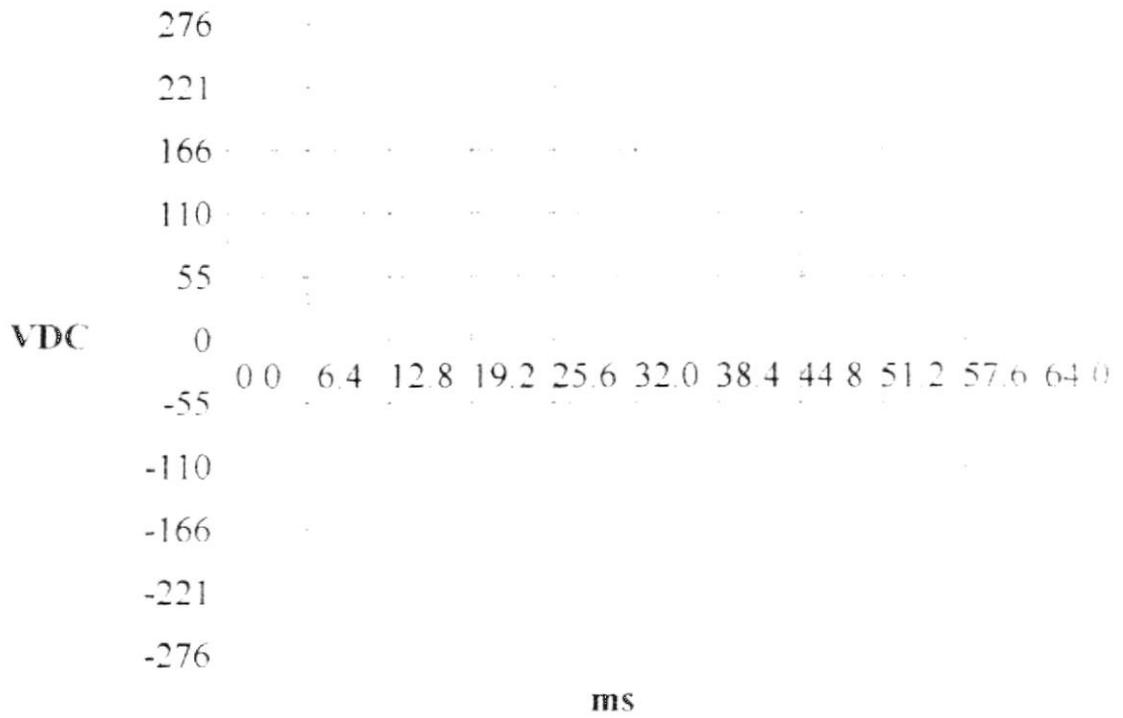
▣ 6.5.1.a) ángulo de disparo ($\alpha = 0^\circ$)



6.5.1.b) ángulo de disparo es ($\alpha = 45^\circ$)

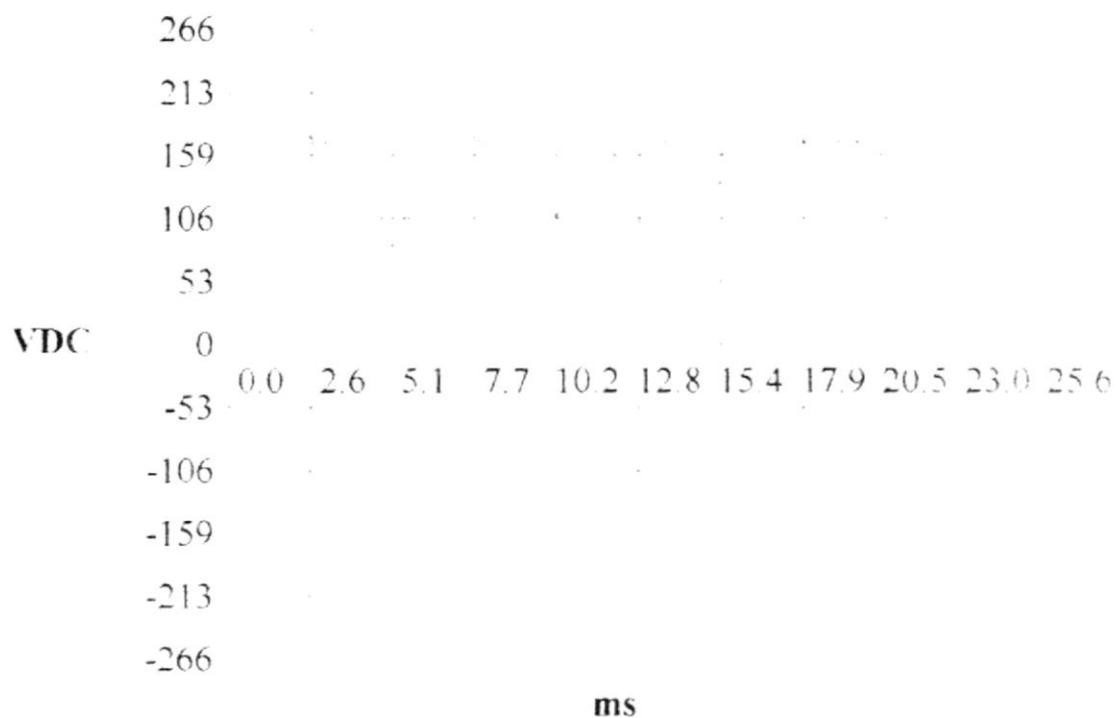


6.5.1.c) ángulo de disparo ($\alpha = 90^\circ$)

