



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA



"CONTROL ELECTRONICO DE INTERCAMBIADOR
AUTOMATICO DE DERIVACIONES DE TRANSFORMA-
DORES APLICADO AL DISEÑO DE
ESTABILIZADORES DE TENSION"

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO EN ELECTRICIDAD

ESPECIALIZACION ELECTRONICA

Presentada por:

CARLOS ALFREDO TORRES PRIETO

Guayaquil - Ecuador

1988

AGRADECIMIENTO

Quiero dejar constancia de mi sincero agradecimiento a quienes de una u otra forma brindaron su ayuda y colaboración para la realización de este trabajo; muy especialmente:

al ING. RODRIGO BERREZUETA P., Director de Tesis.

Al ING. ALBERTO LARCO G., Profesor de la F.I.E.

A quienes hacen el INSTITUTO DE FISICA.

Y a todos aquellos que hicieron posible mi formación:

A MI FAMILIA

A MIS PROFESORES

A MIS AMIGOS

DEDICATORIA

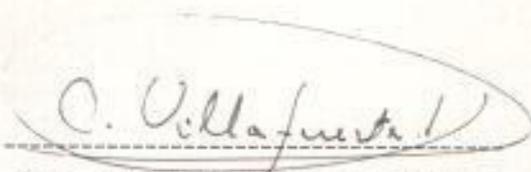
A MIS HIJAS

A MIS PADRES

A MI ESPOSA

A MIS HERMANOS

A MIS AMIGOS



ING. CARLOS VILLAFUERTE P.
SUBDECANO DE LA FACULTAD
DE INGENIERIA ELECTRICA



ING. RODRIGO BERREZUETA P.
DIRECTOR DE TESIS



ING. ALBERTO LARCO Q.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

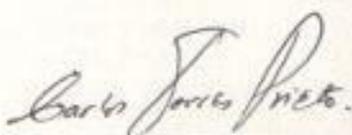


ING. NORMAN CHOOTONG CH.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

DECLARACION EXPRESA

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

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



CARLOS ALFREDO TORRES PRIETO

RESUMEN

Inicialmente se presentan definiciones generales sobre regulación de voltaje, caída de tensión, banda de voltaje, voltaje de utilización, etc., para de esta manera presentar al lector el porqué de la necesidad y uso de los estabilizadores de tensión. Luego se explica los tipos de reguladores automáticos y, se explica los principios básicos de funcionamiento de estabilizadores de tensión.

En el capítulo II se hace un breve estudio de los triacs, elemento electrónico utilizado en este diseño, luego se explicará en forma esquemática, sistemática y ordenada el diseño del circuito, análisis que se realiza en el capítulo III.

En el capítulo IV se presentan formas de ondas que se obtuvieron en la práctica en ciertos puntos del circuito de control. Se presentan fotografías de las pruebas realizadas con el estabilizador de tensión. También se hace una comparación de los períodos que se obtienen en los multivibradores astables del circuito de control con los períodos teóricos calculados.

El capítulo V muestra el costo de la construcción de este estabilizador y, al final de este capítulo se presenta un cuadro que refleja la comparación económica de este estabilizador con otros existentes en el mercado.

El capítulo VI presenta las características de funcionamiento:

- a) Forma de onda de voltaje en estado estable.
- b) Determinación experimental de las pérdidas en vacío (pérdidas en el hierro más potencia consumida por las fuentes de alimentación del circuito electrónico).
- c) Rendimiento a plena carga.

Se presentan dos apéndices:

- a) Manual del usuario
- b) Diagrama general del circuito

INDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	VI
INDICE GENERAL.....	VIII
INDICE DE FIGURAS.....	XI
INTRODUCCION.....	14
CAPITULO I	
REGULADORES DE TENSION.....	15
1.1 Definiciones.....	15
1.2 Tipos de reguladores.....	17
1.3 El regulador de tensión tipo paso (escalonado).....	21
CAPITULO II	
ESTUDIO Y ANALISIS DE LOS TRIACS.....	23
2.1 Operación básica de los triacs.....	23
2.2 Curva característica.....	23
2.3 Especificaciones del triac.....	26
2.4 Protecciones de los triacs.....	28
CAPITULO III	
CARACTERISTICA Y OPERACION DE DISEÑO DEL ESTABILIZADOR DE TENSION TIPO PASO.....	34
3.1 Característica y operación general.....	34
3.1.1 Diagrama de bloques.....	35
3.1.2 Explicación general por bloques.....	36

	Pág.
CAPITULO VI	
VENTAJAS Y DESVENTAJAS EN FUNCION DE LA UTILIZACION DE ESTE ESTABILIZADOR.....	83
6.1 Comportamiento transiente.....	83
6.2 Comportamiento en estado estable.....	86
6.3 Análisis armónico producido en conmutación.....	87
6.4 Determinación del mínimo factor de potencia requerido para que trabaje adecuadamente el estabilizador.....	87
6.5 Rendimiento.....	87
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	89
APENDICE A: Manual del Usuario.....	92
APENDICE B: Diagrama general del circuito del estabilizador diseñado.....	96
BIBLIOGRAFIA.....	98

INTRODUCCION

Las fluctuaciones de la tensión de la red de distribución eléctrica, generalmente en disminución con respecto al valor nominal provocan inconvenientes en el funcionamiento de algunos aparatos eléctricos y electrónicos cuando aquellas sobrepasan cifras aceptables generalmente conocidas. Es común especificar que cualquier artefacto funciona normalmente con un 10% de variación de tensión en más o en menos, pero en la realidad es frecuente que se tengan variaciones, especialmente en disminución, mayores que tal cifra.

Existen autotransformadores ajustadores de tensión que son económicos, pero requieren una regulación manual, cosa factible en instalaciones industriales pero no recomendable para artefactos domésticos, en cuyo caso un error en la maniobra puede dañar a dichos artefactos. Tales razones han creado la necesidad de los elevadores o reductores automáticos, los que se denominan estabilizadores de tensión. Su diseño se ha perfeccionado al extremo que los hay que regulan la tensión dentro de cifras menores a $\pm 1\%$.

En este trabajo de Tesis se explica el diseño y construcción de un estabilizador de tensión automático que emplea dispositivos electrónicos y carece de elementos mecánicos.

CAPITULO I

REGULADORES DE TENSION

1.1 Definiciones

Antes de centrarme exclusivamente en el estudio de los reguladores de tensión de altas potencias, desarrollaré brevemente definiciones que se considera de vital importancia para un mejor entendimiento de este texto.

a) **Regulación de voltaje:** Regular voltaje en un sistema es mantener el voltaje a nivel de consumo, dentro de límites permisibles con el uso de equipos de control de voltaje en localizaciones estratégicas dentro del sistema.

El objetivo principal es proporcionar un estabilizador de voltaje a precio económico que satisfaga adecuadamente los requerimiento del usuario o del equipo a ser utilizado.

b) **Caída de voltaje:** Es la diferencia aritmética entre el voltaje de envío y el de recibo en una alimentadora o acometida.

- c) **Banda de voltaje:** Es la diferencia entre el voltaje máximo y el voltaje mínimo en un nivel de voltaje en condiciones de estado estable.
- d) **Voltaje de servicio:** Es el voltaje medido en los terminales de entrada del medidor eléctrico (Kw/h). Estos terminales son esencialmente el último punto del sistema de distribución, normalmente pertenece al consumidor.
- e) **Voltaje de utilización:** Es el voltaje medido en los terminales de la máquina o aparato. Este voltaje es menor que el de servicio debido a la caída en los circuitos interiores perteneciente al usuario.
- f) **Voltaje de base:** También llamado de referencia, es aquel que se usa como denominador común. Ejemplo: 120 V, 115 V.
- g) **Porcentaje de regulación:** Indica la "caída de voltaje" de una línea en porcentaje, referida al voltaje de recibo:

$$R.V(\%) = \frac{V1 - V2}{V2} \times 100 \quad (1.1)$$

donde:

R.V = Regulación de voltaje

V1 = Voltaje de envío

V2 = Voltaje de recibo

1.2 Tipos de reguladores automáticos

Los objetivos de los reguladores automáticos son reducir las variaciones en la alimentación y, reducir las variaciones debido a la carga.

Hay diversos tipos de reguladores de tensión y pueden ser clasificados en varios grupos: Los que emplean dispositivos electrónicos, los que emplean transformadores a núcleos saturables, otros que usan otros mecanismos de ajuste.

En los sistemas de potencia tenemos: Reguladores en generadores, cambiadores de derivaciones de transformadores bajo carga en subestaciones, reguladores de alimentadoras (de inducción y de paso), capacitores con capacidad de desconexión.

Los reguladores en generadores se los usa para mantener el voltaje constante en su propia barra o en puntos distantes, en este caso requiere de un sensor de caída de línea. En grandes sistemas no es utilizado.

Los reguladores tipo inducción operan bajo el mismo principio de un transformador pero construido como un motor. Tiene un rotor y un estator: El rotor es el primario y el estator el secundario. En el rotor se inducen voltajes que pueden cambiar su polaridad de acuerdo al sentido de giro del motor.

Su regulación normalmente es de $\pm 10\%$.

El regulador tipo paso, es un autotransformador que posee un mecanismo cambiador de derivaciones. Netamente el diseño de esta tesis de Grado consiste en un regulador de estas características.

Los reguladores que emplea transformadores a núcleos saturados pueden ser: A saturación magnética y el resonante saturado. Los estabilizadores a saturación magnética se basan en el principio de que existe una proporcionalidad entre la rapidez de variación de flujo y la f.e.m inducida en los bobinados que envuelven el núcleo, de aquí, si se satura el núcleo se elimina las variaciones lineales y se tendrá que la f.e.m no guarda más la proporcionalidad con la corriente y, tal situación se la aprovecha para la regulación. Lo que se necesita es sumar a la tensión secundaria o de carga una fracción de la misma, que disminuya cuando la tensión primaria o de la línea se reduzca. Entonces se observa que hay que disponer de una tensión de carga que esté formada por dos partes: Una fija que puede ser la mínima, que resulta cuando la tensión primaria es normal y, una que es agregada la cual es nula en dicha situación y va aumentando cuando la tensión de la línea disminuye.

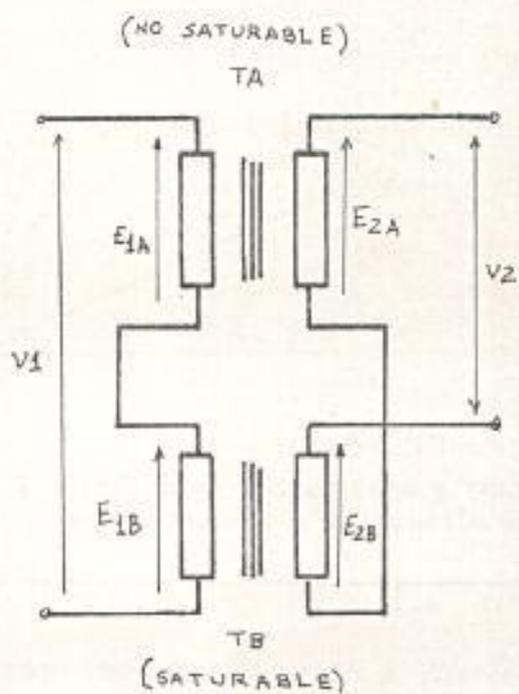
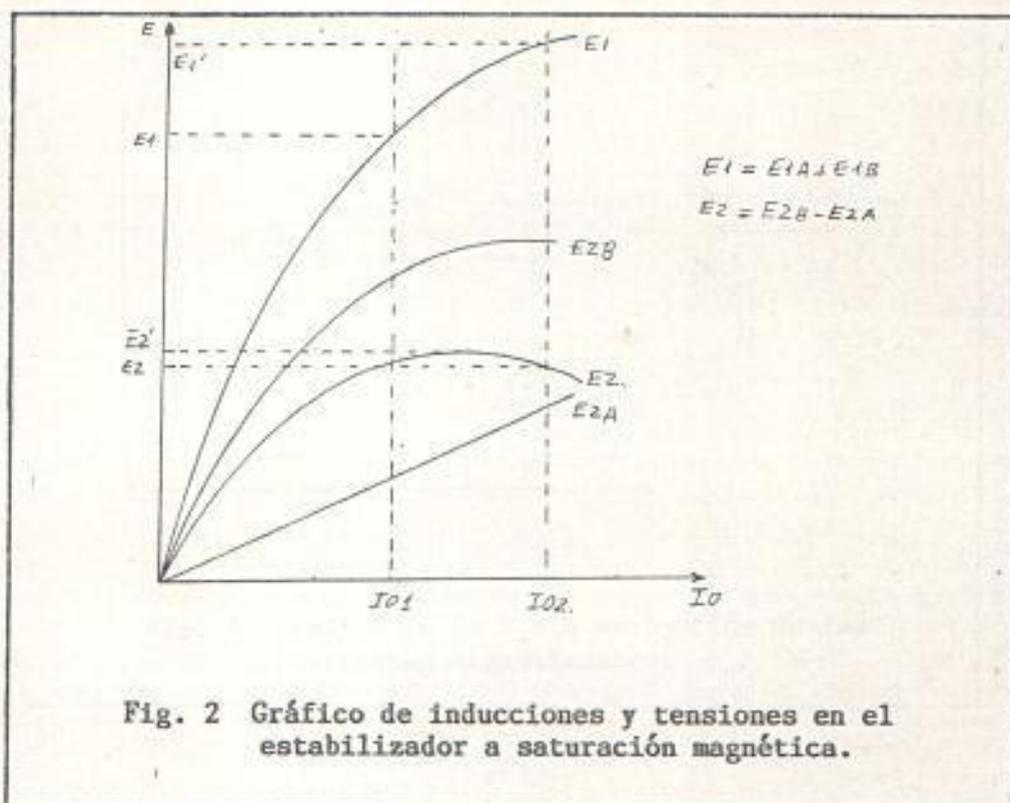
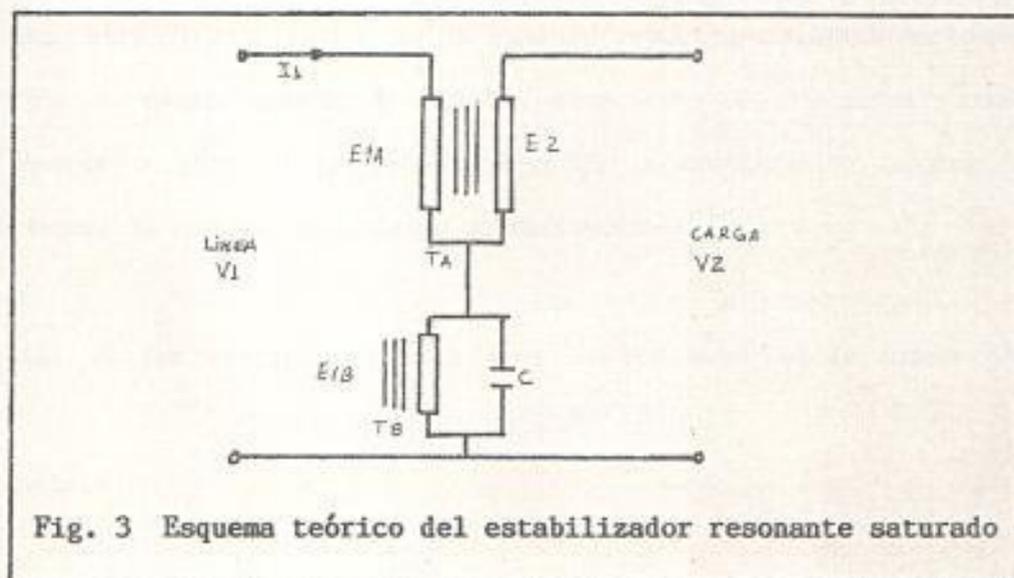
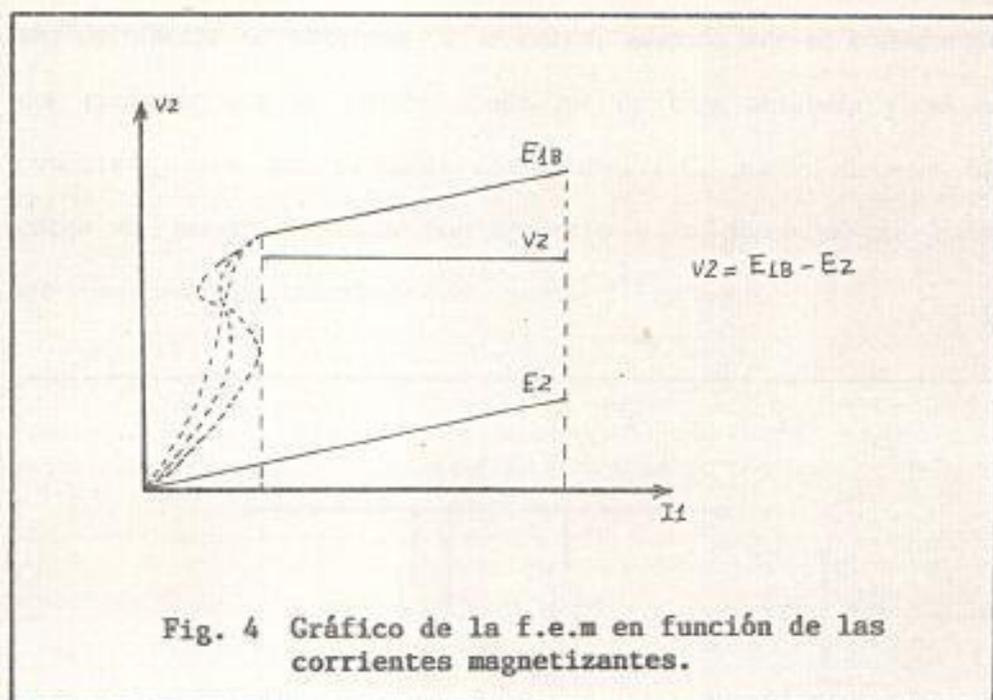


Fig. 1 Esquema de conexiones del estabilizador a saturación magnética.



El estabilizador resonante saturado a diferencia del anterior usa un solo inductor saturado o reactor, que lleva un capacitor derivado para hacerlo entrar en resonancia eléctrica a la frecuencia de la red de canalización.





1.3 Regulador de tensión tipo paso (L.T.C)

Este estabilizador basa su funcionamiento en un autotransformador con múltiples derivaciones, los cuales se conmutan automáticamente mediante la utilización de interruptores electrónicos, que en nuestro caso serán triacs, razón por la cual no producen distorsión en condición de estado estable y solo hay generación de armónicas y transientes durante el pequeño tiempo de la conmutación (cuando se ejecuta el cambio automático de derivaciones).

