

ESUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

"CONSTRUCCION DE UN CONTROL DE TIRISTORES PARA EL USO
EN EL LABORATORIO DE CONTROLES INDUSTRIALES ELECTRONICOS".

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO EN ELECTRICIDAD

ESPECIALIZACION: ELECTRONICA

Presentada por:

JULIO FERNANDO BURGOS MOSQUERA

GUAYAQUIL - ECUADOR

1.985

A G R A D E C I M I E N T O

Mi especial agradecimiento
al ING. RODRIGO BERREZUETA,
Director de Tesis.

Al ING. ALBERTO LARCO G. ,
Profesor del Laboratorio de
Controles Electrónicos.

A los compañeros del Taller
Eléctrico, y a todas las de
más personas que hayan con
tribuido en la realización
de este trabajo.

DEDICATORIA

A MI MADRE



.....
Ing. G. Hermudez F.
SUB-DECANO



.....
Ing. R. Berrezueta P.
DIRECTOR DE TESIS



.....
Ing. A. Larco
M. PRINCIPAL



.....
Ing. N. Chootong Ch.
M. PRINCIPAL.

DECLARACION EXPRESA

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

(Reglamento de Exámenes y Títulos profesionales de la ESPOL).



.....

J. FERNANDO BURGOS M.

RESUMEN

El objetivo de esta tesis es la construcción de un equipo de control de tiristores a base de la variación del ángulo de disparo. El equipo cuenta de seis BCHs por lo cual se necesitan también la misma cantidad de pulsos de disparo. Estos son producidos de a 2 por cada fase de control y estarán desfasados 180° entre sí.

El sincronismo entre el sistema de control y el de fuerza se realiza a través de tres transformadores con toma central y que conforman dos configuraciones estrella en contrafase.

El sistema de control tendrá una parte analógica y una digital (TTL) y su interconexión se hará a través de terminales externos llamados "P" y "G".

El sistema de control es alimentado por medio de una fuente de +5 V., mientras que las fuentes de ± 15 V. son utilizadas para alimentar los op-amp de los circuitos de realimentación de lazo cerrado. Por último, el equipo cuenta con un medidor del ángulo de disparo referenciado a la fase A, tanto para configuración 1ϕ ó 3ϕ .

INDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN	6
INDICE GENERAL	7
INDICE DE FIGURAS	9
INTRODUCCION	13
I. GENERALIDADES	15
II. DESCRIPCION DE LAS ETAPAS	18
2.1 Descripción general del equipo	18
2.2 Alimentación trifásica	25
2.2.1 Alimentación trifásica de fuerza	25
2.2.2 Alimentación monofásica de fuerza.....	26
2.2.3. Alimentación al circuito de disparo...	26
2.2.4 Protección de sobrecorrientes	28
2.3 Rectificación y filtrado	29
2.3.1 Circuitos del voltaje de control V_x ..	36
2.4 El pulso de disparo	38
2.4.1 Circuitos de entrada AC-Generadores de ondas cuadradas.....	39
2.4.2 Circuito diferenciador - Red RC	41
2.4.3 Circuito de oscilación	43
2.4.4 Circuito de sincronismo	47
2.4.5 Modulación a 60 Hz. de pulsos de 28 ki lohertz	50
2.4.6 Circuito de amplificación de pulsos ..	52

cont.

2.5 Control de velocidad de un motor.....	57
2.5.1 Lazo cerrado de corriente.....	59
2.5.2 Doble lazo cerrado.....	61
2.6 Instrumentos incorporados.....	64
III PRUEBAS EXPERIMENTALES	73
3.1 Pruebas de las etapas.....	73
3.2 Pruebas del equipo completo.....	82
3.3 Pruebas experimentales complementarias.....	88
3.3.1 Prueba de cortocircuito del T1.....	88
3.3.2 Prueba de cortocircuito del T2.....	91
3.4 Implantación general en el laboratorio.....	93
3.5 Referencias finales.....	94
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	96
APENDICES	98
A. Datos técnicos.....	99
B. Manual del usuario.....	105
C. Diagrama general del equipo.....	115
BIBLIOGRAFIA	116
1. ...	
2. ...	
3. ...	
4. ...	
5. ...	
6. ...	
7. ...	
8. ...	
9. ...	
10. ...	
11. ...	
12. ...	
13. ...	
14. ...	
15. ...	
16. ...	
17. ...	
18. ...	
19. ...	
20. ...	

INTRODUCCION

En el último nivel de la Facultad de Ingeniería Eléctrica se dicta la materia de Controles Industriales Electrónicos con el propósito de que el estudiante haga un vínculo entre la teoría que ha asimilado en los años de estudio y la práctica de la electrónica de potencia con que se va a encontrar en la industria. Para ello se realizan experiencias relacionadas con el manejo de potencias mayores mediante sistemas de control que apenas utilizan unos pocos voltio-amperios.

Algunas de las experiencias que se realizan son hechas en circuiterías armadas por los propios estudiantes mientras que otras se efectúan en un equipo inglés (Mawdleys Educational Thyristor Drive) que es un banco en el cual se pueden realizar algunos tipos de convertidores estáticos, llámense 1ϕ ó 3ϕ , trabajando hasta seis estudiantes a la vez.

Para darle al estudiante mayor oportunidad de trabajo me fué propuesto como tema de tesis la investigación y construcción de un banco similar al mencionado, que de tener un costo y una confiabilidad de operación ventajosos podrían dar como resultado la construcción futura de o-

tras unidades. Cabe mencionar que el valor aproximado en el equipo donado es de unos \$ 8.000.

Para llevar a efecto esta tarea he contado con la ayuda económica por parte de la ESPOL, la cual ha sido a través de varios canales como entrega de equipos, materiales y efectivo para la compra de componentes electrónicos.

La estructura física externa del tablero de conexiones ha sido mantenida similar al equipo inglés con el objeto de dar una sola explicación de la manera de utilizar los dos bancos. Los circuitos del sistema de control han sido contruidos con elementos disponibles en nuestro medio por lo que difieren al otro, más no así su diagrama de bloques que es bastante similar.

Un nuevo circuito ha sido incorporado al conjunto para medir el ángulo de disparo. Este circuito puede mejorarse en futuras oportunidades ya que actualmente sólo está capacitado para proporcionar datos de una sola fase.

CAPITULO I

GENERALIDADES .

En los últimos 25 años se han presenciado progresos sorprendentes en la electrónica de potencia, sobre todo en lo que respecta al desarrollo que ha tenido en el campo de los semiconductores.

Por definición, la electrónica de potencia es la aplicación específica de la electrónica en el campo de la potencia eléctrica. Comprende en sí la conexión, desconexión, control y transformación de la energía eléctrica utilizando para ello "válvulas convertidoras" y dispositivos de mando, control y regulación.

La electrónica de potencia se ha desarrollado en base a la técnica de conversión, que ya en los años 30 hacía uso de válvulas de vapor de mercurio, sobre todo en forma de rectificadores controlados ó no controlados con potencias del orden de los megavatios. Inicialmente se trataba de éstos últimos para carga de baterías a través de redes monofásicas ó trifásicas.

Otro campo de aplicación que surgió más adelante fue en

el servicio ferroviario ya que los motores de corriente continua presentan características favorables de arranque y fácil control.

La introducción del tiristor en combinación con la tecnología de los semiconductores basados en silicio ha sido el factor más significativo de las mejoras sugeridas anteriormente, debido a la capacidad de manejo de potencia, de tensión, de corriente, etc. Al mismo tiempo ha sido posible explotar la miniaturización de los componentes para señales pequeñas existentes en las unidades de control.

Así, el convertidor ha evolucionado desde un amplificador no especializado hasta un equipo de proceso avanzado que comprende circuitos calificados para el control, supervisión, maniobra y protección.

Hasta ahora ha predominado el empleo de circuitos analógicos pero la tendencia actual es hacia los circuitos digitales. Razones como el progreso presentado de la electrónica en el mundo exterior hacen que día a día deba mejorarse la calidad de aprendizaje del estudiante en esta materia. Para ello es necesario el mejor equipamiento del laboratorio, llámese a esto adquisición de nuevas y modernas unidades ó por lo menos el incremento del número de equipos existentes. Esto es el objetivo de mi tesis.

Para cumplir este objetivo vale la pena por lo menos conocer a grandes rasgos los diferentes sistemas de control a tiristores que pueden ser usados en la industria, a objeto de compararlos con el que se va a utilizar en el equipo a construirse.

Algunos sistemas usan como elemento de producción de los pulsos de disparo al común UJT (transistor de junta única) mientras que otros hacen lo propio a través de PUTs (transistor de junta única programable) ó de op-amps trabajando como comparadores de una señal rampa con un nivel DC variable a través de un op-amp "buffer" (separador) y que se constituye en el voltaje de control.

Otros sistemas más sofisticados usan circuitos integrados especiales y hasta microprocesadores para el control del disparo de los tiristores de fuerza.

En el laboratorio, como ya se dijo se va a utilizar un método de importancia intermedia para la construcción del equipo, dejando para las prácticas cotidianas el uso del UJT, como parte del entrenamiento del estudiante.

En el capítulo siguiente se irá describiendo paso a paso las diferentes partes de que está constituida en sí toda la circuitería del equipo a construirse.

CAPITULO II

DESCRIPCION DE LAS ETAPAS

2.1 DESCRIPCION GENERAL DEL EQUIPO.

El equipo ha sido construido con el propósito de poder tener acceso solamente a la parte de fuerza, mediante terminales colocados en el tablero frontal de conexiones del mismo. La disposición de estos terminales ha sido hecha de la misma forma que en el equipo donado para así facilitar la explicación de las conexiones que habrán de efectuarse en las prácticas del laboratorio, referentes a sistemas rectificadores monofásicos y trifásicos.

Hay dos secciones de conexión en el frente del equipo :

- a.- La superior, en la que se hallan los terminales de los diodos y tiristores. Existen 6 diodos nombrados desde D1 a D6 y 6 tiristores desde TH1 hasta TH6. En serie con cada uno de ellos se encuentra una resistencia de alambre de 0.1 ohmio, que sirve para observar la forma de onda de la inten-

sidad de corriente que pasa a través de ellos. Se observan además unos terminales azules que están destinados a servir como puntos de observación de señales en el osciloscopio.

Las líneas nombradas desde B1 a B6 se conectan a los terminales de fuerza de los transformadores a través de los interruptores SA y SB, de 3 polos y 15 Amp., más no así la línea B0. Así mismo existen aquí resistencias de 0.1 ohmio para cumplir igual objetivo que el explicado anteriormente. Cabe destacar que no siempre la corriente que pasa a través de una línea es igual a la que pasa por un diodo ó un tiristor, dependiendo esto del tipo de configuración que se tenga.

Los terminales nombrados desde P1 a P6 son puntos de salida desde el circuito de control que tienen presente en ellos los pulsos de disparo defasados 60° . Estos pulsos deben ser ingresados nuevamente a través de los terminales nombrados desde G1 hasta G6 según los requerimientos del rectificador a construirse en la práctica del laboratorio. Es importante señalar que estos terminales "G" no son las Puertas físicas de los tiristores, por lo que éstos no pueden ser ocupados independientemente para gatillarse con un circuito externo.

En la esquina inferior derecha está la representación de los circuitos de realimentación de voltaje (terminal T3), de velocidad (terminal T4) y el de corriente que es directamente a través de una resistencia de 0.1 ohmio en serie con la carga.

El medidor del ángulo de disparo que se encuentra incorporado en el tablero de conexiones, está conectado de tal forma de permitir esta medición sólo para la fase A.

El potenciómetro llamado "REFERENCIA" sirve para la variación del ángulo de disparo al variar un voltaje de control que ingresa al circuito de oscilación de un PUT (transistor de junta única programable), el cual produce un pulso de disparo el mismo que anteriormente se dijo estaba presente en un terminal "P" correspondiente.

El voltaje de control puede ser positivo ó negativo, lo cual es seleccionado en el tablero de conexiones con el interruptor llamado "POLARIDAD". Debe ser positivo cuando se utiliza un control de lazo abierto ó el lazo cerrado de corriente y velocidad ó voltaje. Deberá ser negativo cuando sea tan sólo lazo cerrado de corriente.

b.- La inferior, consta de los terminales de salida de los transformadores de fuerza existentes en el equipo y que son un trifásico llamado T1 y un monofásico llamado T2. Además tiene a disposición los terminales A, B, C y n que son los voltajes de línea que llegan al equipo desde las cajas alimentadoras con que cuenta el laboratorio. Por último, se tienen 3 interruptores llamados SA, SB y SC; los dos primeros sirven para conectar los terminales S1, S2, S3 a B1, B2, B3 y S4, S5, S6 a B4, B5, B6 respectivamente ; el tercero conecta la línea llamada M en la parte superior del equipo con el terminal # 1 de la carga. La línea que va desde S0 hasta B0 no pasa por ningún interruptor.

En el interior del equipo puede observarse la presencia de siete transformadores:

- 1.- T1, trifásico de 3.5 KVA. (de fuerza).
- 2.- T2, monofásico de 600 VA. (de fuerza).
- 3.- TA, TB, TC, monofásicos de 30 VA. (de control).
- 4.- Tf, monofásico de 20 VA. (fuente de 5 voltios).
- 5.- Tm, monofásico de 250mVA. (medidor α).

También puede observarse el tablero del circuito de control que produce un pulso mediante la oscilación de un PUT, por cada fase, a una frecuencia de 120 Hz.

Mediante dos puertas lógicas AND se separa este tren de pulsos en dos de una frecuencia de 60 Hz. y defasados 180° entre sí. Cada una de estas señales ingresan a sendos circuitos monostables para aumentar su duración y que sirva de moduladora de la salida de un oscilador de 28 KHz., para luego ingresar a una etapa amplificadora de corriente y pasar al transformador de pulsos.

Los transformadores TA, TB, TC, proporcionan al circuito de control 2 conformaciones trifásicas en estrella defasadas 180° entre sí, de tal manera de que para cada fase del circuito existen también dos ondas sinusoidales de igual defasamiento que son aprovechadas para generar ondas cuadradas a través de dos transistores de entrada llevados a corte y saturación, y que son utilizadas para la separación explicada anteriormente del tren de pulsos producidos por la oscilación del PUT.

Existen tres niveles de voltaje DC. en el circuito de control, +15 V. y -15 V. para alimentar los OP-AMPS y el circuito medidor del ángulo de disparo; y +5 V. para alimentar el resto de la circuitería donde se utilizan TTL.

En las siguientes figuras se ve con detalle lo expli-

cado hasta el momento.

Lav. No. ELEC-030

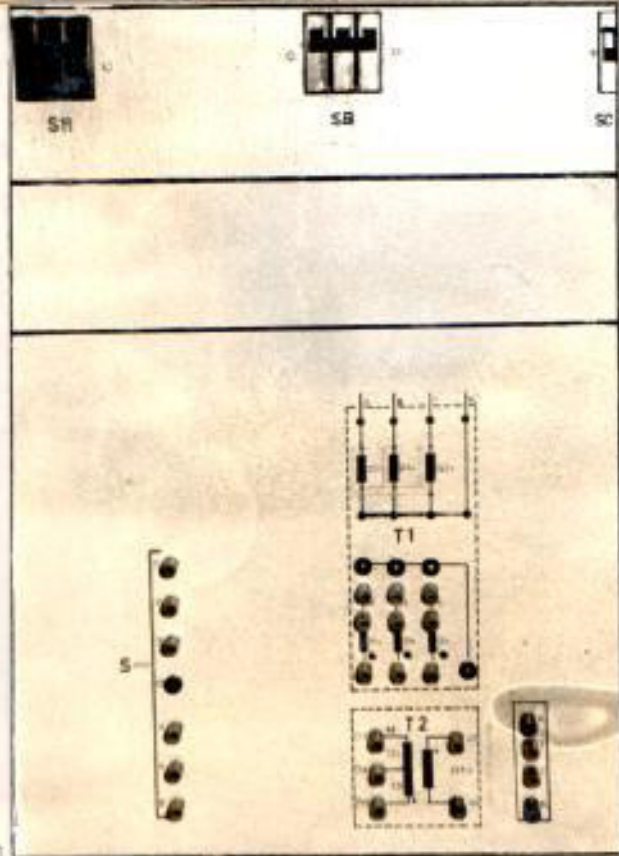
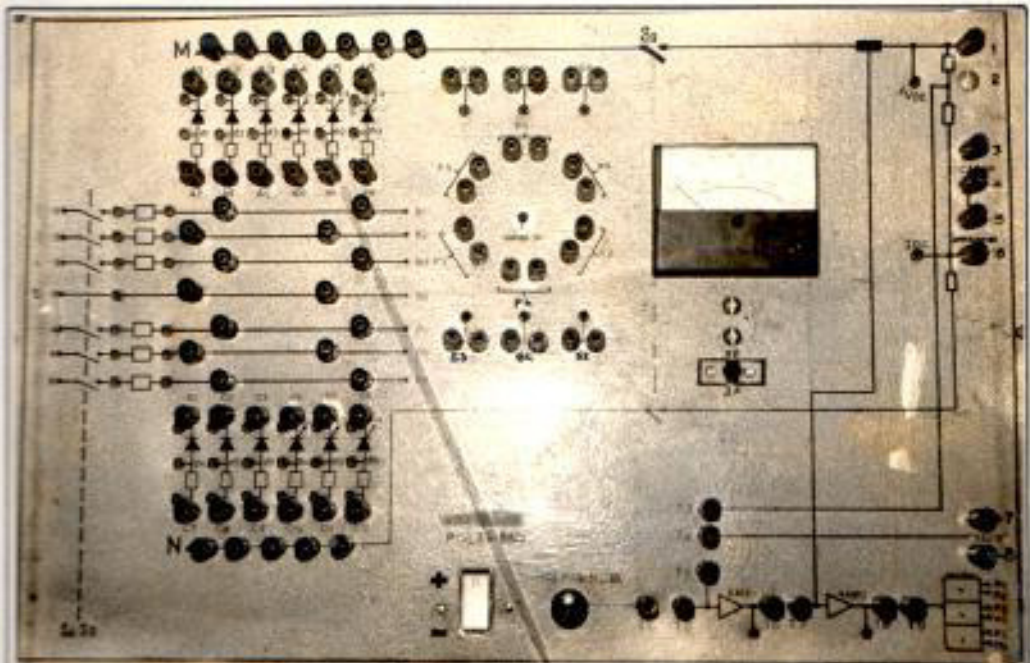


Figura No. 13

"TABLEROS DE CONECCIONES"

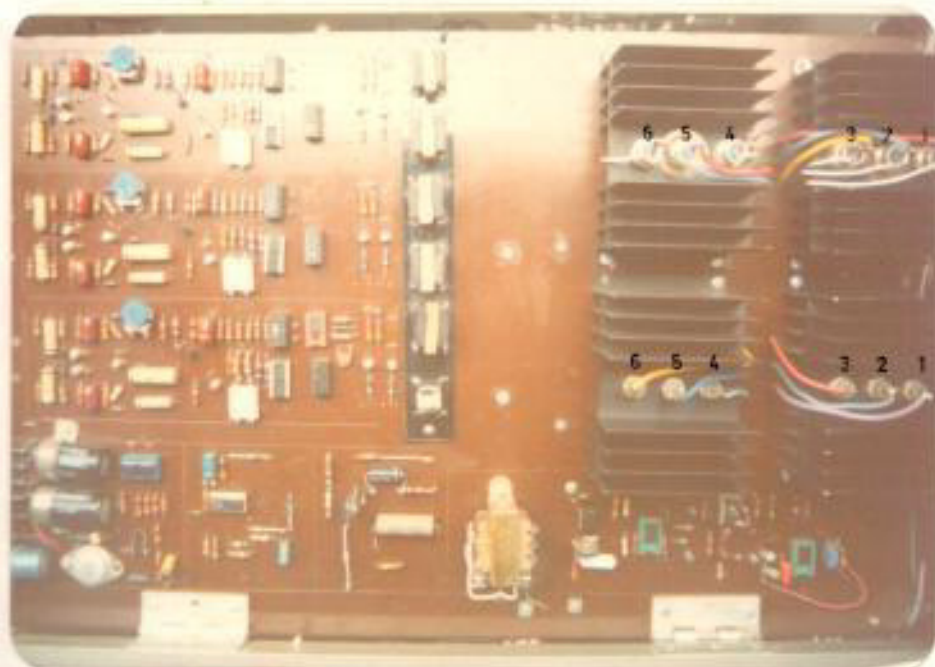
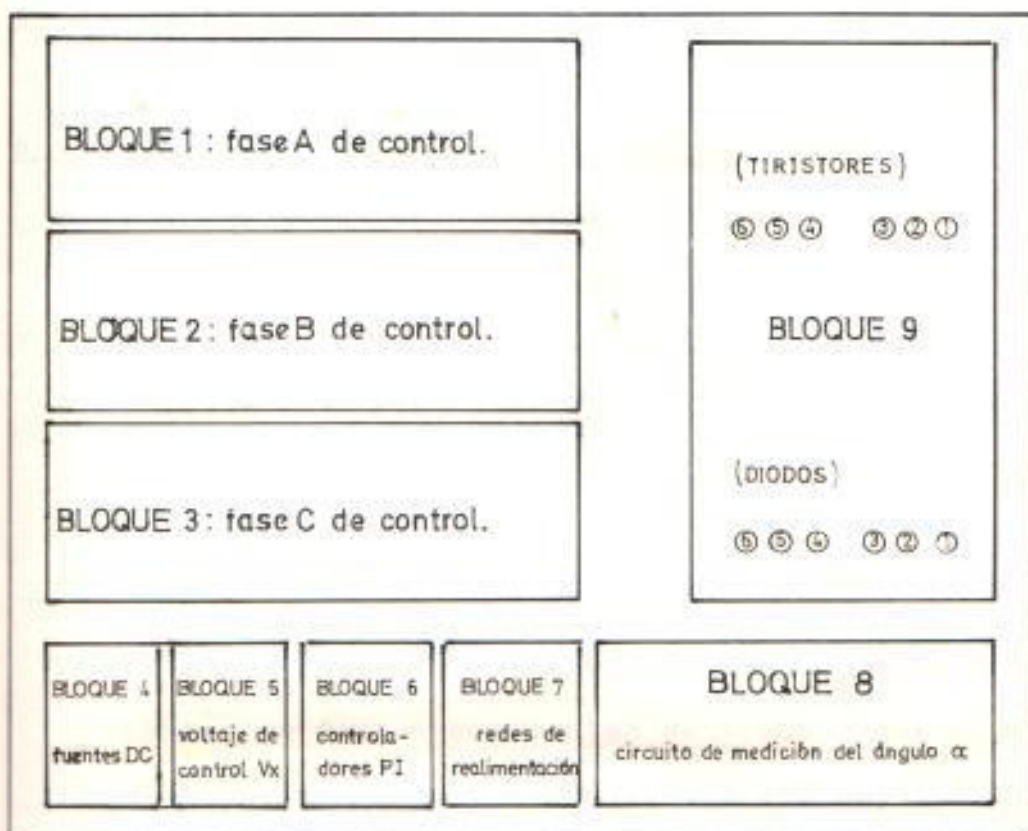


Figura No. 2.

"POSICIONAMIENTO DE LOS BLOQUES DE LA CIRCUITERIA".

2.2 ALIMENTACION TRIFASICA.

2.2.1 Alimentación trifásica de fuerza: Para realizar las prácticas en el laboratorio se cuenta con bancos de resistencias de 110 voltios - 2.2 KVA y de 220 V. - 3 KVA.; de inductancias a 220 voltios -- 3 KVA; y de capacitancias a 220 voltios -- 3 KVA. que sirven como cargas a los rectificadores.

De los valores de voltaje y potencias de estos bancos se tienen corrientes de trabajo del orden de 15 amp. hasta 20 amp. que están por debajo de las corrientes máximas que soportan los tiristores disponibles en el equipo más no así la de los diodos.

Como el objetivo de este equipo no es manejar corrientes grandes sino que el estudiante aprenda el comportamiento, las ventajas y aplicaciones de los diferentes rectificadores que pueden configurarse en él, se ha escogido un transformador trifásico cuyas especificaciones están anotadas a continuación:

Potencia : 3500 VA.

Voltaje : 120 Delta 208 Estrella (primario)

Voltaje : 95 Delta 165 Estrella (secundario)
Corriente: 10 amperios (primario).
Corriente: 13 " (secundario).

Ver en la sección 3.3.1 prueba complementaria .

2.2.2 Alimentación monofásica de fuerza: Para reali -
zar la configuración bifásica dentro de las ex -
periencias del laboratorio, hubo que instalarse
un transformador cuyo secundario tuviera una to
ma central. El transformador T2 cumple con este
requisito y tiene las siguientes especificacio -
nes :

Potencia : 600 VA.
Voltaje : 120 V. (primario).
 : 150 V. (secundario).
Corriente : 5 amp. (primario).
 : 4 " (secundario).

Ver en la sección 3.3.2 prueba complementaria.

2.2.3 Alimentación al circuito de disparo: Existen 5
transformadores para este circuito de los cua -
les 3 son la alimentación trifásica de control,
y es por medio de ellos que se efectúa el sin -
cronismo con la parte de fuerza.