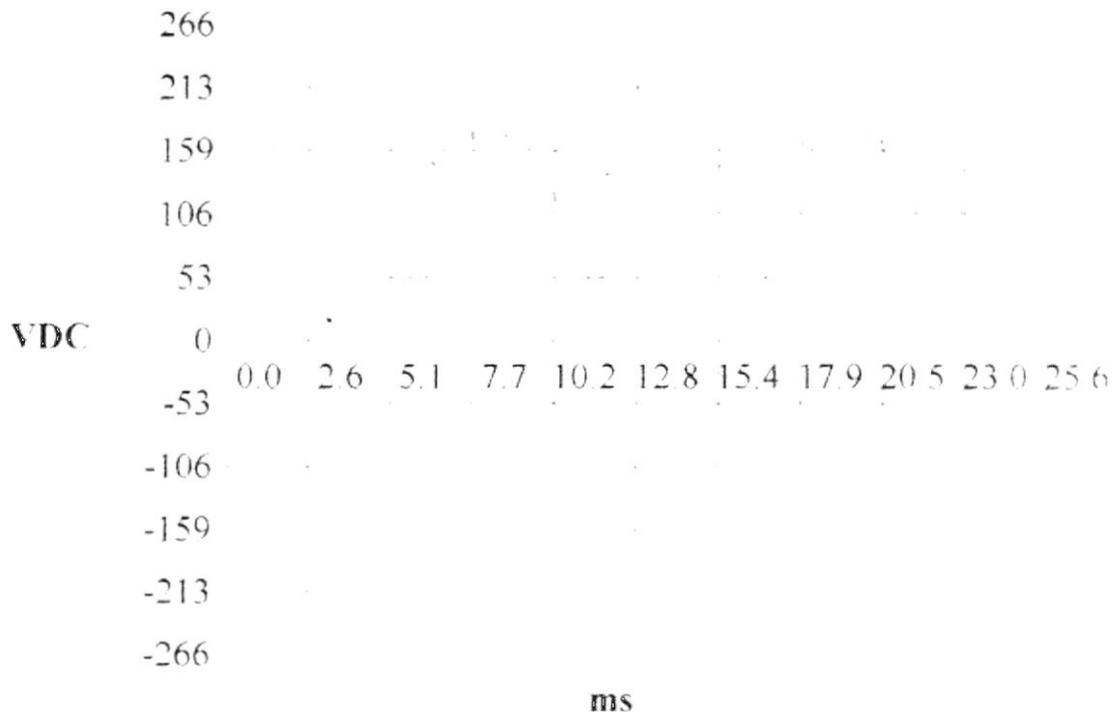


6.5.2 CARGA RESISTIVA INDUCTIVA ($R_L = 149 \Omega$)

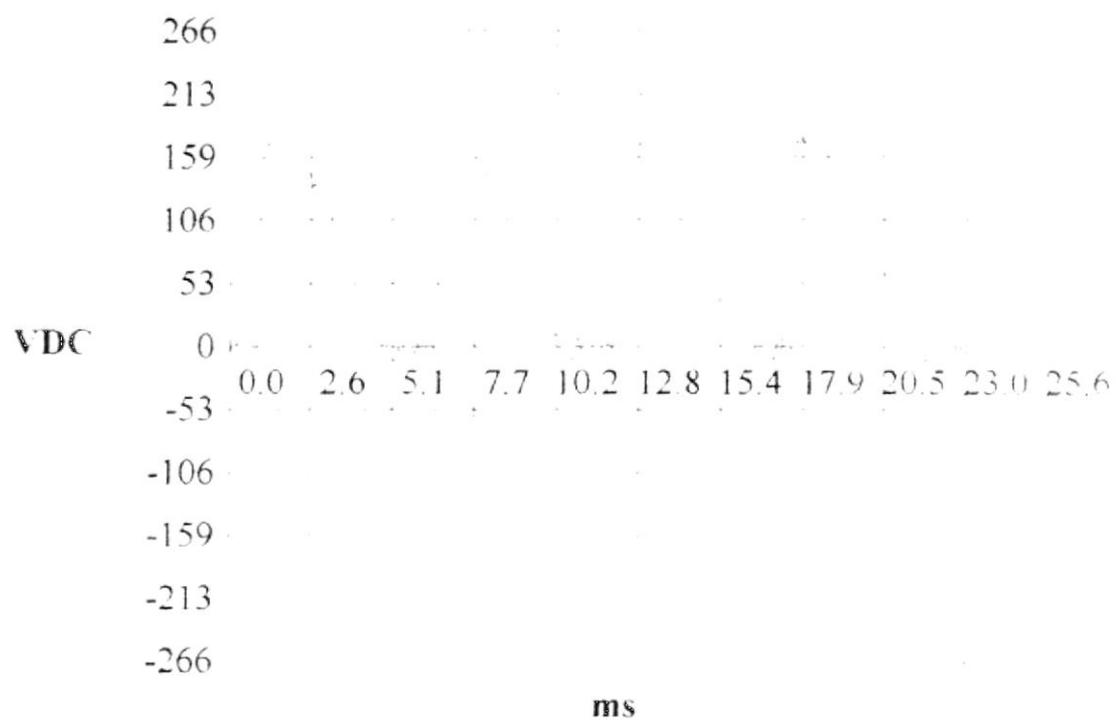
■ 6.5.2.a) ángulo de disparo ($\alpha = 0^\circ$)



▣ 6.5.2.b) ángulo de disparo ($\alpha = 45^\circ$)

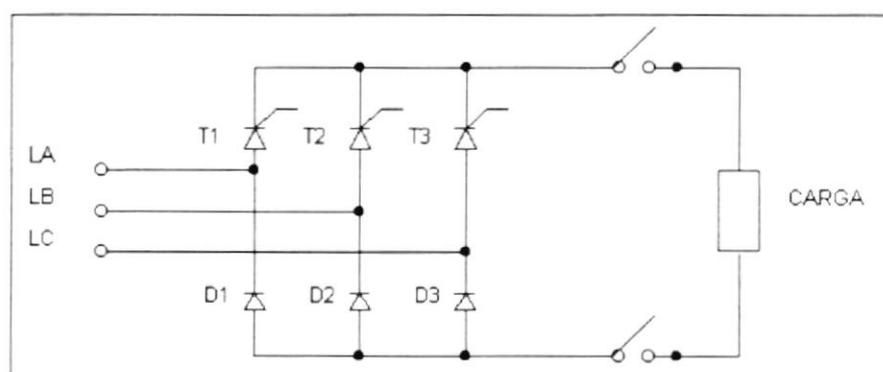


▣ 6.5.2.c) ángulo de disparo ($\alpha = 90^\circ$)



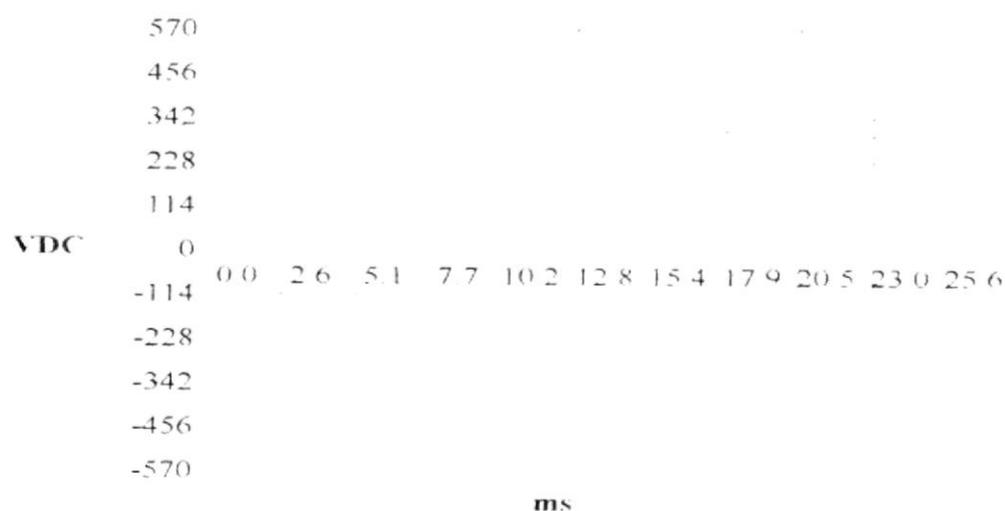
6.6 Rectificador trifásico onda completa semi-controlado

Se muestran las conexiones que deben realizarse. Se utilizan tres tiristores y tres diodos. Las formas de onda a la salida del convertidor para los tipos de rectificadores mencionados.

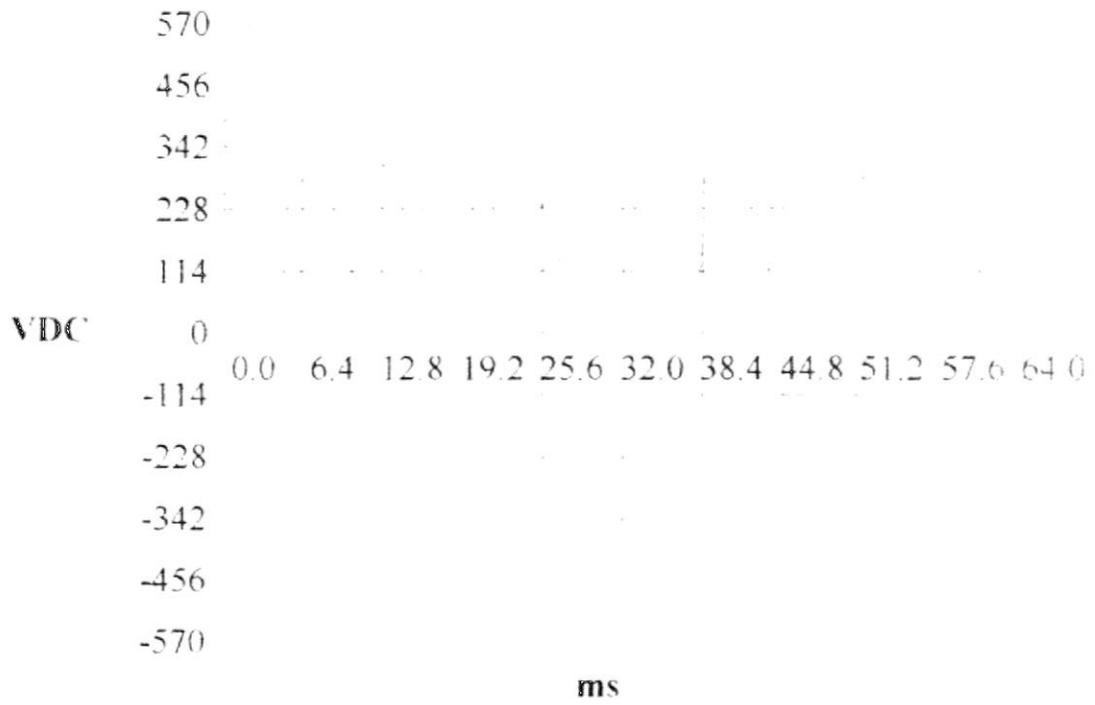


6.6.1 Carga resistiva

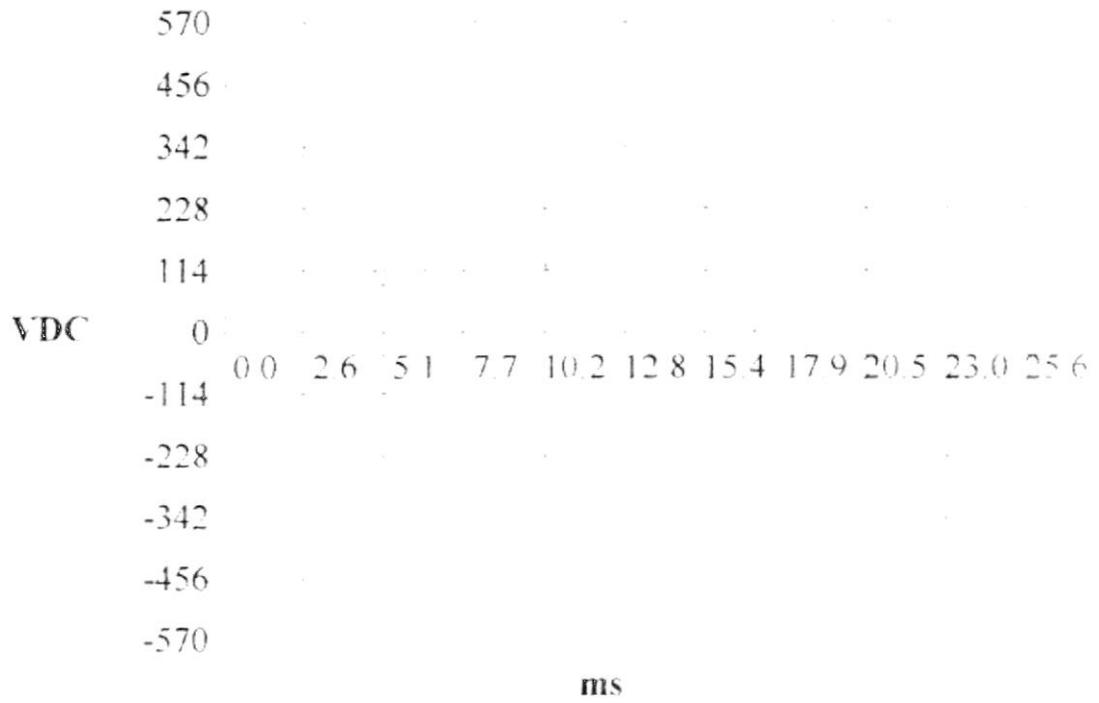
■ 6.6.1.a) ángulo de disparo ($\alpha = 0^\circ$)