Una de las ventajas de este tipo de regulador es la independen-

cia del factor de potencia de la carga, además que el transformador reductor que se utilice puede ser de baja potencia y, al ser conectado para que funcione como un L.T.C. puede manejar una carga de mayor potencia con respecto a la potencia que puede manejar como un transformador común y corriente.

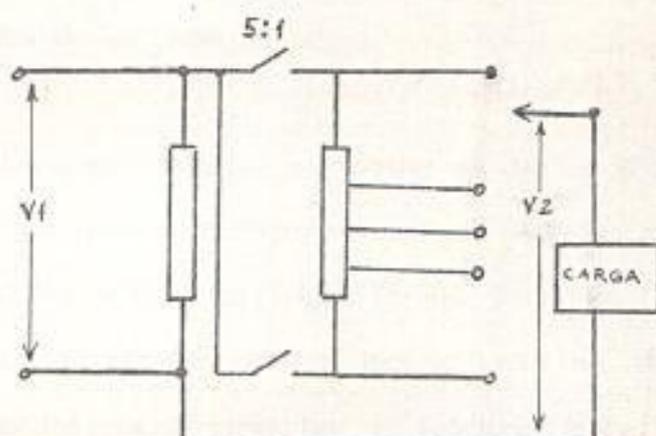


Fig. 5 Conexión del transformador reductor para que funcione como L.T.C.

CAPITULO II

ESTUDIO Y ANALISIS DE LOS TRIAC

2.1 Operación básica de los triac

El comportamiento de los triac es similar al de los SCR con la particularidad que pueden conducir en cualquiera de las dos direcciones. Ambos, los SCR y los triacs forman parte de la familia de los tiristores. El término tiristor, incluye todos los dispositivos semiconductores los cuales presentan un funcionamiento inherente como dispositivos de corte y conducción, en oposición a aquellos que presentan un cambio gradual en la conducción. Todos los tiristores son dispositivos de conmutación regenerativos, y no pueden operar en forma lineal. De este modo; un transistor no es un tiristor porque aun cuando puede operar en corte y conducción, esta no es su naturaleza inherente; es posible para un transistor operar linealmente.

El triac es un dispositivo de tres terminales utilizado para controlar el valor promedio de la corriente que fluye por la carga. Se diferencia del SCR por que conduce en ambas direcciones cuando es llevado a conducción. El símbolo esquemático del triac se muestra en la figura 6.

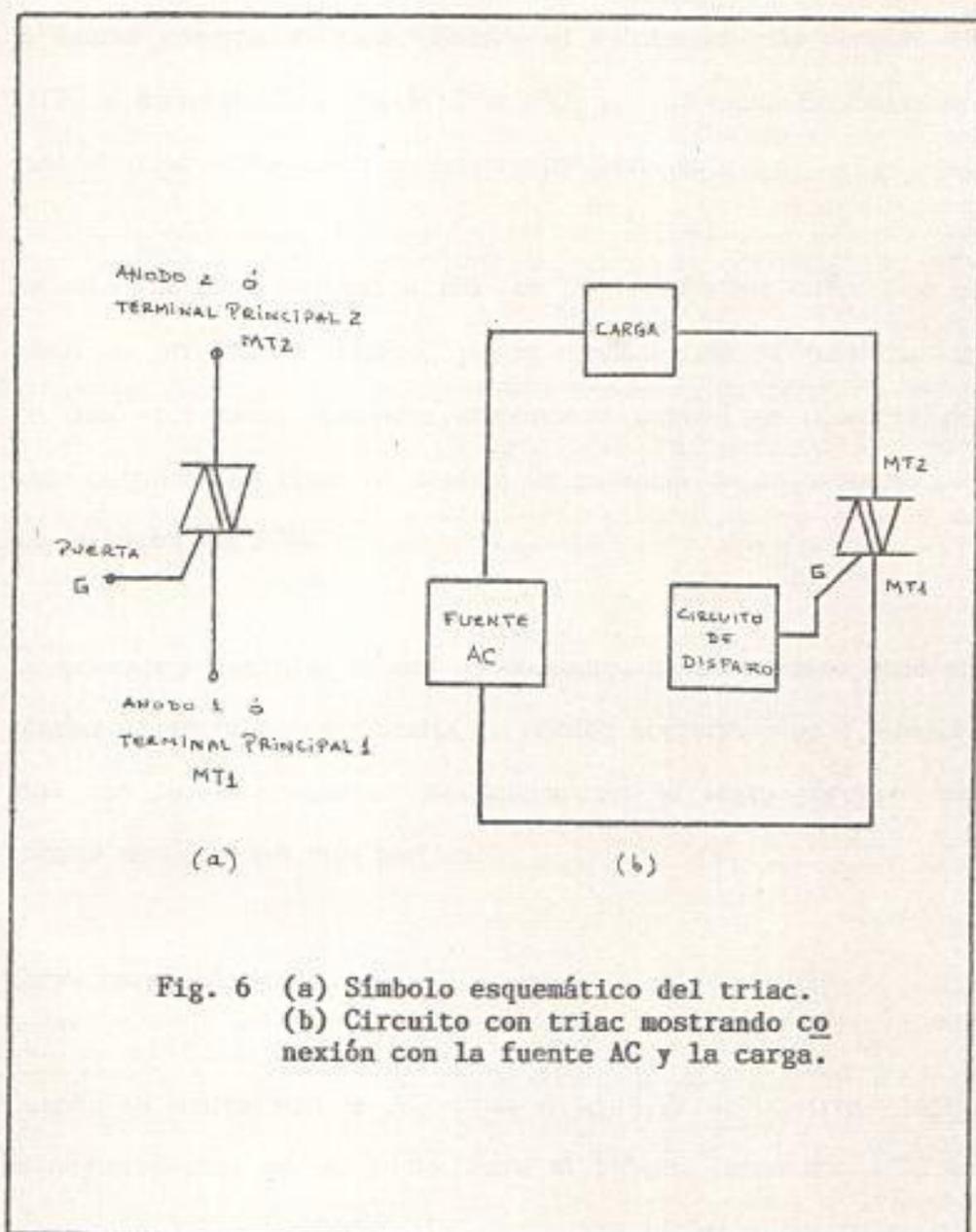


Fig. 6 (a) Símbolo esquemático del triac.
 (b) Circuito con triac mostrando co
 nexión con la fuente AC y la carga.

Cuando el triac es bloqueado, no puede fluir corriente entre sus terminales principales independiente de la polaridad de la fuente externa que se aplica. Entonces actúa como un interruptor abierto. Cuando es llevado a conducción, presenta una resistencia muy baja al paso de la corriente en el camino de un terminal principal al otro, donde el sentido del flujo depende de la polaridad de

la fuente externa aplicada. Cuando el voltaje es más positivo en MT2, la corriente fluye de MT2 a MT1, y, viceversa. En cualquier caso el triac actúa como un interruptor cerrado.

Un triac no está limitado a 180° de conducción por ciclo. Con el adecuado arreglo de disparo, puede conducir por la totalidad de los 360° por ciclo. Entonces proporciona control de potencia de onda completa en lugar de control de potencia de onda media como lo hacen los SCR.

Los triacs no tienen el rebote de contacto, no se produce arco en contactos parcialmente abiertos, y pueden operarse mucho más rápido que los interruptores mecánicos, por lo tanto permiten un control de corriente más preciso.

2.2 Curva característica

Cuando se aplica voltaje AC a un triac, MT2 es positivo y MT1 es negativo para un semiciclo. Para el próximo semiciclo MT2 es negativo y MT1 es positivo. La curva característica del triac, corriente-voltaje, podría mostrar por lo tanto como se comporta durante los semiciclos de la fuente. La figura 7 muestra la característica típica de los triacs. La operación en el primer cuadrante ocurre cuando MT2 es positivo y MT1 es negativo. Esto representa la conducción directa de operación. El tercer cuadrante denota conducción reversa, MT2 negativo y MT1 positivo.

Un triac, al igual que los SCR, no requiere que continúe circulando corriente de puerta una vez que ha sido cebado. El triac permanece en conducción hasta que cambie la polaridad en sus terminales principales o hasta que la corriente principal caiga por debajo de la corriente de mantenimiento I_H . La mayoría de los triacs de mediana potencia poseen una I_H del orden de los 100 mA o menos.

2.3 Especificaciones de los triacs

Entre las especificaciones de los triacs que se deben tener muy en cuenta tenemos:

- a) Voltaje de puerta necesario para disparar el triac (V_{GT}).
- b) Corriente de puerta necesaria para el disparo (I_{GT}). La mayoría de los triacs de mediana potencia tiene un V_{GT} del orden de 0,6 a 2,0 V y una I_{GT} de 0,1 a 20 mA. Como es usual estas características varían considerablemente con cambios en la temperatura. Las variaciones típicas de las características con la temperatura se encuentran graficadas en las hojas de datos que proporciona el fabricante.

Para un triac en particular, la I_{GT} para polarización directa puede ser bastante diferente de la I_{GT} para polarización inversa. Sin embargo, si se consideran muchos triacs del mismo tipo, la I_{GT} para la polarización directa será igual que para la inversa.

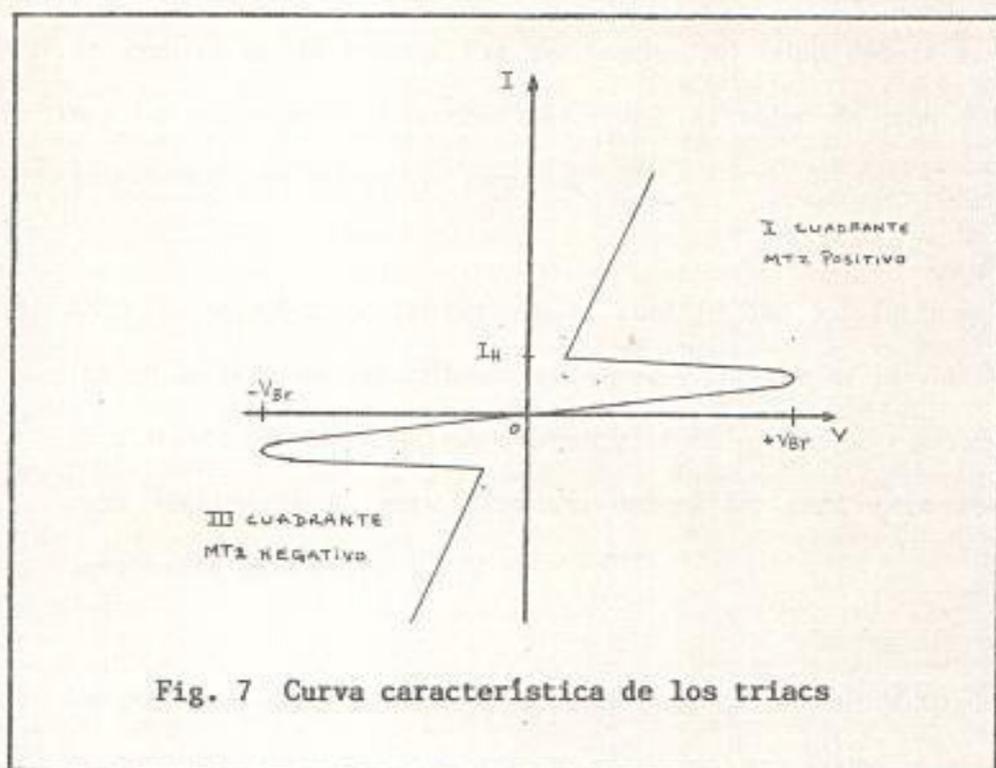


Fig. 7 Curva característica de los triacs

- c) Corriente de mantenimiento (I_H), que es el valor de la corriente por debajo de la cual el triac conmuta del estado de conducción a la región de bloqueo.
- d) Valor RMS de la máxima corriente principal permitida ($I_{T_{RMS}}$).
- e) Voltaje de ruptura (V_{Br}) el cual es el voltaje máximo de pico aplicado en los terminales principales que puede bloquear el triac en cualquier dirección. Si el voltaje aplicado entre los terminales MT2 y MT1 excediera este valor, el triac se rompe y comienza a dejar circular corriente por los terminales principales. Esto no daña al triac, pero significa una pérdida

de control de la puerta. Por tal motivo, el triac deberá tener un valor de V_{Br} mucho mayor que el valor de pico del voltaje AC que maneja el circuito.

- f) Otro valor eléctrico importante el cual lo dan los fabricantes en la hoja de especificaciones es el V_{TM} , que es el voltaje a través de los terminales principales en estado de conducción. Idealmente en esta condición deberá ser cero, pero generalmente está entre 1 y 2 V.
- g) La potencia disipada en el triac está dada por el producto de la corriente principal y el voltaje entre los terminales principales. Es indeseable una gran disipación de potencia desde el punto de vista de protección del triac de las altas temperaturas y también desde el punto de vista de transferencia económica de energía de la fuente a la carga.

2.4 Protecciones de los triacs

En el control de cargas inductivas, se somete al triac a escalones de tensiones de crecimiento rápido que pueden provocar un rebote en el momento de su desconexión. Para evitar que el dv/dt aplicado al triac exceda el valor que puede soportar sin recibirse, se utiliza una red de resistencia y capacidad en serie puesta en paralelo con el triac, como lo muestra la figura 8. Los valores que debe tener dicha red depende de la carga y de la ten-

si3n alterna que se controla.

Aunque generalmente un criterio conservador suele resolver bastantes casos con valores t3picos, hay casos especiales en los que

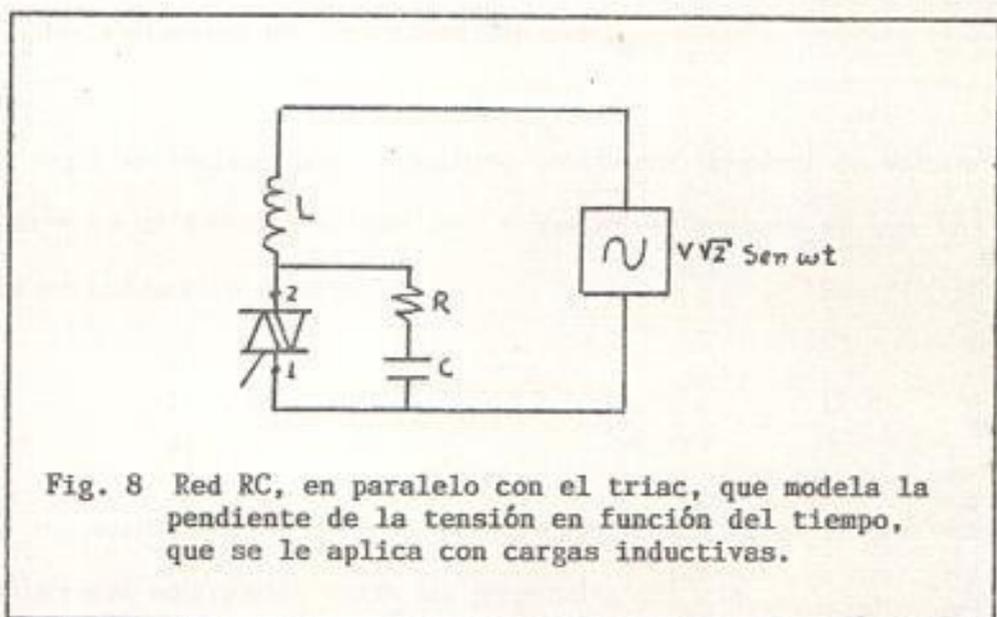


Fig. 8 Red RC, en paralelo con el triac, que modela la pendiente de la tensi3n en funci3n del tiempo, que se le aplica con cargas inductivas.

una red RC no adecuada puede dar problemas. Esto es debido a que dicha red produce una conducci3n cuando el triac est3 bloqueado, entonces la carga ser3 recorrida por corriente cuando no debe serlo.

En el circuito de la figura 8, se puede determinar que la corriente que circula por la red y el voltaje en los terminales del triac son:

$$i(t) = \frac{V \sqrt{2}}{R_{12}} (1 - e^{(-R_{12}/L)t}) \quad (2.1)$$

donde:

$$V_{12}(t) = (1 - e^{(-R_{12}/L)t}) V \sqrt{2} \quad (2.2)$$

R_{12} = Resistencia entre los terminales del triac.
(Experimentalmente es aproximado a 50 K)

$V_{12}(t)$ = Voltaje en los terminales del triac.

De aquí se obtiene que el máximo transiente (cambio) de voltaje ocurre en el instante en que $t=0$, o sea en el instante en que entra en conducción el triac:

$$dV_{12}/dt_{m\acute{a}x} = (R_{12}/L) V \sqrt{2} \quad (2.3)$$

Al colocarle la resistencia R en paralelo, entonces se tendrá una resistencia equivalente entre los terminales del triac:

$$R_{eq} = \frac{R_{12} \times R}{R_{12} + R} \quad (2.4)$$

R_{eq} será muy próxima a R

entonces:

$$R = \frac{L (dV/dt)}{V \sqrt{2}} \quad (2.5)$$

también se debe cumplir que:

$R C$: Constante de tiempo

$$R C = 5 L/R \quad (2.6)$$

Valores típicos de esta red de protección son:

$$L = 20 \mu\text{H}$$

$$C = 0.1 \mu\text{F}$$

$$R = 15 \Omega$$

Aunque en muchos casos el aislamiento galvánico entre el disparador y la carga no es absolutamente necesario, es muy aconsejable que exista, sobre todo si el control forma parte de un sistema complejo; tanto por razones de seguridad personal como de seguridad funcional. En un sistema complejo el problema se puede contemplar en dos formas: O el aislamiento se efectúa entre el triac y el circuito disparador, o bien ambos sometidos a la tensión de la red, se aíslan del resto del sistema. Este último caso afecta únicamente al aislamiento de la tensión de control cuya solución es complicada, al tratarse de señales analógicas.

Una técnica perteneciente al primer caso utiliza aislamiento de la puerta del triac mediante el uso de un transformador adecuado, capaz de transferir el impulso o los impulsos de cebado sin deformarlos ni reducirlos. Esto se logra con el uso de transformadores especiales de respuesta rápida (normalmente con núcleos de ferrita). El disparador, cuyo único disparo es mantenido sincrónicamente con el impulso, no es apto para ser utilizado con aislamiento ya que la elevada duración del impulso (un semiciclo como máximo) exigiría transformadores de gran volumen y costo. En cambio disparadores de la misma clase con transformación de

de un impulso en un tren, si es adecuado para aislar la puerta del triac con transformadores de reducidas dimensiones. También es apto el disparador sincronizado con el cruce por cero de la corriente.