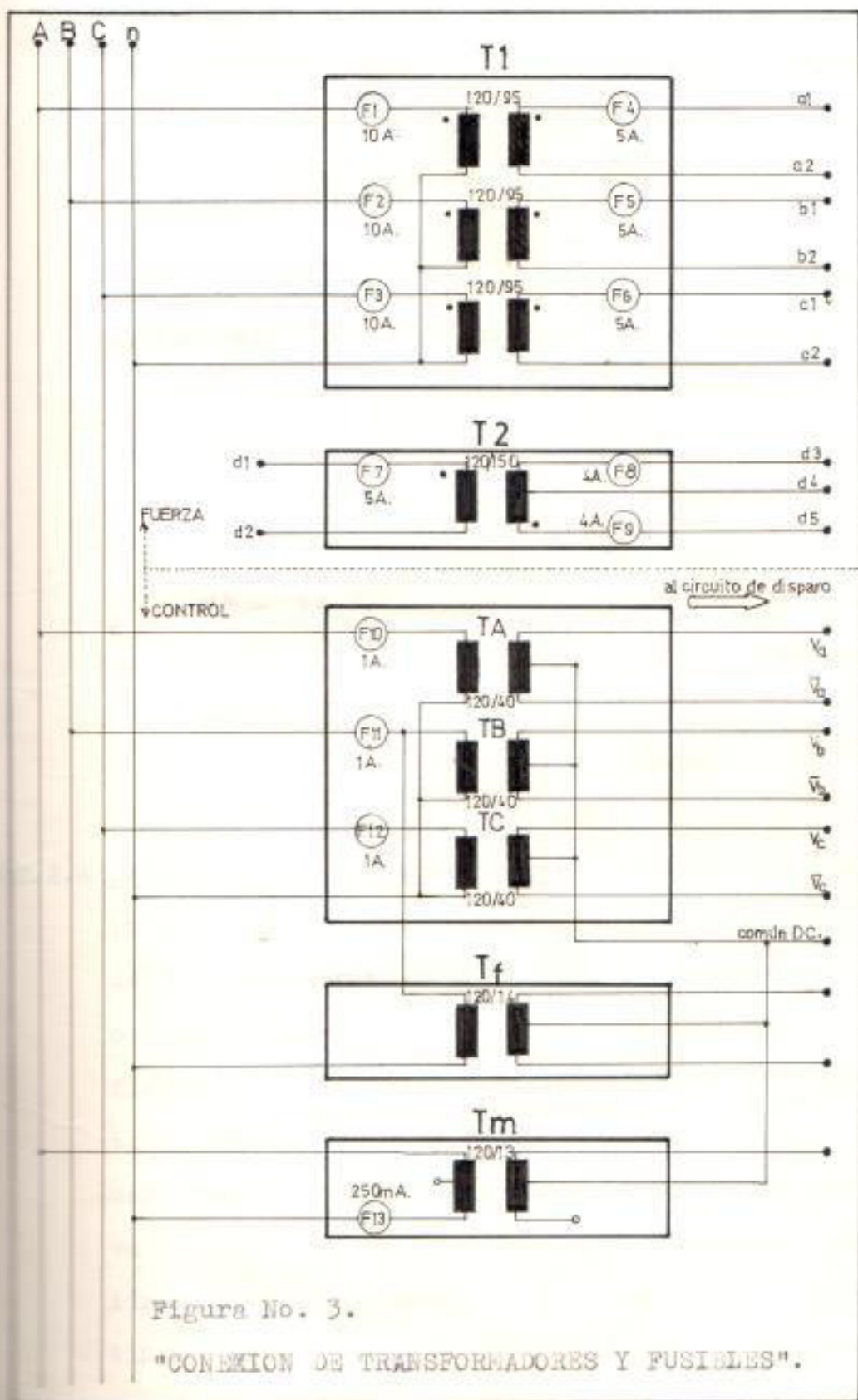


Figura No. 3.

"CONEXION DE TRANSFORMADORES Y FUSIBLES".

Estos transformadores llamados TA, TB y TC tienen 40 voltios de salida en el secundario y dan una corriente aproximada de 0.8 amperios. Todos tienen una toma central.

Los otros dos transformadores son Tf y Tm, que sirven para la fuente de +5 V. y para el medidor del ángulo de disparo, respectivamente. Sus especificaciones son las siguientes :

Tf :	V1 = 120 V.	Tm :	V1 = 220/120 V.
	V2 = 14 V.		V2 = 13 V.
	S = 20 VA.		S = 250 mVA.
	I1 = 170 mA.		I1 = 2 mA.
	I2 = 1.5 A.		I2 = 20 mA.

2.2.4 Protección de sobrecorrientes : El equipo cuenta para esto con fusibles colocados en cada uno de los transformadores, ya sean de fuerza ó de control, los mismos que están indicados en la figura No 3. Además, están también los interruptores SA, SB de 15 amperios, y un interruptor magnetotérmico de 10 amperios que une el positivo del rectificador realizado y presente en la línea M con el terminal No 1 de la carga. A continuación se puede observar un diagrama de conexiones de transformadores y fusibles.

2.3 RECTIFICACION Y FILTRADO. .

En el circuito de control existen tres fuentes de alimentación DC; +15 V., -15 V. y +5 V.

a.- Las fuentes de 15 voltios se las utiliza para alimentar los amplificadores operacionales y el circuito de medición del ángulo de disparo. El voltaje alterno se toma de la fase A ó sea del transformador TA. En las siguientes figuras se muestran un diagrama de bloques y uno eléctrico de estas fuentes.

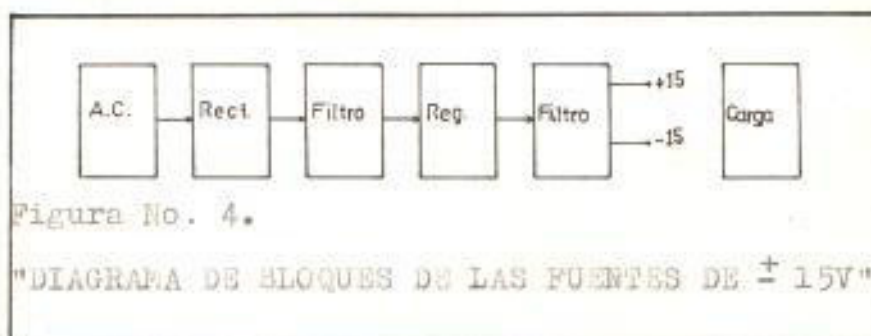


Figura No. 4.

"DIAGRAMA DE BLOQUES DE LAS FUENTES DE $\pm 15V$ "

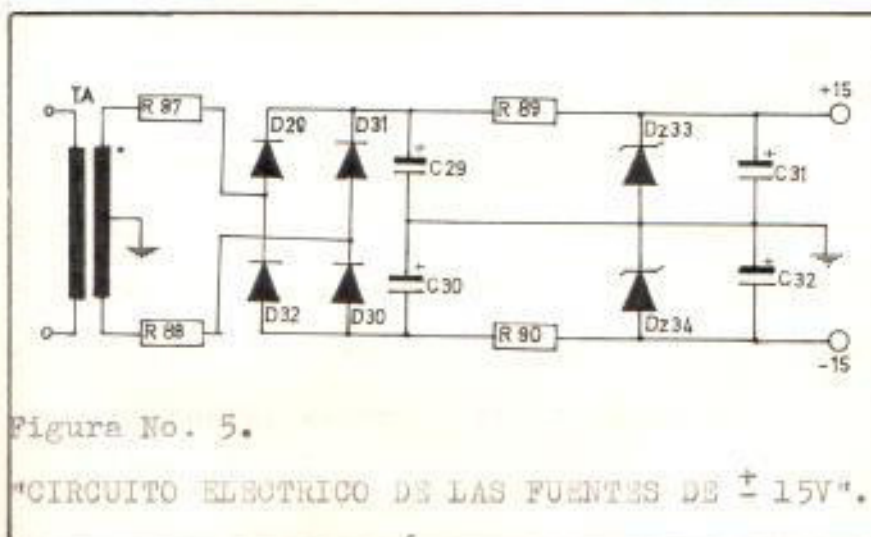


Figura No. 5.

"CIRCUITO ELECTRICO DE LAS FUENTES DE $\pm 15V$ "

Las resistencias R87 y R88 producen una caída de voltaje en la forma de onda del transformador para que los capacitores C29 y C30 no trabajen a un voltaje muy cercano al nominal. Para efecto de estudio vamos a suponer momentáneamente que se pone como carga del rectificador una resistencia. En ella se desarrollará un voltaje como se muestra en la figura No 6.

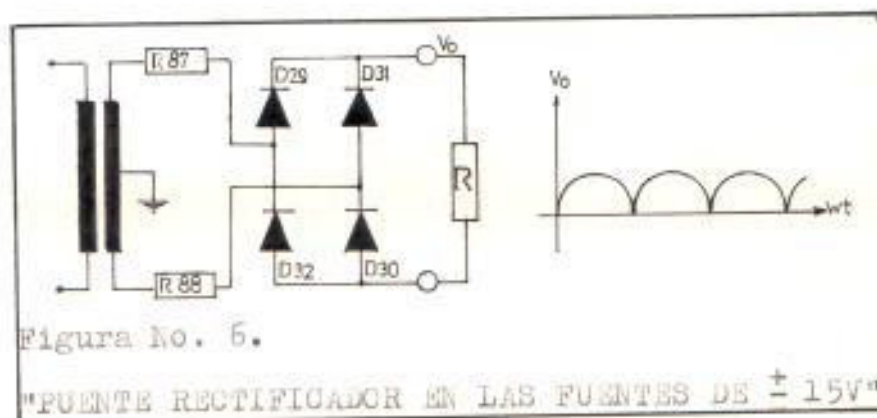


Figura No. 6.

"PUENTE RECTIFICADOR EN LAS FUENTES DE $\pm 15V$ "

Luego, en vez de una resistencia se pone un potenciómetro; se presentan entonces 2 casos:

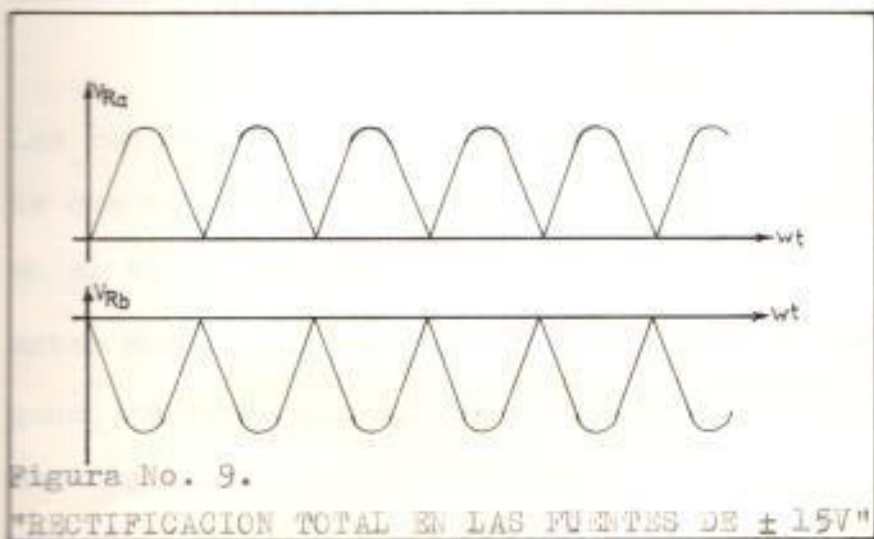
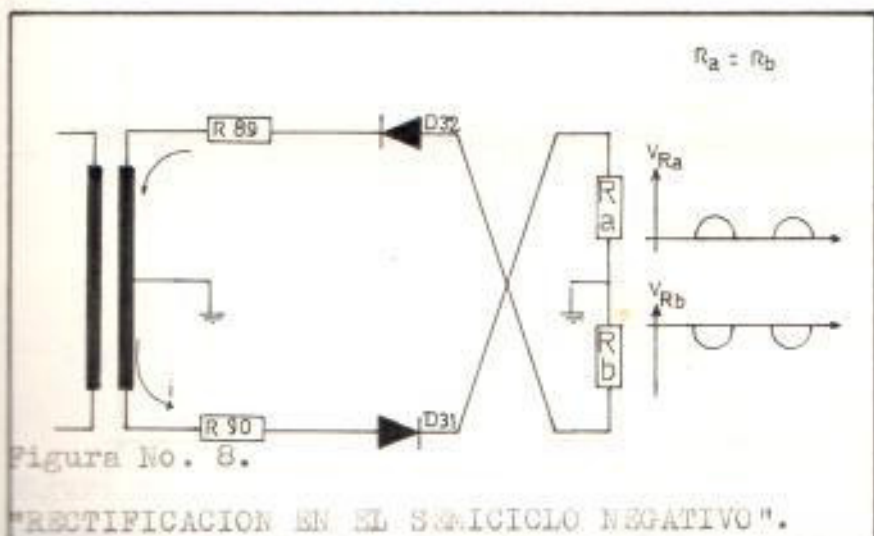
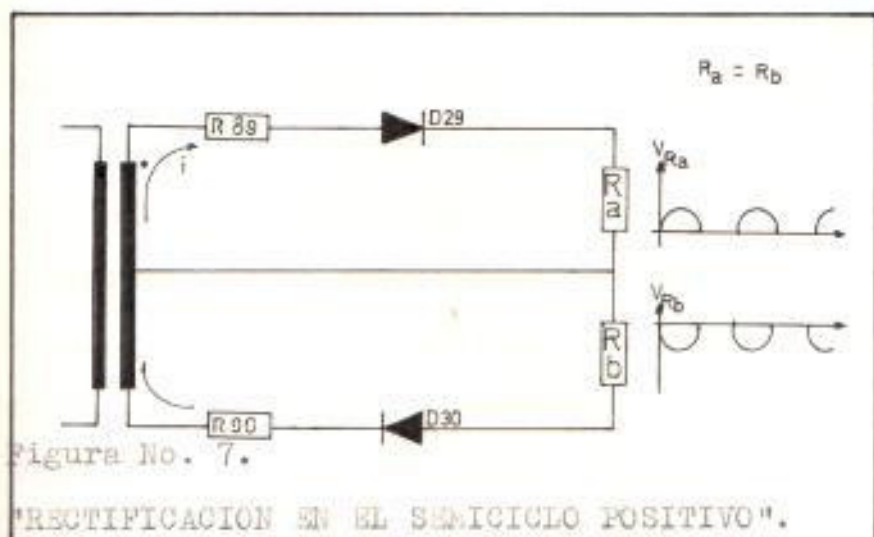
1. que el cursor esté sin conectar;
2. que el cursor esté conectado a la toma central del transformador.

Para el primer caso, la corriente que circula a través de las dos secciones del potenciómetro es la misma pero los voltajes serán proporcionales al valor de resistencia que haya en cada sección, es decir se ha formado un divisor de voltaje.

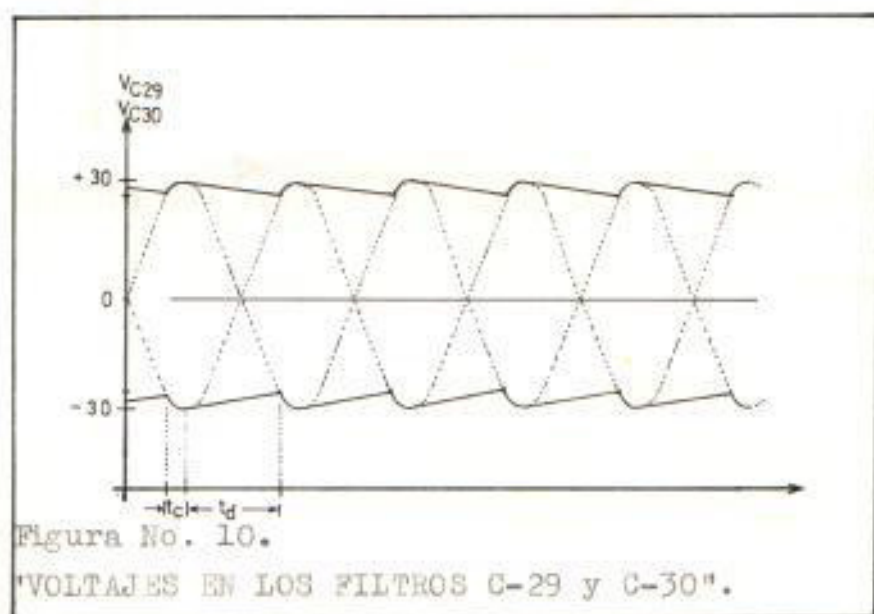
Para el segundo caso, los voltajes siempre serán iguales pero las corrientes que pasarán por cada sección del potenciómetro dependerán de su valor óhmico.

Las fuentes requeridas deben de ser de igual voltaje y corriente, por lo que la conexión a seguir será unir el punto medio del transformador TA al punto medio de la carga, además para que la corriente a través del neutro sea nula este punto medio debe dividir exactamente en dos impedancias iguales a la carga.

Vamos a suponer entonces que tenemos dos resistencias de igual valor conectadas como se ve en la figura No 7. Durante el semiciclo positivo de la forma de onda del TA conducen los diodos D29 y D30 proporcionando una rectificación de media onda para cada resistencia. En el semiciclo negativo conducen los diodos D31 y D32 los cuales completan la rectificación de onda completa al proporcionar una señal de media onda pero defasada 180° a la anterior como se ve en la figura No 8. El efecto total se muestra en la figura No 9.

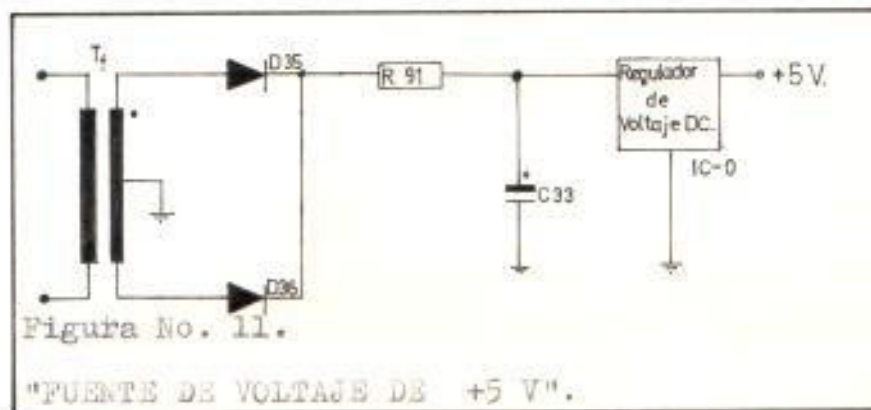


En realidad, en vez de las resistencias se ponen dos capacitores, C29 y C30, para formar un filtro. Su presencia producen un efecto, a las formas de onda, diferentes a las vistas anteriormente pero el principio de operación es similar. La figura siguiente nos muestra las formas de los voltajes presentes en los capacitores.



Las resistencias R89 y R90 limitan la corriente que circulará por cada zener, Dz33 y Dz34, en el tiempo de descarga de los capacitores antes nombrados. Los C31 y C32 forman un segundo filtro capacitivo para contrarrestar el aumento del rizado al conectar los op-amps.

6.- La fuente de + 5 voltios alimenta todo el circuito de disparo y toma su señal alterna del secundario del transformador T₁, de tap central, que tiene un voltaje de salida de 14 V. La siguiente figura muestra el diagrama circuital de esta fuente.



La resistencia R91 produce una caída aproximada de un voltio para disminuir el voltaje diferencial entre entrada y salida del regulador lo que permite aprovechar mayor potencia del mismo y que está dada por la siguiente relación:

$$P_d = (V_{ent} - V_{sal}) I_{sal}$$

El valor de esta resistencia debe ser tal que el voltaje del regulador no sufra distorsiones a plena carga. Experimentalmente se comprobó que valores mayores de 0.5 ohmios produ

cían efectos negativos en el voltaje de salida ya que no había la corriente necesaria para la regulación. Valores menores no daban el efecto que se buscaba con su presencia.

Obviamente, si el regulador se coloca en un disipador apropiado no sería necesaria la presencia de R91 aunque siempre se requiere que haya una diferencia de voltaje entre la entrada y salida no mayor de 3 voltios. El regulador utilizado es de 5 V.-1 Amp. Ver apéndice A. en donde se encuentran las curvas características del regulador.

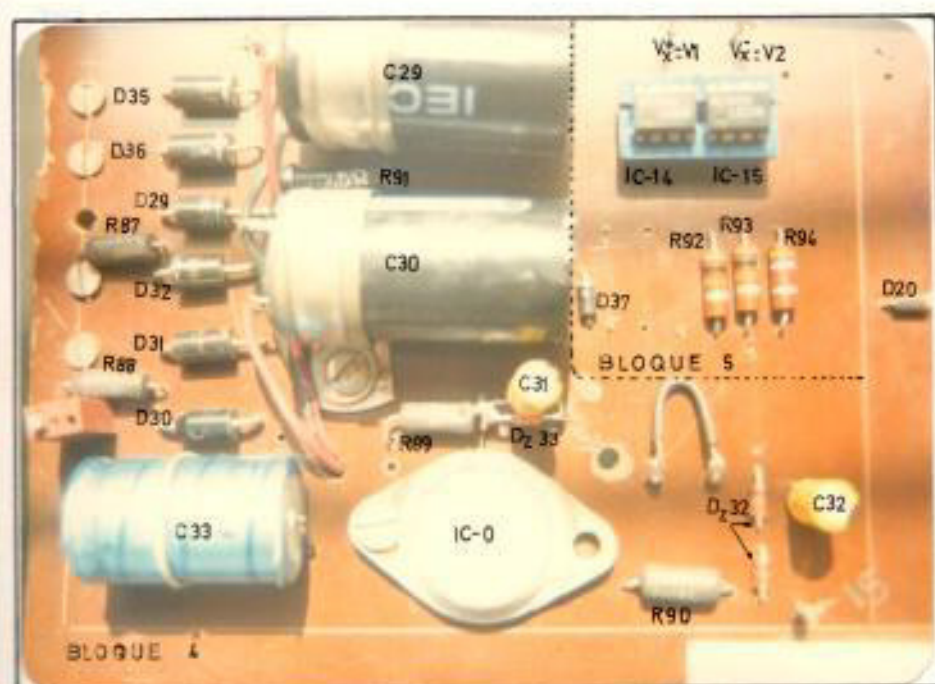


Figura No. 12.

"FOTO DE LA CIRCUITERIA DE LAS FUENTES DC Y DEL VOLTAGE DE CONTROL V_x ".

2.3.1 Circuitos del voltaje de control V_x : En la figura No 2 de la sección 2.1 se veía una distribución de los bloques que constituyen el tablero de comando ó control del equipo. En esta sección se describe el objetivo del bloque 5; aquí se genera un voltaje DC. variable en magnitud para controlar el ángulo de disparo de los SCR.

El potenciómetro "REFERENCIA" colocado en el tablero de conexiones recibe un voltaje de + 5 v en un extremo. En el cursor se obtiene un voltaje DC que ingresa al pin 3 del op-amp IC-14 de cuya posición depende el ángulo de disparo. Este op-amp 741 es un amplificador no inversor de ganancia unitaria cuyo terminal de salida (pin 6) alimenta la entrada inversora del IC-15, otro op-amp pero trabajando como amplificador inversor de ganancia unitaria también. Ver figura No 13.

En el tablero de conexiones un interruptor llamado "POLARIDAD" sirve para escoger uno de los dos voltajes de salida de los op-amps, V_1 ó V_2 , presente en el terminal T1 ubicado también en el frente del equipo.

Cuando se trabaja en lazo abierto se escoge la

referencia positiva, al igual cuando es control de doble lazo de realimentación, esto es cuando se tiene como carga un motor y se hace lazo cerrado de velocidad y corriente ó voltaje de armadura y corriente de armadura. Cuando sólo se trabaja con realimentación de corriente de armadura se escoge la referencia negativa.

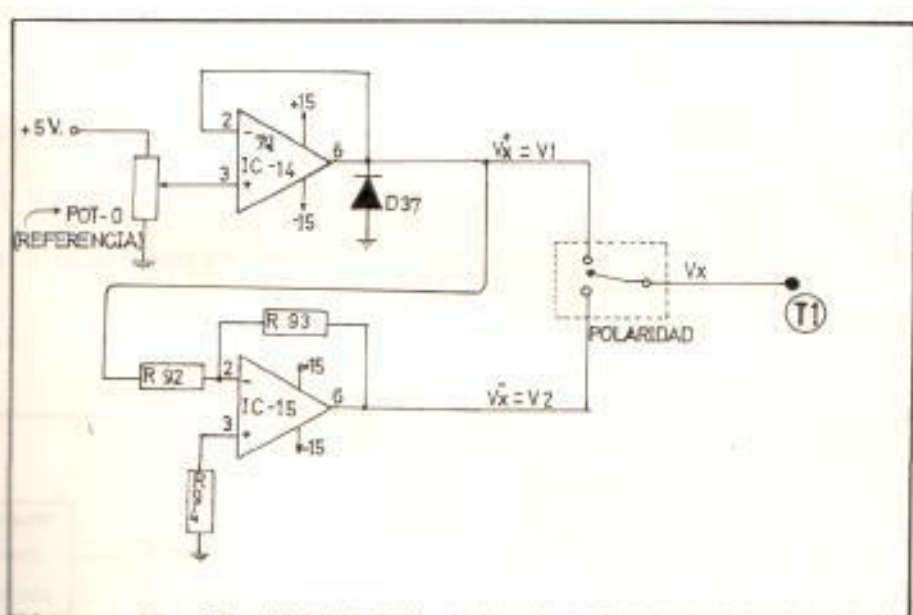


Figura No 13. "CIRCUITO DEL VOLTAJE DE CONTROL".

De este diagrama se puede observar el posicionamiento de los elementos en la figura 12 de este capítulo, que es una foto del circuito montado en el tablero del circuito del equipo.

2.4 EL PULSO DE DISPARO.

El circuito de disparo consta de tres fases, A, B y C que se sincronizan con el circuito de fuerza a través de los transformadores de control TA, TB y TC. Las 3 fases son idénticas y la figura No 14 representa una de ellas en diagrama de bloques, el mismo que sirve para el estudio del circuito de disparo paso a paso. En general se ha dividido este estudio en dos partes: de acuerdo al criterio de si la señal generada en cada uno de los bloques es dependiente ó independiente de las conecciones que se hagan en el exterior del equipo.

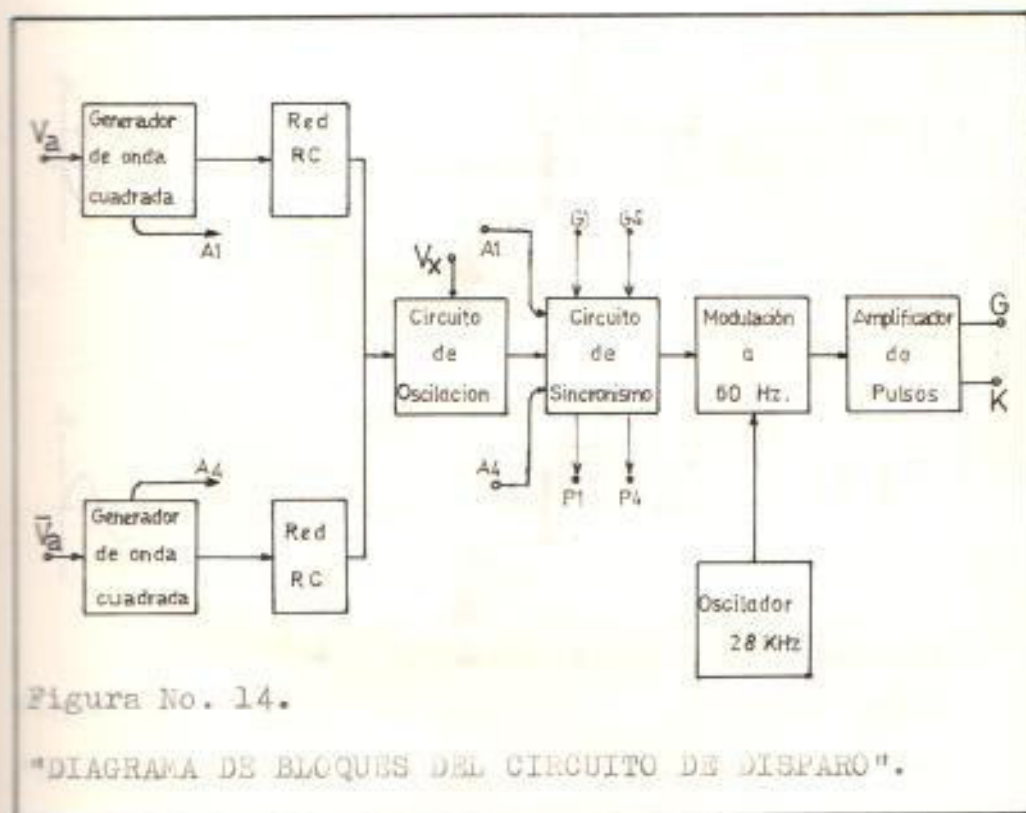


Figura No. 14.

"DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CIRCUITO DE DISPARO".

La primera parte constará de los siguientes bloques :

1.- Generadores de onda cuadrada.

2.- Redes diferenciadoras RC.

3.- Circuito de oscilación.

2.4.1 Circuitos de entrada AC-Generadores de ondas cuadradas : En cada fase existen dos circuitos generadores de ondas cuadradas y que son alimentados por los transformadores TA, TB y TC correspondientes. Estas ondas en cada fase tienen 180° de defasamiento entre sí igual que las ondas sinusoidales que las producen. La figura No 15 muestra los circuitos mencionados.

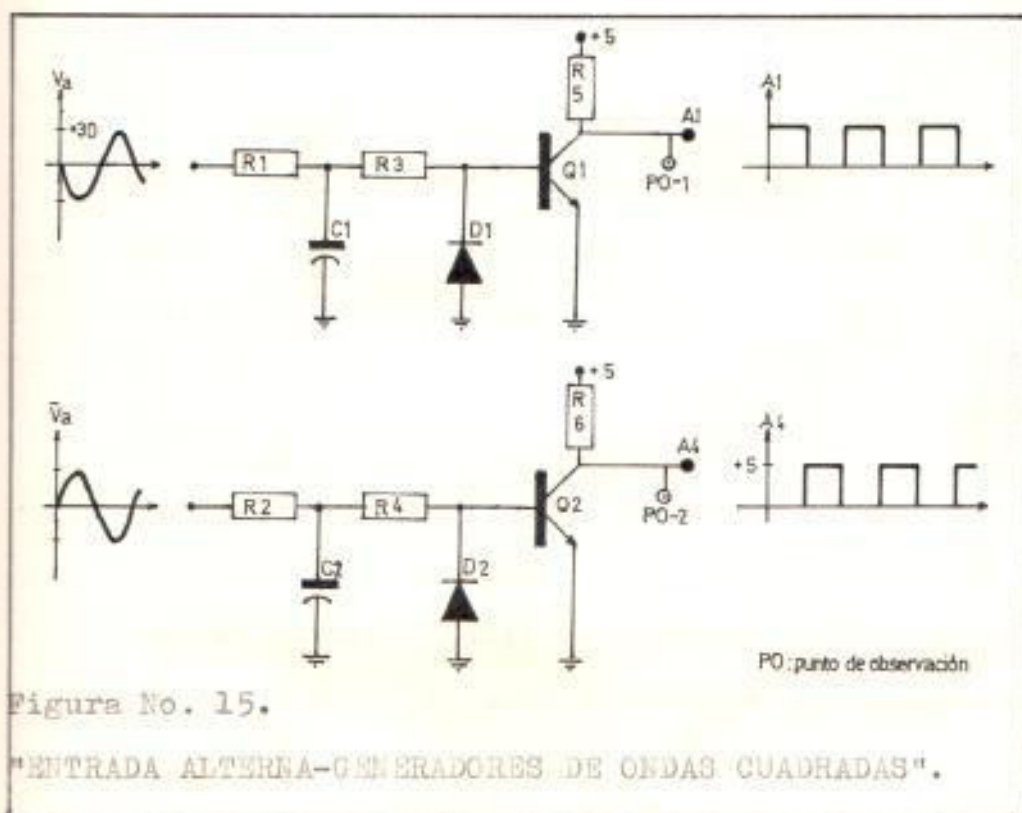


Figura No. 15.

"ENTRADA ALTERNA-GENERADORES DE ONDAS CUADRADAS".

Las redes formadas por R1, C1 ó R2, C2 son filtros pasa-bajo para evitar que ingresen al circuito de control ruidos eléctricos producidos por pulsos de alta frecuencia en los tiristores mezclado con la señal alterna y tenga alguna incidencia negativa en el proceso de la producción de los pulsos de disparo.

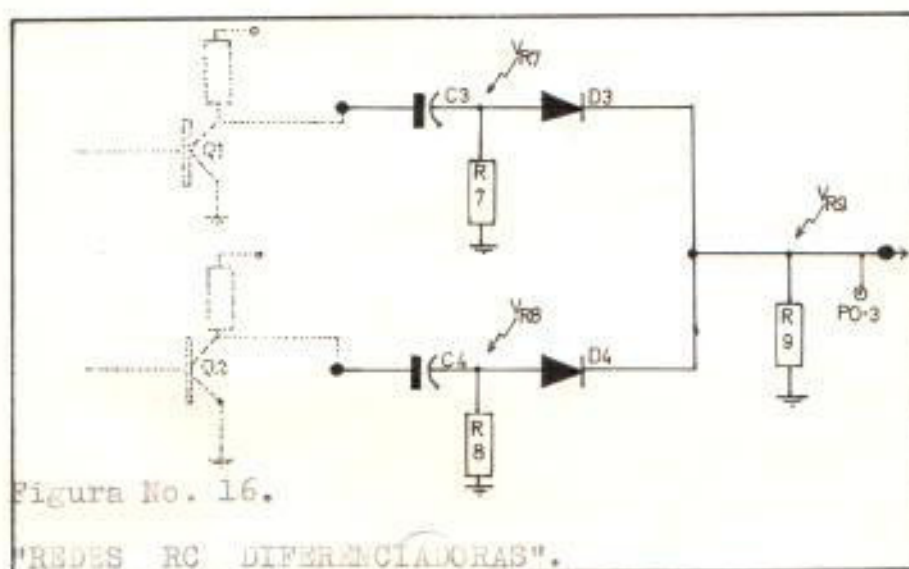
Los capacitores C1 y C2 presentan una alta impedancia (39 K-ohmios) a la onda sinusoidal de 60 Hz. por lo que la caída en ellos es mínima , pero en cambio al ruido eléctrico que va desde 300 KHz. hasta unos 3 MHz. le presentan un camino de cortocircuito a tierra.

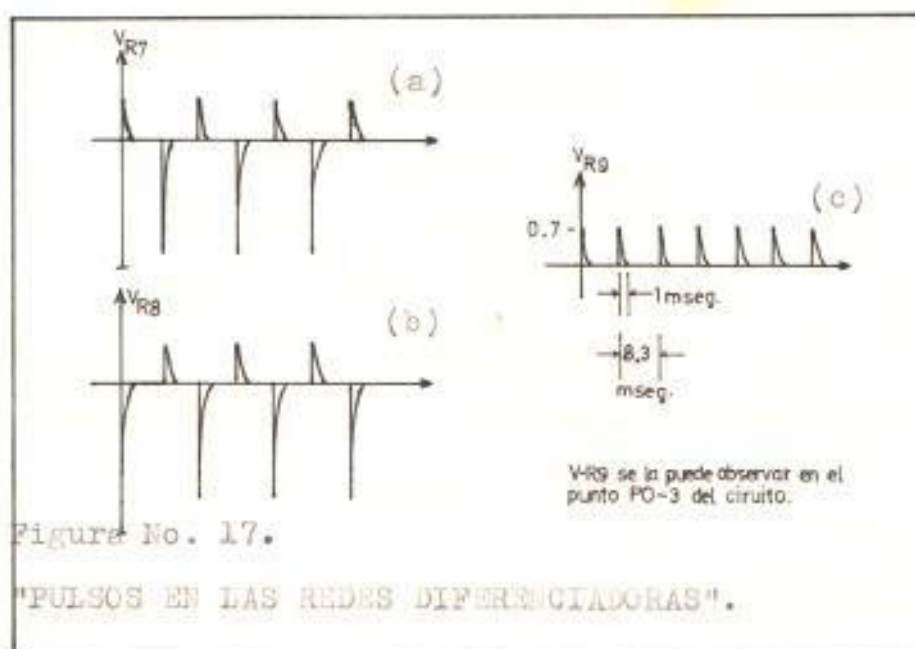
Estos capacitores no pueden ser tan grandes debido al defasamiento que producen en la onda de voltaje AC; para este caso se tienen unos 2.8° , medido experimentalmente.

Durante el intervalo de 0° a 180° el diodo está polarizado inversamente permitiendo el ingreso de corriente en la base del transistor Q1, el cual se satura y envía su colector a tierra. En cambio D2 es polarizado directamente y envía la base de Q2 a tierra poniendolo en corte, es decir en su colector se obtienen los 5 V. (Vcc) .

Los diodos nombrados evitan que hayan más de .6 voltios inversos en las bases de Q1 y Q2. En el semiciclo complementario la situación se invierte permitiendo así formar en cada transistor un tren de onda cuadrado de 60 Hz. y defasados 180 grados entre sí.

2.4.2 Circuito diferenciador - Red RC : Después de cada generador de onda cuadrada (Q1 y Q2) se tienen dos caminos a seguir, el uno es hacia la etapa de sincronización del pulso de disparo en el IC-1 y el otro es hacia una red diferenciadora que convierte estas ondas en pulsos positivos y negativos correspondientes a los flancos respectivos de las ondas cuadradas. En las siguientes figuras se muestran el circuito y las formas de onda que se obtienen.





D3 y D4 eliminan los picos negativos producidos en los flancos negativos de las ondas cuadradas correspondientes, quedando un tren de pulsos positivos presente en R9 que duran aproximadamente 1 mseg. cada uno, tal como se ve en la figura No 17c. Como éste es el voltaje de base del transistor Q3, lo mantendrá en corte la mayor parte del período de la onda sinusoidal, 60 Hz. La constante de carga de C3 ó C4 está dada así:

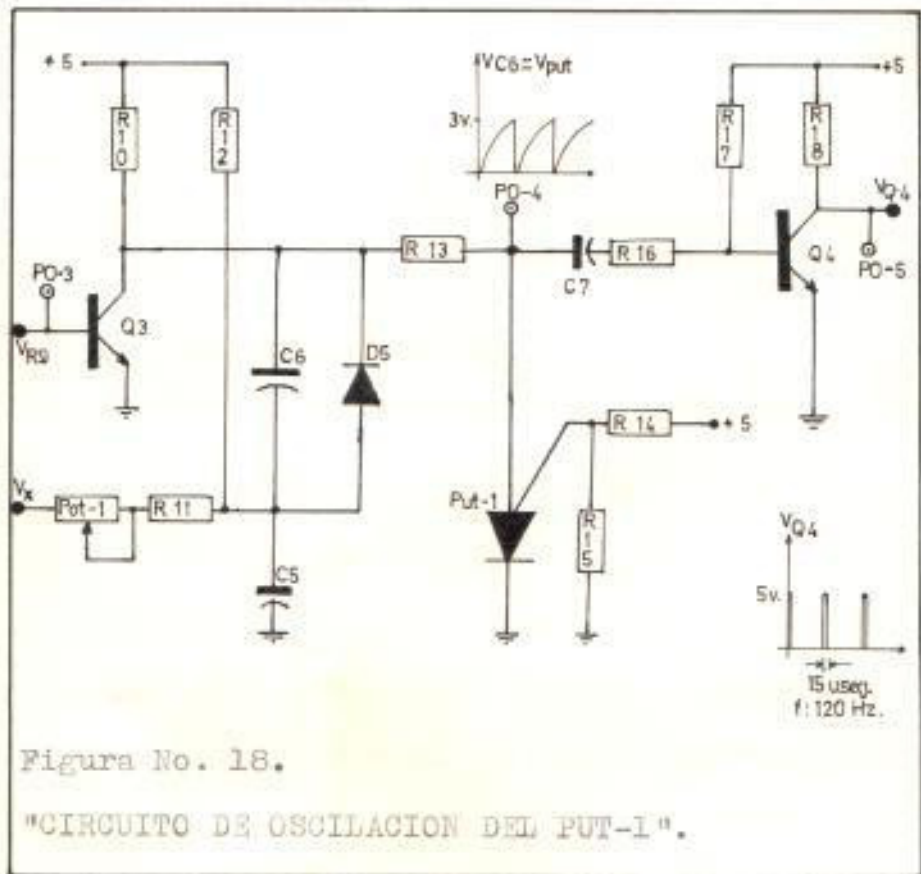
$$RC = (330K//22K) \cdot (0.01 \mu F) = .206 \text{ mseg.}$$

$$T_{\text{carga}} = 5 RC = 1.03 \text{ mseg.}$$

La descarga es a través de los transistores respectivos Q1 y Q2.

2.4.3 Circuito de oscilación : El PUT es un elemento que mediante dos resistores externos colocados como un divisor de voltaje en su terminal llamado "Puerta" permite programarlo para un voltaje de su terminal llamado "Anodo" al cual se disparará ó gatillará, es decir, se cortocircuitará permitiendo el paso de corriente a través de él durante un pequeño lapso.

En la figura No 18 se ve el circuito de oscilación del PUT utilizado en el equipo.



Los resistores R14 y R15 ponen un voltaje en la puerta del PUT de $1/2 V_{cc}$ por lo que cuando en el ánodo haya 0.5 voltios más que esto se logrará su disparo permitiendo que el capacitor C6 se descargue a través de él. Este capacitor recibe su carga de tal forma que cuando el voltaje de control V_x sea cero ésta tenga un período igual al semiciclo de la onda sinusoidal de 60 Hz., es decir 8.33 mseg. El cálculo es el siguiente:

$V_c = V_o e^{-t/RC}$: ecuación de voltaje para la carga de un capacitor

$C = \frac{-t}{R \cdot \ln(V_c/V_o)}$: donde $R = 69 \text{ K-ohmios.}$

$t = 8.33 \text{ mseg.}$

$V_o = 5 \text{ Voltios.} = V_{cc.}$

$C = 0.23 \text{ uF.}$

$V_c = \frac{1}{2} V_{cc} + .5 = 3 \text{ V.}$

Cuando el voltaje de control se varía mediante el potenciómetro localizado en el frente del equipo (llamado REFERENCIA) ingresa al circuito a través del potenciómetro Pot 1 que sirve para calibrar el ángulo máximo de disparo a 170 grados. A medida que el voltaje V_x crece, la carga del capacitor se efectúa más rápidamente dentro del período establecido anteriormente.

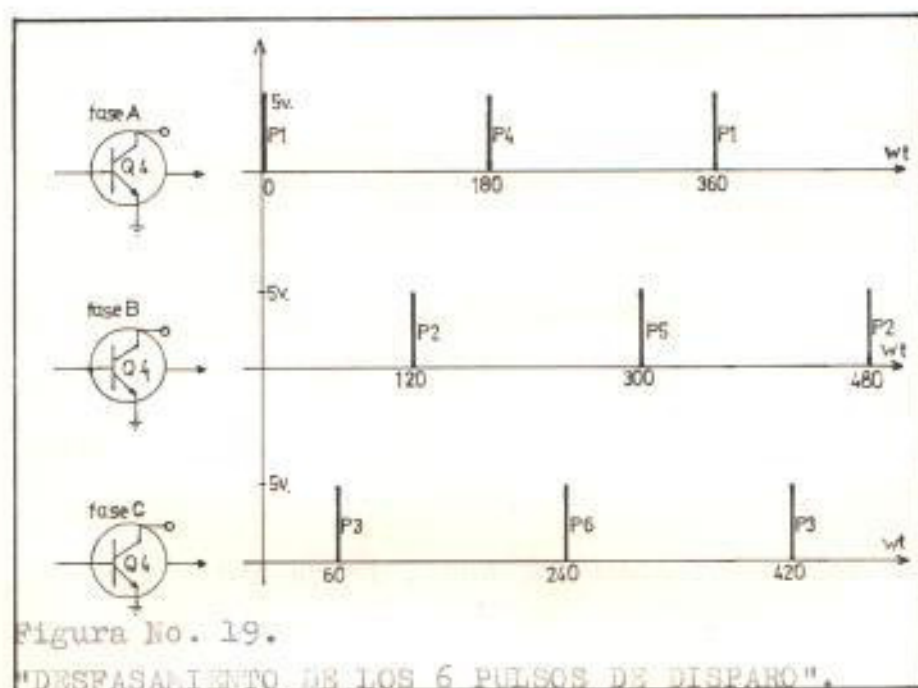
Lo que se está haciendo al aumentar el voltaje de control V_x es disminuir el ángulo de disparo hasta un valor mínimo de 8 grados, los mismos que se deben a retrasos introducidos por los capacitores C_3 y C_4 de 0.1 mseg.; de las redes de entrada que sirven como filtros pasa-bajo de .4 mseg. y del voltaje base-emisor necesario para la conducción del transistor Q_4 de 0.1 mseg. Todos estos valores han sido tomados experimentalmente.

Estos 0.6 mseg. representan unos 12 grados de retraso total de la señal de pulso de disparo respecto a la señal de fuerza, que alimentan a los tiristores, al comienzo de la onda sinusoidal, por lo que el mínimo ángulo de disparo sería 12° ; pero para compensar en algo este retraso se ha colocado el capacitor C_5 , el mismo que aumenta la rapidez de carga del capacitor C_6 en ángulos de disparo muy cercanos al mínimo, obteniéndose el valor de 8° antes nombrado.

Al momento de la descarga del C_6 se produce un pico negativo de aproximadamente -1.5 V. (medido experimentalmente), el mismo que es absorbido por la red C_7 y R_{16} que de lo contrario caería en la base del transistor Q_4 .

Este transistor pasa en saturación durante todo el semiciclo de la onda sinusoidal a excepción de los pocos micro-segundos que dura la descarga del C6, ya que la red C7 y R16 elimina solamente la parte negativa del pico de voltaje que se produce manteniendo la base del Q4 a tierra durante 15 useg. La frecuencia de estos pulsos que en el colector de Q4 son positivos es 120Hz

En las fases B y C de control también se tienen estos pulsos pero defasados 120° y 240° de los de la fase A respectivamente y todos son comandados simultáneamente por el voltaje Vx. La siguiente figura muestra lo anteriormente expuesto.



La segunda parte del circuito de disparo consta, como se dijo al inicio del capítulo, de los bloques cuyas señales generadas dependen de las conexiones que se hagan exteriormente en los terminales "P" y "G". Estos bloques son :

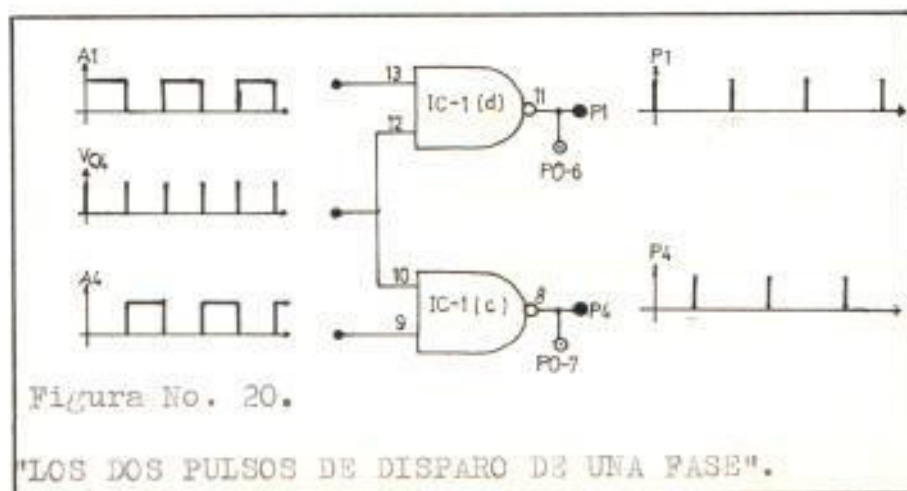
- 1.- Circuitos de sincronismo.
- 2.- Modulación a 60 Hz. de un tren de pulsos de 28KHz
- 3.- Amplificador de pulsos.

2.4.4 Circuitos de sincronismo : La utilización equi probable de cualquiera de los 6 SCR con que el equipo cuenta es posible si se tiene acceso al circuito de disparo para escoger el pulso adecuado que dispare a los SCR (rectificadores controlados de silicio).

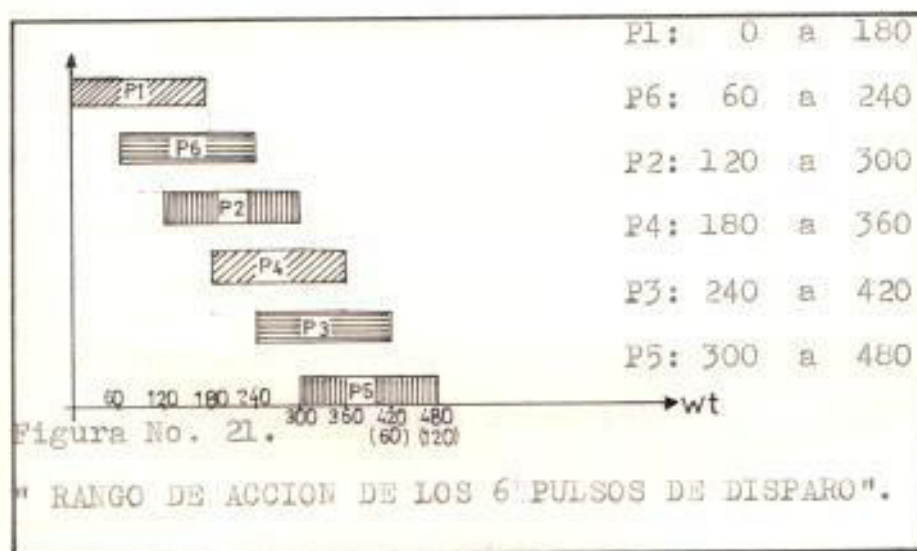
En la sección anterior se vió la producción en cada fase de un tren de pulsos a una frecuencia de 120 Hz. Cada uno de ellos va a ser dividido en dos cuya frecuencia sea entonces igual al de la línea y para ello es la necesidad de los generadores de onda cuadrada explicados anteriormente.

Los circuitos en sí , uno por cada fase, son unas puertas lógicas TTL 7400 (nand de 2 entradas). Los trenes de onda de 120 Hz. y las ondas

cuadradas de 60 Hz. y 180° de desfaseamiento lleguen a estas puertas tal como se muestra en la siguiente figura.



Como esto ocurre en las tres fases, se tienen entonces 6 trenes de pulsos defasados 60° entre sí en la siguiente forma : P1 y P4 para la fase A , P2 y P5 para la fase B, P3 y P6 para la fase C. La figura siguiente muestra el rango de acción de c/u de estos pulsos.



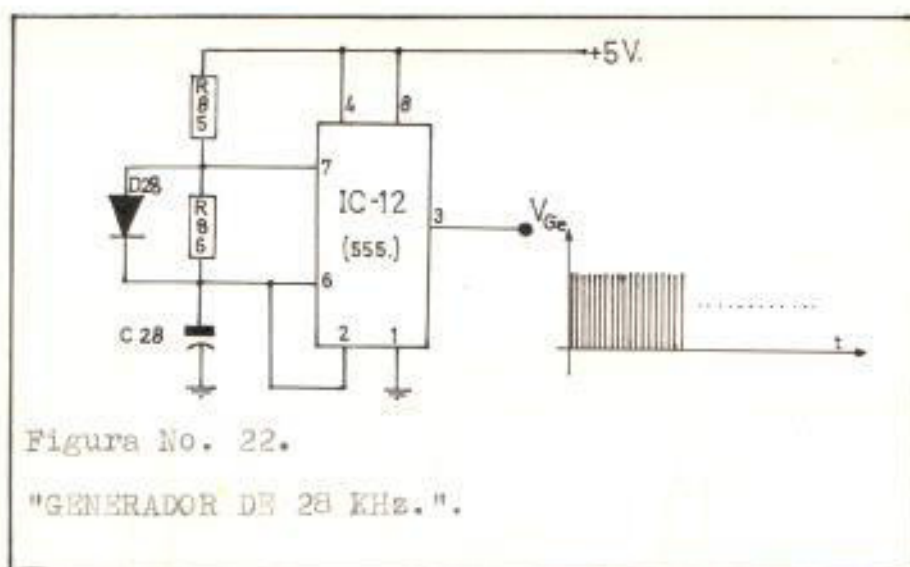
Como puede verse cada par de pulsos barre los 360° de un ciclo de la señal alterna de la fase correspondiente, de modo que c/u lo hace desde 0° a 180° en la semionda dentro de la cual va a moverse a medida que se varíe el voltaje de control V_x . Estos pulsos están presentes en los 6 terminales "P" en el tablero de conexiones, el mismo que también tiene los terminales llamados "G" en los cuales se conectan los pulsos adecuados para el funcionamiento de un rectificador y cuando esto ocurre lo que se hace es ingresarlos nuevamente al circuito de disparo a otras puertas naná 7400.

Debido a que el pulso es muy angosto en duración (15 useg) y no se repite dentro del semiciclo de la señal alterna es necesario producir una "ráfaga" de pulsos para asegurar el encendido de los SCR utilizados , cuyas características se dan en el apéndice A.

Existen sin embargo otros métodos para producir pulsos unitarios que den la suficiente confiabilidad de encendido de los tiristores, los cuales son tratados también en el laboratorio. Uno de ellos es por ejemplo mediante el uso del UJT (transistor de junta única).

2.4.5 Modulación a 60 Hz. de pulsos de 28 KHz.: Cada uno de los 6 pulsos vistos anteriormente van a ingresar a sendos circuitos monostables cuyas salidas de aproximadamente 2.0 mseg. de duración van a servir para modular una señal de 28 KHz. producida en el IC12.

Como puede verse en la figura No 22, se utiliza un CI 555 como multivibrador Astable para generar la señal de 28 KHz.