6.6.1.b) ángulo de disparo es ($\alpha = 45^\circ$)

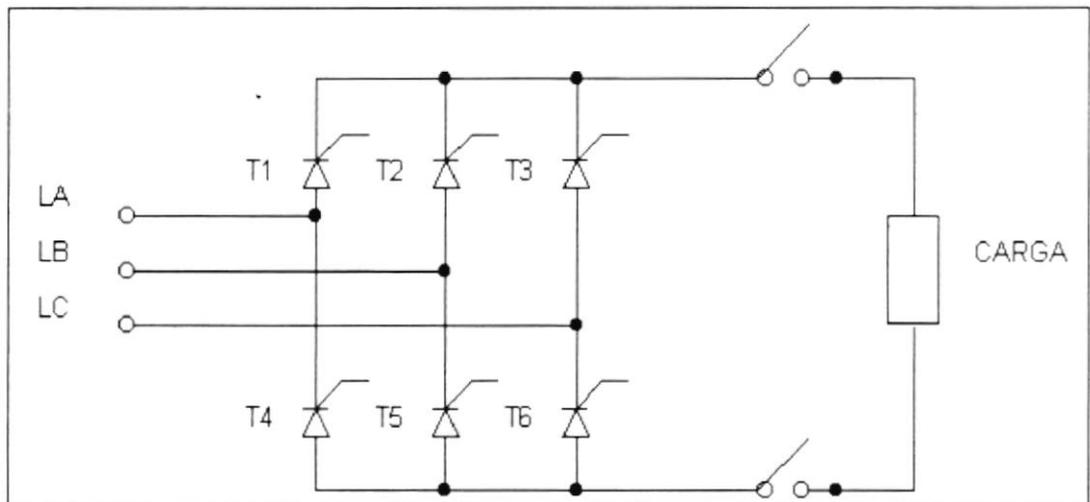


6.6.1.c) ángulo de disparo ($\alpha = 90^\circ$)



6.7 Rectificadores trifásico de onda completa, control completo.

Se muestra las conexiones necesarias. Se utilizan los tres transformadores de sincronismo con sus terminales centrales del secundario, para obtener sincronismo con las seis fases. Puesto que los tiristores trabajan por pares, se sincronizan los pulsos de disparo por medio de los terminales Po y Pe de cada circuito.

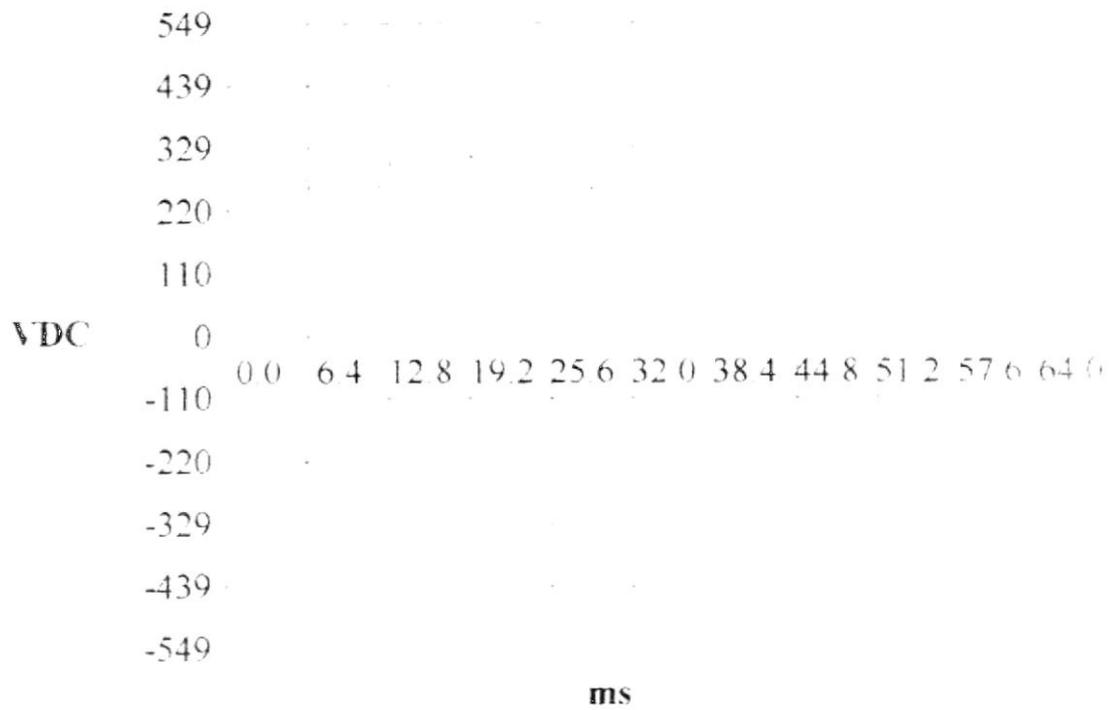


Realizar las siguientes conexiones adicionales:

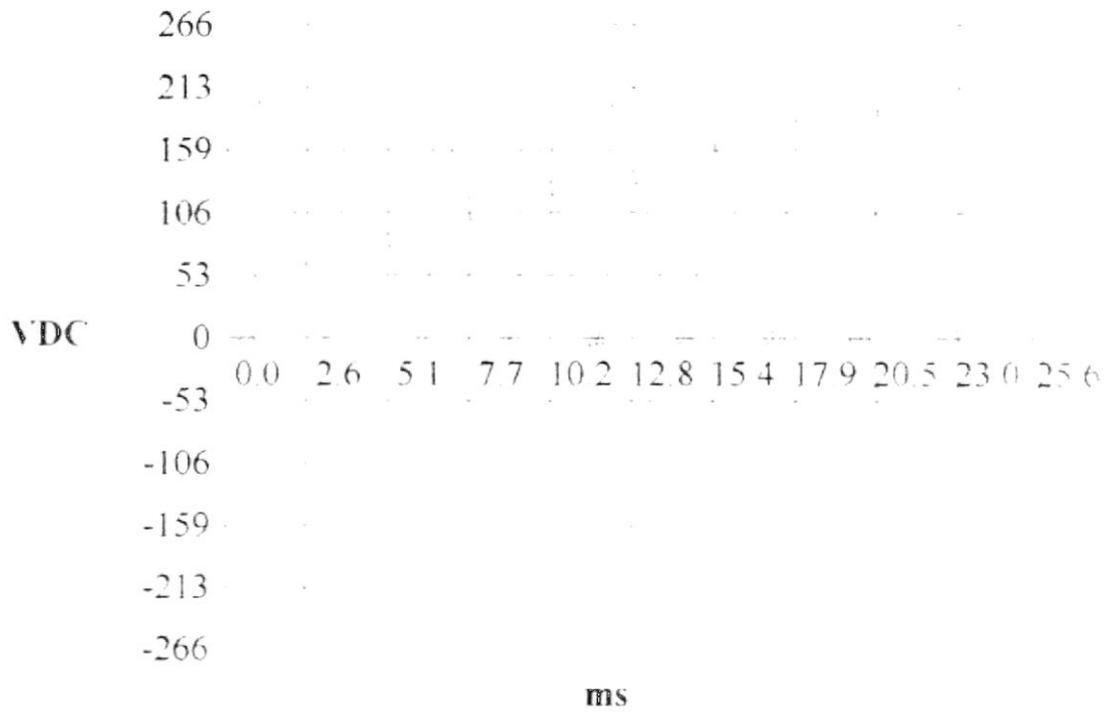
Pe1 _____ Po5 Pe3 _____ Po4 Pe5 _____ Po3
 Pe2 _____ Po6 Pe4 _____ Po2 Pe6 _____ Po1