La inserción del transformador de impulsos en la puerta del triac, puede provocar un fenómeno particularmente perjudicial que puede producir la pérdida del control de la carga en algunos casos en los que la impedancia entre la puerta y el terminal MTI del triac es baja. Este fenómeno consiste en que el secundario del transformador de impulsos, cuando el triac conduce, puede derivar parte de la corriente principal del triac, produciendo la saturación del transformador o impulsos espurios de extracorrente de apertura cuando cesa la circulación de corriente, que puede producir en ambos casos el recebado extemporáneo del triac.

Una solución a este problema consiste en introducir en serie con la puerta del triac una resistencia que reduzca a valores no peligrosos la circulación parásita de corriente a través del transformador de impulsos, o bien, un diodo rápido que la bloquee como muestra la figura 9.

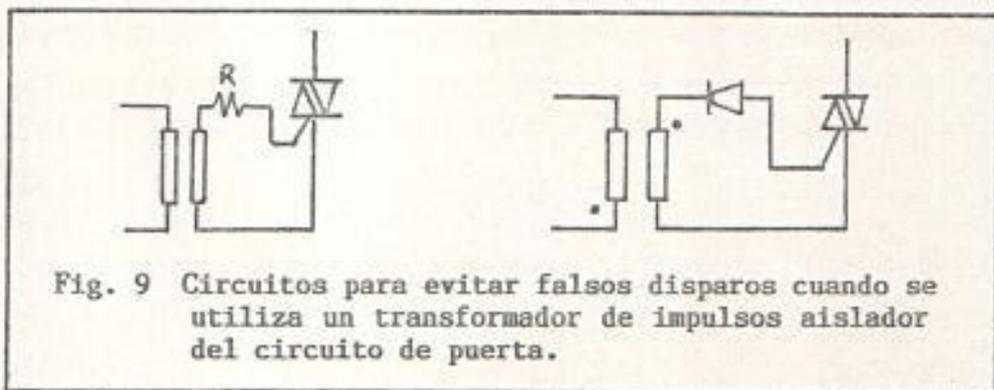


Fig. 9 Circuitos para evitar falsos disparos cuando se utiliza un transformador de impulsos aislador del circuito de puerta.

Inv. No. _____

La polaridad de este diodo impone el cebado con impulsos negativos, fácilmente obtenibles invirtiendo el sentido de un devanado del transformador. Esta circunstancia es inclusive ventajosa habida cuenta de que la mayoría de triacs son más sensibles con impulsos negativos de cebado en la puerta.

CAPITULO III

CARACTERISTICA Y OPERACION DE DISEÑO DEL ESTABILIZADOR DE TENSION TIPO PASO

3.1 Característica y operación general

Este estabilizador basa su funcionamiento en un autotransformador con múltiples derivaciones, las cuales se conmutan automáticamente mediante la utilización de triacs, razón por la cual no producen distorsión en condiciones de estado estable y solo hay generación de armónicas y transientes durante el pequeño tiempo de la conmutación (cuando se efectúa el cambio automático de derivaciones).

Los valores nominales del estabilizador son los siguientes:

Voltaje de operación	105V - 135V
Voltaje de salida	120V \pm 4V (banda regulable)
Potencia	1800 V.A.
Velocidad de respuesta	15V/seg.
Factor de potencia	independiente

Posee una protección de sobre y bajo voltaje (sobre los 140V y bajo los 100V).

3.1.1 Diagrama de bloques

El diagrama de bloques de este estabilizador se presenta a continuación y, la explicación de cada uno de los bloques se realizará en el siguiente subtema.

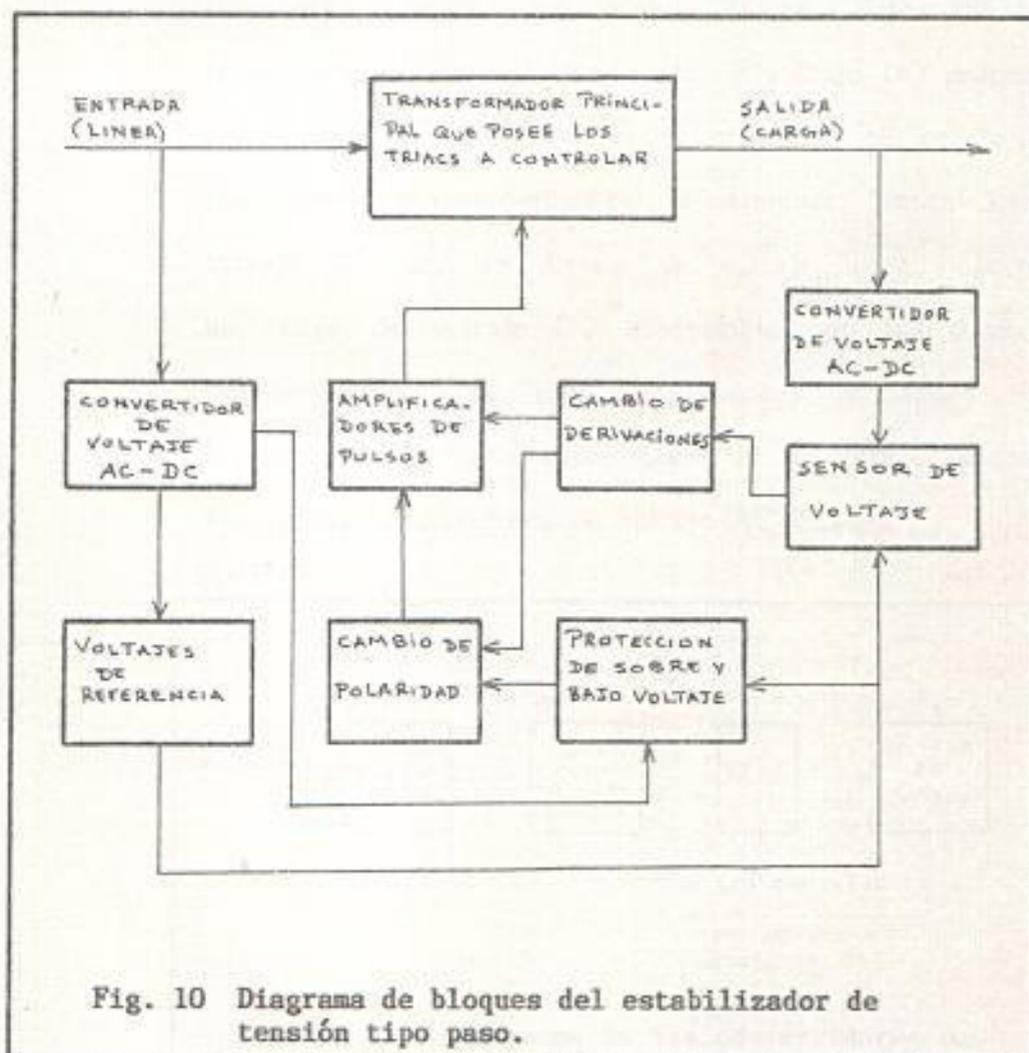
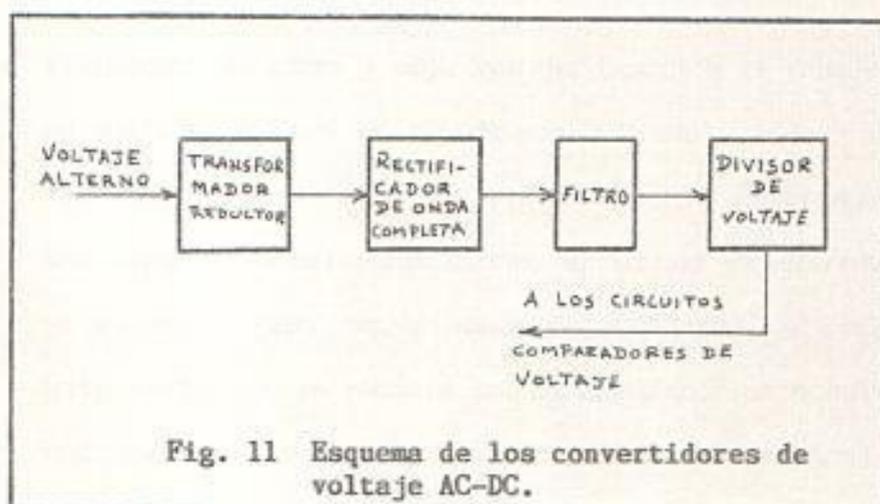


Fig. 10 Diagrama de bloques del estabilizador de tensión tipo paso.

3.1.2 Explicación general por bloques

- a) **Convertidores de voltaje AC-DC:** Convierten las señales de voltaje alterno a señales de voltaje continuo. Los convertidores utilizan un transformador reductor que sirve para aislar el circuito de control del circuito de fuerza. Luego la señal de los secundarios de los transformadores pasan por un rectificador de onda completa formado por cuatro diodos. Este voltaje rectificado es filtrado dando así un voltaje DC proporcional a la señal alterna en los primarios de los transformadores correspondientes. Finalmente pasan este voltaje DC por un divisor de voltaje, para obtener un rango de voltaje DC compatible con los límites pre-establecidos de los comparadores utilizados en los sensores de voltaje. La figura 11 muestra el esquema de los convertidores de voltaje AC-DC.



- b) **Sensor de voltaje:** Usa un comparador de ventana para comparar los dos voltajes de entrada y obtener en la salida un cero o un uno lógico (0V ó 5V).
- c) **Cambio de derivaciones:** Este bloque es digital, formado por puertas lógicas, un contador binario, un decodificador, un reloj y un generador de pulsos. Este bloque es el que decide que derivación debe ser conmutada para mantener el voltaje de la carga regulable. Las señales de control de este bloque son emitidas por el sensor de voltaje.
- d) **Cambio de polaridad:** Comanda la conducción de los triacs que suman o sustraen el voltaje del secundario del transformador principal al voltaje del primario. Posee puertas lógicas y un generador de pulsos con retardos.
- e) **Protección de sobre y bajo voltaje:** Compara el voltaje de entrada, el cual es rectificado, filtrado y reducido, con un voltaje de referencia pre-establecido, generando una señal de interrupción cuando el voltaje de entrada se encuentra fuera de la banda de 100V (rms) a 140V (rms), señal que es recibida por el cambiador de polaridad, lográndose así la desconexión de la bobina secundaria de la primaria, ocurriendo automáticamente la

interrupción del voltaje de la carga.

- f) **Amplificadores de pulsos:** Los pulsos que se generan tanto en la red de cambio de polaridad como en la de cambio de derivaciones, son de pequeña corriente. Por lo tanto se hace necesario el uso de amplificadores de corriente de los pulsos que se enviarán para las puertas de los triacs, para así garantizar una corriente de puerta lo suficientemente grande que permita un encendido seguro de los triacs. Estos pulsos deben ser aislados de la compuerta por medio de los transformadores de pulsos (ver 2.4 Protecciones de los triacs).
- g) **Voltajes de referencia:** El voltaje de entrada rectificado y filtrado sirve para poder generar los tres voltajes de referencia que serán utilizados tanto en el sensor de voltaje como en el circuito de protección de sobre y bajo voltaje. Emplea diodos, zeners y resistencias.
- h) **Transformador principal que posee los triacs a controlar:** Es el transformador que va a funcionar como autotransformador de regulación discreta. Posee en su secundario cuatro derivaciones, en cada una de las cuales se conectará un triac, además un terminal del primario estará conectado a los extremos del secundario también por dos triacs, el otro extremo del

primario estará conectado a la carga.

3.2 Diagrama esquemático del circuito de control

En esta sección se realizará el análisis del funcionamiento circuital de las partes constitutivas del control de este estabilizador.

3.2.1 Transformador de tensión

También llamado transformador principal, posee una relación de transformación de 6.67:1. Posee cuatro terminales de salida, por lo tanto, el voltaje entre dos terminales consecutivos es un $1/3$ del voltaje de la bobina secundaria como lo muestra la figura 12. Está construido como un transformador reductor de 360VA,

Se puede apreciar en la figura 12 b, junto a cada interruptor electrónico su red de protección RC, cuyos valores son los típicos, pero al no disponer de resistencias de 15 Ω , se eligió un valor muy próximo que es 21 Ω , con la misma potencia de 5W, lográndose una protección satisfactoria en el funcionamiento de los triacs en este diseño.

Además, en la figura 12.b, se presenta la conexión del transformador principal y la posición de los triacs, los

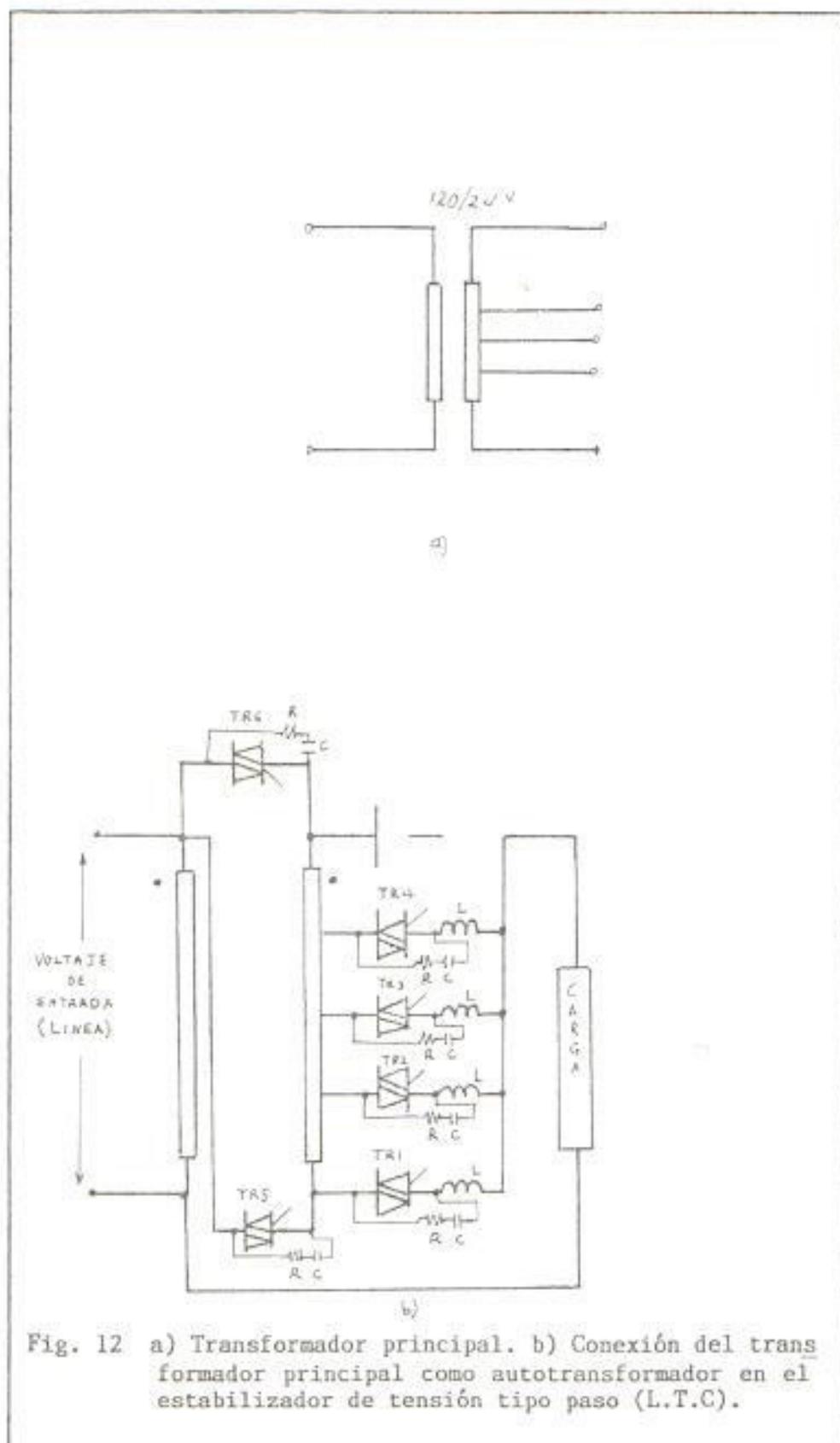


Fig. 12 a) Transformador principal. b) Conexión del transformador principal como autotransformador en el estabilizador de tensión tipo paso (L.T.C).

que en conjunto constituyen el circuito de fuerza del estabilizador, estudio de esta tesis. Los inductores colocados en serie con los triacs, tienen como finalidad evitar que se produzca un cortocircuito de una porción de la bobina secundaria o de toda, al intercambiar una derivación con otra; ya que en el circuito de disparo no se garantiza la no conducción inmediata del triac que se apaga al enviar los pulsos de disparos al triac de otra derivación. Los valores de los inductores se los calculó suponiendo el caso de que ambos triacs, de dos terminales consecutivos de la bobina secundaria estaban conduciendo y un máximo valor de voltaje de dicha porción de bobina de 7V rms como lo muestra la figura 13.

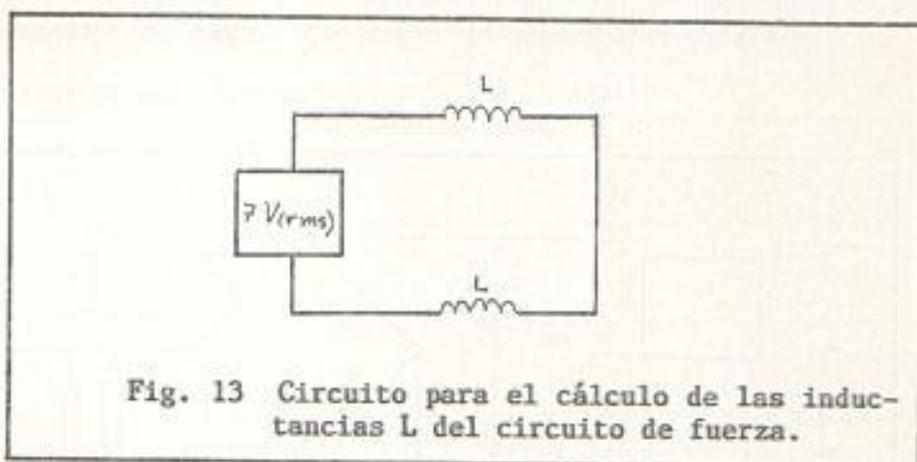


Fig. 13 Circuito para el cálculo de las inductancias L del circuito de fuerza.