El capacitor C28 se carga a través de la resistencia R85 y el diodo D28, el mismo que cortocircuita a R86 con el objeto de disminuir el período de carga que es cuando el 555 se mantiene en alto su salida, nivel DC innecesario porque en él la bobina primaria del transformador de

pulsos es un cortocircuito. Los tiempos de carga y descarga, el período y la frecuencia de operación de este circuito están calculados así:

$$T_{\text{alto}} = 0.693 (R_a + R_b) C \quad R_b = 0$$

$$R_a = R85 = 4.7K$$

$$T_{\text{alto}} = 3.26 \text{ useg.}$$

$$C = C10 = .001$$

$$T_{\text{bajo}} = 0.693 R_b C$$

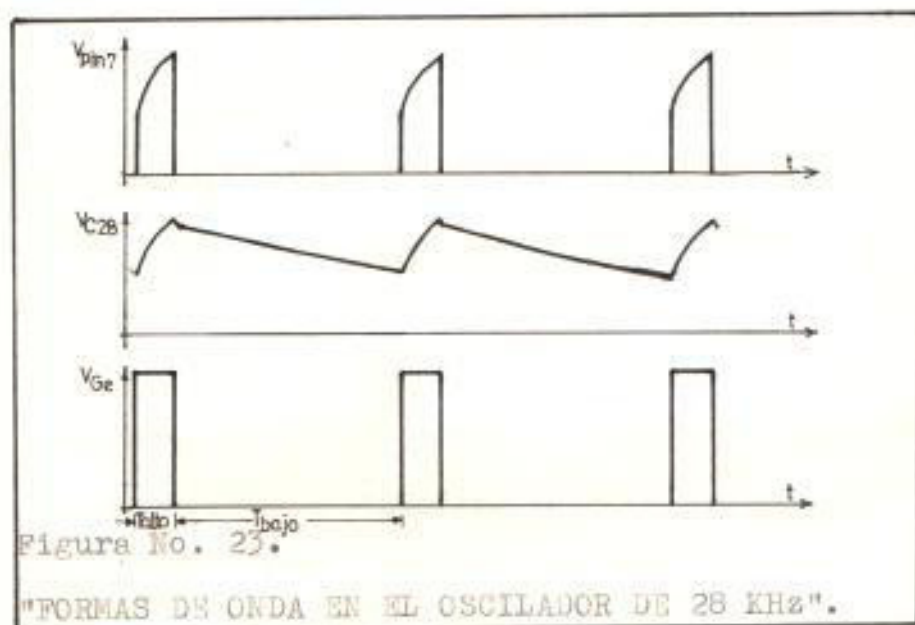
$$R_b = R86 = 47 K$$

$$T_{\text{bajo}} = 32.57 \text{ useg.}$$

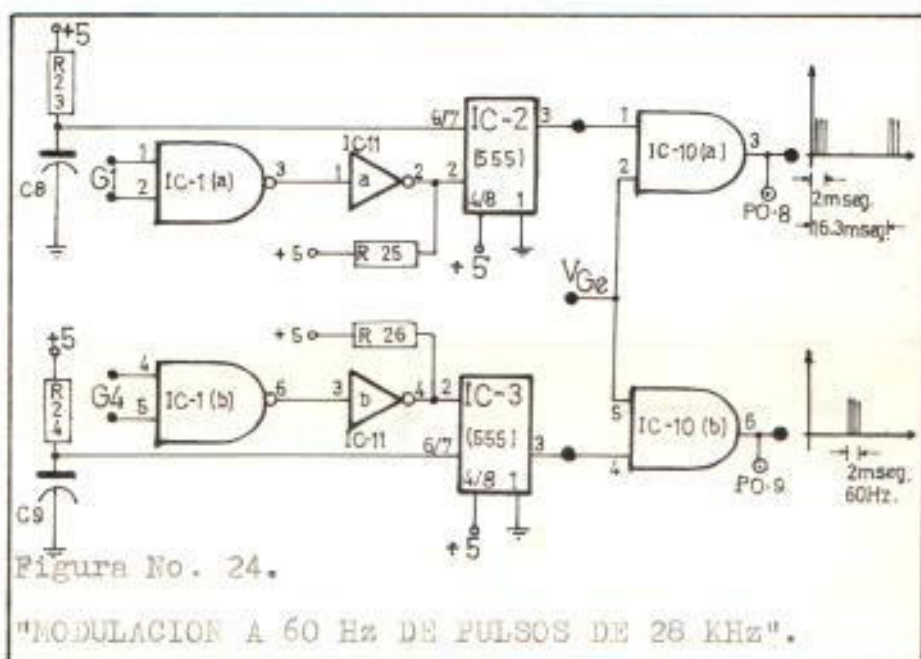
$$T_{\text{total}} = 35.83 \text{ useg.} = T$$

$$f = \frac{1}{T} = 28 \text{ KHz}$$

Las formas de ondas referentes a este circuito son las siguientes :

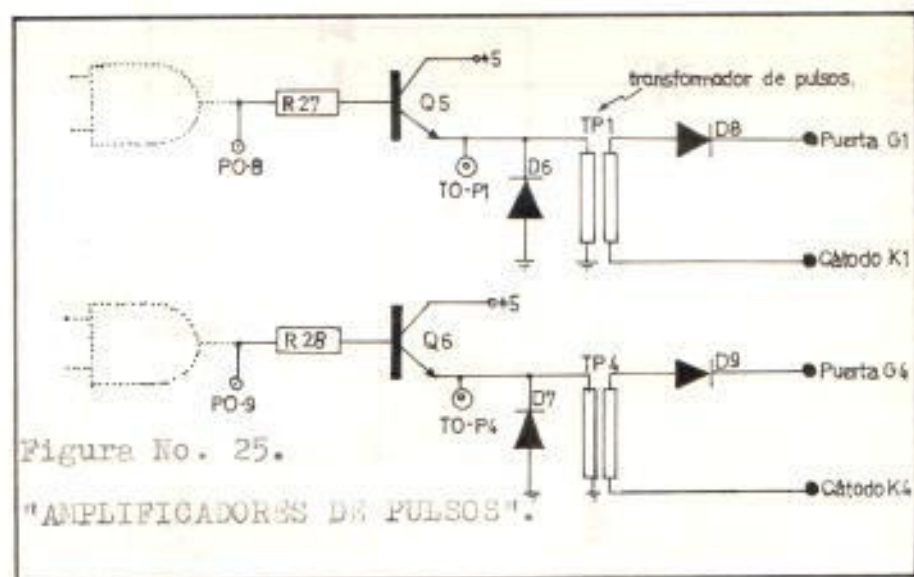


Este tren de pulsos de alta frecuencia son luego modulados por la señal generada en c/u de los multivibradores monostables a base de 555 llamados IC-2 e IC-3 de cada fase. Estos circuitos se ven en la figura que sigue .



2.4.6 Circuito de amplificación de pulsos.: Debido a que la corriente de salida de los TTL es baja, es necesario para el disparo de los SCR se intercale una etapa reforzadora de corriente. Esta consiste en un transistor por cada pulso, es decir hay 2 en cada fase, Q5 y Q6, que reciben en su base la señal modulada de 28 KHz y los hacen trabajar como "interruptor" ya que los ponen en saturación cada vez que ésta es alta y en corte cada vez que es baja, es decir en los

períodos de carga y descarga, respectivamente, del capacitor C28. La figura No 25 muestra este circuito y en el cual los diodos D6 y D7, de interrupción rápida (100 nseg) ,evitan el paso de pulsos negativos al terminal puerta de los tiristores que están conectados al secundario de los transformadores de pulso. Los diodos D8 y D9 sirven para evitar corrientes de fuga desde el circuito de fuerza hacia el de control en caso de daño en los SCR.



En la figura de arriba se tienen los puntos de PO-8 : que son puntos internos de observación TO-P1 : para observación de los pulsos P1 en el exterior del equipo.

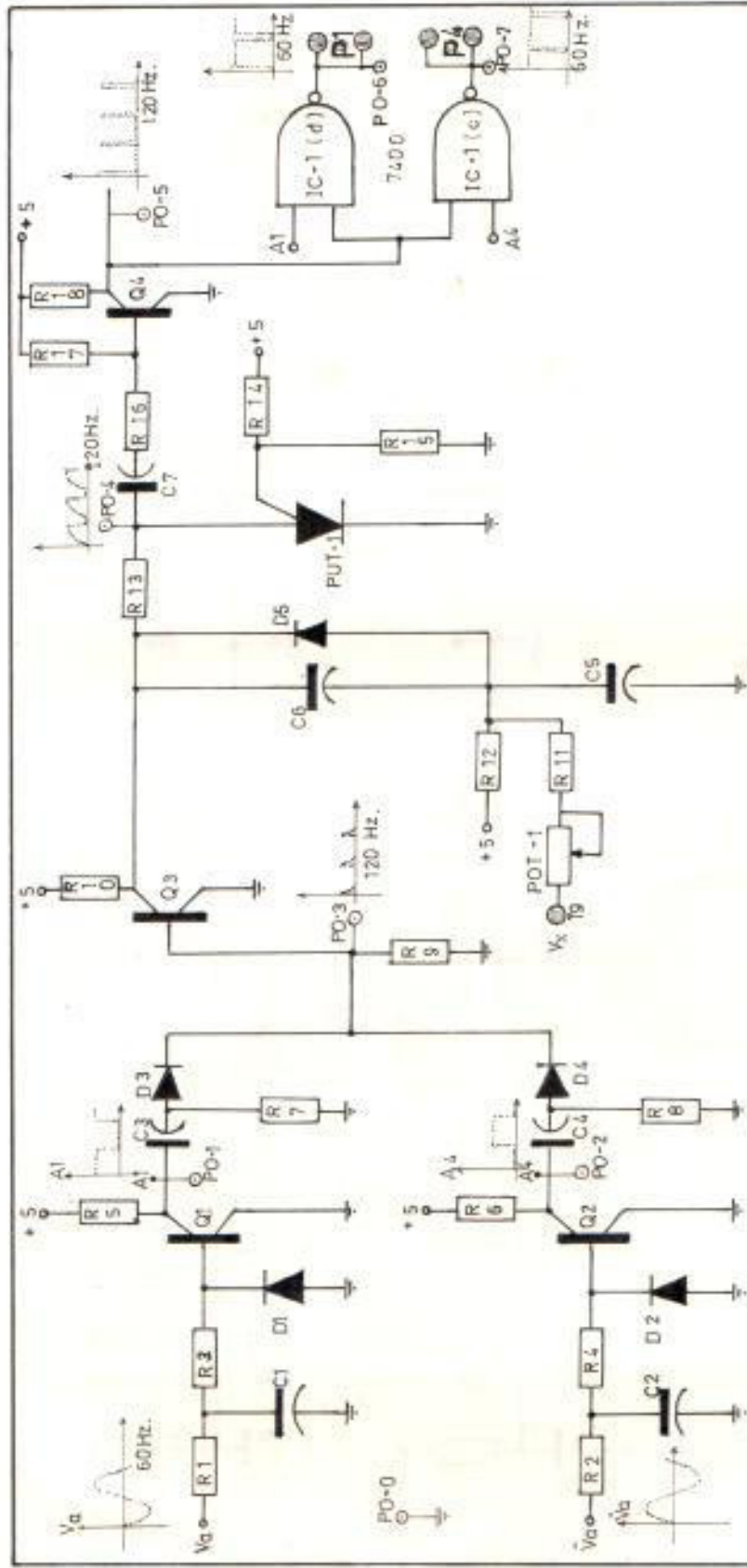
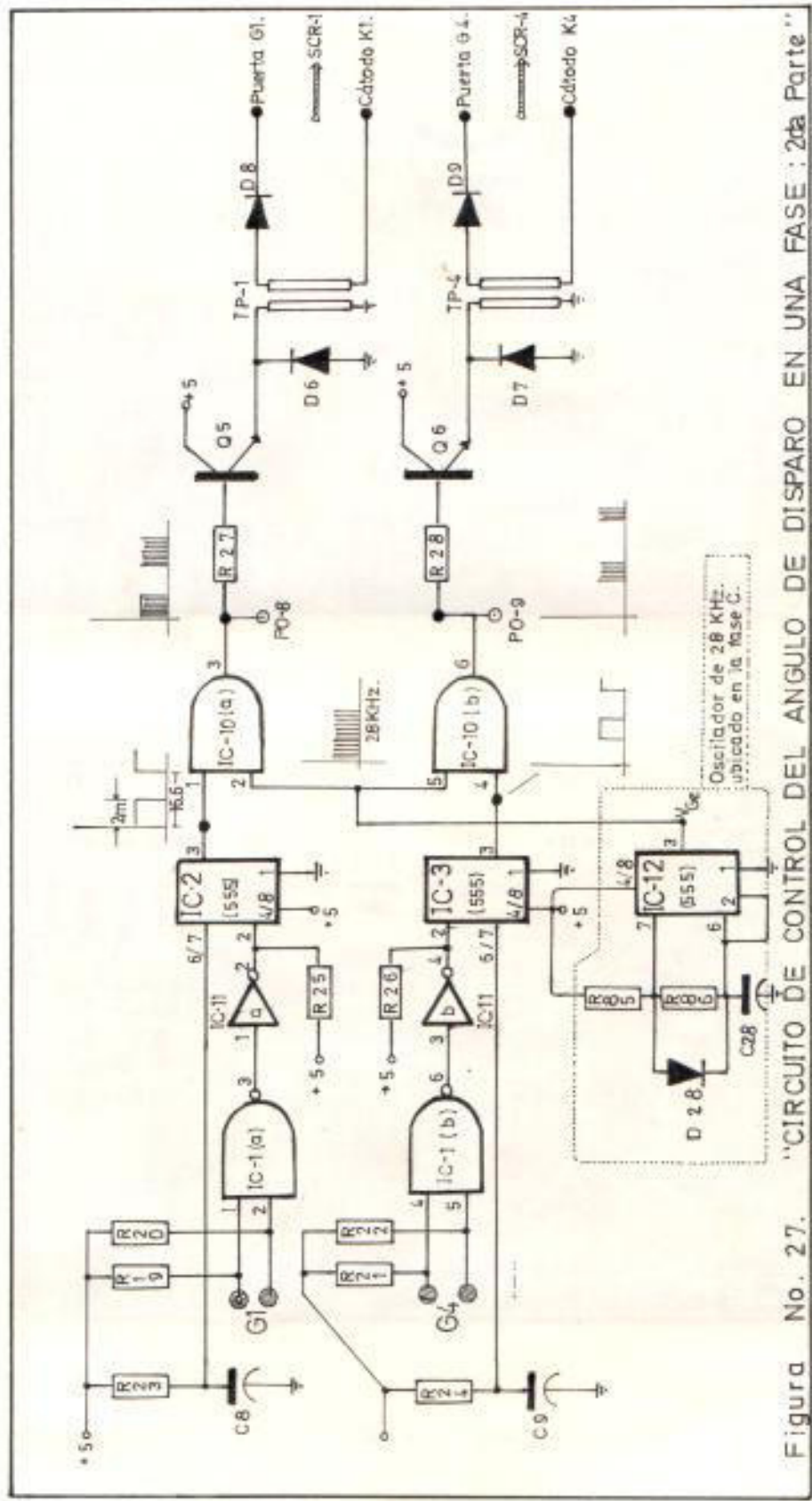
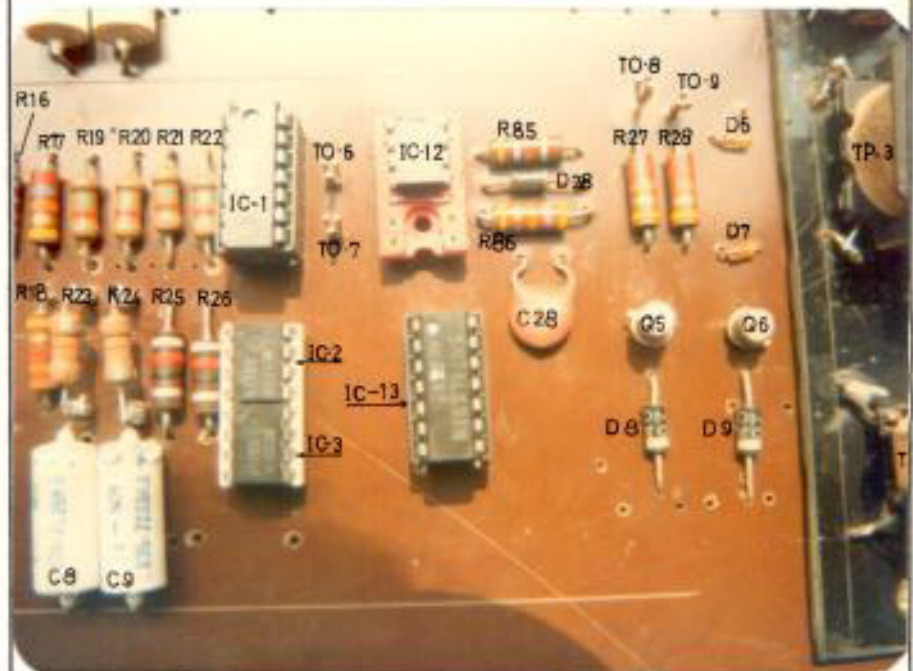


Figura No. 26. "CIRCUITO DE CONTROL DEL ANGULO DE DISPARO EN UNA FASE : 1ra Parte"





1ra parte.



2da parte

Figura No. 27a.

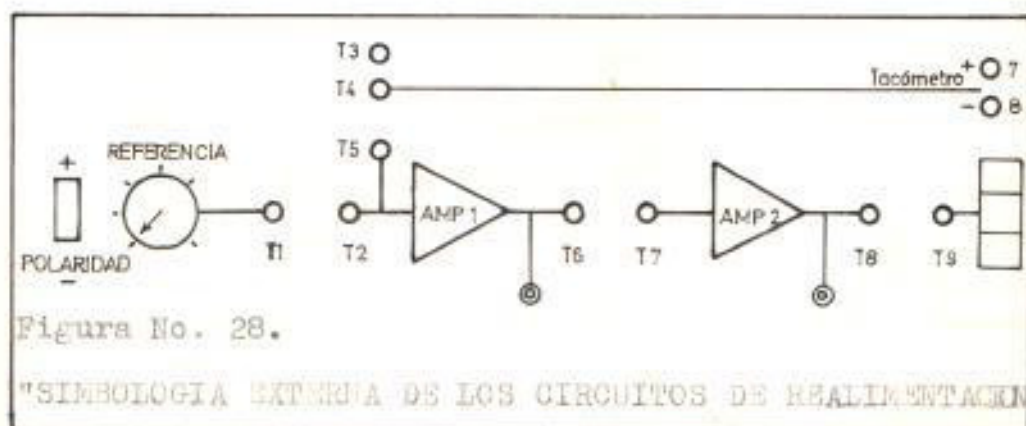
"CIRCUITERIA TOTAL DEL CONTROL DEL ANGULO CC".

2.5 CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR.

Entre las prácticas que se realizan en el laboratorio está la de control de velocidad de un motor DC mediante lazo abierto y lazo cerrado. Hasta aquí se ha visto el sistema en lo que se refiere a la generación de pulsos de disparo los mismos que desplazan en un rango de 180° al variar el voltaje de control V_x mediante el giro del potenciómetro "REFERENCIA" en el tablero de conexión, voltaje que está presente en este tablero en el terminal llamado T1 y que para efectuar una práctica de lazo abierto se lo debe conectar al T9 para que ingrese al circuito de control a través del potenciómetro Pot 1 de cada fase, y así aumente la rapidez de carga del capacitor C6 y dispare al PUT correspondiente produciendo un pulso, tal como se ha estado viendo en los artículos anteriores. Esto es indistintamente del tipo de carga en lazo abierto.

Cuando se trabaja con lazo cerrado, sea éste simple ó doble, el voltaje de control V_x ya no viene al terminal T9 desde el T1 sino desde T8 que es la salida de un controlador proporcional integral mediante un op-amp. 741. Si es un lazo simple sólo se utiliza un op-amp. y es el caso de lazo cerrado de corriente mediante el AMP 2, llamado así en el tablero de conexión. Si es lazo doble se utilizan el AMP 1 y el AMP 2, tal

como se ve en la figura siguiente, en donde se muestra la simbología de los circuitos de realimentación de lazo cerrado en el frente del equipo.

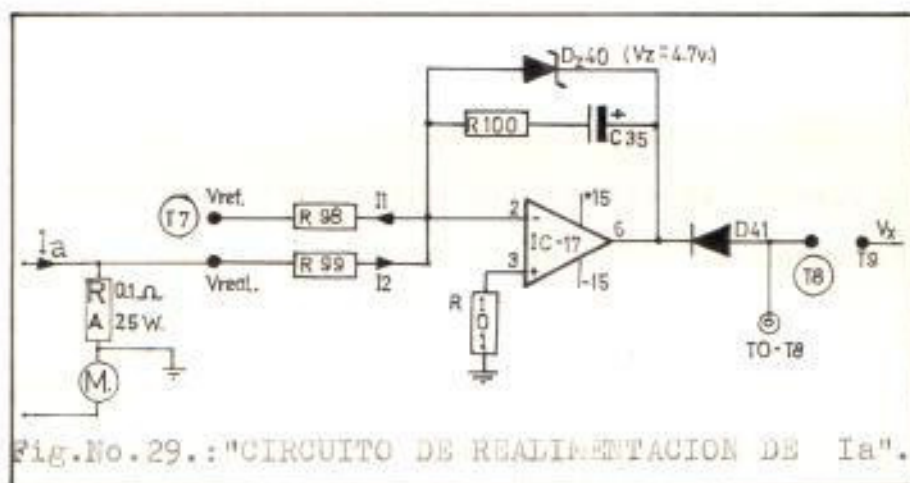


En un sistema de lazo abierto, la velocidad de un motor no puede ser controlada sino tan sólo variada mediante el ángulo de disparo de los tiristores que conforman el rectificador. En un sistema de lazo cerrado se realimenta una muestra del parámetro de la máquina a ser controlado a través de una red de realimentación hacia el sistema de control. Según esto, en el equipo se pueden realizar las siguientes experiencias de lazo cerrado.

- 1.- De corriente de armadura I_a .
- 2.- De voltaje y corriente de armadura : V_a e I_a .
- 3.- De velocidad y corriente de armadura : V_e e I_a .

A continuación se describen cada uno de estos lazos y sus circuitos.

2.5.1 Lazo cerrado de corriente : Ésta realimentación se la realiza por medio de una resistencia de alambre de 0.1 ohmio y 25 vatios colocada en serie con la armadura y que proporcionará 0.1 voltio por cada amperio de corriente de armadura . Este voltaje estará presente en la resistencia R99, llamada resistencia de valoración, en la figura No 29.



El IC-17 es un op-amp trabajando como controlador proporcional-integral para el lazo cerrado de corriente. Las dos resistencias de valoración R98 y R99 han sido escogidas para que las corrientes que se desarrollan en ellas tengan aproximadamente las mismas magnitudes en todo el rango del ángulo de disparo.

Tomando en cuenta que el voltaje de realimentación (depende de la corriente de armadura) que pa

ra el caso no será mayor de 0.75 voltios ya que la corriente nominal del motor utilizado es 7.5 amperios se tendrán los valores siguientes para las corrientes I1 e I2 a través de las resistencias de valoración R98 y R99 respectivamente :

$$I1 \text{ máx} = \frac{\text{voltaje de referencia}}{R98} = -50 \text{ uA.}$$

$R98 = 100 \text{ K.}$

$$I2 \text{ máx} = \frac{\text{volt. de realimentación}}{R99} = +75 \text{ uA.}$$

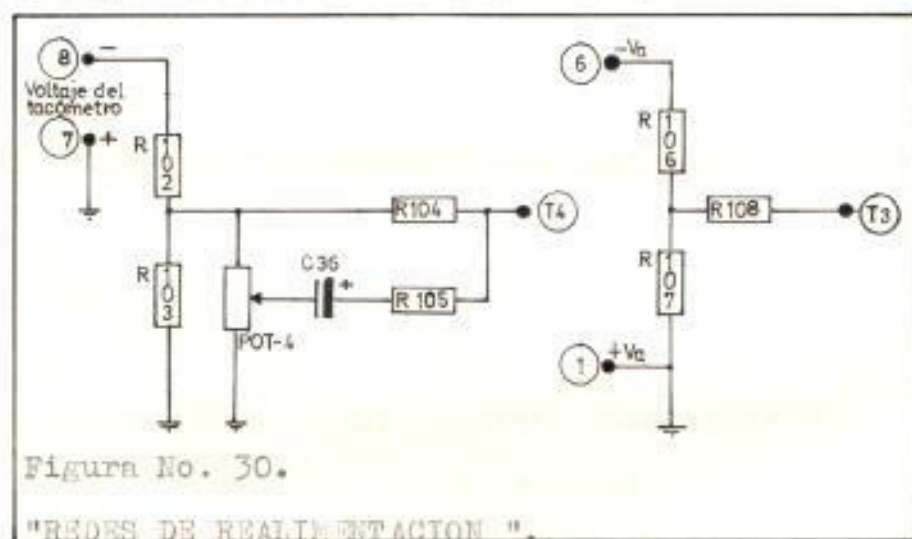
$R99 = 10 \text{ K.}$

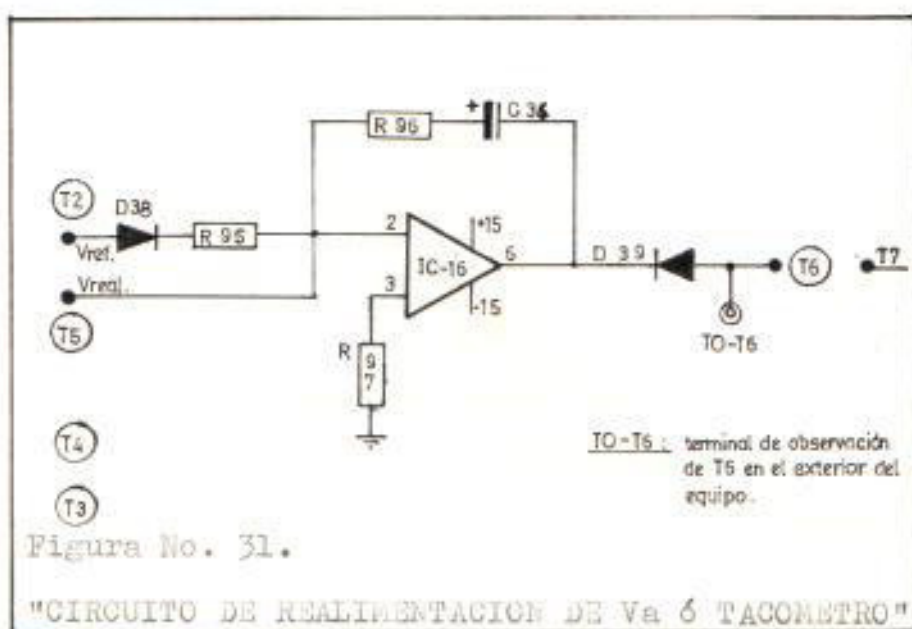
El voltaje de referencia nombrado arriba es un voltaje de control negativo tomado del IC-15, un op-amp 741, mediante el interruptor "Polaridad" en el tablero de conexiones del equipo. Es negativo porque va a ser ingresado a la entrada inversora del op-amp IC-17 que es el controlador que va a comandar el ángulo de disparo en el circuito de control, al cual siempre debe de llegar un voltaje positivo, llamado Vx.