6.7.1 Carga resistiva

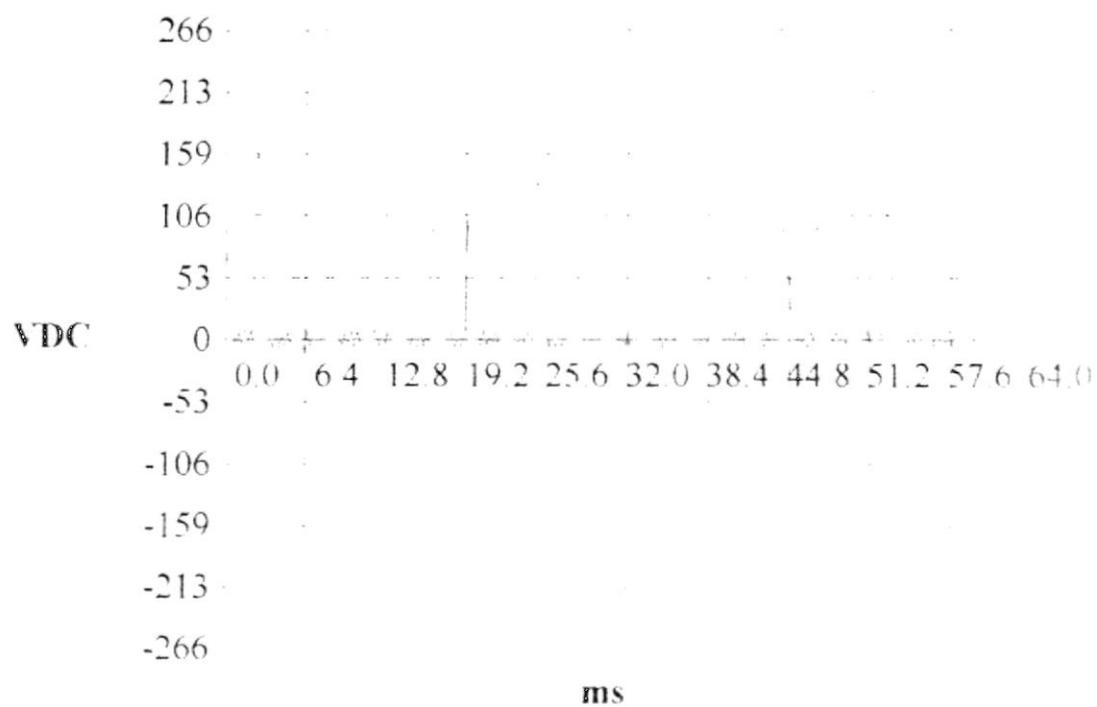
6.7.1 a) ángulo de disparo ($\alpha = 0^\circ$)



† 6.7.1.b) ángulo de disparo ($\alpha = 90^\circ$)

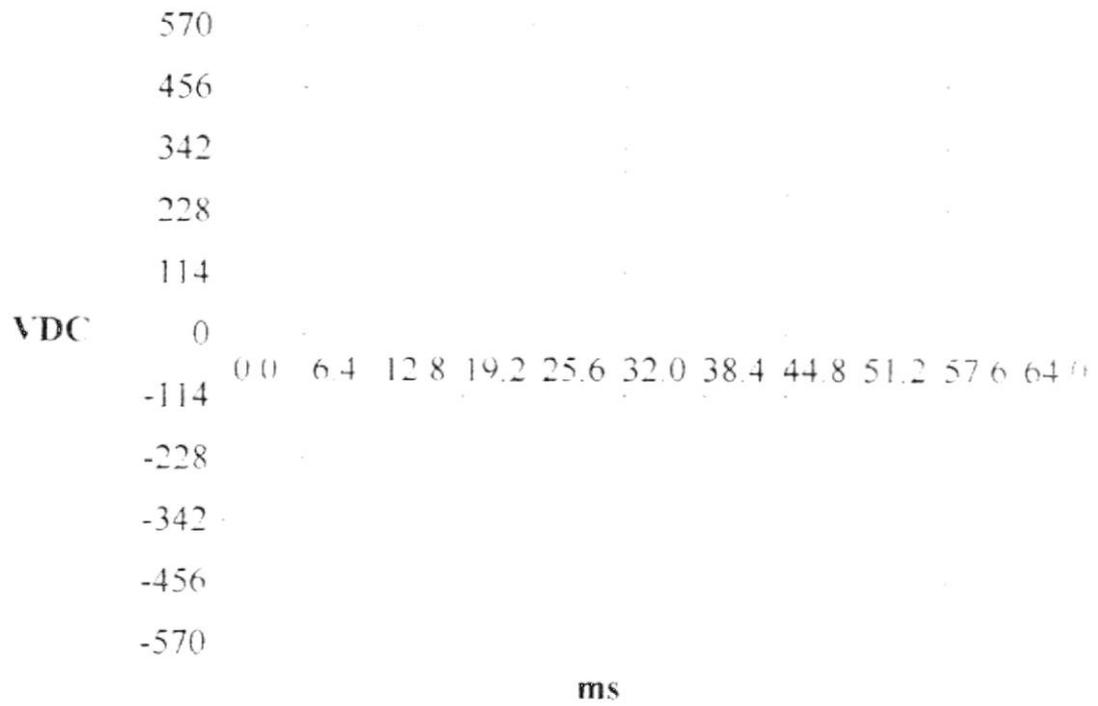


† 6.7.1.c) ángulo de disparo ($\alpha = 120^\circ$)

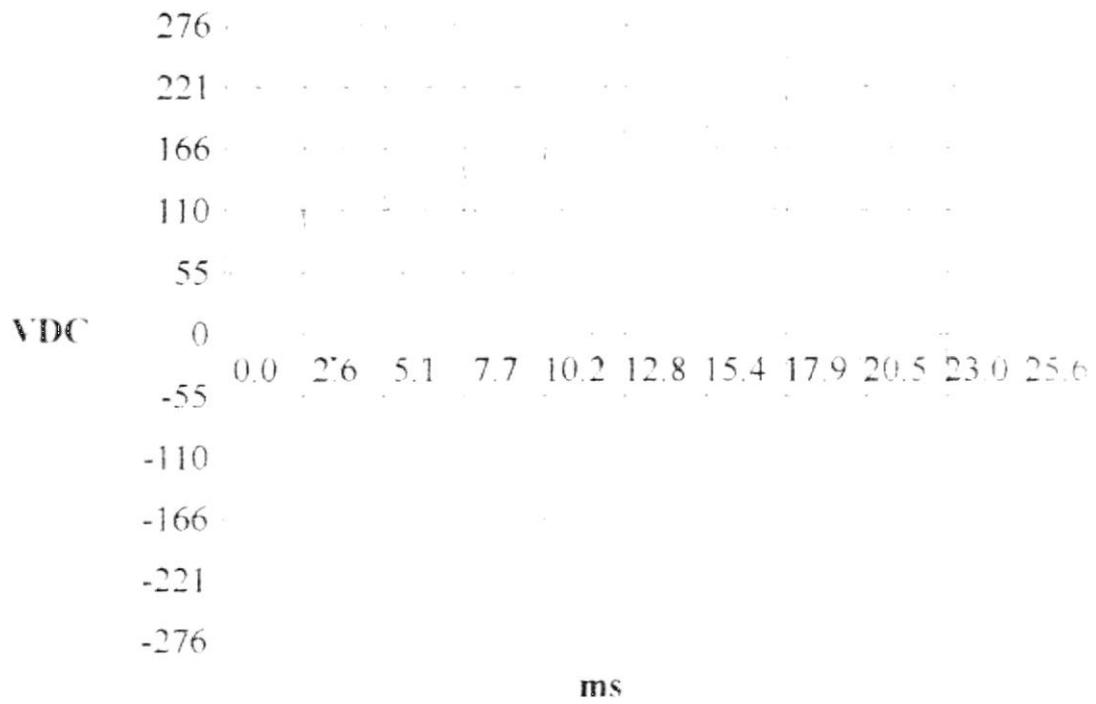


6.7.2 Carga : Motor dc

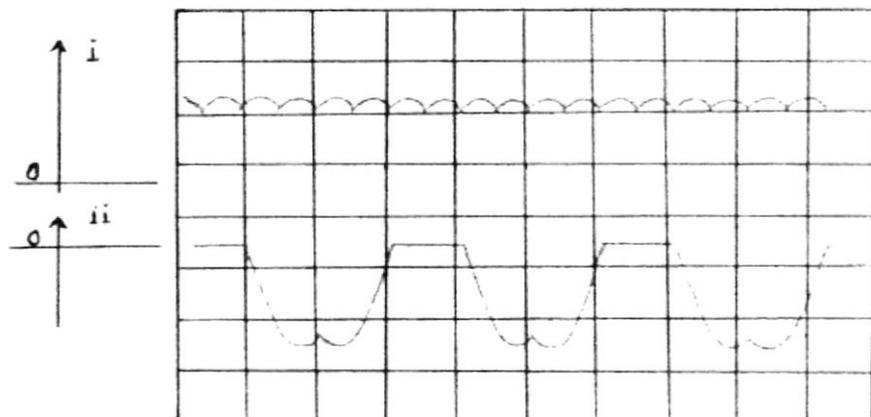
6.7.2.a) Angulo de disparo ($\alpha = 0^\circ$)