Usando malla, tenemos que:

$$2(2\pi f L)I = 7 \quad (3.1)$$

En esta circunstancia I posee un valor de 16 A(rms):

f: frecuencia de la línea (60 Hz)

$$L = \frac{7}{16 \times 2 \times 2\pi \times 60} \quad (3.2)$$

$$L = 0.58 \text{ mH}$$

En la práctica se construyó y utilizó inductancias de 0.59m H.

3.2.2 Fuente de suministro 5V, 15V

La fuente de suministro de 5V es utilizada para la polarización de todos los circuitos integrados digitales TTL. Toma la señal alterna del secundario del transformador T1, el cual posee una relación de transformación de 10:1 y dos amperios de salida. La figura 14 muestra el diagrama circuital de esta fuente.

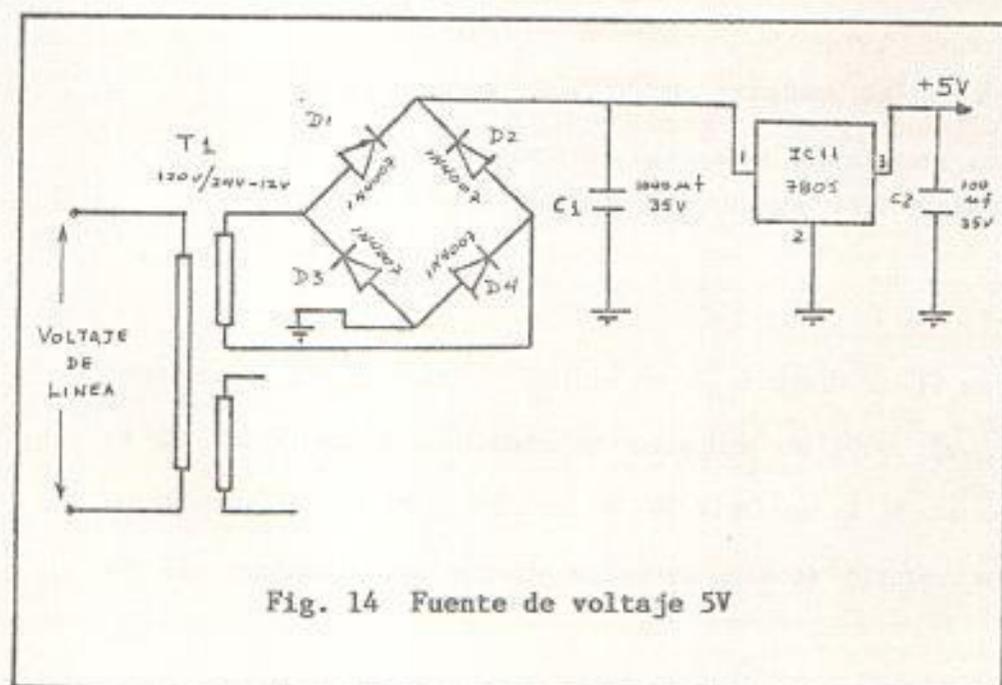


Fig. 14 Fuente de voltaje 5V

El primario del transformador T1 es conectado a la línea el cual es un voltaje no regulado. Se emplea un circuito integrado regulador de voltaje 7805, el que funciona correctamente con un voltaje de entrada DC entre 7V y 35V. El nivel del voltaje DC a través del condensador C1 viene dado por:

$$V_{cc} = V_m - V_{r_{pico}} \quad (3.3)$$

$$V_{cc} = V_m - \sqrt{3} (2.4 I_{dc})/C1 \quad (3.4)$$

en donde:

V_{cc} es el nivel de voltaje dc a través del condensador C1

V_m es el voltaje de pico en el secundario de T1.

V_r es el voltaje de rizado.

I_{dc} es el valor de corriente continua en la carga que para nuestro caso será la máxima corriente dc que entrega el regulador 7805 al circuito (0.5A)

Suponiendo que el máximo voltaje en el primario de T1 será de 150 V(rms) y utilizando un capacitor de 1000 uF, y considerando un voltaje mínimo de 70 Vrms en el primario de T1, mediante las ecuaciones antes citadas obtenemos que:

$$V_{r_{pico}} = 2.08 \text{ V}$$

El valor del voltaje dc para 150 V(rms) de entrada será de 19.2 V. Para 70 V(rms) de entrada tenemos un voltaje dc de 7.81 V.

Como se puede notar el voltaje de entrada dc al regulador 7805 se encuentra de los límites permisibles.

Además, el transformador T1 posee otro devanado cuya relación de transformación es de 5:1, devanado que servirá para la construcción de la fuente de 15V, que sirve para la polarización de los comparadores de voltaje, los voltajes de referencias y, para sensar voltaje para la protección de sobre y bajo voltaje.

La figura 15, muestra el diagrama circuital de esta fuente.

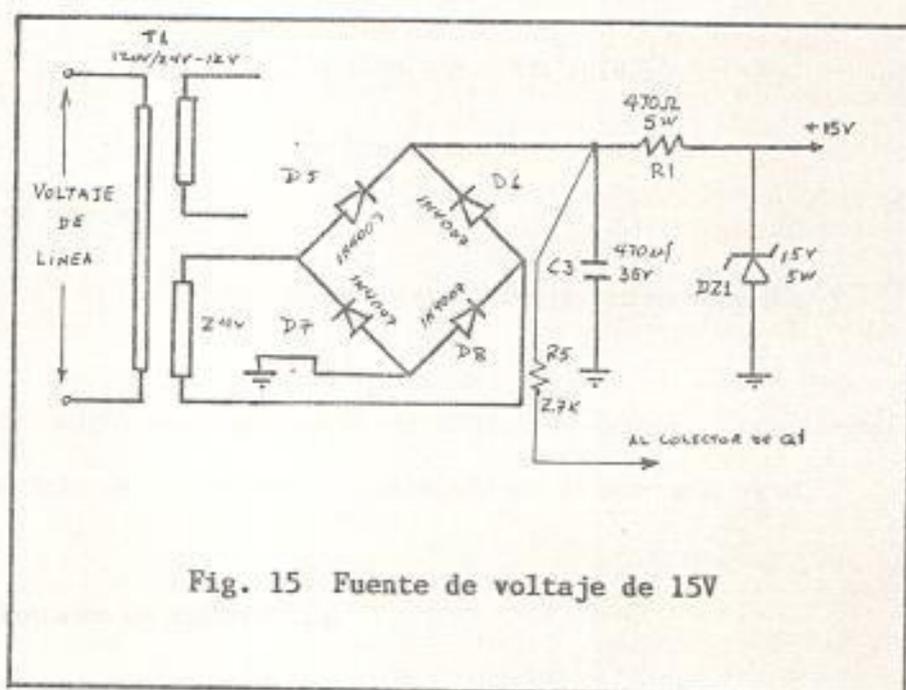


Fig. 15 Fuente de voltaje de 15V

La resistencia R_1 limita la corriente que circulará por el zener Dz_1 en el tiempo de descarga del capacitor C_3 .

El valor de la resistencia se lo determinó considerando un zener de 15V, 5W, el cual debería suministrar una corriente de 10 mA y un voltaje de entrada de 70 V(rms):

$$\begin{aligned} V_{cc}(\text{en } C_3) &= 70 \sqrt{2}/5 \\ &= 19.798 \text{ V (despreciando rizado)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_1 &= (19.798 - 15)/0.010 \\ R_1 &= 479.8 \Omega \end{aligned}$$

Para el cálculo de la potencia se desprecia el voltaje de rizado y se consideró un voltaje de 150 V(rms) en el primario del transformador:

$$\begin{aligned} P_{R_1} &= (150 \sqrt{2}/5 - 15)^2/479.8 \\ &= 1.568 \text{ W} \end{aligned}$$

en donde:

P_{R_1} es la potencia de la resistencia R_1

Se eligió una resistencia de 470Ω -5w, debido a la no existencia de la resistencia calculada en el mercado local.

3.2.3 Voltajes de referencias

a) Referencia del circuito sensor de voltaje: Esta se la im-

plementa con un diodo zener de 5.1V, para así obtener muy poca variación de este valor. Este valor se escogió para así obtener un amplio margen de variación de voltaje dc en la entrada de los comparadores, el que es proporcional al voltaje de la carga, caso contrario, una pequeña fluctuación del voltaje de carga haría funcionar a los comparadores. Es decir, con este valor de referencia, existe la posibilidad de corregir esta anomalía utilizando un realimentación positiva. El diagrama circuital muestra la figura 16. El criterio de selección de la resistencia R2 es como sigue asumiendo que se limita la corriente a 5mA;

$$R2 = (15 - 5.1)/0.005$$

$$R2 = 1980 \Omega$$

Se escogió una resistencia de 2 K 1/4 W.

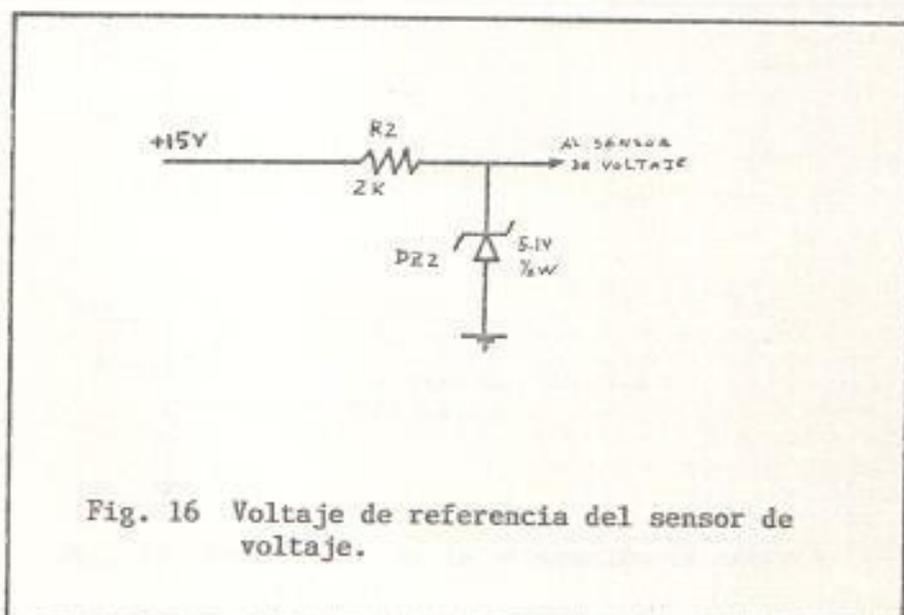


Fig. 16 Voltaje de referencia del sensor de voltaje.

b) **Voltaje de referencia de la protección de sobre y bajo voltaje:** Se utilizan dos referencias: Una superior y otra inferior, la primera representará un voltaje proporcional al límite de sobre voltaje, 140 V(rms) y, la segunda al límite de bajo voltaje, 100 V(rms). Los 140 V(rms) representan un voltaje de 3.60 V, mientras que los 100 V(rms) representan 2.57 V. Por lo tanto se eligió una red divisora de voltaje alimentada por la fuente de 5V, para ambas referencias, de tal forma que presenten una baja impedancia en la entrada de los comparadores. Con los valores escogidos se tiene que en realidad el límite superior es de 3.85 V y, el límite inferior de 2.68 V, lo que representa en realidad una protección de sobre los 149V y bajo los 104V. En la práctica la protección está sobre los 145 V y bajo los 102 V. La figura 17 presenta el circuito de estas referencias.

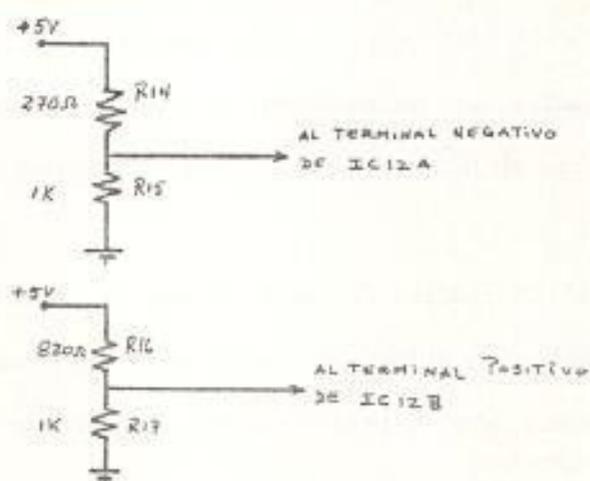


Fig. 17 Referencias de la protección de sobre y bajo voltaje.

3.2.4 Circuito sensor de voltaje

Este circuito toma la señal alterna del voltaje de la carga, por medio de un transformador T2, con relación de transformación de 10:1. El voltaje del secundario de T2 es rectificado por un puente de 4 diodos (1N4007), para luego ser filtrado por medio del capacitor C4 de 470uF, obteniéndose un rizado de 3.89 V pico a pico como máximo 150V(rms) de entrada.

El voltaje de corriente directa en los terminales del capacitor C4 (ver figura 18), será:

$$V_{cc_{max}} = 15 \sqrt{2} - 1.9 = 19.2 \text{ V}$$

Para un voltaje de carga de 120V y, sin considerar el rizado que lo minimizaremos empleando otro capacitor C5, tendremos en la base del transistor Q1, que sirve como acople de impedancia, un voltaje de 13.1 V y por consiguiente en el emisor un voltaje de 12.4 V.

Como se desea tener el voltaje en la carga en el rango de voltaje de 120 ± 4 voltios regulables debemos construir una red que la analizaremos más adelante, conocida como "banda o rango de voltaje".

1er. No. _____

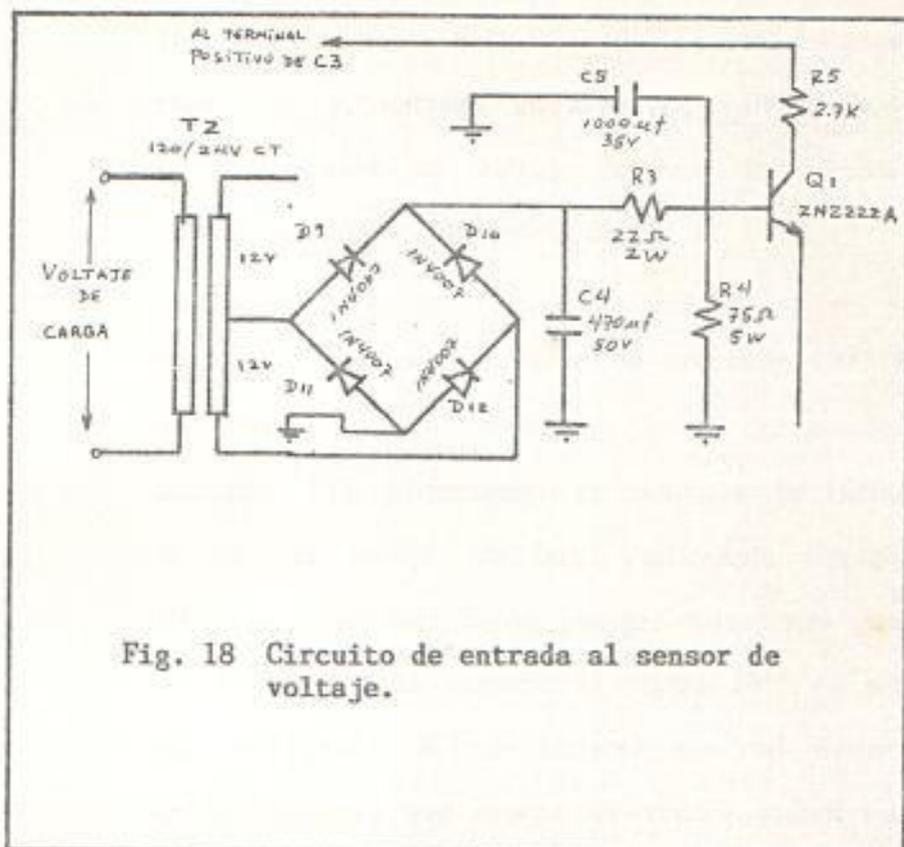


Fig. 18 Circuito de entrada al sensor de voltaje.

3.2.4.1 Ajustes de niveles de voltaje (105V, 120V, 135V)

Las resistencias R6 y R7 que se muestran en la figura 19, pueden ser reemplazadas por dos potenciómetros para así poder calibrar una salida de voltaje a un valor diferente al de diseño (120 ± 4 voltios). Por lo tanto se deja como alternativa la colocación de estos potenciómetros siempre que se desee obtener a la salida un voltaje diferente a 20 ± 4 V.

3.2.4.2 Banda o rango de voltaje

Consiste simplemente en una red divisora de vol-

taje, la cual toma el voltaje del emisor del transistor Q1 y, entrega un nivel de voltaje dc a un comparador de voltaje, el que lo compara con el voltaje de referencia de 5.1 V.

Se utiliza dos comparadores de precisión LM311, los cuales pueden manejar (cada comparador) circuitos TTL conectando su salida a la fuente de 5V por medio de una resistencia pequeña (1K por ejemplo). Estos comparadores son conectados como lo muestra la figura 19. Al primer comparador IC1 se conecta una red divisora de voltaje, red que otorga un voltaje menor que el voltaje referencia y, por lo tanto a la salida de este integrado obtenemos 5V (señal de subida) cada vez que el voltaje de la carga desciende por debajo los 116 V(rms). Al segundo comparador se conecta otra red divisora tal que, cuando el voltaje de la carga supera los 124 V(rms), entrega un nivel de voltaje superior al de referencia y, por lo tanto, a la salida de este integrado obtenemos un nivel alto TTL (5V) indicando una señal de bajada. Los comparadores están polarizados con voltajes de + 15V y 0V entregando a su salida +5V cuando el voltaje en la entrada positiva (terminal 2) es mayor que el voltaje

de la entrada negativa (terminal 3). Además posee para el integrado IC1 una retroalimentación entre el resistor R11 de 470K y la resistencia dinámica del zener para producir una pequeña histéresis que evita que niveles de ruido de orden de los milivoltios cambie el voltaje de salida de este circuito. La banda de tolerancia de voltaje se la puede regular por medio de los potenciómetros POT1 y POT2 de 100 Ω cada uno, entregando máximo una banda de tolerancia de ± 4 V. El potenciómetro POT1 regula el nivel inferior y, el potenciómetro POT2 regula el nivel superior.