En el equipo el ángulo máximo de disparo es 170 grados y para cuando se esté en este caso existe un pequeño voltaje aplicado a la armadura, el mismo que también representará una corriente pequeña de armadura, aproximadamente de 0.05 amperios y que ocasiona una corriente I2 positiva en la resistencia R99 que no tiene con que com

pararse ya que el voltaje de referencia es cero y por tanto $I_1=0$. Esa corriente I_2 hace que el capacitor C35 se cargue de tal manera de producir que en el op-amp IC-17 halla una salida negativa de .8 voltios, medidos experimentalmente, que provoca disparos erráticos del PUF correspondiente y por consiguiente de los SCR. Para evitar este efecto se ha colocado el diodo D41, en el cual existe una caída de .7 V. anulando así el voltaje negativo descrito anteriormente.

2.5.2 Doble lazo cerrado : Este puede ser de voltaje y corriente de armadura ó velocidad y corriente de armadura. Para cualquiera de los dos casos existen redes de realimentación, ver figura No 30, que sirven para proporcionar una muestra del parámetro realimentado en el terminal T5 de la figura No 31. de la página siguiente.





Cuando se utiliza doble lazo, el voltaje de referencia del op-amp IC-17 ya no es el presente en el terminal T1 del tablero de conexiones, si no el del terminal T6 que corresponde a la salida del op-amp IC-16 que es otro controlador proporcional-integral utilizado para el lazo de velocidad ó de voltaje de armadura.

En la entrada inversora del op-amp IC-16 llegan la señal de "referencia" del parámetro a controlarse y la señal de realimentación del mismo. La primera lo hace a través de la resistencia de valoración R95 y el diodo D38 y debe ser positiva, para ello el interruptor "polaridad" debe estar colocado en "+". La segunda ingresa en el terminal T5 al conectarse con el T4 cuando es ve

velocidad y con T3 cuando es voltaje.

En la siguiente foto se pueden ver los circuitos de realimentación de velocidad, de voltaje de armadura y los circuitos de los amplificadores operacionales que sirven de controladores proporcional-integral cuando se hacen sistemas rectificadores con lazo cerrado de corriente y velocidad ó de corriente y voltaje de armadura

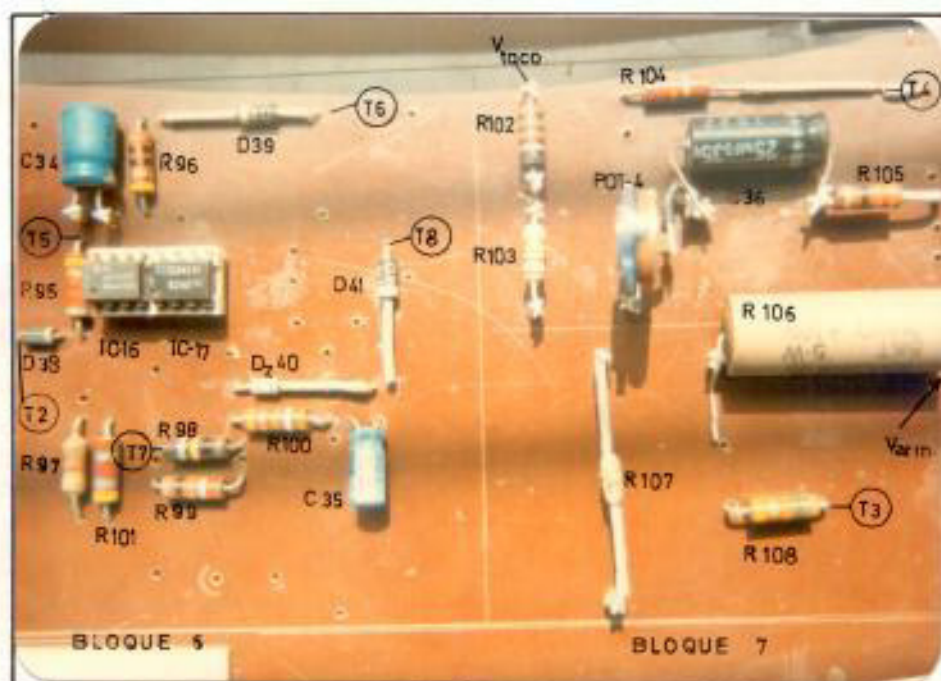


Figura No. 32.

"FOTO DE LAS REDES DE REALIMENTACION Y DE
LOS CONTROLADORES PROPORCIONALES-INTEGRALES".

2.6 INSTRUMENTOS INCORPORADOS.

En las prácticas que se realizan en el laboratorio muchas veces es necesario hacer la medición del ángulo de disparo de los tiristores, acto que se efectúa mediante la utilización del osciloscopio en el cual se debe estar graduando la escala del tiempo a valores que permitan la lectura de una forma más fácil. En este equipo se ha incluido un medidor de este ángulo facilitando la realización de la práctica al estudiante. A continuación se muestra la circuitería de este instrumento en el equipo y en la siguiente página su diagrama circuital.

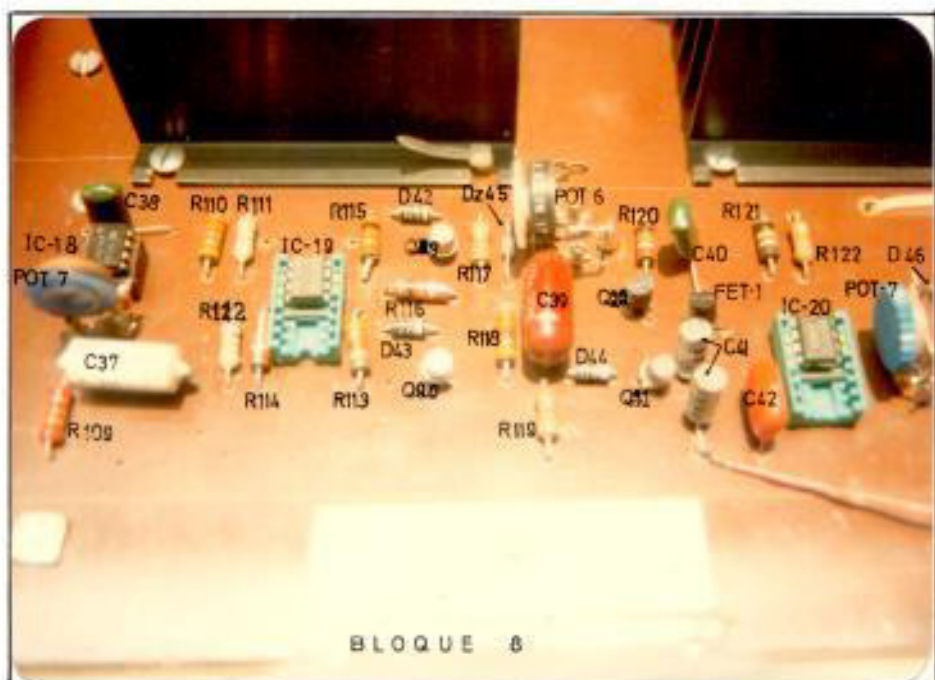


Figura No. 33.

"FOTO DEL CIRCUITO DE MEDICION DEL ANGULO CC".

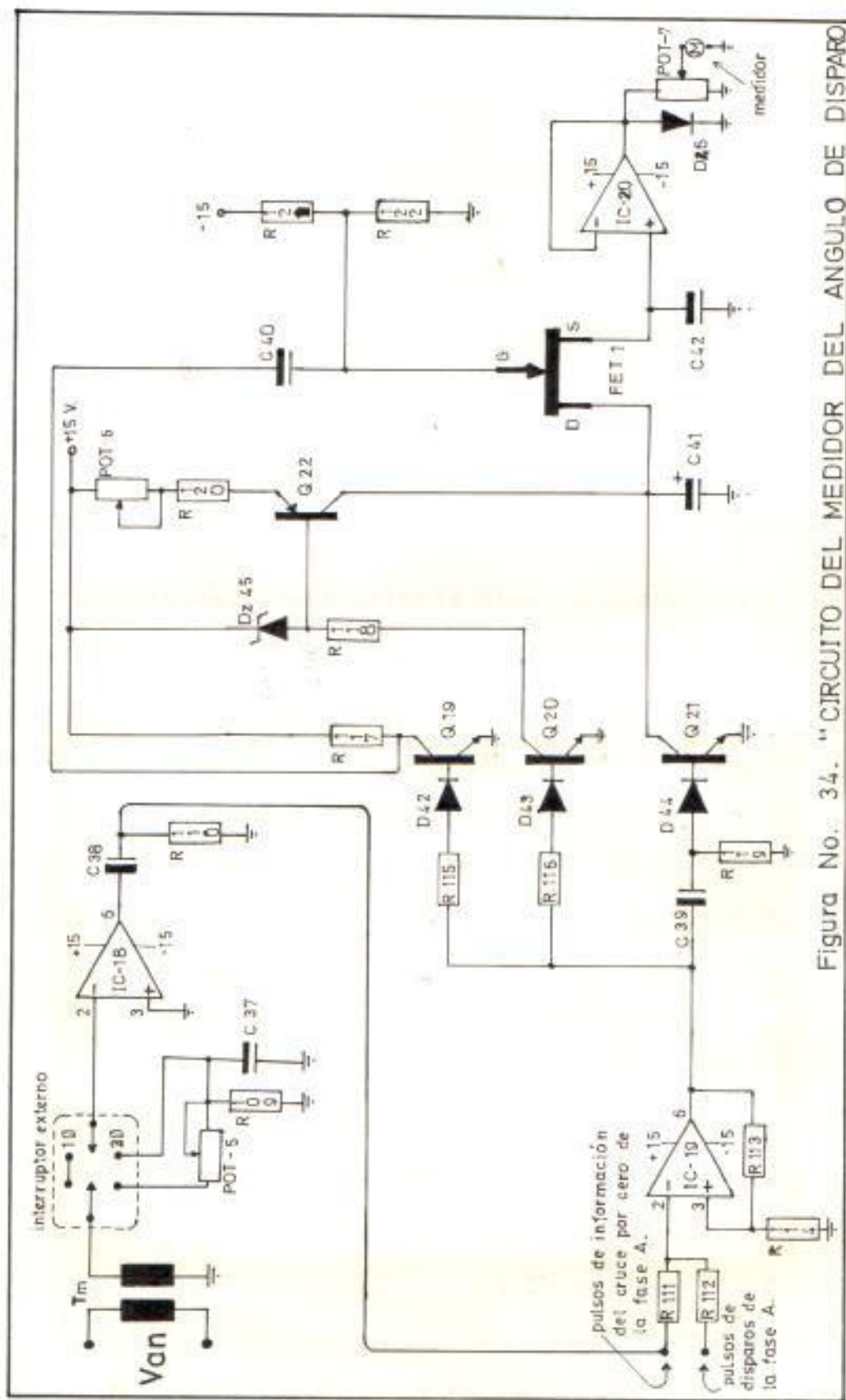


Figura No. 34. "CIRCUITO DEL MEDIDOR DEL ANGULO DE DISPARO"

Al circuito mostrado ingresan dos señales :

- 1.- El pulso de disparo producido en la fase A,
- 2.- La información de cruce de cero de la onda Van.

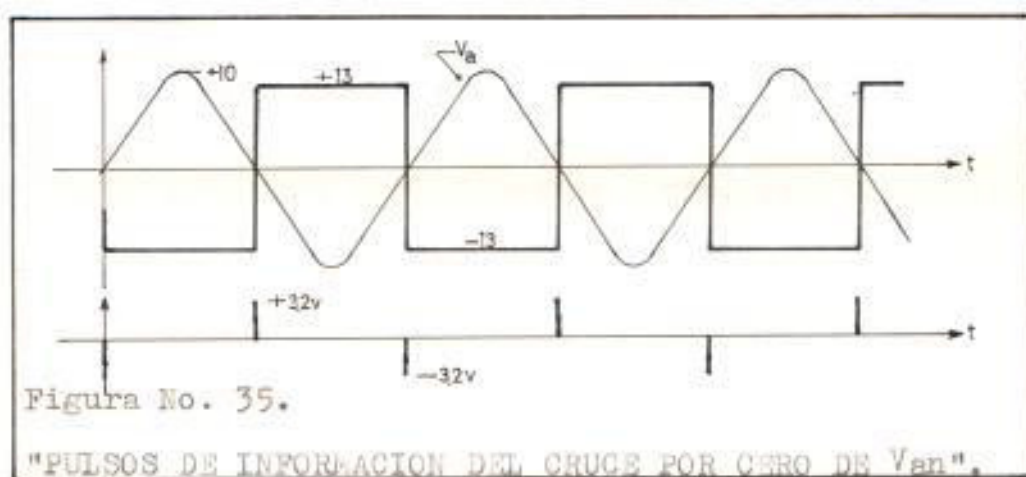
Como se puede ver, se hace la medición del ángulo de disparo de una fase, la A, ya que por diseño del circuito de control todas las fases son idénticas y sus pulsos de disparo se desplazan simétricamente con el mismo voltaje de control V_x .

La onda sinusoidal Van llega al primario del transformador Tm, figura No 34, obteniéndose en su secundario unos 6 voltios. Este voltaje tiene dos caminos a seguir dependiendo del tipo de configuración que se haga (1φ ó 3φ) y que se selecciona con un interruptor en el frente del equipo. Cuando es monofásica, ingresa directamente a la entrada inversora del op-amp 741 IC-18; cuando es trifásica, pasa primero por una red defasadora que permite compensar el ángulo de disparo para que se lea $\alpha = 0^\circ$ cuando en el medidor marca un valor de $\omega t = 30^\circ$.

La red defasadora está formada por R109, C37 y Pot-5, y éste último es el que sirve para calibrar el ángulo exacto de defasamiento. Cualquiera sea la configuración, llega un voltaje alterno a la entrada inversora del op-amp IC-18 que trabaja como comparador inversor haciendo que su terminal de salida (pin 6) vaya a sa-

turación positiva ó negativa dependiendo si es el semiciclo negativo ó positivo respectivamente.

Una red diferenciadora, C38 y R110, forma de esta señal de salida unos impulsos de 3.2 V.de amplitud (medidos experimentalmente) que proporcionan la información de cruce de cero de la onda alterna, tal como se ve en la siguiente figura.



El op-amp IC-19, que también trabaje como comparador, recibe la suma de la información obtenida en la red diferenciadora y la del pulso de disparo obtenida en el transistor Q4 de la fase de control A en su entrada inversora (pin 2), mientras que en la no inversora está presente una realimentación positiva de su voltaje de salida a través de las resistencias R113 y R114.

Al momento que la onda alterna cruza por cero de menos a más, llega al pin 2 un impulso negativo de ma -

yor magnitud que la referencia existente en la entrada no inversora (pin 3), por lo que el voltaje diferencial, que es la diferencia entre el voltaje de la entrada no inversora menos el de la inversora, se hace positivo y esto implica que la salida del op-amp toma valores de saturación positiva (+13 V.).

Al momento de llegar a la entrada inversora el pulso de disparo, que es positivo y de mayor magnitud que la referencia actual en el pin 3, el op-amp se satura negativamente en -13 V. permaneciendo así hasta el siguiente cruce por cero de menos a más, ya que en todo cruce de más a menos el voltaje diferencial es negativo implicando saturación negativa.

Al desplazar el ángulo alfa de disparo se está produciendo una señal cuadrada de mayor ó menor duración y que comienza en el cruce de cero y termina en el momento de disparo. El objetivo de este circuito es entonces convertir esta señal en un voltaje proporcional que pueda ser medido en una escala graduada desde 0° a 180° . En las siguientes figuras se ve algunos ejemplos de esto, teniéndose los casos de ángulo mínimo de disparo, un ángulo intermedio y el ángulo máximo que se puede obtener en el equipo.

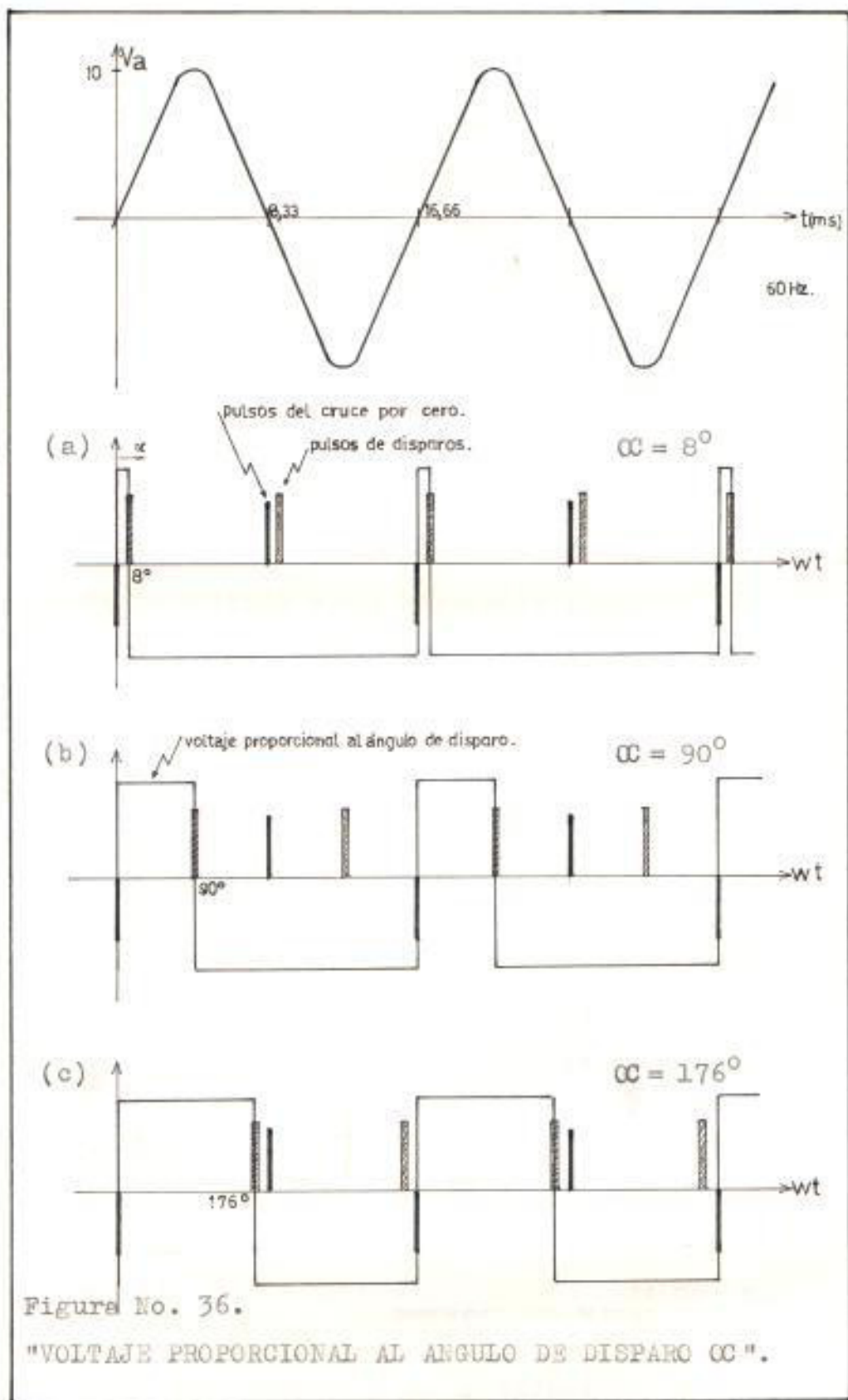


Figura No. 36.

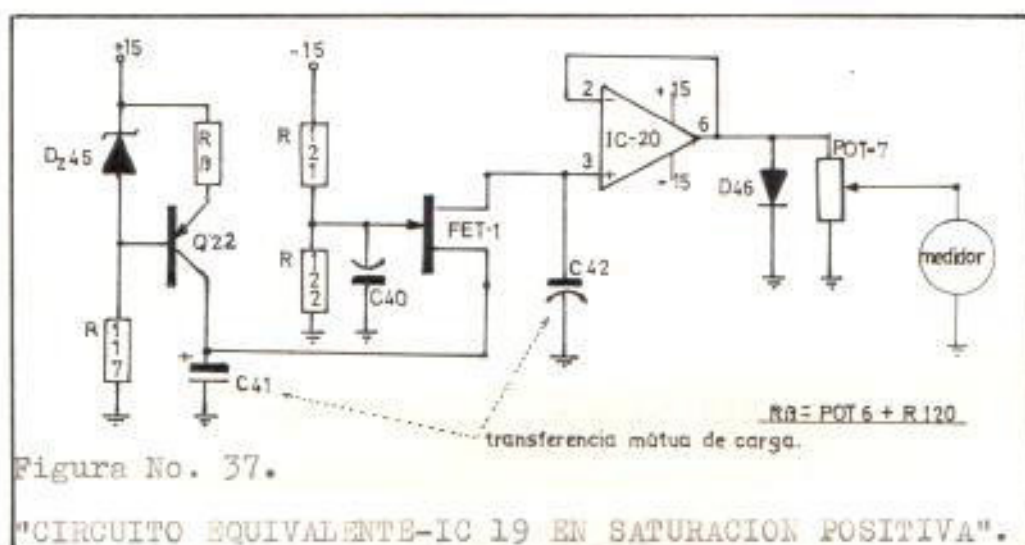
"VOLTAGE PROPORCIONAL AL ANGULO DE DISPARO α ".

Durante el tiempo en que el IC-19 está en saturación positiva, los transistores Q19 y Q20 se encuentran en saturación también, existiendo 0.7 Voltios en su base con respecto al emisor que está aterrizado. Los diodos D42 y D43 evitan que el voltaje de salida negativo del op-amp IC-19 se aplique al diodo base-emisor.

La saturación de Q20 permite poner en la base de Q22 un voltaje constante de 11 voltios a través del diodo zener Dz45 convirtiéndose así en una fuente constante de corriente para la carga del capacitor C41 y cuya ecuación de voltaje es la siguiente :

$$V_c = \frac{1}{C} I \cdot T$$

donde T : tiempo en que el IC-19 está en saturación positiva. El circuito equivalente para este caso queda como se ve en la figura No 37.



Durante el período en que el op-amp IC-19 está en saturación negativa, los transistores Q19, Q20 y Q21 están en corte por lo que no existe entonces la fuente de corriente constante mencionada y el C41 comienza a perder su carga positiva acumulada llegando incluso a ser negativa al final del período debido a la presencia del divisor de voltaje negativo entre R121 y R122 y del diodo puerta-fuente del FET 1, tal como se puede observar en la siguiente figura.

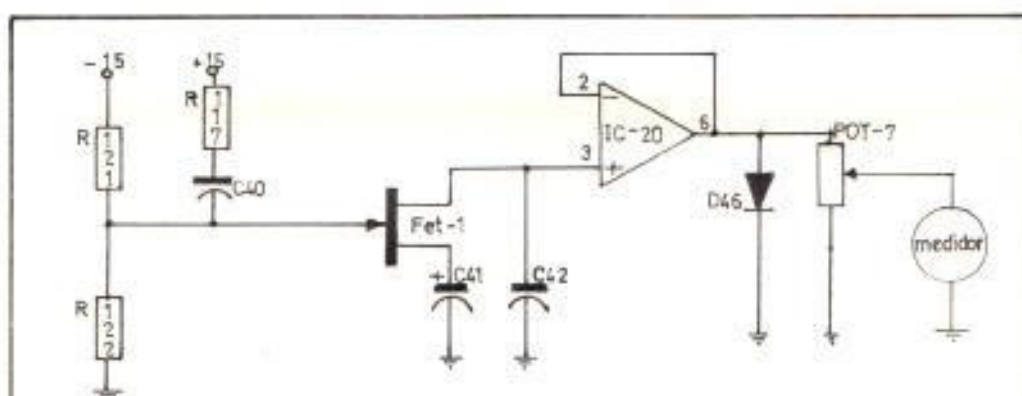


Figura No. 38.

"CIRCUITO EQUIVALENTE-IC 19 EN SATURACION NEGATIVA".

En el nuevo ciclo de saturación positiva del IC-19, el transistor Q21 constituye un cortocircuito para el capacitor C41 permitiéndole descargarse a través de él en un tiempo muy pequeño. Después de esto el proceso se repite, y siempre que se varía el ángulo de disparo el FET 1 transfiere la carga del C41 al C42 ó viceversa, dependiendo de si el ángulo crece ó disminuye, respectivamente. El voltaje presente en el C42 ingre-

sa a la entrada no inversora del op-amp IC-20 que trabaja como un amplificador-separador (en inglés : buffer) entre este circuito y el medidor, cogido desde el cursor del potenciómetro Pot-7. Tanto el Pot-6 como el Pot-7 sirven para graduar la escala en sus extremos, inicial y final respectivamente.

CAPITULO III

PRUEBAS EXPERIMENTALES.

3.1 PRUEBAS DE LAS ETAPAS.

En el capítulo anterior se vió paso a paso el funcionamiento del circuito de control del ángulo de disparo del equipo y otros circuitos adyacentes a sí como : las fuentes de alimentación DC., el medidor del ángulo de disparo(alfa) de los tiristores, los circuitos de realimentación, etc.

En este capítulo se trata de mostrar por medio de fotos algunas de las señales que sirvieron en el anterior para efectuar las explicaciones del caso

En cada una de las fotos se va a proporcionar las escalas tanto horizontal (tiempo) como vertical (magnitud) de las señales que aparecen y el punto dentro del circuito en donde fueron obtenidas.

Se tratará siempre de ir relacionando en la misma foto las señales para su fácil comprensión, es decir estarán en orden tal como se van generando.