6.7.2.b) Angulo de disparo ($\alpha = 90^\circ$)

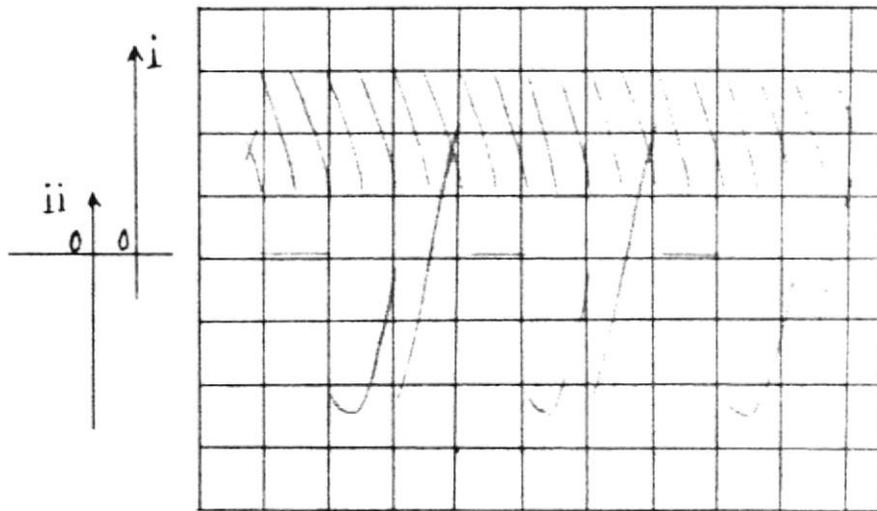


6.7.2.c) Angulo de disparo ($\alpha = 0^\circ$), i) salida del puente trifásico, ii) caída de tensión en el tiristor 1.



Escala horizontal: 5ms/div
Escala vertical : i) 100 V/div
ii) 100 V/div

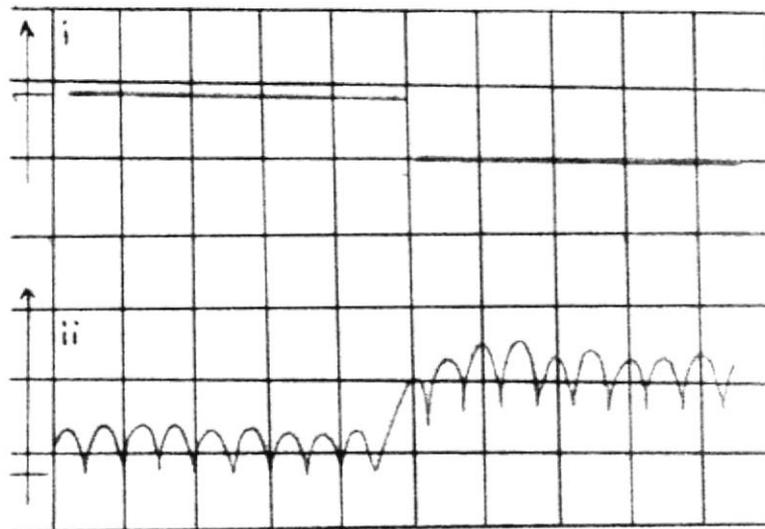
6.7.2.d) Angulo de disparo ($\alpha = 60^\circ$), i) salida del puente trifásico, ii) caída de tensión en el tiristor 1.



Escala horizontal : 5ms/div
Escala vertical : i) 70 V/div
ii) 80 V/div

6.7.3) Controlador de corriente.

6.7.3.a) $K_i=1.13$, i) referencia de corriente, ii) corriente de armadura.

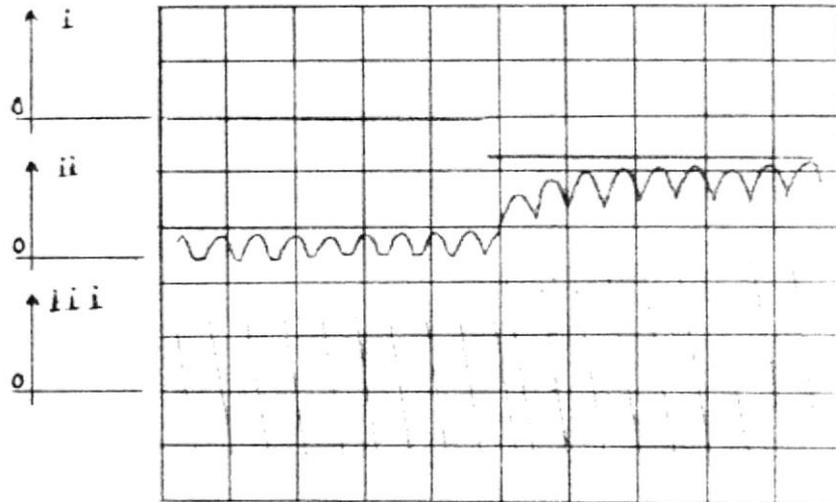


Escala horizontal : 5 ms/div

Escala vertical : i) 5 V/div

ii) 2.5 V/div

6.7.3.b) $K_i=1.13$, i) referencia de corriente, ii) corriente de armadura, iii) voltaje de armadura.



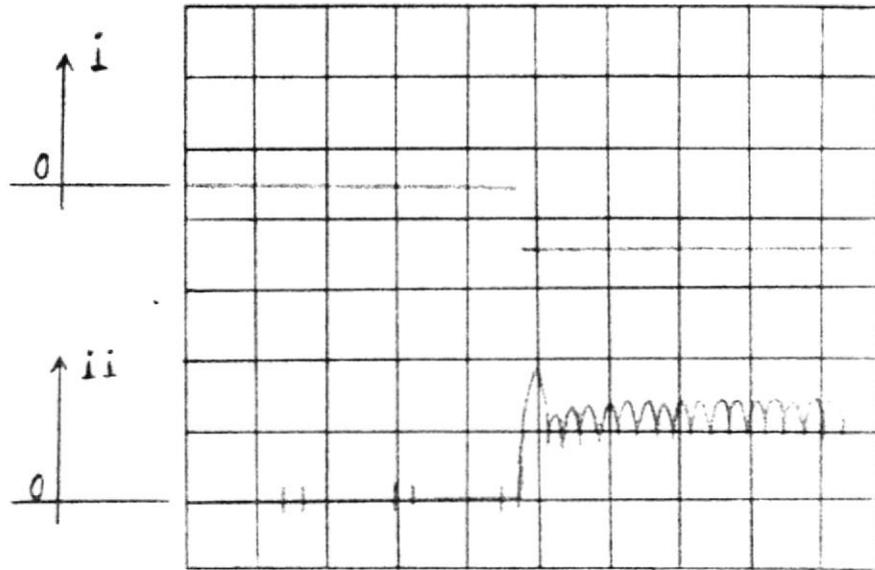
Escala horizontal : 5 ms/div

Escala vertical : i) 5 V/div

ii) 2.5 A/div

iii) 50 V/div

6.7.3.c) $K_i=3.54$, i) referencia de corriente, ii) corriente de armadura.

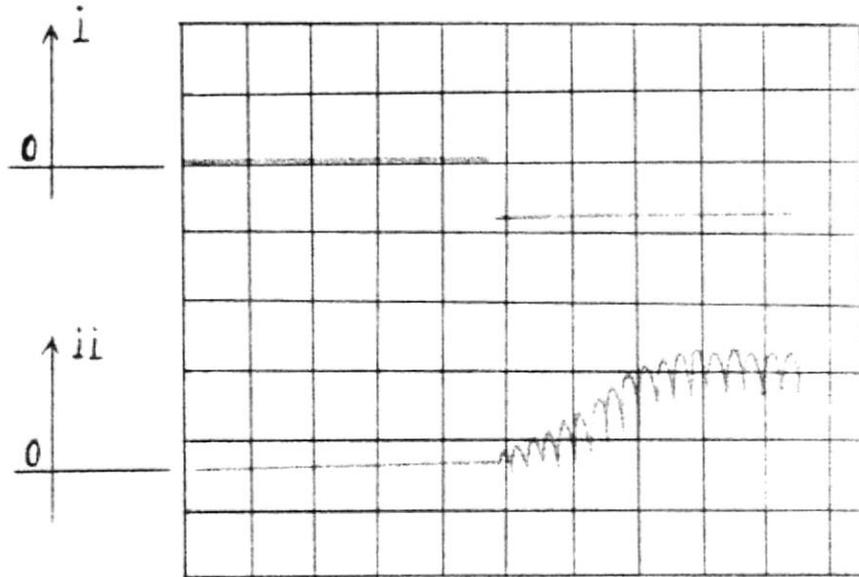


Escala horizontal: 10 ms/div

Escala vertical : i) 5 V/div

ii) 2.5 A/div

6.7.3.d) $K_i=0.43$, i) referencia de corriente, ii) corriente de armadura.