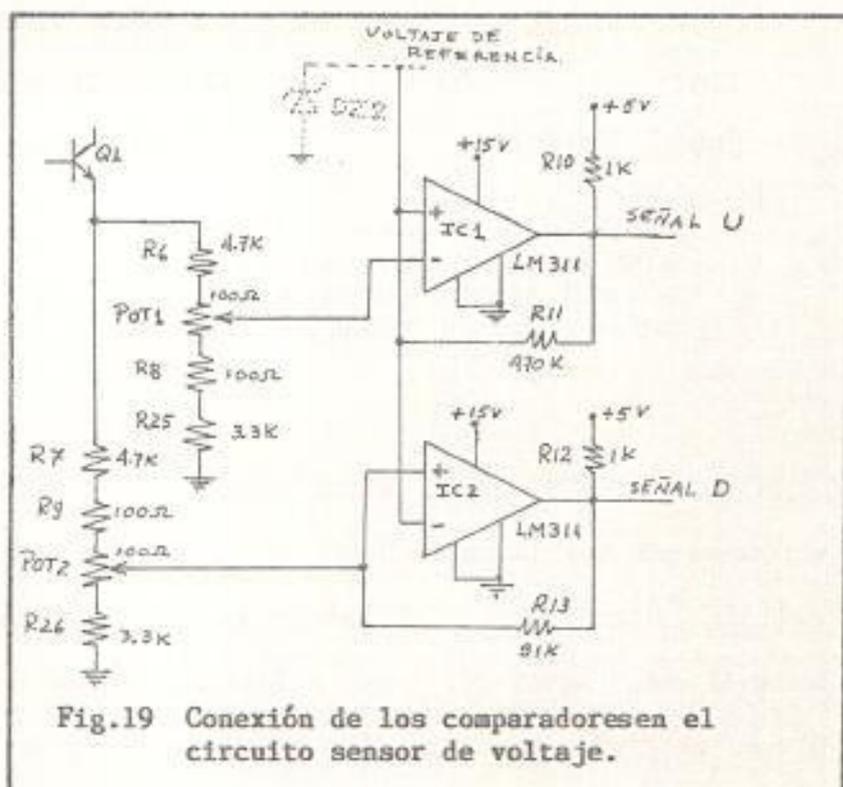


Fig.19 Conexión de los comparadores en el circuito sensor de voltaje.

3.2.5 Circuito intercambiador de taps o derivaciones

Como se expresó anteriormente es una red digital, que utiliza puertas lógicas, un contador binario y un decodificador, a los que se les suma el reloj del circuito y un generador de pulso. Recibe señales del sensor de voltaje, en donde se llamará señal U, la señal que entrega el integrado IC1 (con lógica positiva) y, señal D, la señal que entrega el integrado IC2 (también con lógica positiva). Por lo tanto, y de acuerdo al diseño del sensor, se tendrá:

TABLA I

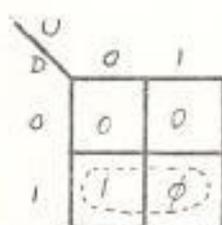
Voltaje	Salida	Salida
en la carga (load)	IC1(U)	IC2(D)
mayor a 124 V	0V(0)	5V(1)
entre 124 y 116V	0V(0)	0V(0)
menor a 116V	5V(1)	0V(0)

Posibles combinaciones de las salidas de los comparadores del sensor de voltaje que se pueden obtener. Entre paréntesis, los niveles lógicos correspondientes.

Se utilizará un contador binario UP/DO WN de 4 bit (74LS 191), el cual utiliza un reloj (terminal 14) disparado por flancos positivos, las señales de control: "Enable" (terminal 4) que se lo conectará a tierra (0); carga (load, terminal 11), que se lo conectará a 5V y, la señal \bar{U}/D , la cual si tiene un voltaje de 5V, el contador realiza cuenta descen-

dente y, si posee OV, realizará cuenta ascendente.

El mapa de excitación para este terminal \bar{U}/D , es el siguiente:



$$\bar{U}/D = D \quad (3.5)$$

La tabla 2, permite observar la correspondencia entre los dos bit menos significativos del contador con los interruptores en los terminales de la bobina secundaria del transformador de tensión.

TABLA II

Terminal 2	Terminal 3	Triac
B1	A1	
0	0	TR1
0	1	TR2
1	0	TR3
1	1	TR4

Si la salida del contador es $x1xx$, entonces conducirá el triac TR5 y, si la salida del contador es $x0xx$ conducirá el triac TR6, siendo el bit de la izquierda el más significativo y (x) representa cualquier nivel lógico.

Si están conduciendo tanto el triac TR5 y el triac TR4 y, existe una señal de subida ($U= 1$ lógico), el contador debe parar la cuenta. Caso similar si el triac TR6 y el triac TR1 están conduciendo y existe una señal de bajada ($D= 1$ lógico). De igual forma si ambas, las señales U y D tienen un valor de cero lógico. Por lo tanto, el circuito lógico que gobierna la parada de la acción del contador estará conectada en conjunción con el reloj del contador:

(3.6)

$$Clk = A1.B1.C1.U + \bar{A1}.\bar{B1}.\bar{C1}.D + \bar{U}.\bar{D} + clk1$$

O su equivalente: en los circuitos lógicos disponibles. Las señales menos significativas de la salida del contador son decodificadas por medio el integrado IC5 (74LS138), el que entrega una correspondencia con el manejo de la conducción de los triacs. Las salidas del decodificador seleccionan directamente los triacs: Q0 (terminal 15) controla al Triac TR1; Q1 (terminal 14) controla al TRIAC TR2; Q2 (terminal 13) controla al TRIAC TR3 y; Q3 (terminal 13) controla al TRIAC TR4. Cada una de las cuales dejará pasar pulsos por el accionar de las puertas NOR (741s02) a su respectivo triac. Una de las entradas de todas las puertas NOR tiene conectado la salida de un multivibrador estable diseñado con temporizadores 555. El clk1, también es un multivibrador astable. El primero de frecuencia de 11 KHz y el segundo de 2.1 Hz.

La figura 20 muestra el circuito intercambiador de tap o derivaciones, con los respectivos multivibradores astables.

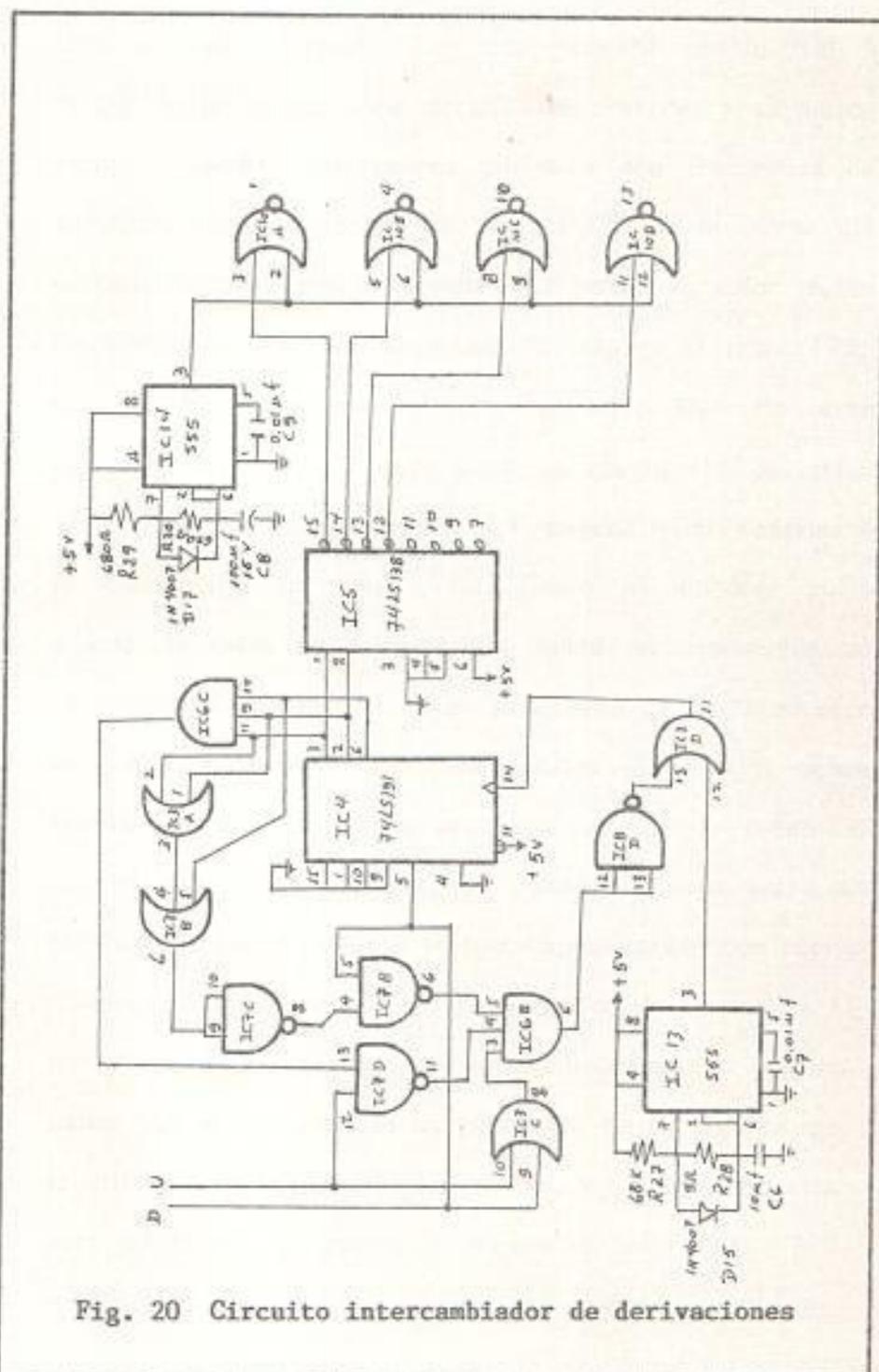


Fig. 20 Circuito intercambiador de derivaciones

3.2.6 Circuito intercambiador de polaridad de la bobina secundaria del transformador de alimentación la cual se conecta en serie a la bobina primaria del mismo.

Este circuito, formado por una pequeña red digital a la que se le agrega unos circuitos de retardos y un multivibrador astable que genera pulsos a una frecuencia de 11 KHz, toma su señal de control C1 de la salida del contador digital binario. Cuando C1 posee un valor lógico de UNO, se debe enviar pulsos de disparo al triac TR5, caso contrario se enviará pulsos al triac TR6. En otras palabras, la señal C1 controlará la conducción del triac TR5, mientras que la señal C1 negada ($\overline{C1}$) controlará la conducción del triac TR6. Como al enviarse pulso a uno de estos triacs para que entre en conducción no se garantiza que el otro triac se apague instantáneamente por suspensión de pulsos, las señales C1 y $\overline{C1}$, deben ser retardadas un tiempo prudente tal que se garantice que el un triac está apagado cuando el otro entra en conducción. Estos retardos se han implementado con temporizadores 555(IC16 e IC17) cuya magnitud de tiempo es 11 mseg. Estas señales retardadas están en conjunción con los pulsos que se obtienen de un generador de pulsos, idéntico al utilizado en el circuito intercambiador de derivaciones, para así formar los pulsos de disparo de los triacs TR5 y TR6 que luego son amplificados en corrientes y llegar

por medio de transformadores de pulsos a las puertas respectivas de los triac antes mencionados.

La polaridad o el voltaje de polarización del generador de pulso que se utiliza en este circuito es tomado de la señal de salida que se genera en el circuito de protección de sobre y bajo voltaje. Este circuito de protección generará un voltaje directo de 5V siempre que el voltaje de entrada se encuentre entre los 100V y los 140V, caso contrario generará un voltaje de CERO voltios.

Para sensar el voltaje de entrada se colocará una red divisora de voltaje en paralelo al capacitor C3, localizado en el circuito de la fuente de 15V (fig. 15). Los valores de resistencia de esta red se los realizó con los siguientes criterios de diseño; utilizando las referencias de 3,85 V para sensar el límite superior de 145V, y la referencia de 2.68V para sensar el límite inferior de 100V, además despreciando el voltaje de rizado en los terminales del capacitor C3; escogiendo la resistencia conectada a tierra de 1K , en cuyos terminales se tomará el voltaje proporcional al de entrada:

$$3.85 = (140 \cdot 2/5) \left(\frac{1K}{1K + X} \right)$$

de donde: $X = 9.28 K$

o bien: $2.68 = (100 \cdot 2/5) \left(\frac{1K}{1k + X} \right)$

de donde: $X = 9.55 K$

Por lo tanto se escogió una resistencia de 10K, 1/2 W.

El circuito sensor de voltaje de esta protección es un comparador de ventana formado por los integrados IC12-A e IC12-B en donde el integrado IC12 es, el LM324. Las salidas de los opams que forman este comparador, se conectan en común por medio de diodos rápidos 1N914, para así evitar que fluya corriente de un opam a otro. En este punto común se obtendrá un voltaje de +15V (voltaje de saturación de los opams) cuando el voltaje de entrada esté fuera del rango de operación del estabilizador (100V-140V). Esta señal pasa por un inversor transistorizado, utilizándose una resistencia limitadora de corriente en la base del transistor (NPN) y de igual forma otra en el colector que se conecta a la fuente de + 7.5V formada por zener de 5.1V en serie con uno de 2.4V y conectados en paralelo a la fuente de 15V. El emisor de este transistor es la salida inversora que se conecta a un nuevo retardo de tiempo similar a los anteriores de las señales $C1$ y $\overline{C1}$, pero que posee una magnitud de tiempo regulable desde los 13.2 segundos hasta los 3.88 minutos por medio del potenciómetro POT3. Este nuevo retardo me asegura el NO FUNCIONAMIENTO INMEDIATO al ocurrir una variación de voltaje que caiga fuera del rango de operación

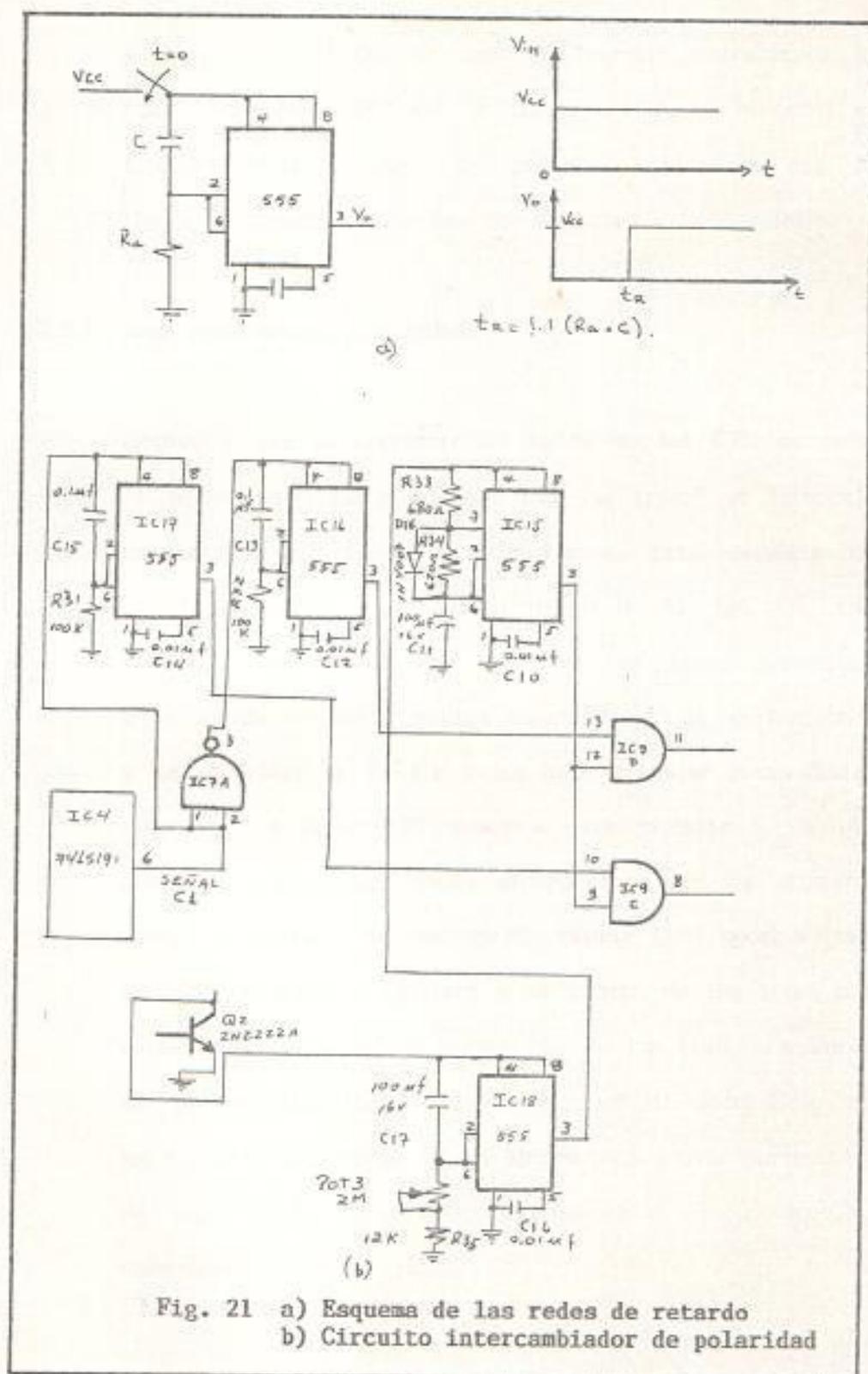


Fig. 21 a) Esquema de las redes de retardo
b) Circuito intercambiador de polaridad

y luego el voltaje de entrada ingrese nuevamente al rango de operación. En la figura 21 b se muestra el circuito intercambiador de polaridad, mientras que la figura 22 muestra la protección de sobre y bajo voltaje.

3.2.7 Red amplificadora de pulsos

Debido a que la corriente de salida de los TTL es baja, es necesario para el disparo de los triacs se intercale una etapa reforzadora de corriente. Esta consiste en un transistor por cada pulso, es decir Q3, Q4, Q5, Q6, Q7, Q8, que reciben en su base los pulsos generados a la salida de los circuitos cambiadores de derivaciones y de polaridad a 11KHz y los hace trabajar como "interruptor". La figura 23 muestra este circuito y en el cual los diodos que están en paralelo con el primario (anodo a tierra), de interrupción rápida (100 nseg) evitan el paso de pulsos negativos a la puerta de los triac que están conectados en el secundario de los transformadores de pulsos, los diodos localizados en el secundario de los transformadores de pulsos sirven para evitar corrientes de fuga desde el circuito de fuerza al de control en caso de daño en los triacs.