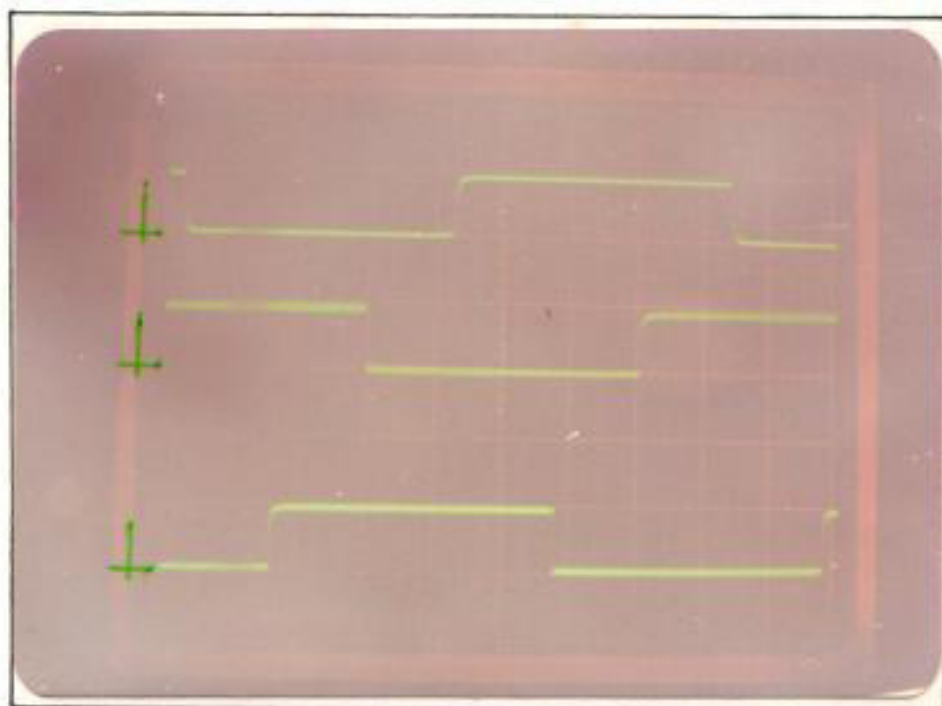


Figura No. 39.

"ONDAS CUADRADAS GENERADAS EN LOS TRANSISTORES Q1"

Desde arriba hacia abajo tenemos las fases A, B, y C. Estas ondas cuadradas generadas en los transistores Q1 de c/u de estas fases sirven luego para definir el rango de acción de los pulsos P1, P2 y P3, respectivamente.

Escalas : Para las 3 señales se tienen iguales y son, Magnitud = 5 V/div.

Tiempo = 2 mseg/div.

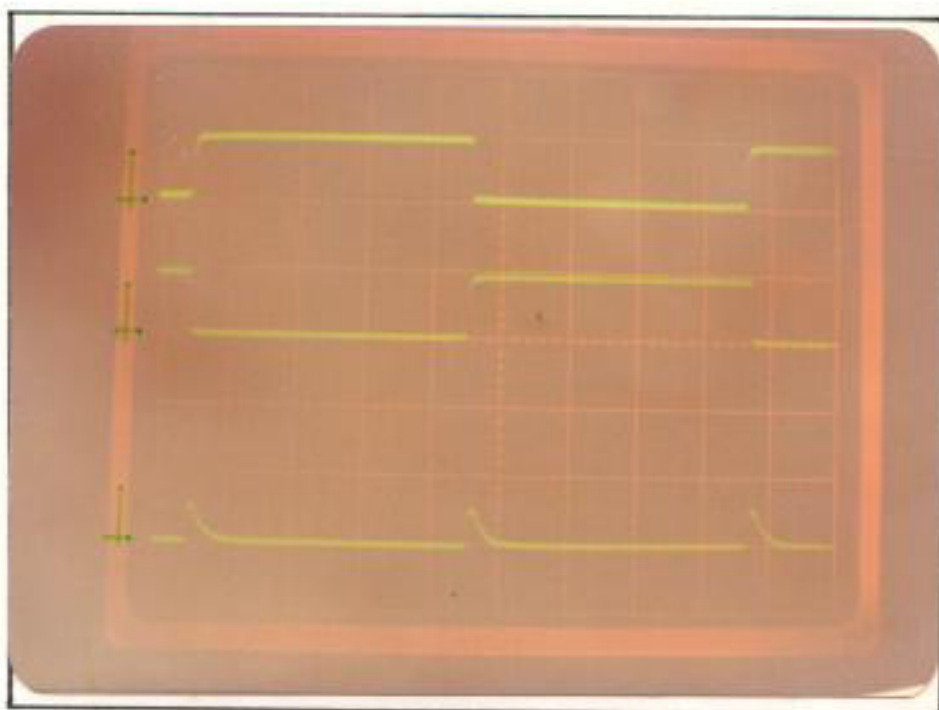


Figura No. 40.

"ONDAS CUADRADAS GENERADAS EN UNA FASE".

Observamos en las 2 señales de arriba las ondas obtenidas en los generadores de onda cuadrada las cuales se encuentran defasadas 180° entre sí. En la señal de abajo se muestra la salida de las redes diferenciadoras RC.

Escalas: Magnitud de las dos primeras = 5 V/div.

Magnitud de la última señal = 1 V/div.

Tiempo = 2 mseg/div.

Tiempo = 2 mseg/div.

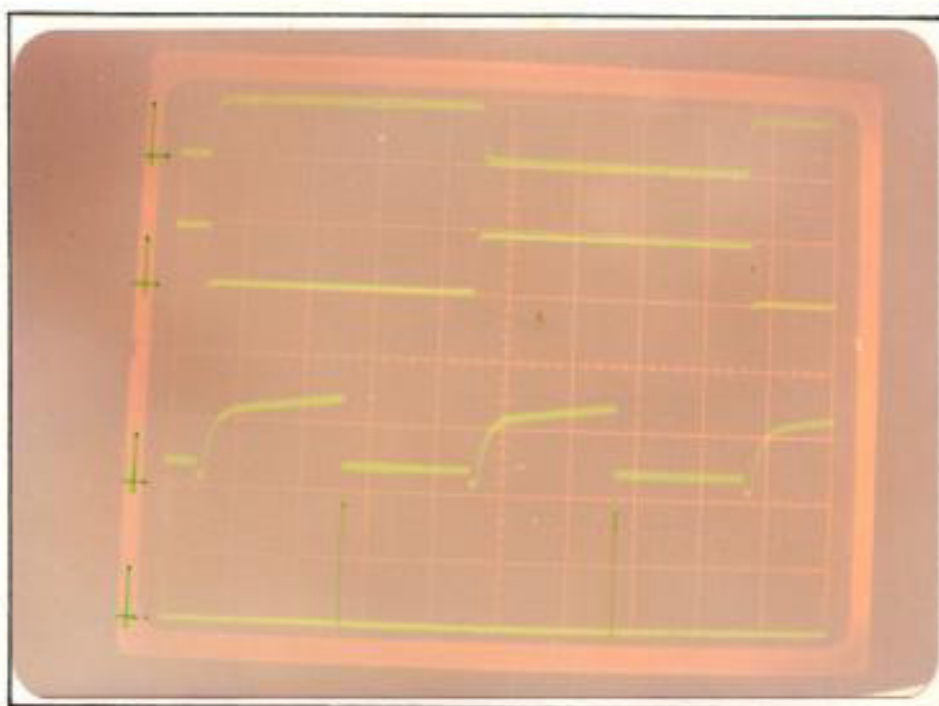


Figura No. 41.

"VOLTAJE DE OSCILACION DEL PUT".

En cada fase existe un PUT el cual oscila bajo el voltaje del capacitor C6 respectivo cuya forma de onda se ve arriba, tercera desde la superior. La última señal muestra el pulso de disparo de apenas 15 useg. de duración y que ocurre al momento de descarga del capacitor.

Escala: Magnitud de las dos primeras 5 V/div.
Magnitud de las 2 inferiores 2 V/div.
Tiempo = 2 useg/div.

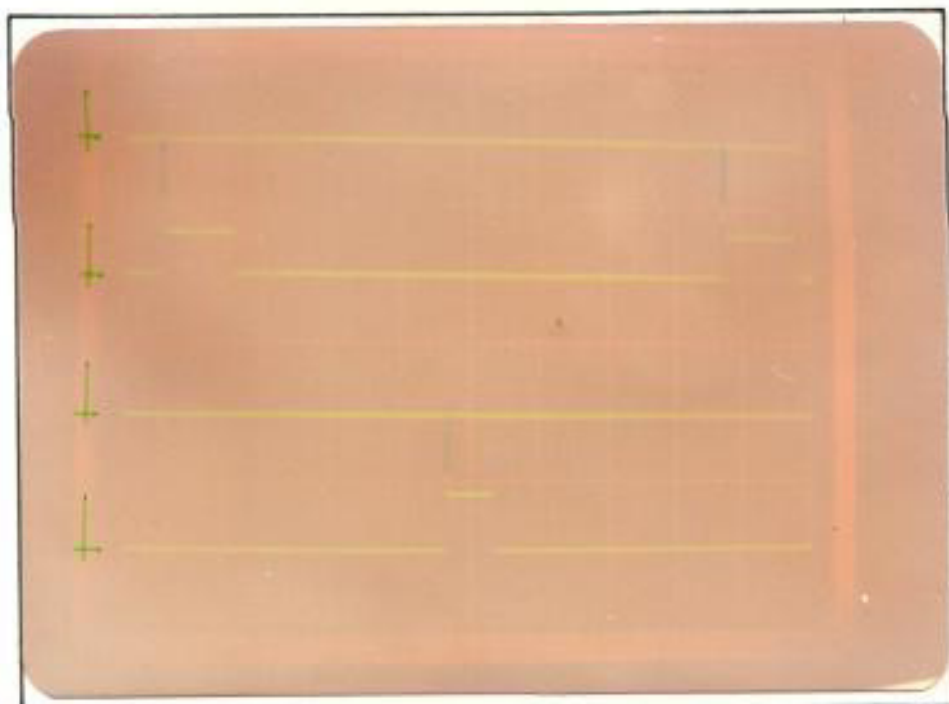


Figura No. 42.

"LOS PULSOS DE DISPARO".

En la figura de arriba se muestra el pulso de disparo de c/u de los multivibradores monostables existentes en una fase cualquiera y su correspondiente salida de mayor duración. Estas últimas sirven para modular la señal de 28 KHz. cuyas formas se ven en la siguiente figura.

Escala: Para todas las señales se tienen igual
Magnitud = 5 V/div. y
Tiempo = 2 mseg/div.

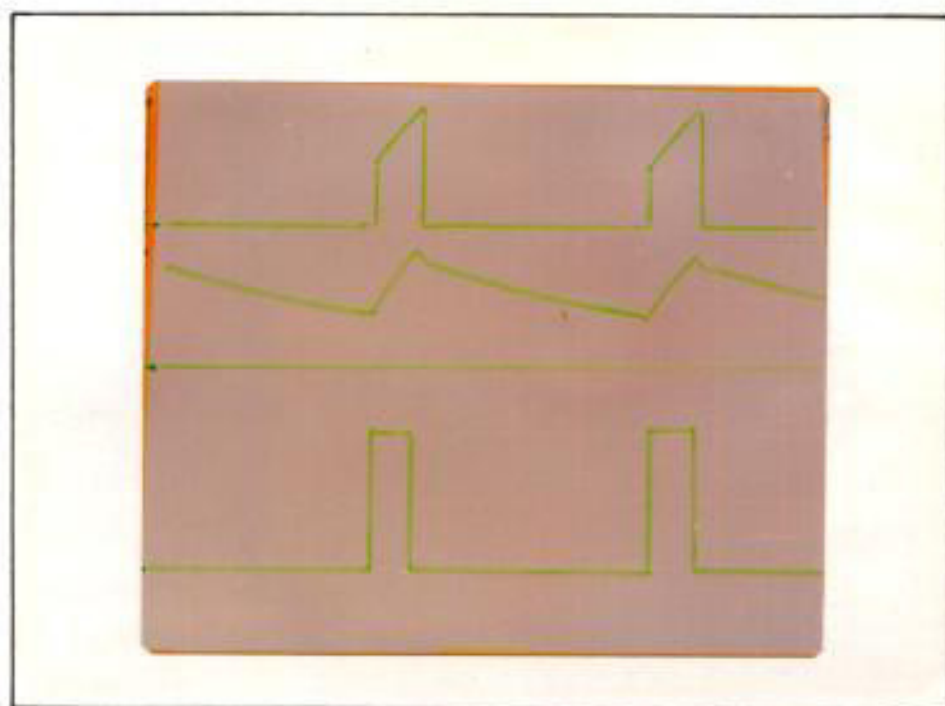


Figura No. 43.

"SEÑALES EN EL GENERADOR DE 28 KHz".

La señal superior representa el voltaje del pin 7 (de descarga) del IC-12 que es un 555 trabajando como multivibrador estable. La del centro es el voltaje del capacitor C28. La inferior muestra los pulsos de salida del 555 cuya frecuencia es 28 KHz.

Escalas: Magnitud = 2 V/div.

Tiempo = 10 useg/div.

En las siguientes figuras se muestran las señales asociadas al circuito de medición del ángulo de disparo, las mismas que han sido explicadas en la sección 2.6.

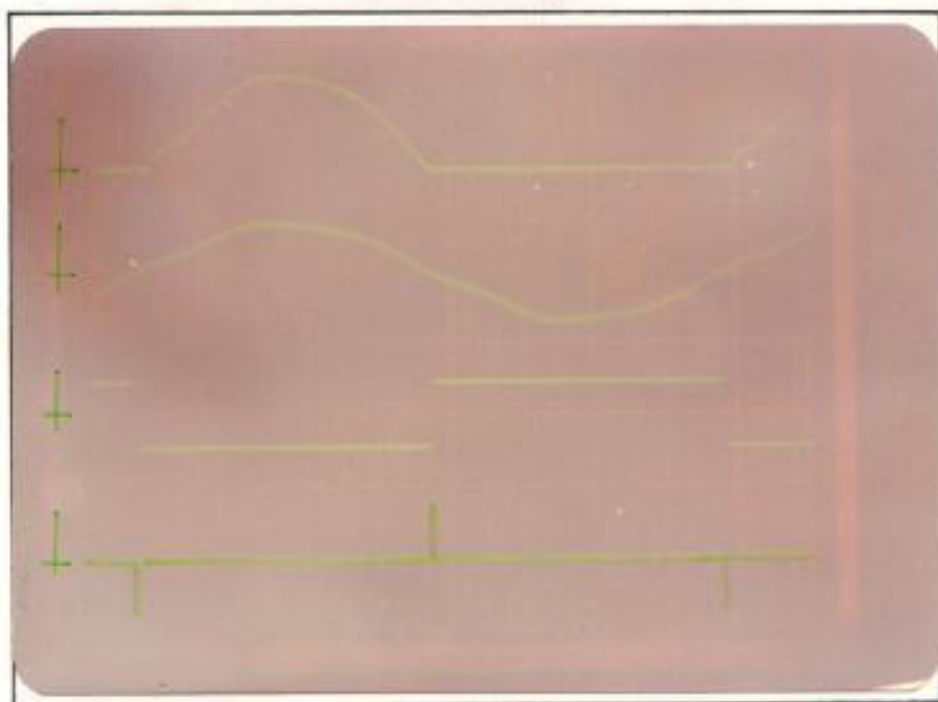


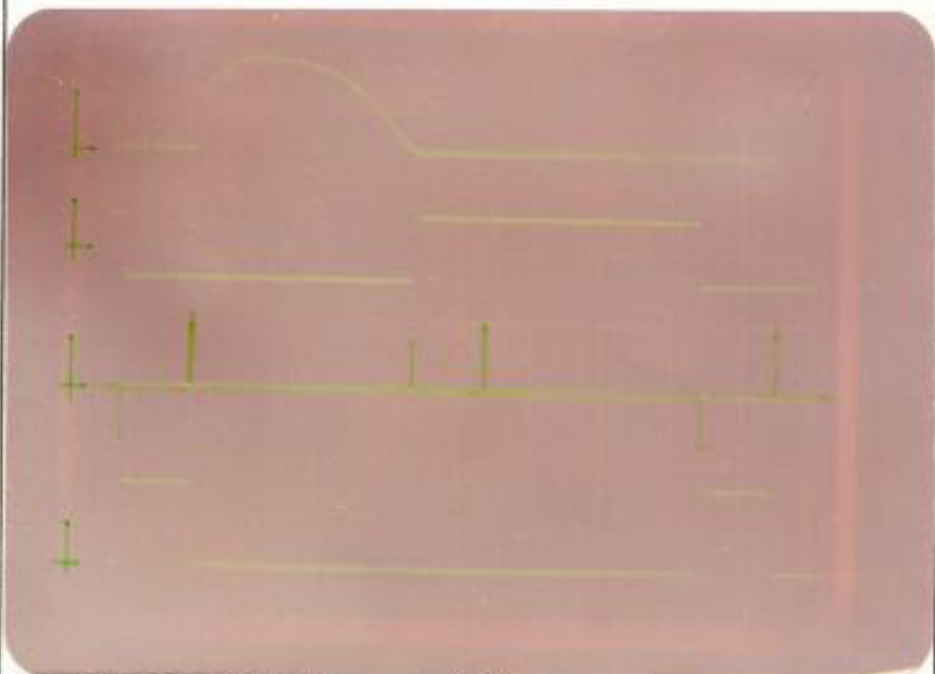
Figura No. 44.

"INFORMACION DEL CRUCE POR CERO DEL VOLTAJE VAN".

Arriba se puede apreciar la relación entre el voltaje de la carga de un rectificador 1ϕ , la onda sinusoidal Van en el secundario del transformador T_m , la onda cuadrada que produce la sinusoidal en el op-amp comparador IC-18 y los pulsos positivos y negativos que definen el cruce por cero del voltaje Van.



ángulo de disparo = 80°



ángulo de disparo = 45°

Figura No. 45.

"VOLTAJE PROPORCIONAL AL ÁNGULO DE DISPARO".

Como puede apreciarse en las dos fotos, la señal inferior es un voltaje que es proporcional al ángulo de disparo. Para el primer caso se tiene el ángulo mínimo que da el equipo (80°), por ello e se voltaje tiene una duración pequeña, la misma va desde la información de cruce por cero hasta la del pulso de disparo. Para el segundo caso la duración es mayor ya que el ángulo de disparo es mayor (450°), pero siempre comienza en el cruce de la sinusoidal Van por cero y termina el el momen- to de disparo.

En las dos fotos las señales que se ven son : el voltaje en la carga, el voltaje de salida del op-amp IC-18, el voltaje de entrada al pin 2 (inver- sora) que contiene el pulso de información de cru ce por cero y el de disparo, y el voltaje de sali da del op-amp IC-19 que es proporcional al ángulo de disparo alfa (α).

Escala: Magnitud de la primera señal = 100V/div
" " " segunda " = 20 V/div
" " " tercera " = 2. V/div
" " " cuarta " = 20 V/div

3.2 PRUEBA DEL EQUIPO COMPLETO.

Se realizaron las siguientes prácticas para probar el funcionamiento correcto del equipo.

- 1.- Rectificador monofásico (1ϕ) de media onda.
- 2.- Rectificador monofásico de onda completa, tipo puente.
- 3.- Rectificador bifásico (2ϕ) ó monofásico de onda completa con toma central.
- 4.- Rectificador trifásico (3ϕ) de media onda.
- 5.- Rectificador trifásico de onda completa.
- 6.- Control de lazo abierto de velocidad de un motor DC.
- 7.- Control de lazo cerrado de corriente de un motor DC.
- 8.- Control de doble lazo cerrado de velocidad de un motor DC.
- 9.- Control de doble lazo cerrado de voltaje de armadura de un motor DC.
- 10- Controlador AC. monofásico.
- 11- Controlador AC. trifásico para un motor de inducción jaula de ardilla.

Estas prácticas se han realizado para configuraciones no controladas, semi y totalmente controladas; con cargas R, RL y con diodo de paso li-

bre. De algunas de estas experiencias se tomaron fotos de las formas de onda en la carga y de los respectivos pulsos de disparo.

La figura de abajo muestra el voltaje de salida y el pulso de disparo utilizado en un rectificador monofásico de media onda controlado y cuyo ángulo alfa es 90° .

Escalas : En la carga = 50 V/div.
 En los pulsos = 5 V/div.
 Tiempo = 5 mseg/div.

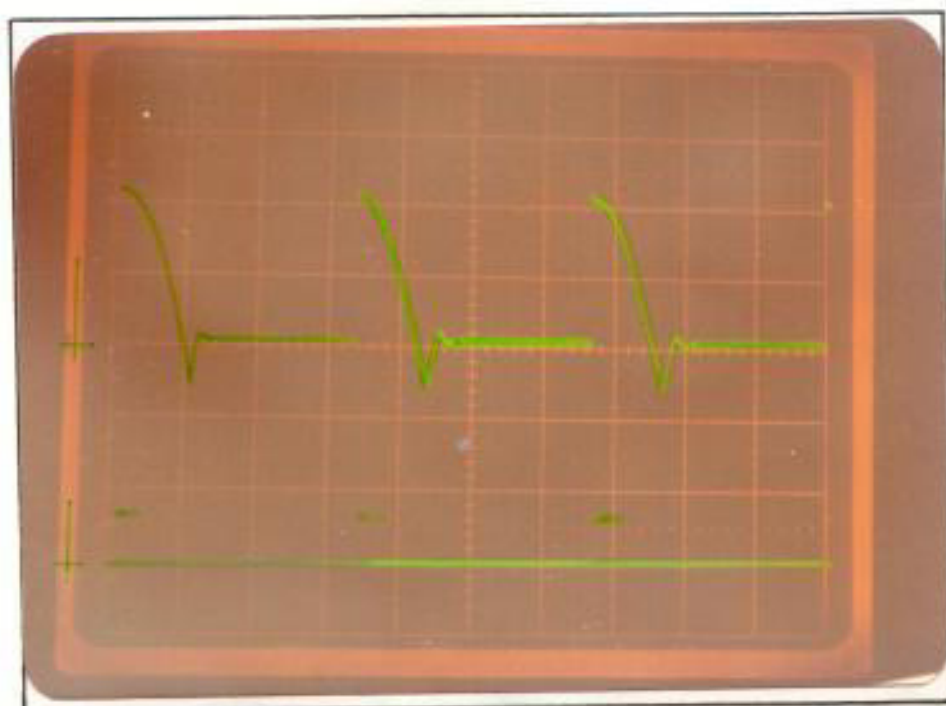


Figura No. 46.

"RECTIFICACION 1ϕ DE MEDIA ONDA-CARGA RL".

Ahora se va a ver en la figura siguiente es la se_{ñal} en la carga de un rectificador monofásico pe_{ro} de onda completa semicontrolado y un ángulo de disparo de 90° . Notar que aunque la carga era re_{sistiva-inductiva} y no había diodo de paso libre existe este efecto pero producido por los diodos del mismo rectificador.. Las 2 señales de abajo son los pulsos de disparo en cada semiciclo.

Escalas : En la carga = 50 V/div.
 En los pulsos = 5 V/div.
 Tiempo = 5 mseg/div.

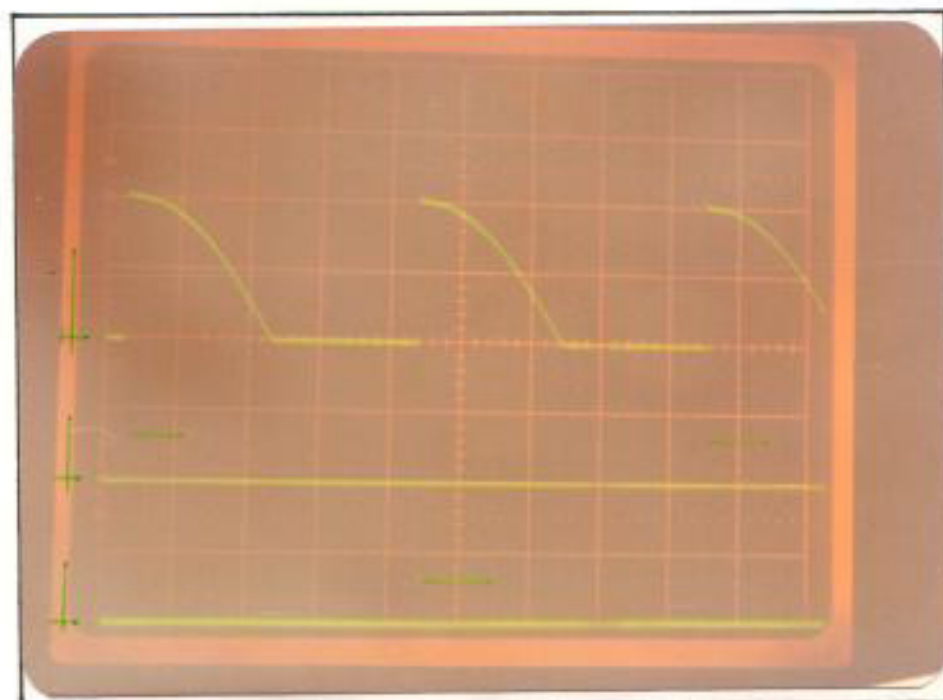


Figura No. 47.

"RECTIFICACION 1Ø DE ONDA COMPLETA-CARGA RL".

En la figura de abajo podemos apreciar el caso de un rectificador trifásico de media onda controlado cuyo ángulo de disparo es 90° y se tiene carga puramente resistiva. Las tres señales que se divisan en la parte inferior de la foto son los pulsos de disparo de cada fase los cuales tienen un defasamiento trifásico, es decir unos 2.8 mseg de separación.

Escalas : En la carga = 50 V/div.
 En los pulsos = 5 V/div.
Tiempo = 2 mseg/div.

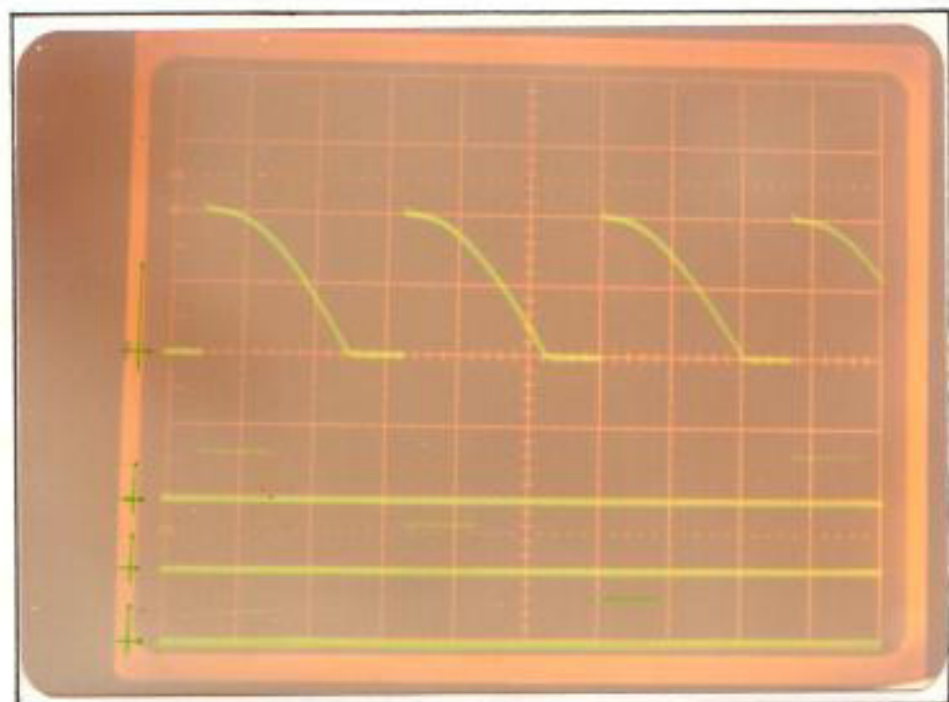


Figura No. 48.