Escala horizontal: 10 ms/div
Escala vertical : i) 5 V/div
ii) 2.5 A/div

6.8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- 1) Los circuitos de control transistorizados proveen al sistema de un buen funcionamiento, alta confiabilidad y facilidad de uso.
- 2) La localización de fallas se ha facilitado con la disposición de puntos de prueba en los circuitos impresos.
- 3) La limitación de la corriente ofrece un excelente protección para el motor durante el periodo de arranque; sin embargo, influye en el tiempo de aceleración del motor.
- 4) Las diferencias que puedan existir entre los cálculos teóricos y los resultados experimentales se deben a la exactitud de los elementos utilizados y también a que el sistema ha sido aproximado a un modelo lineal de bajo orden, para facilitar el diseño.
- 5) No se ha realizado un análisis matemático profundo del sistema puesto que el interés del trabajo desarrollado es práctico y está destinado al laboratorio de controles Industriales Electrónicos de la ESPOL.

RECOMENDACIONES

- 1) Utilizar la alimentación trifásica de los laboratorios para alimentar al convertidor construido.
- 2) Utilizar el sistema completo de protecciones para el equipo.

ANEXO I

MANUAL PARA EL USUARIO

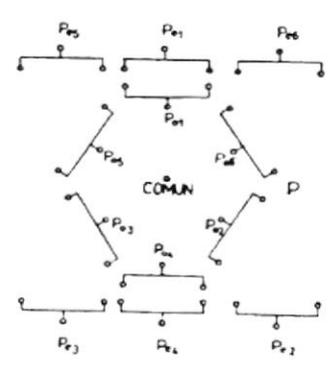
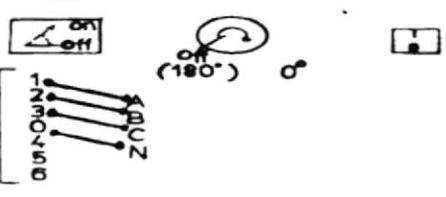
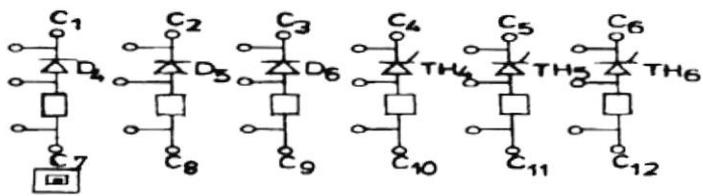
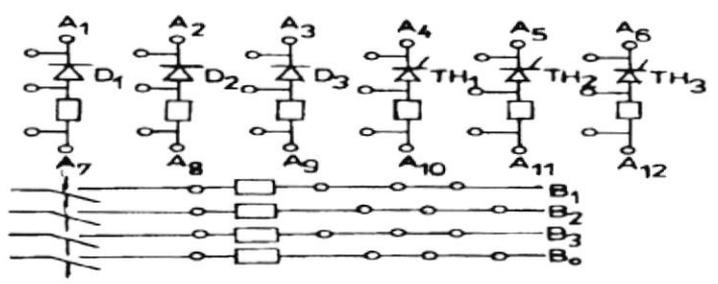
En esta sección se trata de explicar de manera clara mediante gráficos, las correctas conexiones que se deben realizar a fin de poder armar los diferentes tipos de rectificadores controlados, así como tratar de evitar cortos circuitos que puedan afectar al correcto funcionamiento del equipo diseñado.

Para todos los siguientes diseños seleccione la polaridad POSITIVA (+) y asegúrese de unir los puntos T1 (referencia) y T9 (Control de encendido de tiristores), asegúrese de que la perilla de control del ángulo de disparo este en la posición off (180°).

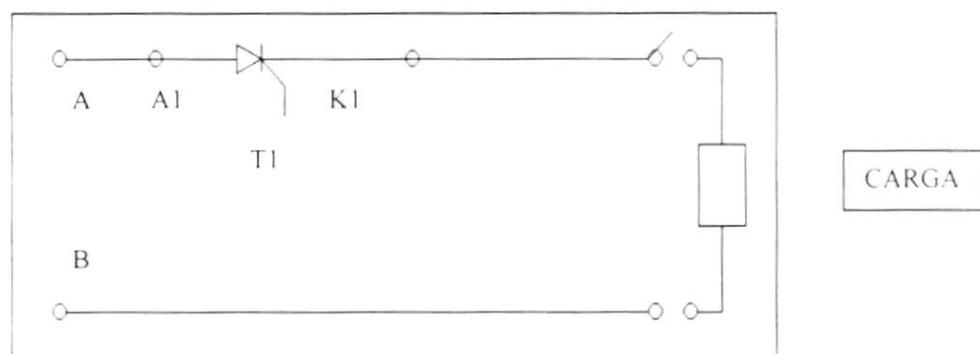
Utilizar la secuencia de fase como se indica en cada una de los diagramas siguientes, esto asegurará un correcto funcionamiento de cada circuito.

NOTA: Las conexiones a los GATE de cada tiristor son internas, no es necesario cablear.

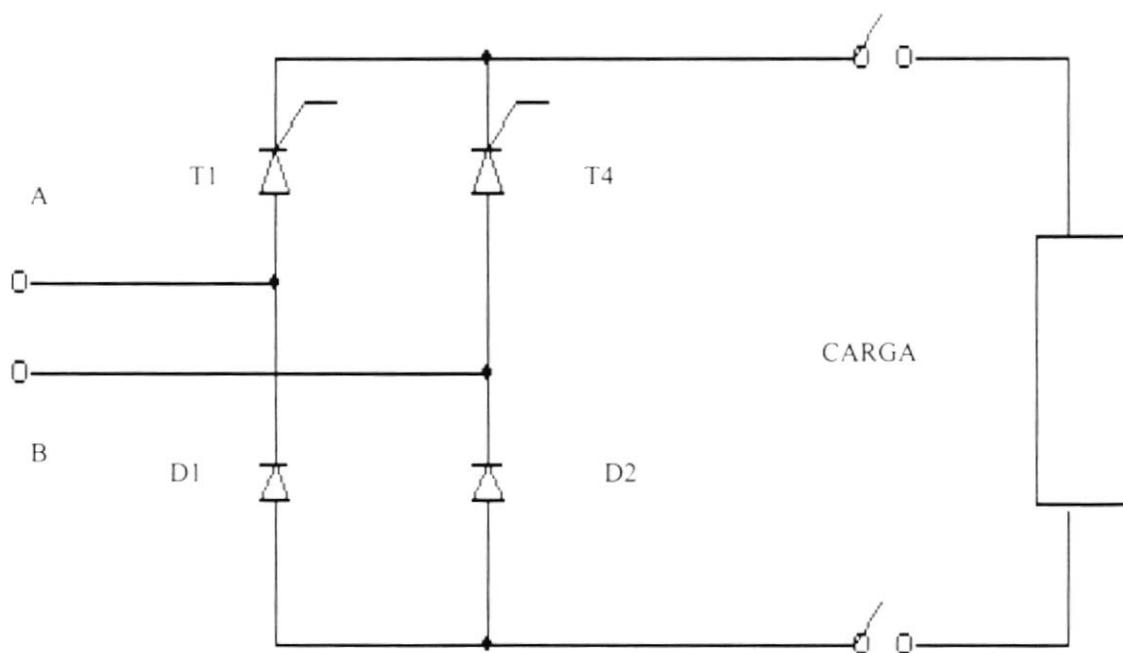
I.1 Distribución de los elementos en el panel frontal