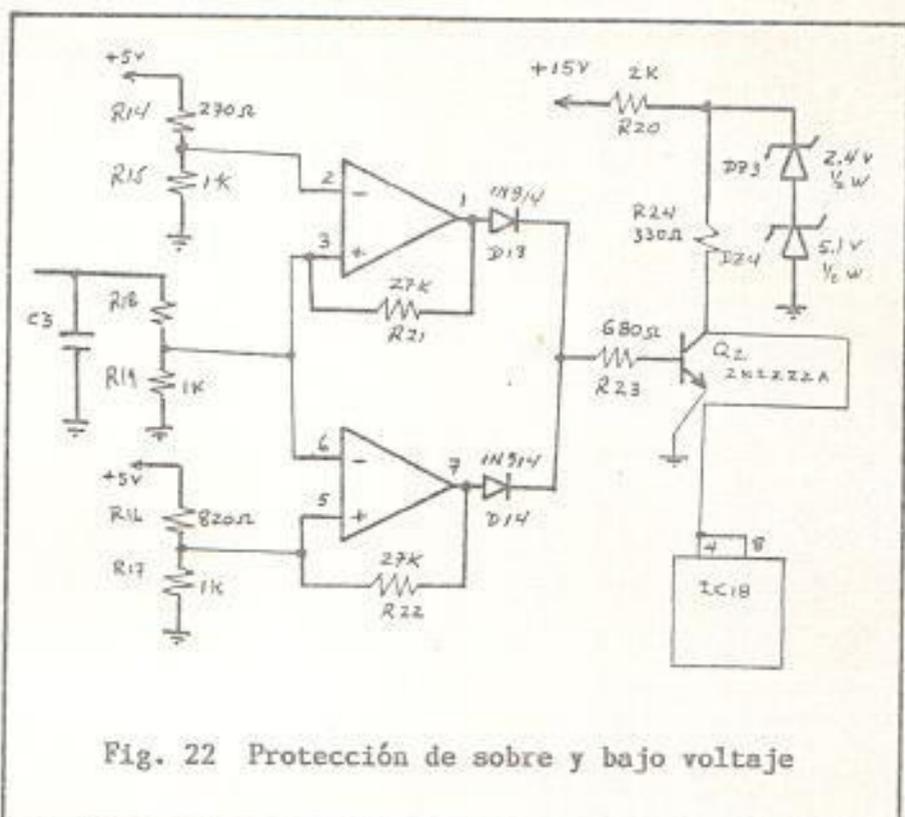


Fig. 22 Protección de sobre y bajo voltaje

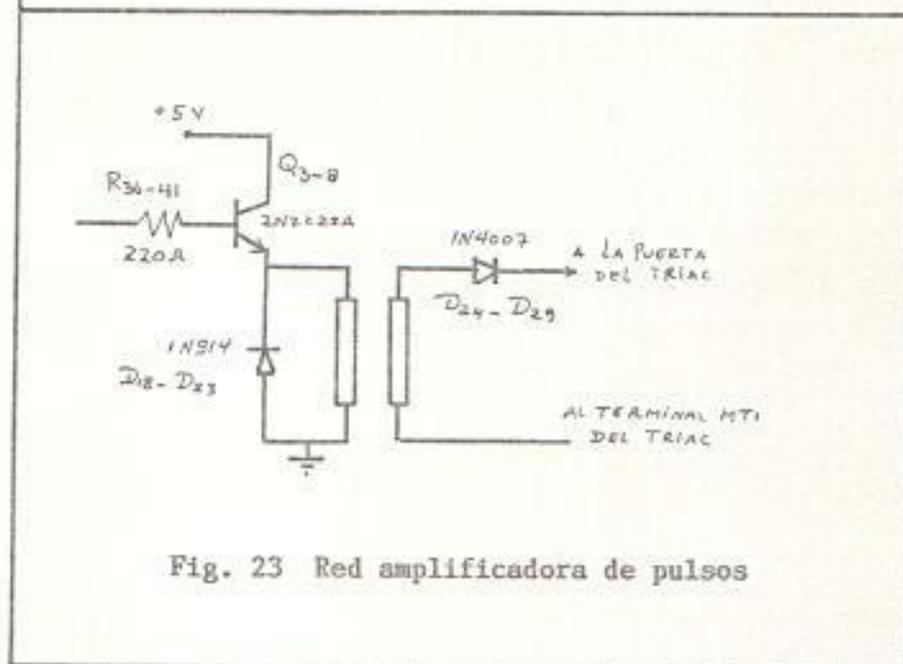


Fig. 23 Red amplificadora de pulsos

Los transformadores de pulsos poseen una relación de 2/1 para así disminuir la magnitud del voltaje de los pulsos y aumentar su corriente, para así ajustarse a las especifici-

caciones de los triacs.

CAPITULO IV

CONSTRUCCION Y PRUEBAS

- 4.1 Verificación experimental en laboratorio de cada uno de los bloques constitutivos de este estabilizador

En este capítulo se trata de mostrar por medio de fotos, algunas de las señales que se generan en el circuito de control, analizado en el capítulo anterior.

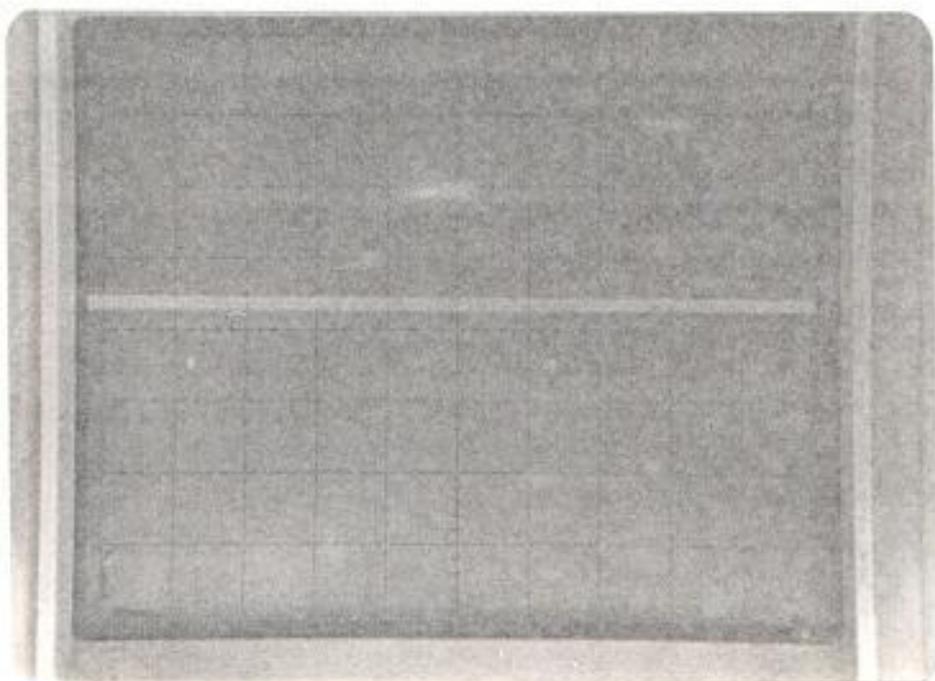


Fig. 24 Onda cuadrada generada en el multivibrador estable implementada en el integrado IC13.

Esta onda cuadrada generada en la salida del temporizador 555 (IC13) sirve para ser utilizada como señal de reloj que comandará al reloj del contador binario IC4. El nombre que se le ha impuesto a esta señal en este circuito es "clk1". Posee un angosto nivel bajo para así evitar pulsos negativos en el instante que se ha enviado señal de inhabilitar la señal del reloj del contador binario.

Escalas:

Magnitud = 5V/div.

Tiempo = 100 mseg/div.

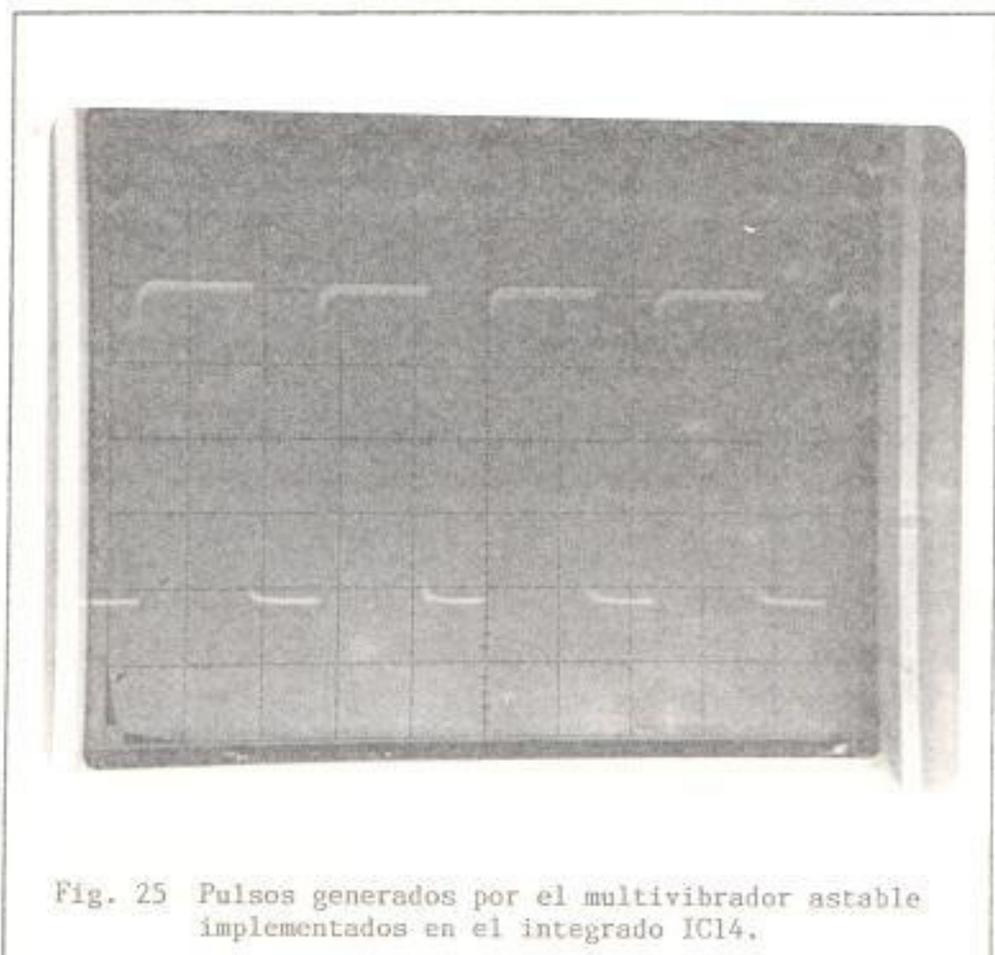


Fig. 25 Pulsos generados por el multivibrador astable implementados en el integrado IC14.

Son los pulsos que modulan las señales generadas en el decodificador IC5 y en los retardos generados en los integrados IC16 e IC17, para luego ser enviadas al amplificador de pulsos y por medio de transformadores de pulsos, comandar la conducción de los respectivos triacs. Estos pulsos son generados tanto en el integrado IC14 como también en el integrado IC15.

Escalas:

Magnitud = 1V/div.

Tiempo = 50 useg/div.

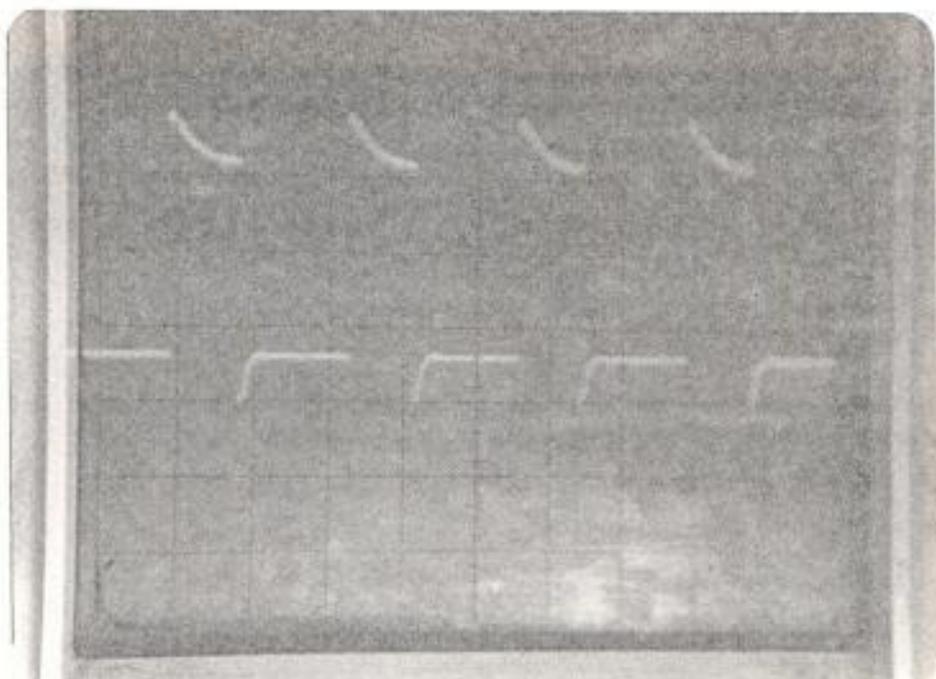


Fig. 26 Pulso en la salida de los amplificadores de pulsos

Estos son los pulsos amplificados en corriente que llegan al primario de cada transformador de pulsos. Poseen la misma frecuencia que los pulsos generados en los integrados IC14 e IC15.

Escalas:

Magnitud = 1V/div.

Tiempo = 50 uscg/div.

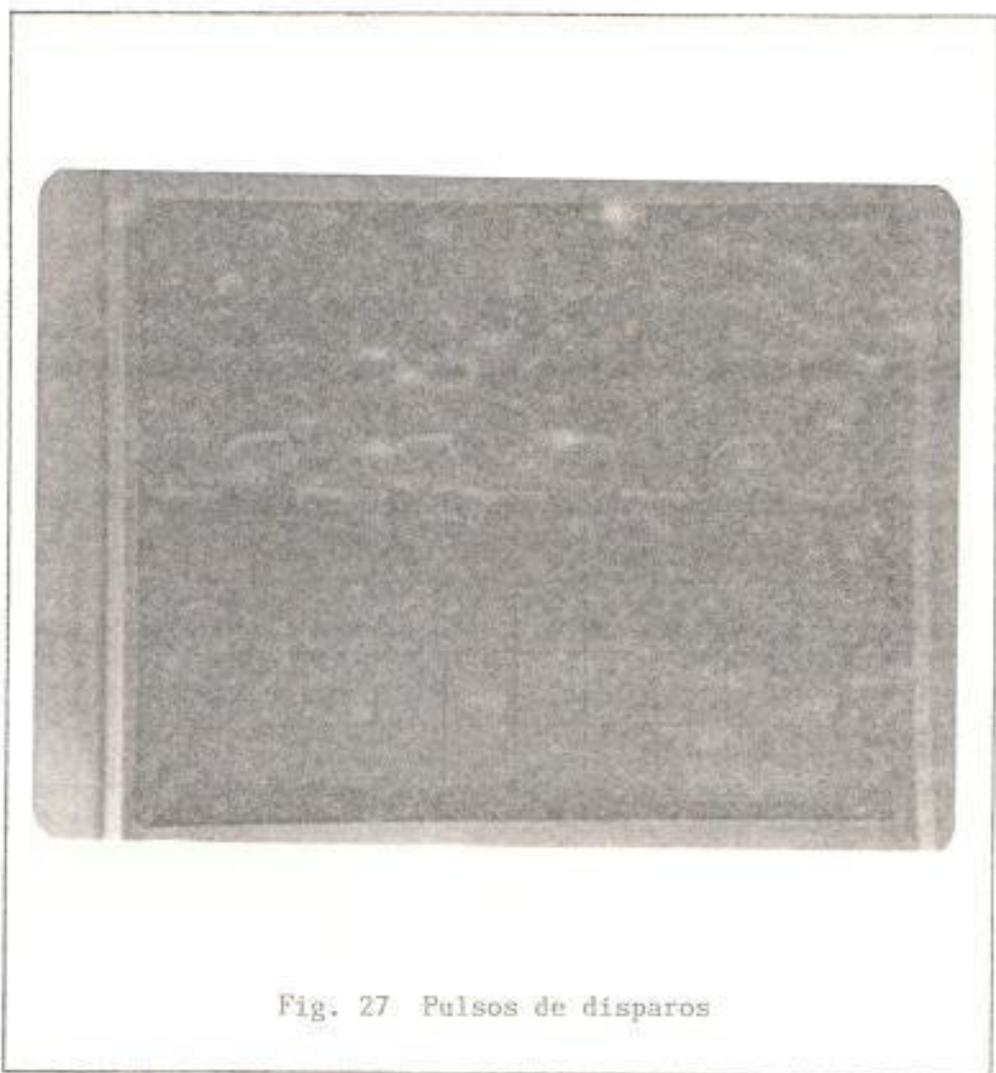


Fig. 27 Pulsos de disparos

Estos pulsos de disparos, son los que llegan netamente a las puertas de cada uno de los triac, para que puedan entrar en estado de conducción.

Escalas:

Magnitud = 1V/div.

Tiempo = 50 useg/div.