"RECTIFICACION 50° DE MEDIA ONDA-CARGA RESISTIVA".

Para el mismo tipo de rectificador de la figura anterior se hizo una prueba pero poniendo como la carga a un motor DC.

En la figura de abajo puede observarse el voltaje en la armadura del motor cuyo nivel de referencia es el eje central de la graticula del osciloscopio. Notar el nivel dc. que es la fuerza electromotriz.

Escalas : En el motor = 50 V/div.
 En los pulsos = 5 V/div.
 Tiempo = 2 mseg/div.

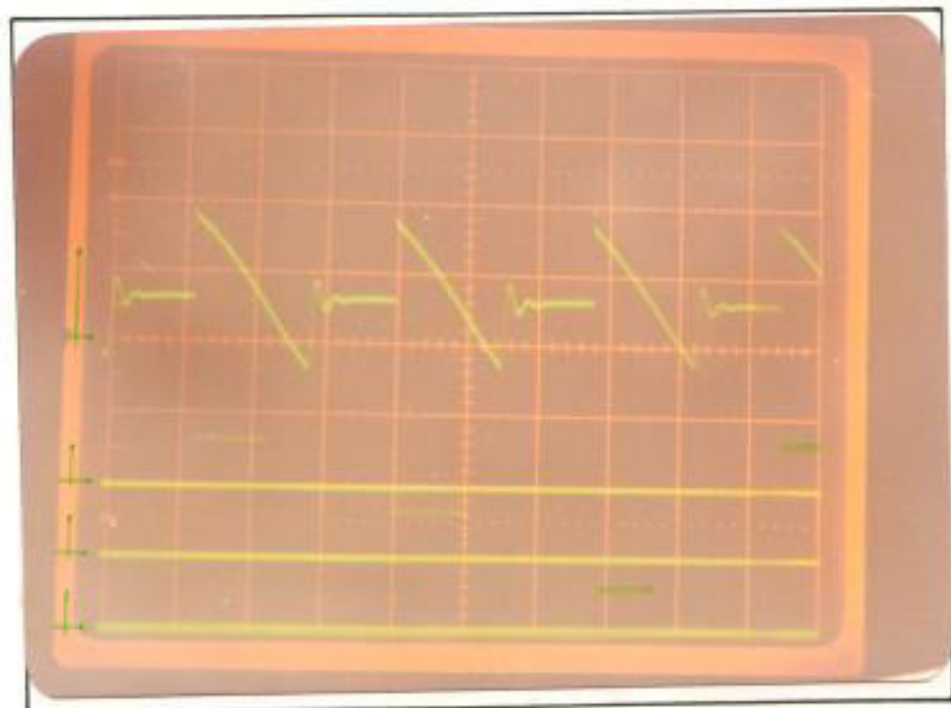


Figura No. 49.

"VOLTAJE DE ARMADURA EN UN MOTOR DC-- $\alpha = 90^\circ$ ".

Por último se tiene en la figura de abajo la representación del voltaje de carga en un rectificador trifásico de onda completa y totalmente controlado, es decir de 6 pulsos, cuyo ángulo de disparo era 30° . La carga estaba constituida por un banco de resistencia y uno de inductancia. Notar la presencia de 2 pulsos en cada una de las señales inferiores de la foto.

Escala : En la carga = 50 V/div.
 En los pulsos = 5 V/div.
 Tiempo = 5 mseg/div.

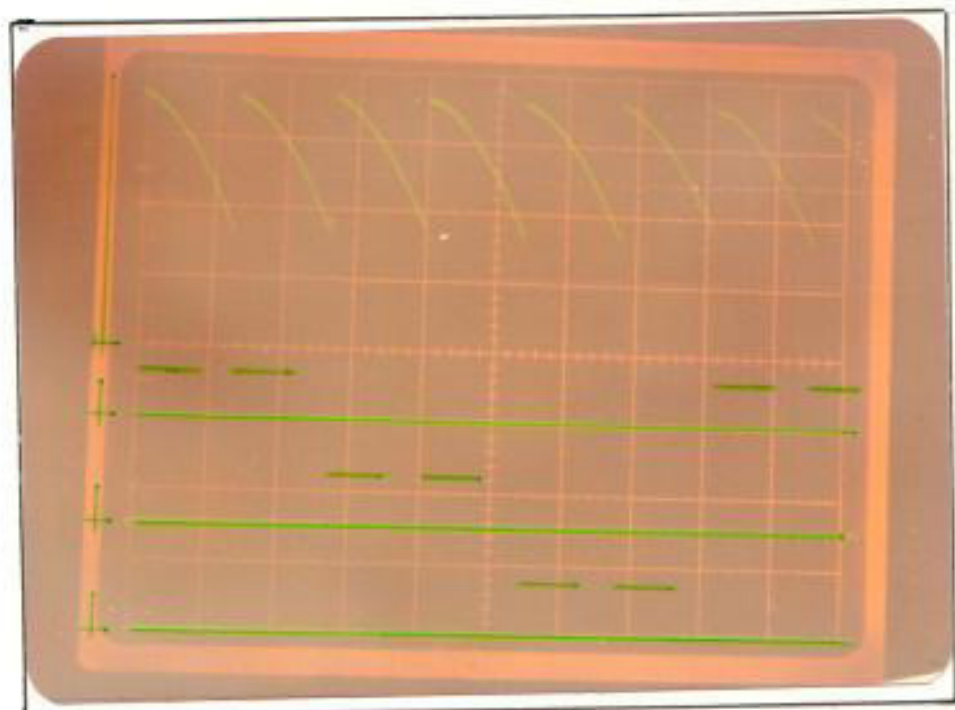


Figura No. 50.

"RECTIFICACION 3ϕ DE ONDA COMPLETA-CARGA RL".

3.3 PRUEBAS EXPERIMENTALES COMPLEMENTARIAS.

En el capítulo anterior se mencionó la existencia de dos transformadores de fuerza en el equipo, llamados T1 el trifásico y T2 el monofásico. Con objeto de tener las características de reactancia que presentan y saber cual va a ser el di/dt que van a soportar los tiristores del equipo se les realizó la prueba de corto circuito. A continuación se presentan por separado para cada transformador los datos medidos y los obtenidos en los cálculos del di/dt requerido.

3.3.1 Prueba de cortocircuito del T1 : El circuito a continuación muestra la forma como se llevó a efecto la prueba.

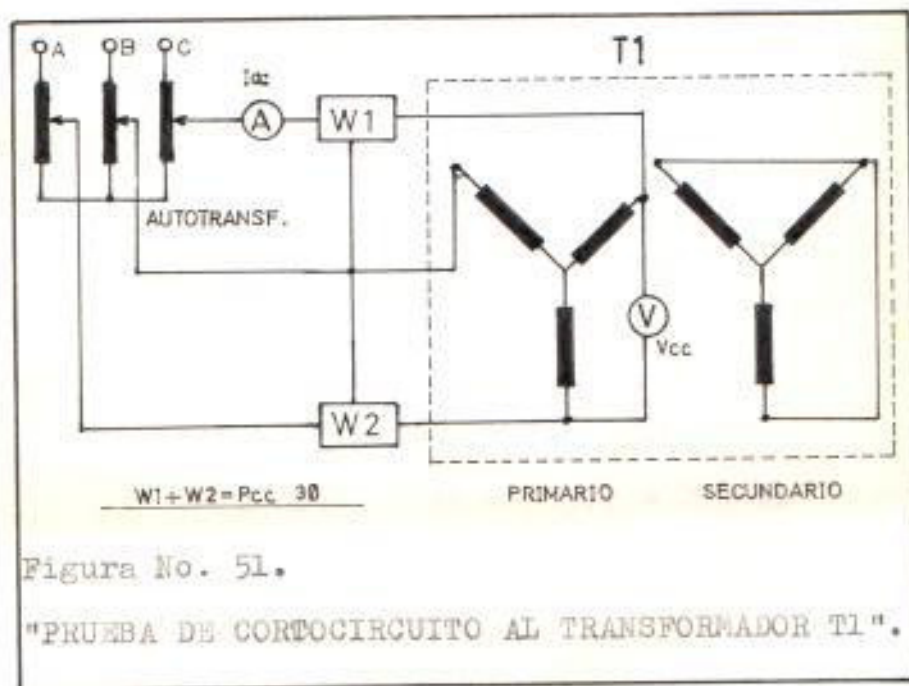


Figura No. 51.

"PRUEBA DE CORTOCIRCUITO AL TRANSFORMADOR T1".

Los datos medidos fueron :

$$P_{cc} = 120 \text{ w.}$$

$$I_{cc} = 10 \text{ A.}$$

$$V_{cc} = 7 \text{ V.}$$

$$R_l = 0.25 \text{ ohmios (frío).}$$

Los datos de los SCR son :

$$I_f = 25 \text{ A.}$$

$$V_{rf} = 600 \text{ V.}$$

$$di/dt = 150 \text{ A/useg.}$$

$$dv/dt = 100 \text{ V/useg.}$$

$$I_{fuga} = 3 \text{ mA.}$$

Los cálculos hechos son :

$$Z_e = V_{cc}/I_{cc} = 0.7 \text{ ohmios.}$$

$$R_e = P_{cc}/I_{cc}^2 = 0.4 \text{ "}$$

$$X_e = \sqrt{Z_e^2 - R_e^2} = 0.57 \text{ "}$$

$$X_l = X_2 = X_{cc}^2/2 = 0.29 \text{ "}$$

$$R_2 = R_e - R_l = 0.15 \text{ "}$$

El voltaje a través de una inductancia crece de acuerdo a la siguiente expresión :

$$V_{m\acute{a}x} = L \cdot di/dt$$

$$\text{siendo } V_{m\acute{a}x} = 165\sqrt{2} = 233 \text{ V.}$$

$$L = 1.56 \text{ uH.}$$

Esta es la inductancia mínima que podría presentar el transformador T1 para proteger a los SCR

contra el di/dt , pero según los cálculos el valor de inductancia que presenta es mucho mayor, lo que implica que no existe la necesidad de poner inductancias extras en el equipo. Ese valor es el siguiente:

$$L = X^2 / 2 f .$$

$$L = 769 \text{ uH.}$$

Este valor de inductancia da una relación del cambio de corriente respecto al tiempo así :

$$di/dt = .303 \text{ A/useg.}$$

Así mismo se puede calcular el valor del dv/dt que van a soportar los SCR a momento de apagado de los mismos:

$$V = R.I$$

$$dV/dt = R. dI/dt$$

$$R = 100 / 150 = .67 \Omega$$

Esta resistencia constituye la de la red suavizadora que junto con el capacitor deben de dar una constante de tiempo RC de unas 5 veces (como mínimo) mayor que el tiempo de encendido de los tiristores usados y que según el manual de la Westinghouse es de 3 useg. Asumo unas 6 veces mayor que T_{on} (tiempo de encendido).

$$C = 18/R$$

$$C = 27 \text{ uF.}$$

La constante de tiempo no se altera si se escogen los siguientes valores de R y de C:

$$R = 180 \text{ ohmios.}$$

$$C = .1 \text{ uF.}$$

Con estos se tiene que el dV/dt que van a soportar los tiristores está dado por el siguiente valor :

$$dV/dt = 55 \text{ V/useg.}$$

Este valor es menor que el permitido.

3.3.2 Prueba de cortocircuito del T2 : Para este caso los datos medidos fueron:

$$I_{cc} = 5 \text{ A.}$$

$$V_{cc} = 4.3 \text{ V.}$$

$$P_{cc} = 18 \text{ W.}$$

$$R_l = 0.4 \text{ ohmios. (frío)}$$

Los cálculos hechos son :

$$Z_e = 0.86 \text{ ohmios.}$$

$$R_e = 0.72 \text{ "}$$

$$X_e = 0.47 \text{ "}$$

$$X_1 = X_2 = 0.24 \text{ "}$$

$$R_2 = 0.3 \text{ "}$$

Donde las fórmulas usadas son las mismas que para el caso anterior, por lo que la inductancia que presenta este transformador es el siguiente

$$L = 637 \text{ uH.}$$

Lo que implica que tampoco existe la posibilidad de poner una inductancia extra, ya que el valor del di/dt es el siguiente:

$$dI/dt = .17 \text{ A/seg}$$

Y el cambio de voltaje respecto al tiempo es:

$$dV/dt = 30 \text{ V/useg.}$$

El circuito utilizado para esta prueba es el siguiente:

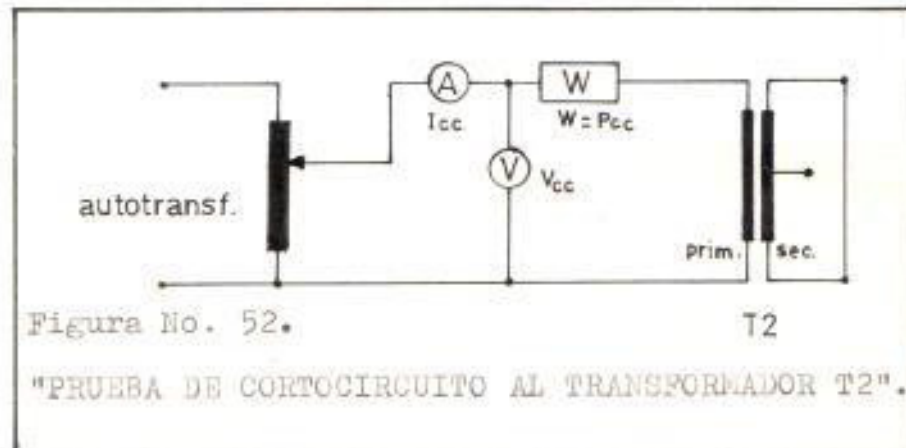
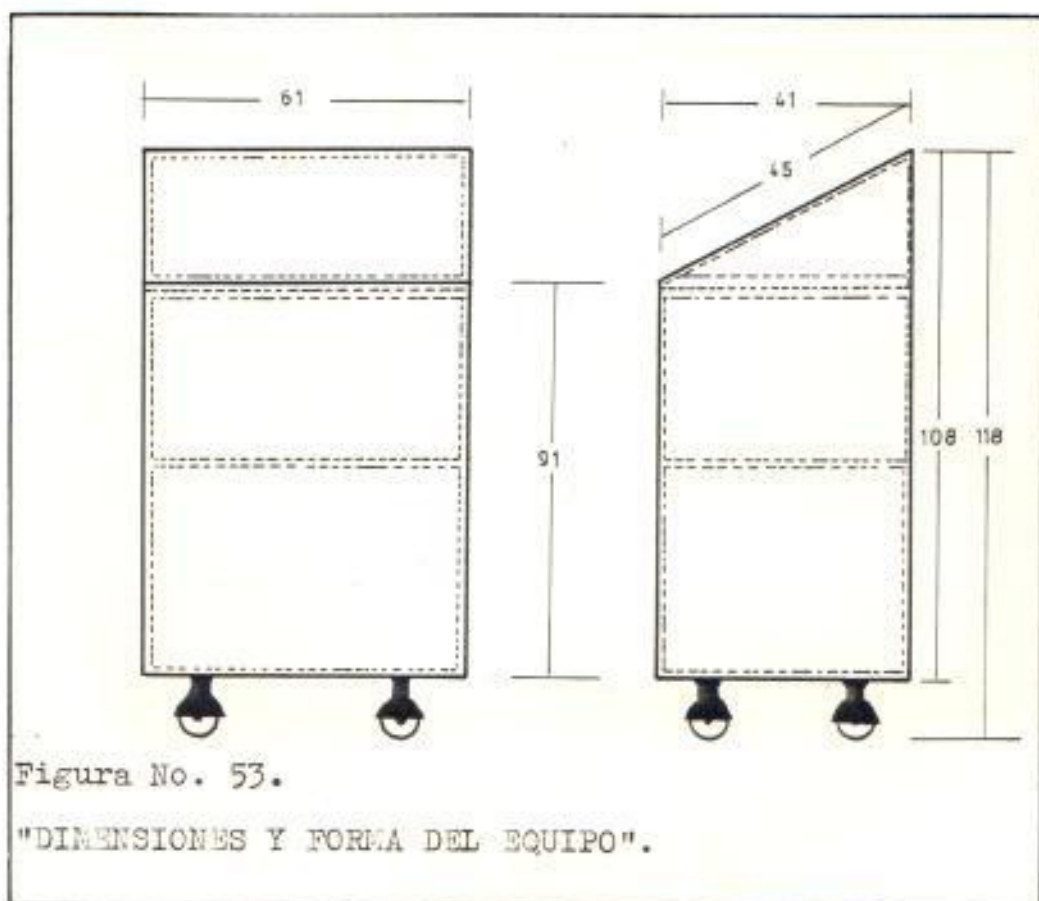


Figura No. 52.

"PRUEBA DE CORTOCIRCUITO AL TRANSFORMADOR T2".

3.4 IMPLANTACION GENERAL EN EL LABORATORIO.

A continuación se dará una descripción general de la estructura física del equipo: El chasis que fué construido por el Taller de Mantenimiento Eléctrico de la Facultad tiene la forma y dimensiones que se muestran en la figura No. 53; la circuitería está colocada en un tablero de bakelita de 55 x 35 x 0.7 cms. cogido a su vez por medio de bisagras a un transversal de la estructura física metálica del equipo a fin de poderlo desplazar hacia afuera en la parte de atrás del mismo para comodidad de limpieza ó reparaciones.



3.5 REFERENCIAS FINALES.

Al principio de este capítulo fueron mencionados los tipos de convertidores estáticos que fueron realizados para probar el funcionamiento total del equipo y cuyos diagramas de conexiones pueden ser sacados de un manual de operaciones perteneciente al equipo inglés "MAWDLEY'S EDUCATIONAL THIRISTOR DRIVE EQUIPMENT" en el cual constan.

Las dos últimas prácticas que se ven en esta lista no se encuentran en ese manual ya que han sido efectuadas como parte integral de esta tesis con el objeto de aumentar la capacidad de trabajo de los dos bancos de prueba y que sirvan como referencia a nuevas prácticas para el laboratorio de controles industriales electrónicos.

En el apéndice A pueden obtenerse las características técnicas del equipo como son voltajes de alimentación, capacidad de corriente de los transformadores de fuerza, y el listado general de los componentes electrónicos de la circuitería del equipo.

En el apéndice B, que se presenta como un manual del usuario puede encontrarse el principio de operación del medidor del ángulo y de los controladores AC.

En la siguiente foto se puede apreciar el momento en el cual se efectuaba una de las prácticas enlistadas anteriormente en el equipo construido. Cabe mencionar que a la fecha éste ya tiene 3 semanas en uso de los estudiantes, es decir desde principios de Julio de 1985.



Figura No. 54.

"EQUIPO CONSTRUIDO COMO TEMA DE TESIS".