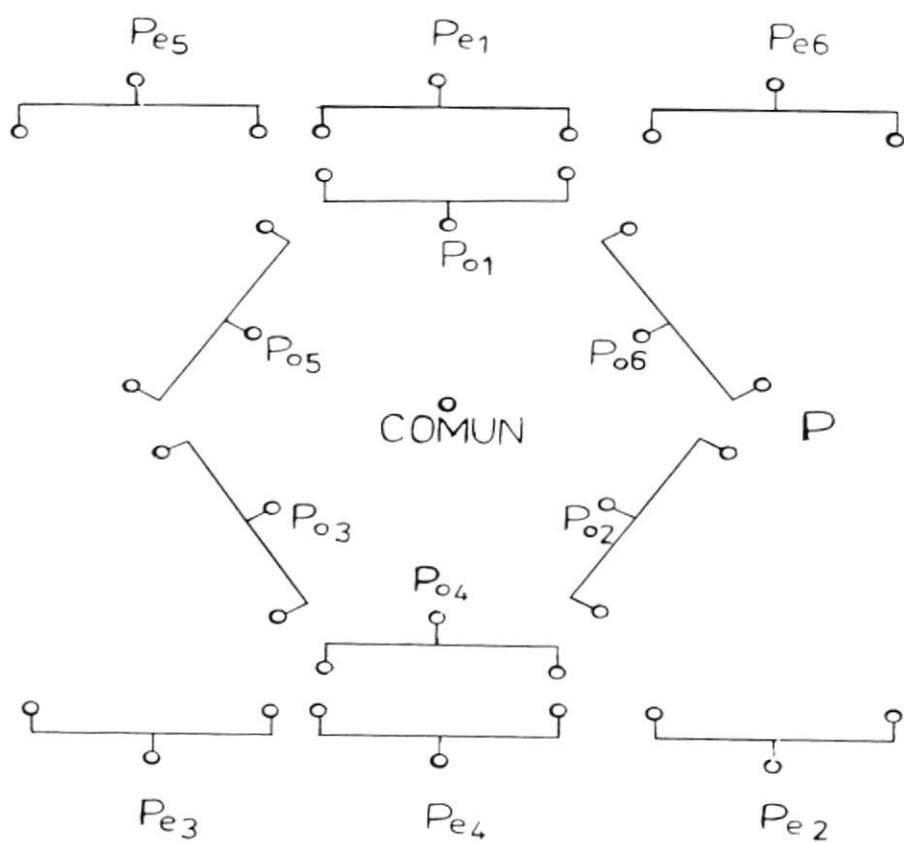
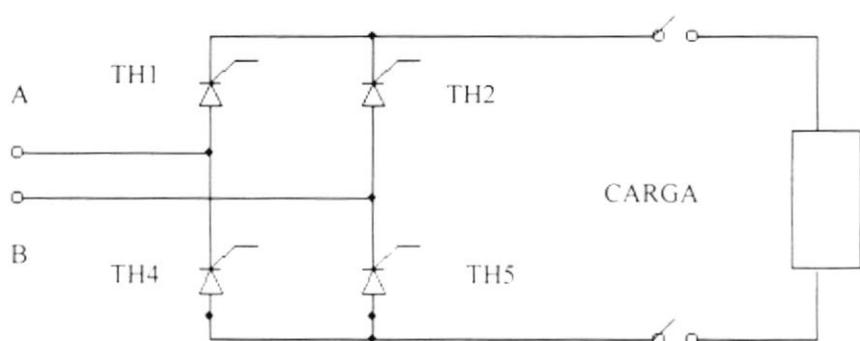
I.2 Rectificador monofásico de media onda



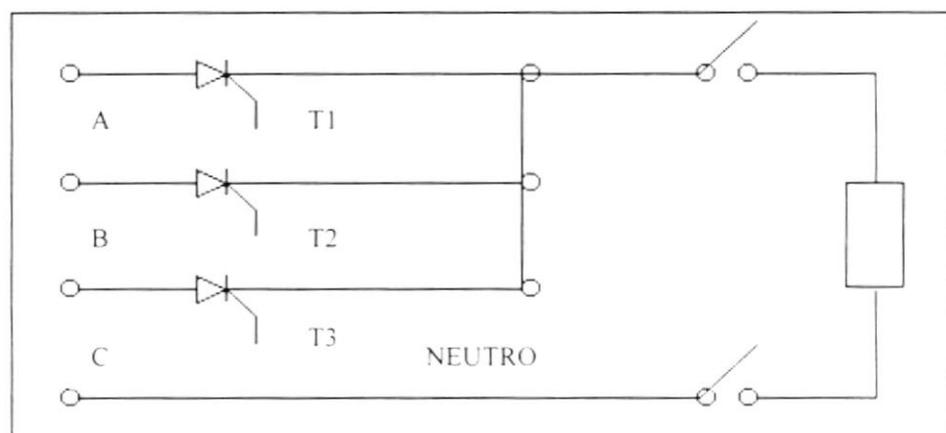
I.3 Rectificador monofásico de onda completa semicontrolado



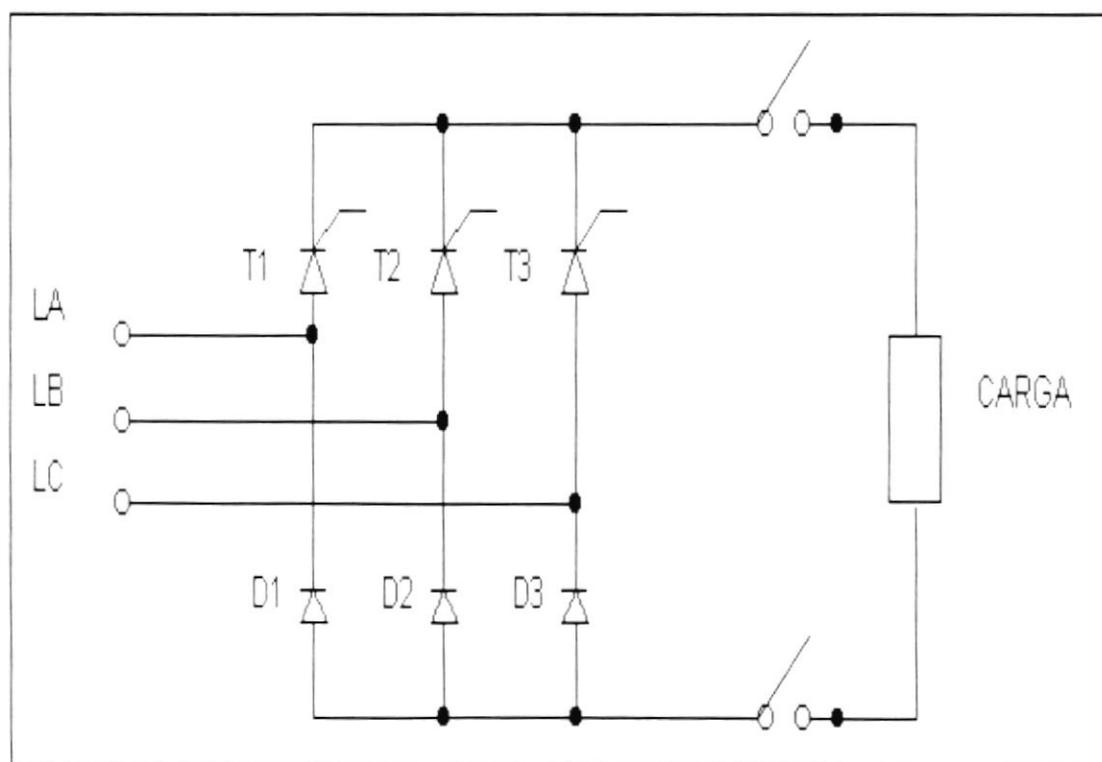
I.4 Rectificador monofásico de onda completa, control completo.



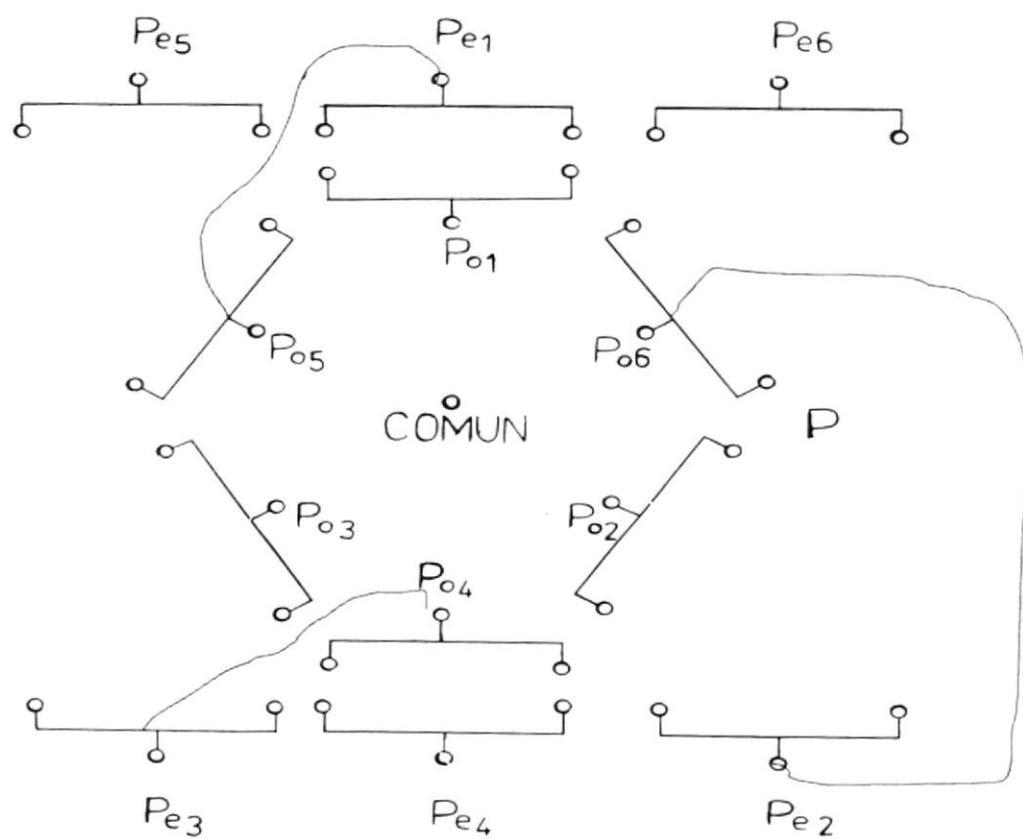
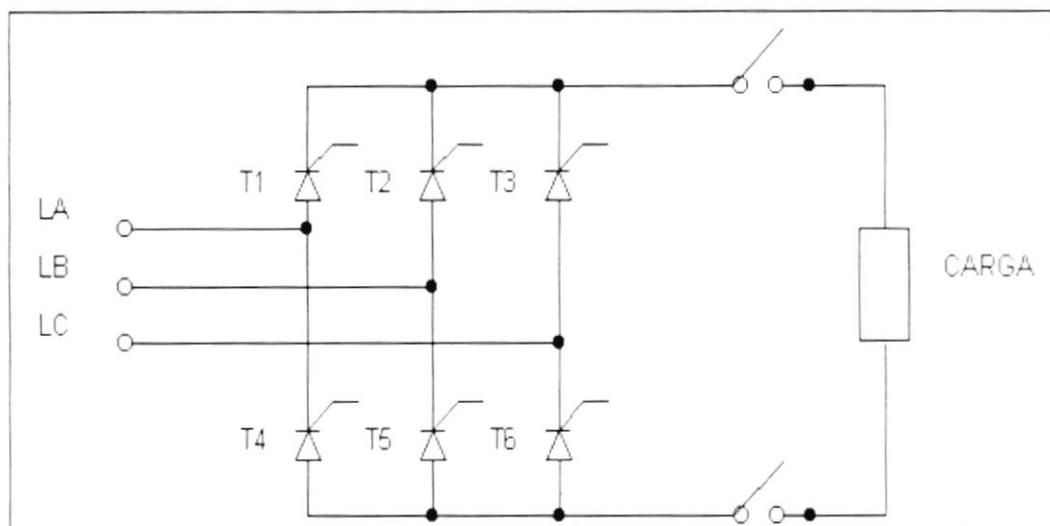
I.5 Rectificador trifásico de media onda.