4.2 Comparación con análisis teórico realizado

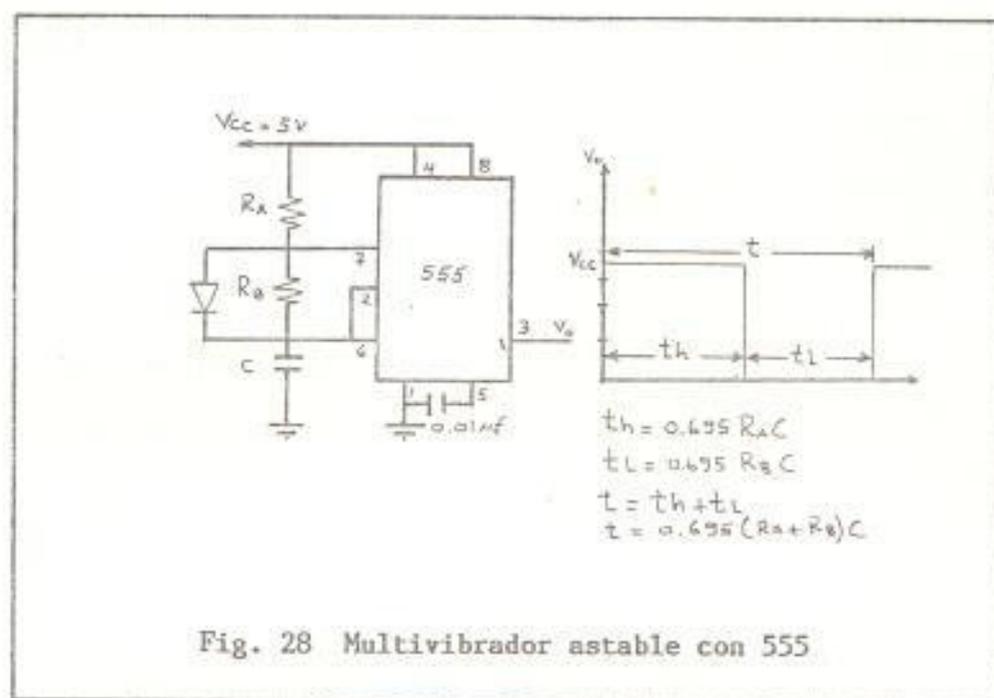
Como se expresó anteriormente, este estabilizador se diseñó para que funcione entregando un voltaje a la carga de $(120V \pm 4V)$ pero, los valores de resistencias tienen en su mayoría una tolerancia de $\pm 10\%$ de su valor, se puede en la realidad entregar un voltaje a la carga de $(118 \pm 5.5V)$ que en la práctica es muy aceptable.

En el diseño de la protección de sobre y bajo voltaje se calculó una protección de sobre los 140 Vrms y bajos los 100 V pero, debido a que la fuente de 5V en realidad entrega un voltaje de +4.88 V y, adjuntándose a esto la alta tolerancia de las resistencias (en unos casos de $\pm 10\%$ y en otro de $\pm 20\%$), la protección quedó establecida por sobre los 145Vrms y por debajo los 102 Vrms.

Finalmente, el pulso del generador de pulso (ckl) y los pulsos que comandan los disparos de los triacs generados por los integrados IC14 e IC15, se pueden observar en las fotografías respectivas. El período teórico de las ondas generadas viene dado por:

$$T = 0.695 (R_a + R_b)C \quad (4.1)$$

Ecuación del período de los multivibradores estables implementados con temporizadores 555 como lo muestra la figura 28.



La tabla 3, muestra la comparación de los períodos de las señales antes mencionadas.

TABLA III

Señal	Período teórico	Período Experimental
clk1 (salida del IC13)	472.6 mseg	460 mseg.
Generador de pulsos (salida de IC14, IC15)	90.35 useg.	120 useg.

Tabla comparativa de los períodos de los pulsos generados en los multivibradores del circuito de control

4.3 Presentación de resultados

Ahora se presentará los resultados que se obtuvieron en las pruebas realizadas para la comprobación del buen funcionamiento del regulador o estabilizador de tensión construido. Las pruebas se ejecutaron en la siguiente secuencia:

- Carga de 100W (foco)
- Carga de 1HP (motor AC)
- Carga: Motor AC (1HP) en conexión paralelo con 60uF (banco de capacitancia).

Las características del motor que se utilizó en la prueba son:

Voltaje AC	105-210 (V)
Corriente	12-6 Amp
Frecuencia	50-60 Hz
Velocidad	1750 RPM

En cada prueba, se obtuvo la gráfica de la curva: Voltaje de la carga vs voltaje de la línea (entrada).

Para obtener las gráficas antes mencionadas, realmente se tomó un voltaje directo (DC) proporcional al voltaje de la carga y, un voltaje directo (DC) proporcional al voltaje de la línea no regulada. El primer voltaje directo se lo obtuvo en la base del transis

tor Q1, localizado en el circuito sensor de voltaje. El segundo voltaje directo se lo obtuvo de una red divisora de voltaje que se conectaba en paralelo al capacitor C3 localizado en la fuente de +15 V. La red divisora de voltaje fue elegida de tal manera que se pueda apreciar lo mejor posible en la pantalla del osciloscopio. Experimentalmente se determinó que sería formada por una resistencia de 10 K y otra de 2 K . El voltaje directo que sería tomado en consideración como proporcional al voltaje de la línea, resultó ser el voltaje en los terminales de la resistencia de 2 K de dicha red divisora de voltaje. El voltaje de la carga ingresaría por la entrada vertical del osciloscopio, mientras que la otra señal, por la línea externa y los respectivos ajustes del caso en el osciloscopio.

A continuación se presentará en la misma forma secuencial de las pruebas, las fotografías de las señales obtenidas en cada una de las pruebas. Antes de esto, se presentará una fotografía del estabilizador construido, en funcionamiento.

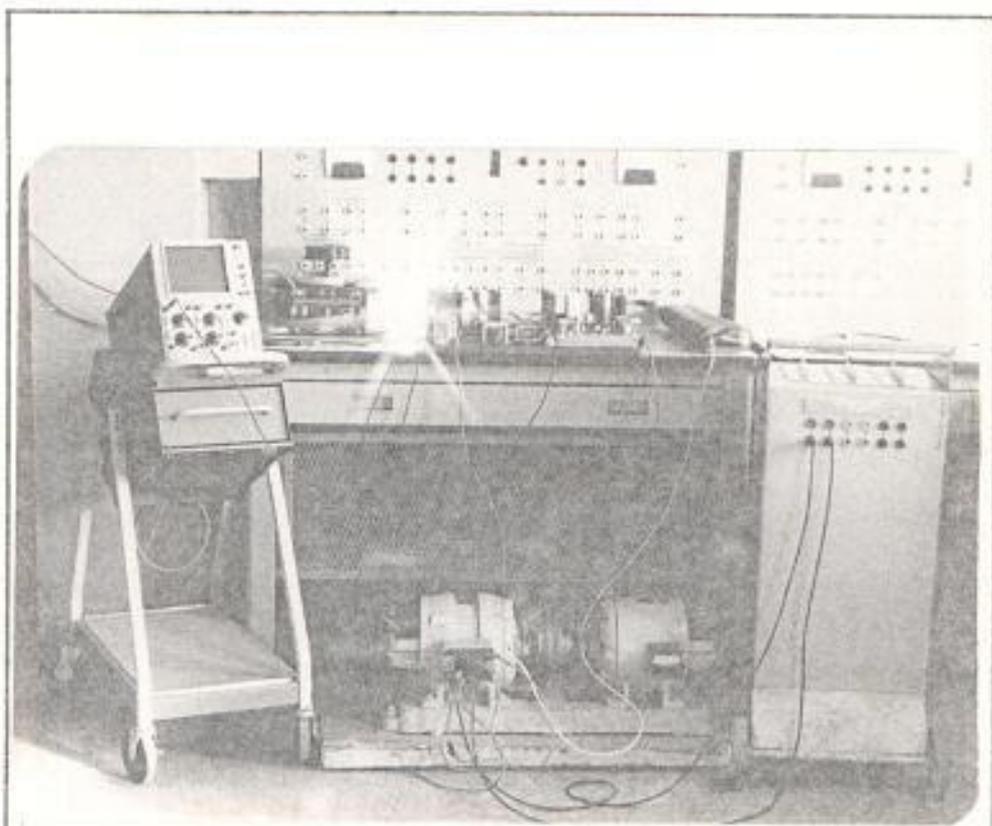


Fig. 29 Estabilizador de tensión construido en estado de prueba.

En la figura 29 se puede apreciar fácilmente el motor AC de 1HP, el osciloscopio con memoria tektronix, el banco de capacitancia, y finalmente el estabilizador construido. Se observa el encendido del foco como señal de funcionamiento del estabilizador.



Fig. 30 Prueba con carga de 100W (foco)

Gráfico del voltaje de carga vs voltaje de línea no regulado. Se aprecia que el margen de variación del voltaje en la escala vertical es de 1.2 voltios, que equivalen a una variación de ± 5.5 voltios (rms) en los terminales de la carga.

Escalas:

Voltaje de carga 2V/div.
 (escala vertical)

Voltaje de entrada 0.5 V/div.
 (escala horizontal)

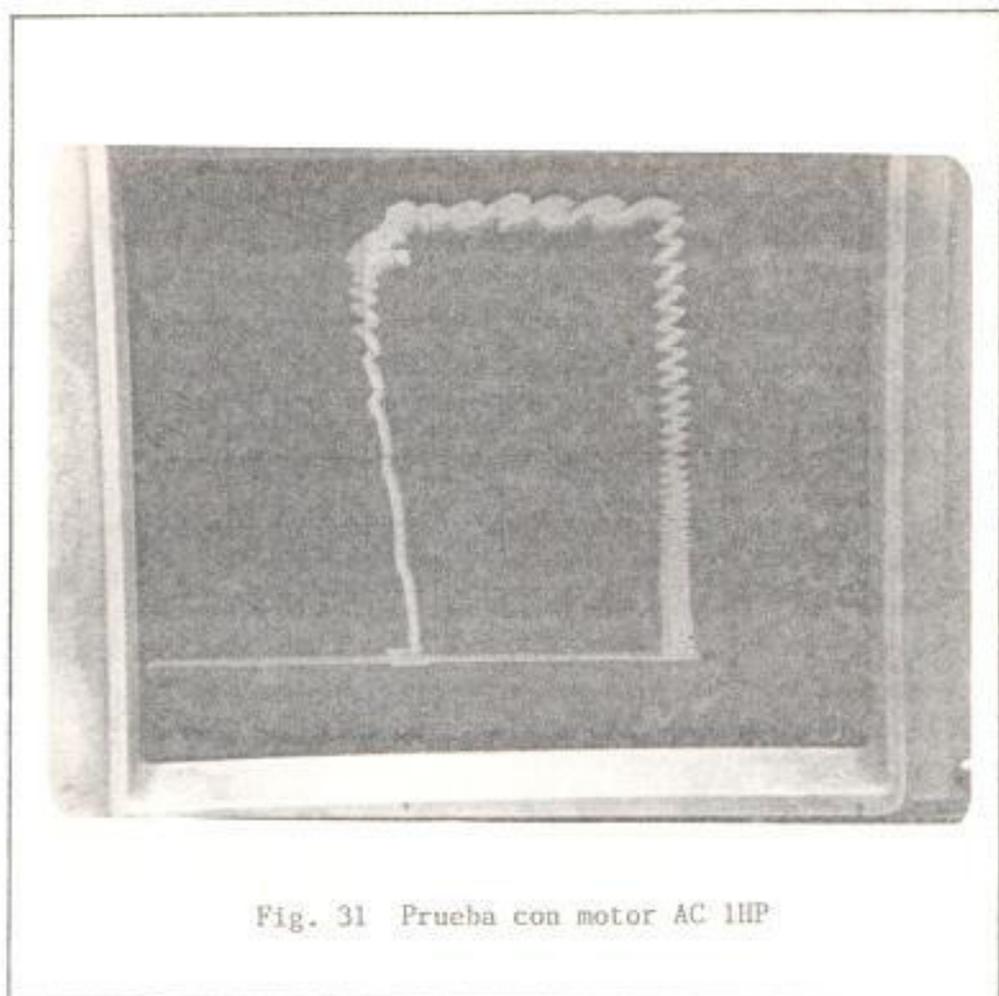


Fig. 31 Prueba con motor AC 1HP

Se aprecia que el margen de variación del voltaje de la carga es el mismo que en la prueba anterior.

Escala:

Voltaje de carga 2 V/div.
(escala vertical)

Voltaje de entrada 0.5 V/div.
(escala horizontal)

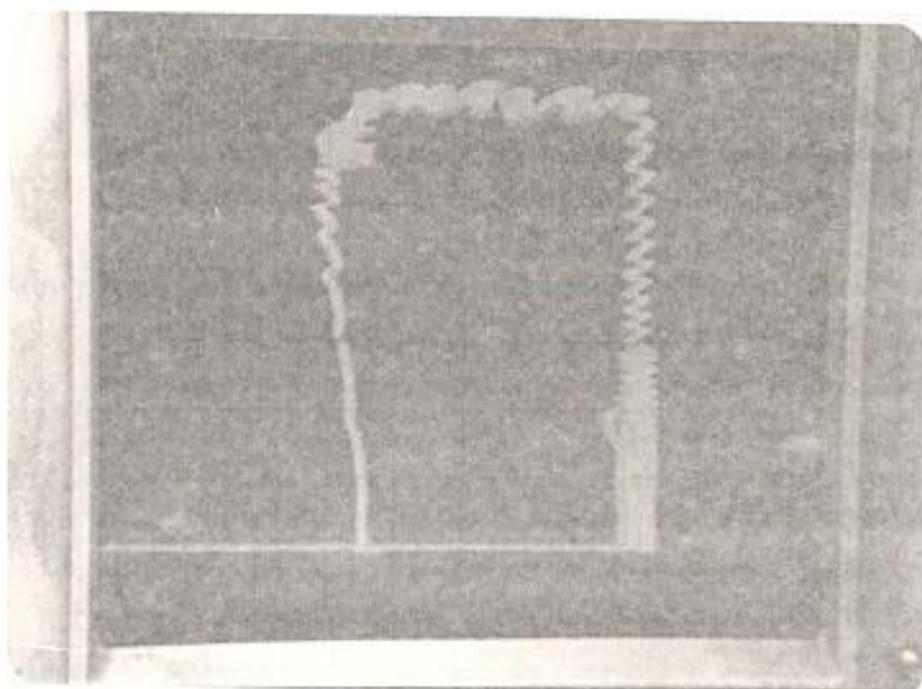


Fig. 32 Prueba con motor AC en conexión paralelo con 60 μF .

El margen de variación del voltaje de la carga sigue invariable.

Escala:

Voltaje de carga 2V/div.
(escala vertical)

Voltaje de entrada 0,5 V/div.
(escala horizontal)

CAPITULO V

COSTOS

5.1 Lista y costo de materiales requeridos en este estabilizador

Ahora se realizará un análisis del costo a que conllevó la construcción de este estabilizador de tensión. Esta lista se la dividirá en dos partes: La de fuerza y la de control.

a) Lista de materiales del circuito de fuerza:

No.	Material	Precio Unitario	Precio Total
1	Transformador de tensión 120V/24V 360 VA. Derivaciones en secundario.	S/.10.000,00	S/.10.000,00
4	Inductores 0.59mH	450,00	1.800,00
6	Triacs NTE 5690 40 A, 600 V	1.300,00	7.800,00
6	Capacitores 0.1 uF 600V	80,00	480,00
6	Resistencias 21 Ω ,5W	50,00	300,00
1	Caja portafusible	500,00	500,00
6	Fusibles 25A encapsulado	20,00	120,00

No.	Material	Precio Unitario	Precio Total
1	Fusible 5A encapsulado	S/. 20.00	S/. 20.00
30	Terminales de uña	10.00	300.00
1	Conector 12 terminales	500.00	500.00
	Cables # 12, 10 m.	100.00	1.000.00
	Aluminio(disipadores)		180.00
1	Conector 5 terminales	100.00	100.00
TOTAL			S/.23.500.00

b) Lista de materiales circuito de control:

No.	Material	Precio Unitario	Precio Total
1	Transformador 120V/24-12V, 1.5A	S/. 1.200.00	S/. 1.200.00
1	Transformador 120/24, 1.5A C.T	800.00	800.00
6	Transformadores de pulsos	200.00	1.200.00
1	Placa wire wrap	600.00	600.00
50	Puntos de conexión	10.00	500.00
2	Conectores 10 pines	80.00	160.00
1	Rollo alambre	1.000.00	1.000.00
2	Capacitores 100uF 35V	100.00	200.00

No.	Material	Precio Unitario	Precio Total
2	Capacitores 470uF 35V	S/. 80.00	S/. 160.00
1	Capacitor 100uF 35V	80.00	80.00
3	Capacitores 100uF 16V	70.00	210.00
6	Capacitores 0.01UF cerámicos	30.00	180.00
4	Capacitores 0.1uF cerámicos	30.00	120.00
21	Diodos 1N4007	30.00	630.00
8	Diodos rápidos 1N914	50.00	400.00
1	Diodo zéner 15V 5W.	150.00	150.00
2	Diodos zéner 5.1V 1/2W	70.00	140.00
1	Diodo zéner 2.4V 1/2 W	70.00	70.00
8	Transistores NPN 2N2222A	100.00	800.00
2	Potenciómetros 100	80.00	160.00
1	Potenciómetro 2M	100.00	100.00
1	Resistencia 22 Ω 2W		30.00
1	Resistencia 75 Ω 5W		70.00
1	Resistencia 470 Ω 5W		70.00
2	Resistencias 2,7 K 1/2W		
2	Resistencias 2 K 1/2W		
2	Resistencias 4.7 K 1/2W		
2	Resistencias 3.3 K 1/2W		

No.	Material	Precio Unitario	Precio Total
2	Resistencias 0.1 K 1/2W		
1	Resistencia 91 K 1/2W		
1	Resistencia 470 K 1/2W		
5	Resistencias 1 K 1/2W		
1	Resistencia 10 K 1/2W		
1	Resistencia 12 K 1/2W		
1	Resistencia 0.82 K 1/2W		
1	Resistencia 0.27 K 1/2W		
2	Resistencias 27 K 1/2W		
4	Resistencias 0.68 K 1/2W		
1	Resistencia 0.33 K 1/2W		
2	Resistencias 0.62 K 1/2W		
2	Resistencias 100 K 1/2W		
2	Resistencias 18 Ω 1/2W		
6	Resistencias 220 Ω 1/2W		

(todas las resistencias de 1/2W tienen un costo de S/.12.00 cada una dando un total de S/.480.00).

1	Capacitor 10 μ F 16V	S/.	30.00
2	Puertas lógicas	S/.	200.00
1	Regulador de voltaje 7805		350.00
1	Contador binario 74LS191		300.00
1	Decodificador 3-8 74LS138		270.00
2	Comparadores de voltaje LM311	200.00	400.00

No.	Material	Precio Unitario	Precio Total
6	Temporizadores 555	S/. 200.00	S/. 1.200.00
1	Amplificador Operacional LM324		240.00
1	Puerta lógica 74LS02 (NOR)		200.00
1	Puerta lógica 74LS32 (OR)		200.00
1	Puerta lógica 74LS08 (AND)		200.00
10	Socket 8 pines para c. integrados	80.00	800.00
TOTAL			S/.14.100.00
TOTAL CONSTRUCCION			37.600.00
TRANSPORTE (10%)			3.760.00
COSTO TOTAL			S/.41.360.00

5.2 Comparación económica con otros tipos de estabilizadores

La figura 33, muestra un cuadro comparativo en el aspecto económico de tres estabilizadores con el estabilizador construido.