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

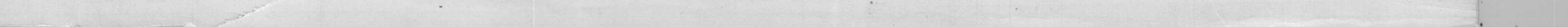
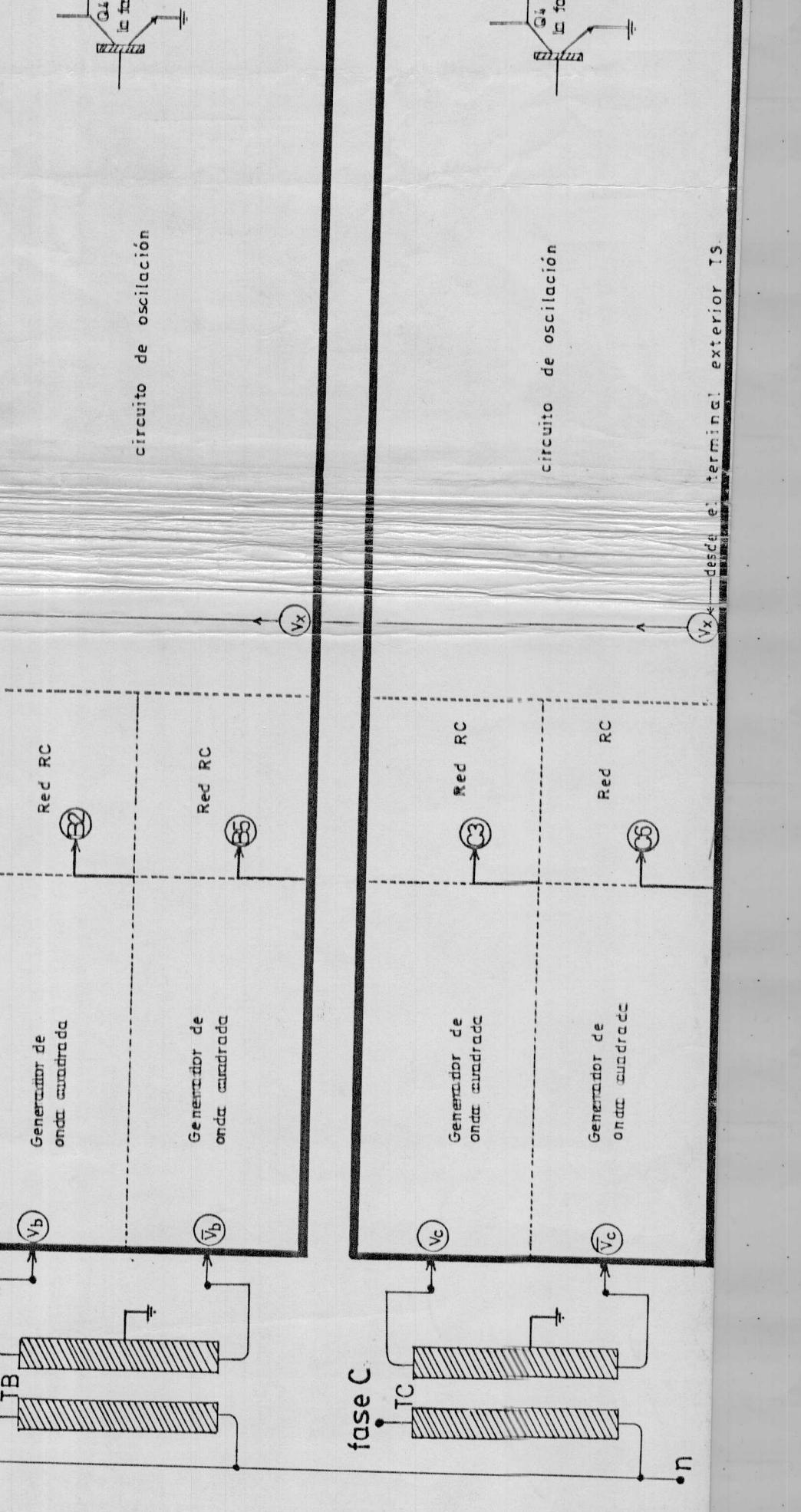
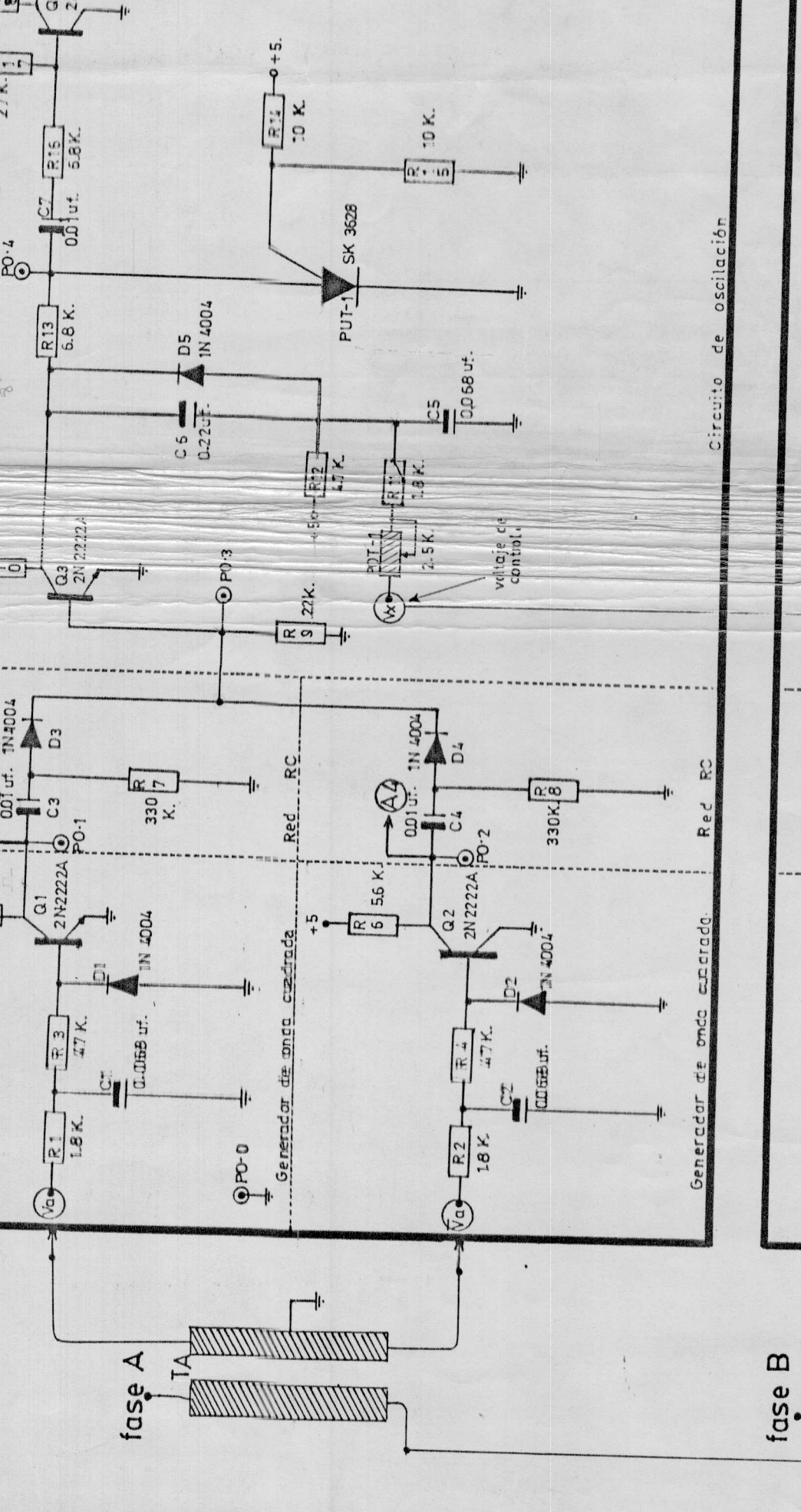
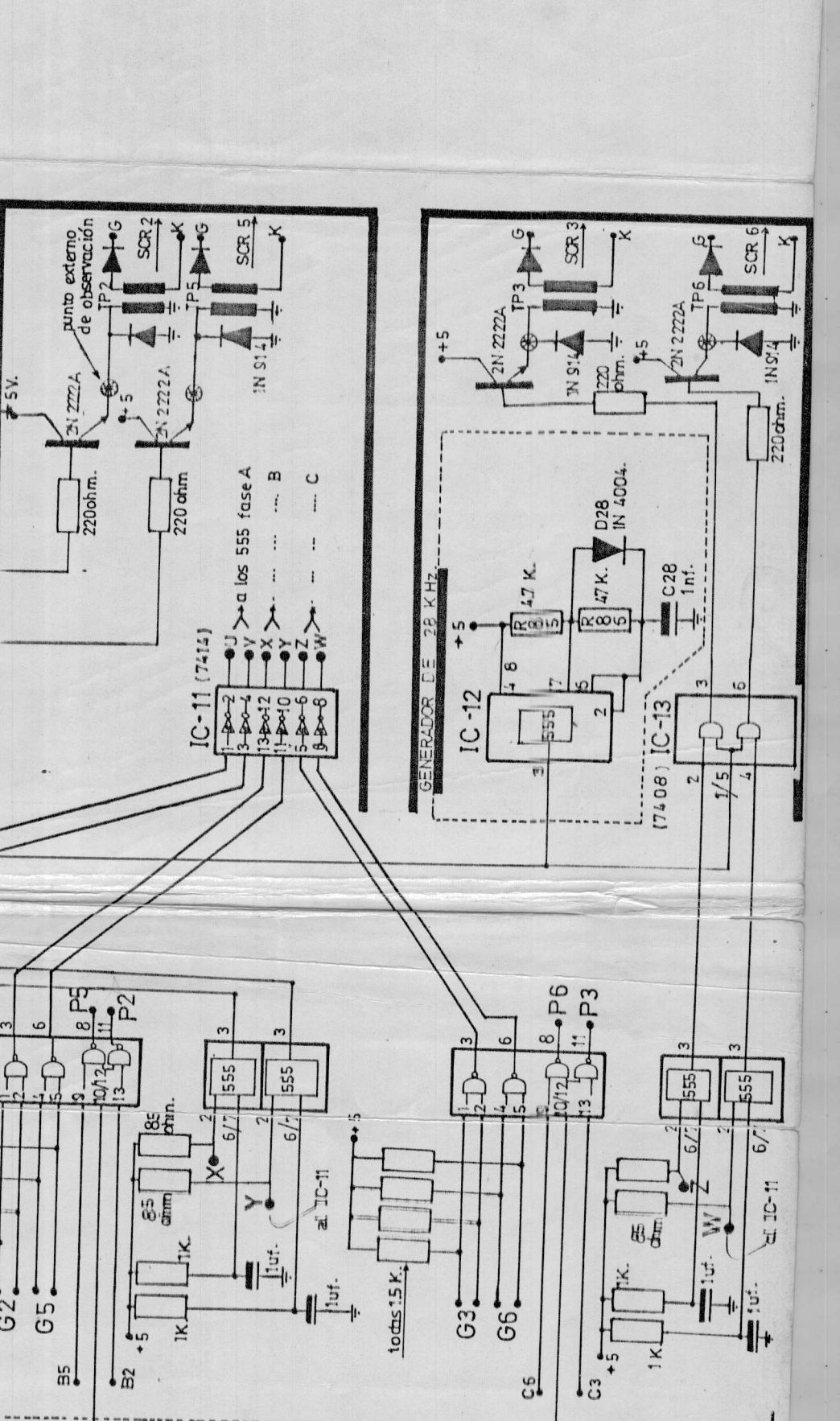
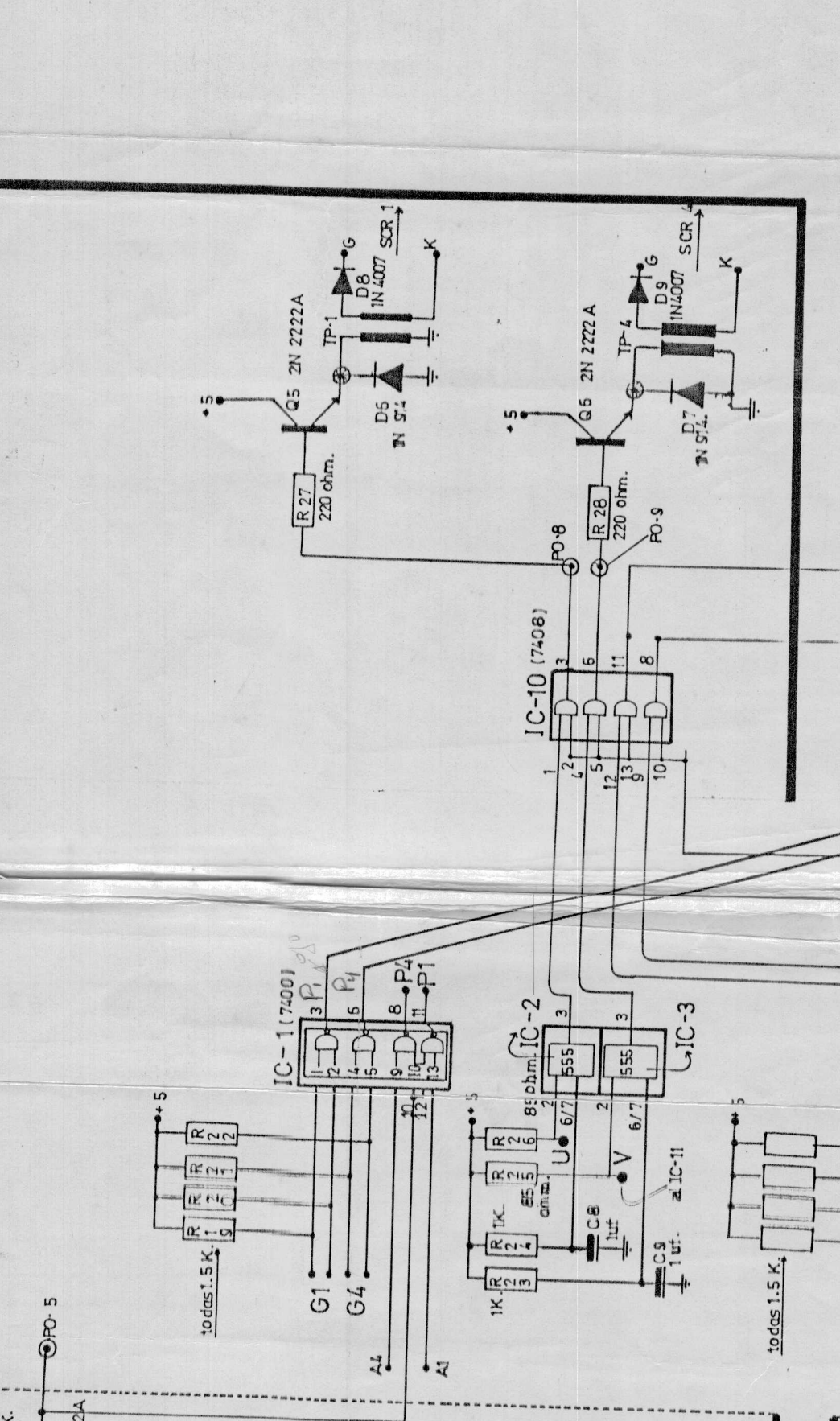
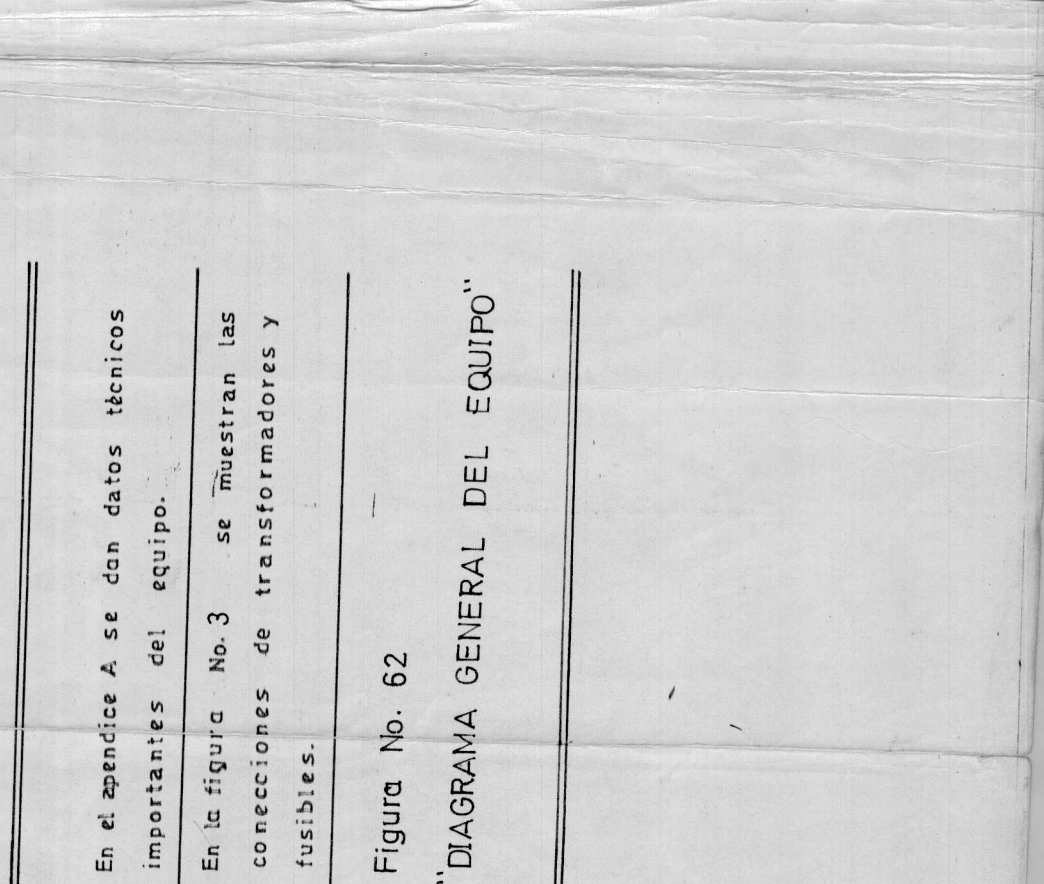
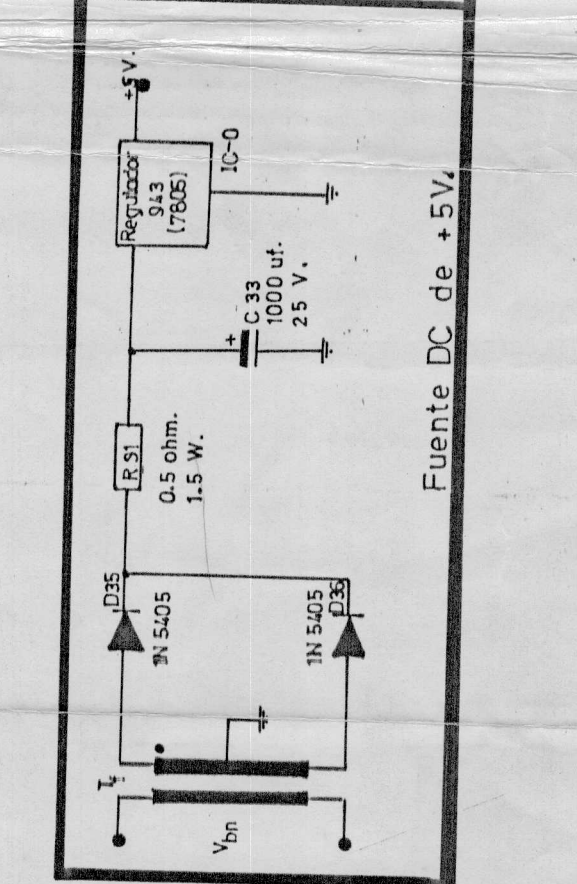
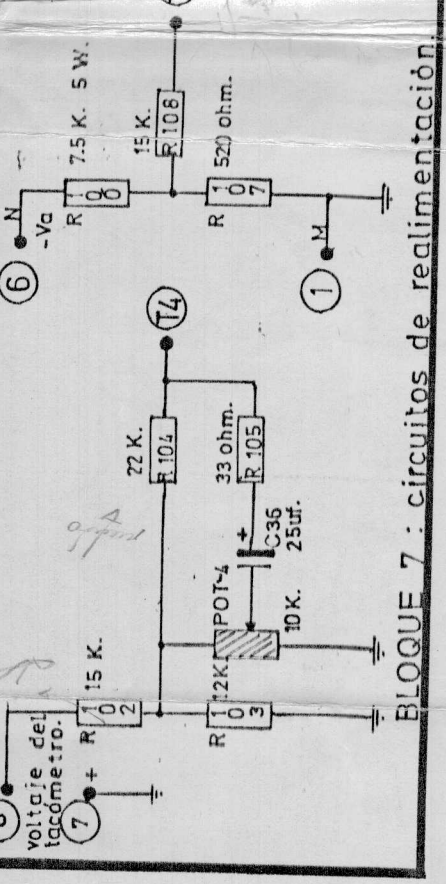
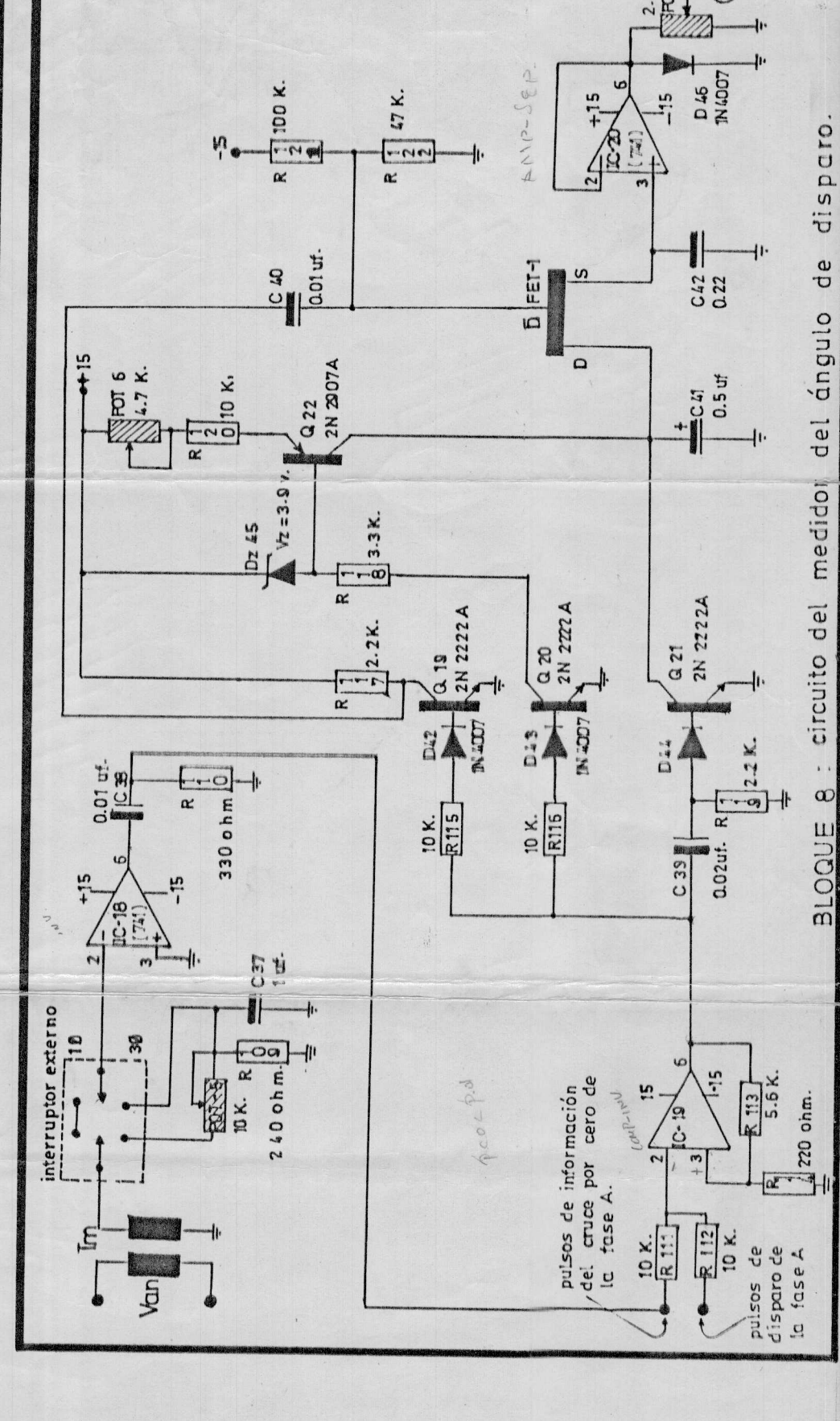
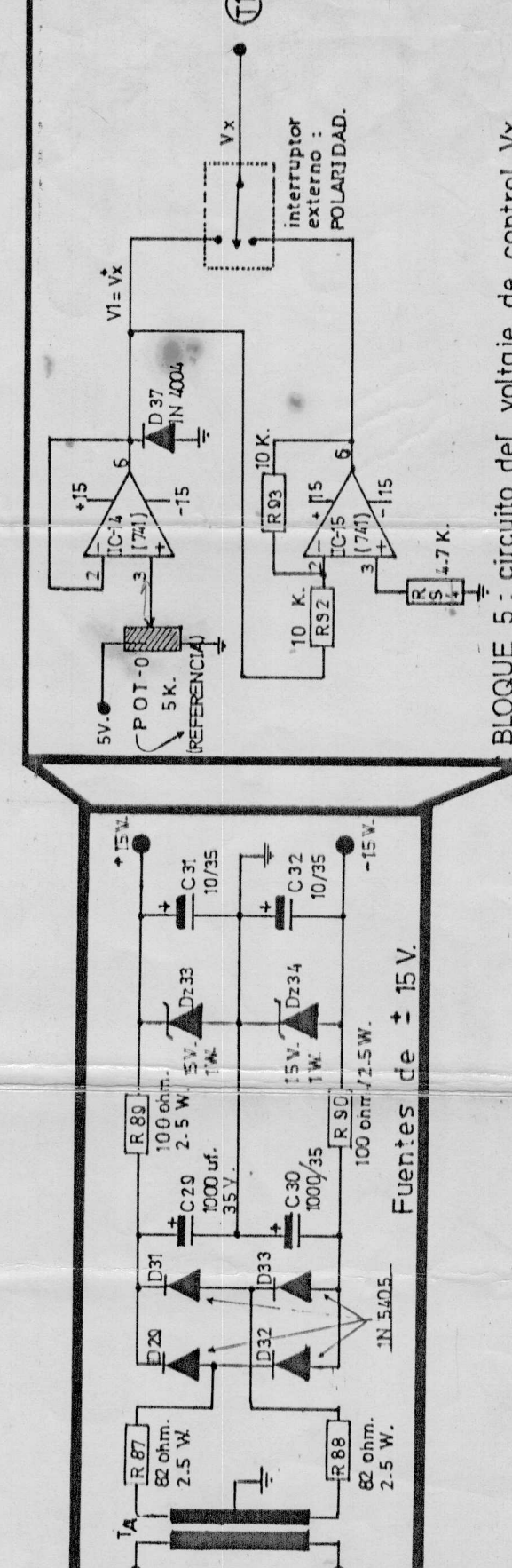
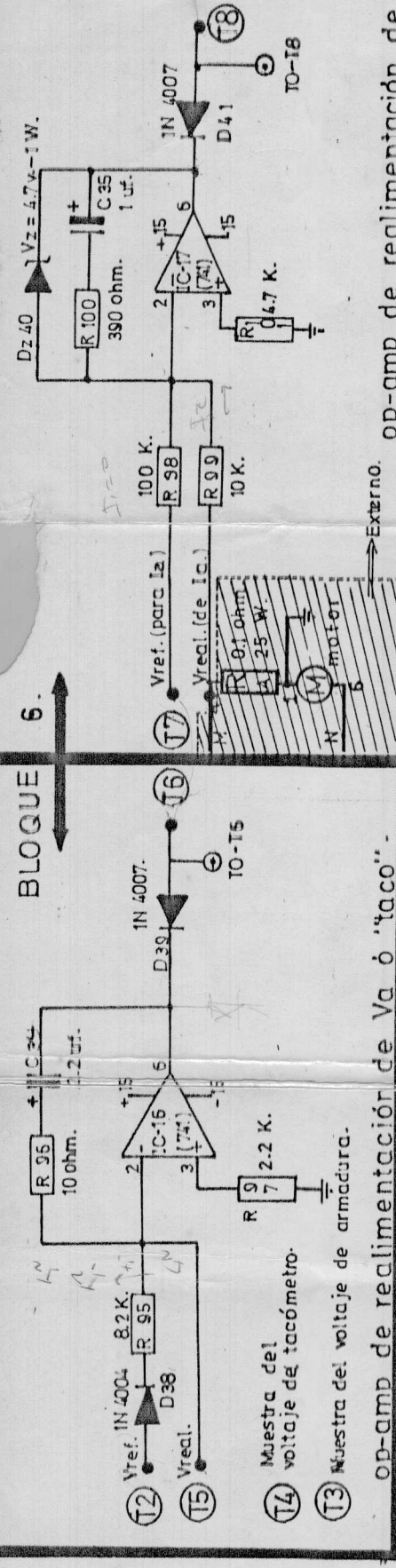
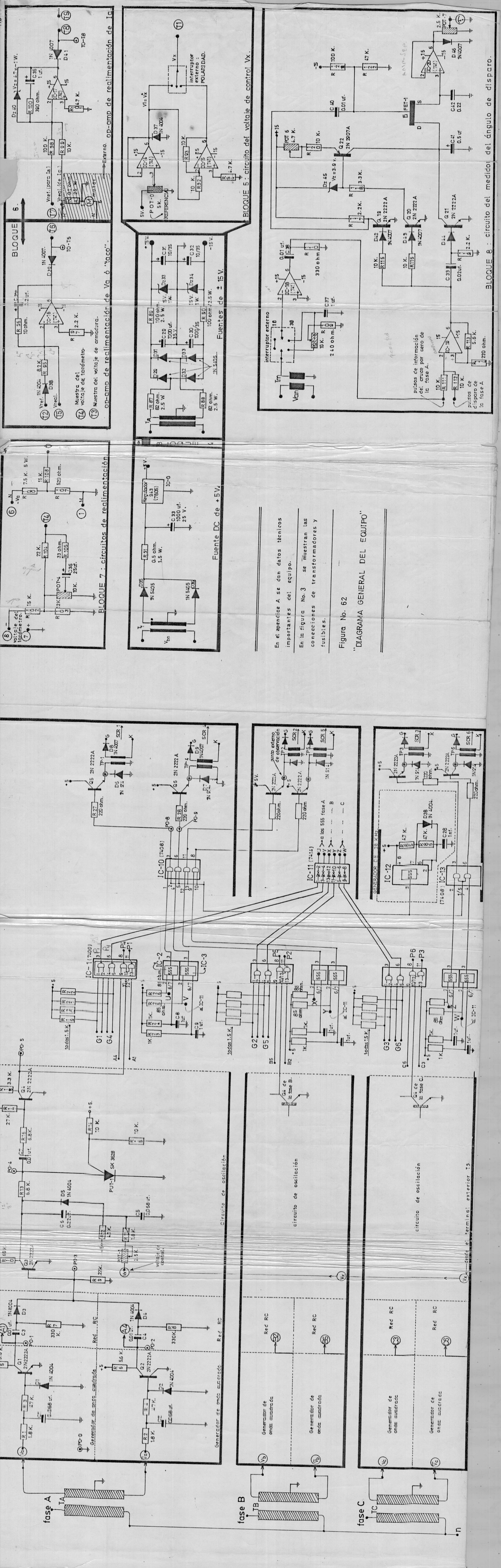
Transcurridos seis meses desde la culminación de este trabajo (Feb/85) y puesto en uso del laboratorio desde Julio del 85, puede decirse que :

1. Las pruebas realizadas durante estos meses han sido pasadas satisfactoriamente por el equipo, lo que implica que las modificaciones introducidas en el sistema de control son confiables en su operación.
2. Las medidas de protección tomadas en el equipo han ido cumpliendo su objetivo poco a poco cuando el caso lo ha requerido.
3. La inclusión del medidor del ángulo de disparo ha hecho más simples las prácticas, en la medida esperada.
4. El costo de construcción ha sido relativamente bajo en comparación con la utilidad que representa al estudiante. Su valor aproximado es doscientos mil sucres.
5. La construcción de 1 ó 2 equipos más de éstos debería de ser el objetivo futuro de la ESPOL.

6. La inclusión de un medidor del ángulo de disparo en el equipo inglés debería llevarse a cabo bajo la responsabilidad del Laboratorio de Controles Electrónicos.

7. De hacerse efectiva la construcción de nuevas unidades, éstas deberían de ser montadas de tal forma que el estudiante tenga visibilidad del circuito de control y de fuerza.

8. Es necesario la inclusión dentro de las prácticas de laboratorio, las realizadas como controladores AC monofásicos ó trifásicos en las pruebas del equipo, de las cuales se dá una idea general en el apéndice B.



BIBLIOGRAFIA

1. BUXBAUN A.-SCHIERAU K., Cálculo de circuitos de regulación, AEG Telefunken Paraninfo, 1976, p:149.
2. COUGHLIN R., Operacional Amplifiers and Linear Integrated Circuits, 1977.
3. FOX H. W., Master Op-amp Applications Handbook, 1978.
4. GARCIA L.-GUTIERRR3Z I., Amplificadores operacionales (teoría y montajes prácticos), Paraninfo, 1981.
5. HEUMANN K., Fundamentos de la electrónica de potencia, AEG Telefunken Paraninfo, 1978.
6. IEEE , Industrial applications and control instrumentation, 1978 , p:178.
7. LIWSCHITZ M., Máquinas de corriente alterna, Ceesa , 1977, p: 177-210.
8. NATIONAL, Voltaje Regulator Handbook, 1982.
9. WESTINGHOUSE, Silicón Controlated Rectifier Designer Handbook, Leslie Rice, 1970, p: 13-6 ... 13-13.