I.6 Rectificador trifásico de onda completa, semicontrolado.



1.7 Rectificador trifásico onda completa, control completo

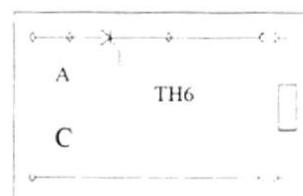
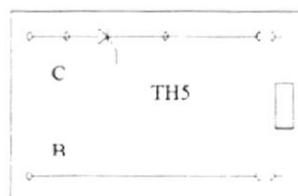
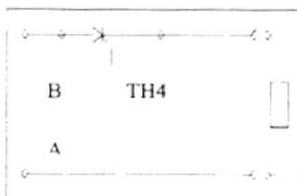
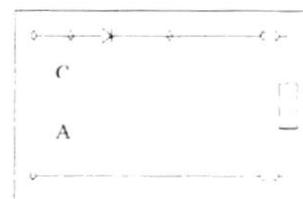
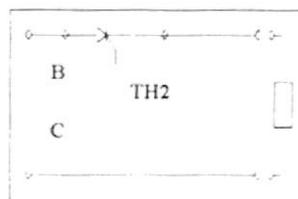
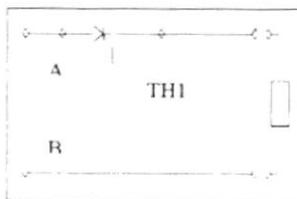


ANEXO II

PROCEDIMIENTO PARA DETENCION Y REPARACION DE AVERIAS EN EL EQUIPO DISEÑADO.

En caso de presentarse alguna falla en el equipo diseñado se recomienda seguir el siguiente procedimiento para la localización y corrección de fallas: .

- 1) Revisar el estado de todos los fusibles localizados en la parte posterior – superior del equipo.
- 2) Proceder a poner en funcionamiento independiente cada uno de los tiristores para ello se formará un puente monofásico de media onda, utilizando como carga una resistencia con un valor aproximado de 100 ohm.



Se debe tener presente que la perilla de control de ángulo de disparo debe estar en la posición off = 180 .

3) Con el empleo de un osciloscopio proceder a observar la señal en la carga, lo cual nos puede dar los siguientes diagnósticos:

3.1) Si estando la perilla en off = 180 se observa la onda seno completa , esto nos indica que el tiristor esta en corto-circuito y se debe proceder a su inmediata reposición.

3.2) Si al variar el control del ángulo de disparo, observamos que poco a poco se comienza a formar el semiciclo positivo de la onda se debe proceder a la revisión de los restantes tiristores y sus circuitos de disparo.

3.3) Cuando se varia la perilla de control y no se observa ninguna señal en el osciloscopio, se debe proceder a la inmediata revisión de la tarjeta de control de disparo correspondiente.

- 4) Para localizar las fallas en las tarjetas controladoras conectar la tierra del osciloscopio (aislado) al punto común localizado en la parte frontal del equipo.

Observe la señal de entrada en el pin 2 del primer LM741 esta debe ser una señal seno aproximadamente 12 voltios. La salida en el pin 6 es una onda cuadrada, sino es así proceder a cambiar el integrado.

Por el pin 6 del LM741 se debe tener una onda triangular de aproximadamente 12 voltios, sino es así cambia el integrado, si la señal requerida aún no aparece cambiar el transistor que esta conectada entre pines 6 y 2 del LM741.

Si aún no se ha localizado la falla observar la salida por el pin 6 del LM741(#3) debe observarse una señal con periodo variable cuando se modula sobre la perilla de control de ángulo de disparo, si no ocurre esto procede a reponer el integrado.

Procedimiento con el análisis de la tarjetas de control de disparo, observar la salida por el pin 3 del integrado 555 se debe poder apreciar una onda de ancho variable para luego desplazarse cuando se modula el ángulo de disparo.

Al llegar a esta etapa el error debe haber sido localizada.

Si la falla persiste compruebe el estado del Darlington (D1273) y del transistor (C2688) que están a la entrada de la etapa de amplificación de pulsos.

Se sigue el mismo procedimiento en cada una de las tarjetas controladoras.

Nota: El proceso de reparación debe ser realizado por estudiantes de los últimos niveles y con una experiencia previa en mantenimiento de equipos electrónicos.

ANEXO III

□ DATOS DEL TIRISTOR TIPO SON VALORES MAXIMOS

- ✓ VOLTAJE REPETITIVO DE PICO INVERSO (VRSOM)
Puerta abierta 700V
- ✓ VOLTAJE NO REPETITIVO, ESTADO APAGADO (VSSOM)
Puerta abierta 700 V
- ✓ VOLTAJE DE PICO INVERSO REPETITIVO, (VRROM)
Puerta abierta 600 V
- ✓ VOLTAJE DE PICO REPETITIVO, ESTADO APAGADO(VDROM)
Puerta abierta 600 V
- ✓ CORRIENTE, ESTADO ENCENDIDO
Tc = 65 C, ángulo de conducción: 180
I (rms) 35 A
I (dc) 22 A
- ✓ CORRIENTE DE PICO NO REPETITIVO, ESTADO ENCENDIDO
Para un ciclo completo de voltaje aplicado, Tc = 65 C
60 Hz (sinusoidal) 350 A
50 Hz (sinusoidal) 300 A
- ✓ RAZON DE CAMBIO DE CORRIENTE, ESTADO ENCENDIDO (di/dt)
Vd= VDROM, Ig = 200 ma, Tiempo de subida: 0,5 us 200 A/us
- ✓ CORRIENTE DE FUSION (para protección del SCR) (i²t)
Tj= -40 a 100o C, t=1 a 8.3 ms 300 A²S
- ✓ DISIPACION DE POTENCIA DE PUERTA
De pico en sentido directo (para 10 us max) (PGM) 40 W
Promedio (para 10 ms max) (Pgav) 0.5 W
- ✓ RANGO DE TEMPERATURA
Almacenamiento (Tstg) -40 a 125°C
Operación (Tc) -40a 100 °C
- ✓ TEMPARATURA DE TERMINAL durante soldadura (Tt)
Para 10 segundos max. 225°C

BIBLIOGRAFIA

1. Boylestad Robert, Electrónica y teoría de circuitos, cuarta edición, págs 704 a 740.
2. Dorf R, Sistemas automáticos de control, teoría y práctica, págs 98 a 99, 127 a 133, 263, 379 a 380.
3. Driscoll Frederick F., Coughlin Robert F., amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales, Cuarta edición, págs 149 a 178, 182 a 206, 454 a 484, apéndice 5.
4. Gingrich Harold W, Máquinas eléctricas, transformadores y controles, Págs. 310 a 333.
5. Rashid Muhammad H, Electrónica de potencia, circuitos, dispositivos y aplicaciones, segunda edición, Págs. 130 a 186, 493 a 540.
6. Séguier G, Electrónica de potencia, colección semiconductores, Págs. 136 a 178.
7. WWW.datasheetlocator.com.



A.F. 141808