TIPO	CARACTERISTICAS	PRECIO MERCADO
<p>Regulador Automático de voltaje STAVOL 2000</p>	<p>Voltaje entrada: 50V-130V/160V-240V Voltaje salida: 110V/220V \pm 3% Fase: Una Tiempo respuesta: dentro de 0.5 seg. contra 10% de desviación Frecuencia: 50/60 Hz. Sistema de Control: Servo-Motor DC. Aplicaciones: Computadoras, equipos electrónicos, equipos eléctricos, electromecánicos.</p>	<p>S/.300.000.00</p>
<p>STABYLEX 2000</p>	<p>Voltaje de entrada: 115 VAC Regulación de línea: \pm 4% para entrada de 90-125 VAC</p>	<p>S/.250.000.00</p>

Fig. 33 Cuadro Comparativo en el aspecto económico de estabilizadores de tensión

TIPO	CARACTERISTICAS	PRECIO MERCADO
<p>REGULAMATIC 2000</p> <p>ESTABILIZADOR CONSTRUIDO EN ESTA TESIS</p>	<p>Regulación de carga: 2%</p> <p>Carga mínima: 0</p> <p>Eficiencia: 98%</p> <p>Total distorsión: 0.1%</p> <p>Frecuencia: 47-63 Hz</p> <p>Potencia de entrada: 2000W</p> <p>Potencia de salida: 1800W</p> <p>Uso doméstico (poco confiable)</p> <p>Voltaje operación: 100-140VAC</p> <p>Voltaje salida: 118 ± 5.5VAC (con banda del voltaje regulable)</p> <p>Frecuencia: 60 Hz</p> <p>Fase: Una</p> <p>Tiempo respuesta: 15 V/seg.</p> <p>Eficiencia: 98.4%</p> <p>Uso: doméstico e industrial</p> <p>Potencia: 1800 VA</p>	<p>S/.46.850.00</p> <p>S/.41.360.00 (precio de construcción).</p>

Continuación de la figura 33

CAPITULO VI

VENTAJAS Y DESVENTAJAS EN FUNCION DE LA UTILIZACION DE ESTE ESTABILIZADOR

6.1 Comportamiento transiente

Para analizar la respuesta en estado transitorio y también en estado estable se utilizará el circuito que muestra la figura 34, asumiendo que se envía pulsos de disparos para lograr que el triac entre en conducción en el instante $t=0$ seg. El triac funcionará como un simple interruptor

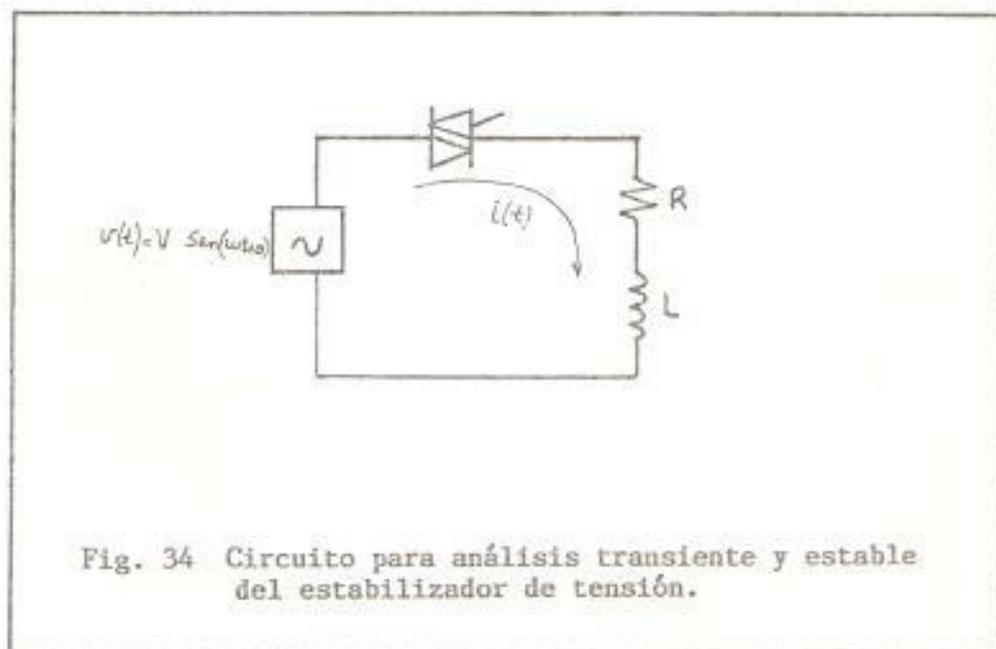


Fig. 34 Circuito para análisis transiente y estable del estabilizador de tensión.

El voltaje de excitación externa será:

$$v(t) = V \text{ sen } (\omega t + \theta) \quad (6.1)$$

En donde: θ es el ángulo de la senoide en el instante que el triac entra en conducción.

ω es la frecuencia angular de valor $2\pi f$, siendo

f la frecuencia de la línea (60 Hz)

Por la ley de voltaje de Kirchhoff se tiene que:

$$L(di/dt) + Ri = V \text{ sen } (\omega t + \theta) \quad (6.2)$$

$$di/dt + (R/L)i = (V/L) \text{ sen}(\omega t + \theta) \quad (6.3)$$

Usando la transformación $di/dt = s$:

$$s + (R/L) = 0 \quad (6.4)$$

Que es la ecuación característica del circuito, de tal manera que la función complementaria es:

$$i_c = K e^{(-Rt/L)} \quad (6.5)$$

La forma de prueba de la integral particular, debido a que la fuente de excitación externa es de carácter senoidal será la siguiente:

$$i_p = A \cos(\omega t + \theta) + B \text{ sen } (\omega t + \theta) \quad (6.6)$$

Por lo tanto la corriente $i(t)$ será:

$$i(t) = i_c + i_p \quad (6.7)$$

Sustituyendo la ecuación 6.6 en la ecuación 6.3 se obtiene:

$$A = (-VL\omega) / (R^2 + L^2\omega^2)^{1/2} \quad (6.8)$$

$$B = (VR)/(R^2 + L^2\omega^2)^{1/2} \quad (6.9)$$

Luego, reemplazando estos valores en la ecuación 6.6 y, utilizando cambio de variables se obtiene que:

$$i_p = (V/(R^2 + L^2\omega^2)^{1/2}) \operatorname{sen}(\omega t + \theta - \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}) \quad (6.10)$$

Entonces:

$$i(t) = Ke^{(-Rt/L)} + \frac{V}{(R^2 + \omega^2 L^2)^{1/2}} \operatorname{sen}(\omega t + \theta - \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}) \quad (6.11)$$

Como en el instante en que conduce el triac ($t = 0$ seg), la corriente tiene valor cero, entonces:

$$K = \frac{V}{(R^2 + \omega^2 L^2)^{1/2}} \operatorname{sen}(\theta - \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}) \quad (6.12)$$

Quedando finalmente la corriente:

$$i(t) = \frac{V}{(R^2 + \omega^2 L^2)^{1/2}} (\operatorname{sen}(\omega t + \theta - \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}) - \operatorname{sen}(\theta - \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}) e^{(-Rt/L)}) \quad (6.13)$$

En la práctica solo ocurre transientes en el instante que se cambia las derivaciones del transformador principal y es por un pequeño instante. Si ocurre transientes en la línea o voltaje de entrada, que salgan del rango de los 100 V a los 140 V, se desconectaría o dejaría de trabajar el estabilizador para luego entrar en funcionamiento después de un cierto retardo de tiempo, siempre y cuando el vol-

taje de la línea esté dentro del rango de voltaje antes mencionado.

6.2 Comportamiento en estado estable

En la práctica se obtiene una senoide de voltaje sin deformación como se muestra en la figura 35, en la que se aprecia el voltaje de salida y el voltaje de entrada simultáneamente. No existe distorsión alguna.

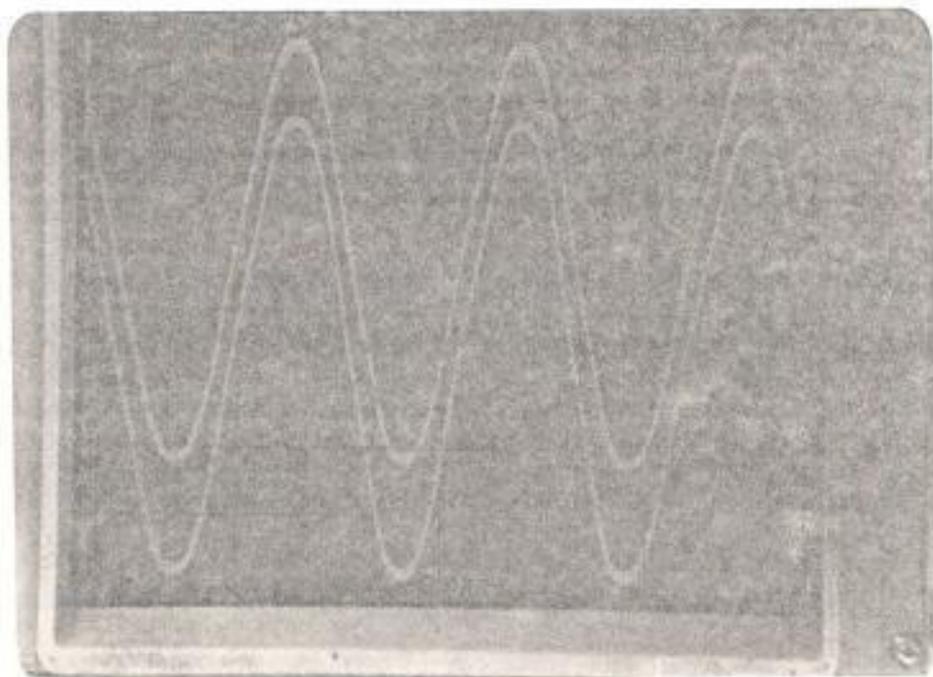


Fig. 35 Voltaje de salida (parte superior) y voltaje de entrada (parte inferior) simultáneamente, en la prueba con carga de 100W (foco).

6.3 Análisis armónico producido en conmutación

En la práctica se debería obviar los armónicos producidos, ya que estos solo se producen en el pequeñísimo instante de cambio de derivaciones. Es importante recordar que en el instante de cambio de derivaciones la carga no deja de ser alimentada. En estado estable no existen armónicos.

6.4 Determinación del mínimo factor de potencia requerido para que trabaje adecuadamente el estabilizador

No existe ninguna restricción en lo que concierne a la carga que manejará este estabilizador, pero en lo posible se debería evitar manejar cargas capacitivas puras que producirían transientes de valores un poco mayores, aunque, el estabilizador realmente vería una carga inductiva-capacitiva ya que siempre está conectado en serie a cada derivación del secundario del transformador principal un inductor de 0.59 mH como fue explicado en el capítulo tres.

6.5 Rendimiento

En la práctica se determinó que este estabilizador posee un rendimiento de 98.4%, debido a las pérdidas en el núcleo del transformador principal y en el cobre. Estas pérdidas en conjunto con la potencia de las fuentes de voltajes de 5V y 15V (fuentes que se ali-

mentan en paralelo al primario del transformador principal) poseen un valor de 30W para un voltaje de entrada de 145 V(rms). Por lo tanto:

$$\begin{aligned} \text{Rendimiento} &= \frac{\text{potencia de salida}}{\text{potencia de entrada}} \times 100 (\%) & (6.14) \\ &= \frac{1800 \text{ W}}{1830 \text{ W}} \times 100 = 98.4 \% \end{aligned}$$

Es de anotar que el circuito de control consume una potencia de 6.6 w, valor que se determinó al conectar un vatímetro en el primario del transformador T2.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Después de finalizar satisfactoriamente este trabajo de tesis se concluye que:

1. La construcción de un estabilizador similar al realizado resulta de un costo elevado si se diseña para manejar bajas potencias (menor a 1000W), no así si se considera que debería manejar altas potencias.
2. Las pérdidas producidas en el estabilizador en funcionamiento a plena carga son de 30W, pérdidas que contemplan las producidas en el hierro, en el cobre y las potencias consumidas por las fuentes de 5 y 15V.
3. Por lo expuesto en el punto anterior el rendimiento del estabilizador es de 98.4%, siendo esta una de las ventajas de este estabilizador.
4. No existen distorsión en estado estable, solo existe transientes en los pequeñísimos instantes de conmutación de las derivaciones del secundario del transformador de tensión.
5. La banda del voltaje de la carga tiene un valor tope de $\pm 5.5V$ y puede ser regulable hasta 3.5V.

6. Se recomienda estudiar la posibilidad de sustituir los inductores de 0.59 mH en serie con los triacs en las derivaciones y, utilizar en su lugar un control de cruce por cero de la corriente de carga para controlar correctamente el cambio de las derivaciones.

BIBLIOGRAFIA

1. FLETCHER, W.I., "A Engineering approach to digital design", Prentice Hall, New Jersey, 1980.
2. LENK, JOHN D., "Manual for integrated circuit users", New York, 1973.
3. PEARMAN, RICHARD, "Solid State Industrial Electronics", Prentice Hall, Reston Virginia, 1984.
4. MALONEY TIMOTHY J., "Industrial Solid State Electronics, devices and systems", II Edición, Prentice Hall, Ney Jersey, 1986.
5. DRISCOLL, F.-COUGHLIN, R. "Operational amplifiers and linear integrated circuits", Prentice Hall, New Jersey 1977.
6. NATIONAL, "Voltage regulator handbook", 1982.
7. SOLA, "Computer solatron line voltage regulator technical and field analysis manual", Sola, 1973.
8. MCGRAW-EDISON, "Voltage regulating apparatus (electrical apparatus 225)" McGraw Edison.
9. ESPOL, "Construcciones electrónicas", folleto de ESPOL, 1982.
10. REA "Bulletin 45-1", febrero 20, 1973.
11. ESPOL, Seminario sobre "Regulación de sistemas de distribución", ESPOL 1982.

12. HEVI-DUTY ELECTRIC "Acovolt static line voltage regulator", Hevi-Duty Electric Company, 1983.
13. REVISTA MUNDO ELECTRONICO # 88 "Control de Cargas Inductivas con triacs. Control de Fase", España, 1978.

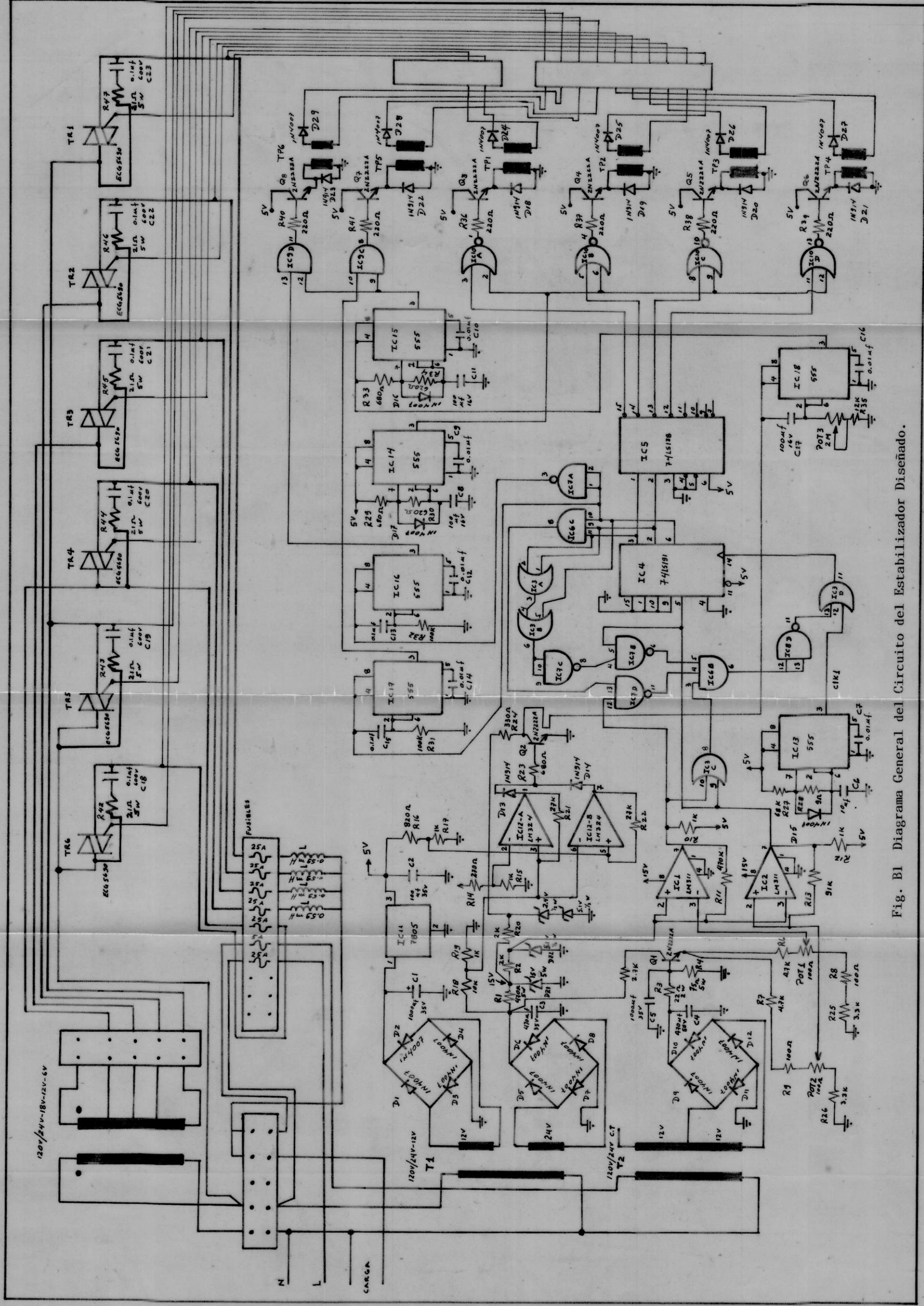


Fig. B1 Diagrama General del Circuito del Estabilizador Diseñado.