



\*D-3938\*

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA-ELECTRICA

"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN REGULADOR ESTÁTICO  
DE VOLTAJE PARA EL SIMULADOR DE SISTEMAS DE  
POTENCIA DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA  
ESPOL".

TESIS DE GRADO PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO  
DE INGENIERO EN ELECTRICIDAD  
ESPECIALIDAD POTENCIA

POR

RAFAEL EMILIO QUINTERO RODRIGUEZ

D-3938

AGOSTO 1980

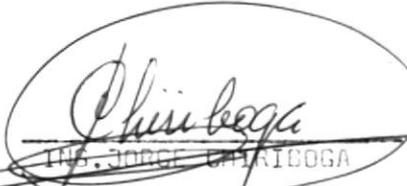


GUAYAS, ECUADOR

T  
621.3191  
87

"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN REGULADOR ESTATICO  
DE VOLTAJE PARA EL SIMULADOR DE SISTEMAS DE  
POTENCIA DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA,  
ESPOL".

DIRECTOR DE TESIS

  
DR. JORGE CARIBOGA

AUTOR

  
RAFAEL E. QUINTERO R.

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)

## AGRADECIMIENTO

Dejo expresa constancia de mi agradecimiento al Ing. Jorge Chiriboga, Director de esta tesis, al Ing. Hugo Villavicencio, y en especial al Dr. Eric Kromton, por la valiosa ayuda prestada para la realización de este trabajo.

A la memoria de mi Madre

A mi esposa e hijas

A mi padre y hermanas

## INDICE GENERAL

INDICE GENERAL	i
INDICE DE ABREVIATURAS	ii
INTRODUCCION	1
I. GENERALIDADES	3
II. DISEÑO DEL REGULADOR PROTOTIPO	6
III. OBTENCION DE LAS FUNCIONES TRANSFERENCIA	18
3.1. Función transferencia del modelo de máquina	18
3.2. Función transferencia del regulador	19
3.3. Función transferencia del sistema completo	19
IV. OBTENCION DE LOS PARAMETROS DE LA MAQUINA	21
V. SIMULACION DEL SISTEMA EN EL COMPUTADOR ANALOGICO	23
VI. ESTUDIO DE ESTABILIDAD DEL REGULADOR	28
VII. CONSTRUCCION DEL REGULADOR PROTOTIPO EN EL LABORATORIO	31
VIII. PRUEBAS DEL REGULADOR PROTOTIPO	34
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	36
ANEXO Nº 1 : TABLAS	39
ANEXO Nº 2 : FIGURAS	47
ANEXO Nº 3 : MANUAL DEL USUARIO	83
BIBLIOGRAFIA	85

## INDICE DE ABREVIATURAS

A : Amperios

Alfa :  $\alpha$  : Constante de escalamiento en tiempo

Amp : Amperaje

C : Señal de salida del regulador y de entrada al generador

$C_1$  : Condensador que determina la ganancia del error junto con  $r_1$

$C_2$  : Condensador que determina la constante de tiempo de la realimentación

$C_m$  : Valor máximo asumido para C

C(s) : Señal de salida en función de s

C(t) : C(s) en función de tiempo

E : Señal de entrada al bloque del error

e : Constante Neperiana

$E_m$  : Valor máximo adquirido para E

HP : Caballos de fuerza

H<sup>-</sup> : Hertz

$K_1$  : Ganancia del bloque del error

$K_2$  : Ganancia del bloque correspondiente a los tiristores amplificadores de potencia

$K_3$  : Ganancia de los transformadores reductores de voltaje y del puente rectificador de diodos

- $K_f$  : Ganancia del tono de la realimentación
- $K_g$  : Ganancia del bloque del generador
- $K\Omega$  : Kilo-ohmio
- nF : Nanofaradio
- $P_1$  : Potenciómetro para la referencia
- $P_2$  : Potenciómetro para seleccionar voltaje de trabajo
- pF : Picofaradio
- $R_1$  : Resistencia que determina la ganancia del bloque de realimentación junto con  $R_2$
- $R_2$  : Resistencia que determina la ganancia del bloque de realimentación junto con  $R_1$
- $r_1$  : Resistencia que determina la ganancia del bloque del error junto con  $C_1$
- RPM : Revoluciones por minuto
- $R(s)$  : Señal de entrada en función de  $s$
- $t$  : tiempo
- $T_c$  : Tiempo de computadora
- $T_f$  : Constante de tiempo de la realimentación
- $T_g$  : Constante de tiempo del generador
- $T_r$  : Tiempo real
- $T(s)$  : Función transferencia en función de  $s$
- $\mu F$  : Microfaradio
- V : voltios
- $V_c$  : Voltaje de computadora

$V_{dc}$  : Voltaje de corriente directa

$V_g$  : Señal de salida del generador

$V_{gm}$  : Valor máximo asumido para  $V_g$

Volt : Voltaje

$V_r$  : Voltaje de referencia

w : vatios

$X_1$  : Señal de salida del error y de entrada a' lazo de realimentación

$X_{1m}$  : Valor máximo asumido para  $X_1$

## INTRODUCCION

El presente trabajo comprende el diseño y construcción de un regulador de voltaje con elementos estáticos para alternadores, adaptable al generador número tres del panel Hamden del Laboratorio de sistemas de potencia.

Los generadores de dicho panel son regulados manualmente, tanto en su voltaje de salida como en su frecuencia. El objetivo de este trabajo es el de proporcionar un regulador automático de voltaje para los generadores en mención.

Se parte originalmente de la hipótesis de que la señal de campo del generador puede ser regulada automáticamente por medio de elementos estáticos.

La metodología que se sigue para la construcción del presente trabajo es: primero diseñar teóricamente un prototipo del regulador de voltaje con la ayuda experimental de equipos de prueba con que cuenta el actual laboratorio de sistemas de potencia; y a partir de este prototipo construir un regulador para que sirva como equipo de ayuda al estudiante de Sistemas de Potencia.

El objetivo de este trabajo no es en ningún caso obtener un modelo perfecto de regulador; sino más bien un prototipo de tal forma que pueda

ser motivo de otro trabajo obtener un modelo matemático exacto del sistema en conjunto, tanto de la máquina como del regulador, para que mediante un análisis prolijo y con la ayuda de un computador poder mejorar este prototipo de regulador y de esta forma optimizarlo. Es decir-- dejar sembrado los primeros pasos de la idea para que un estudiante a partir de aquí pueda analizarlo matemáticamente y obtener un regulador de voltaje óptimo tanto en su nivel de regulación como en el tiempo de repuesta y estabilidad.

Es de destacar como nota importante que en el análisis matemático que se realiza en la página doce del capítulo dos, no se toma en cuenta la función transferencia del generador, ya que la intención de este análisis es únicamente demostrar las ventajas de la doble realimentación - tanto en la rapidez de la señal de repuesta como en su estabilidad, - más no el comportamiento real del sistema, el cual es analizado en el capítulo seis incluyendo la función transferencia de la máquina; así - como por la dificultad que presenta la obtención de dicha función transferencia según las razones que se exponen en el capítulo tres.

## I.- GENERALIDADES

El panel Hampden del laboratorio de sistemas de potencia del departamento de ingeniería eléctrica de la Escuela Superior Politécnica del Litoral cuenta con tres alternadores que simulan un centro de generación de un sistema de potencia.

Cada uno de estos generadores de corriente alterna tiene las siguientes características de placa:

Volt.:	208 V	RPM:	1800
Amp.:	3 A	Letra de código:	K
HP:	1000 W	Temperatura de operación:	40° C
Fases:	3	Trabajo continuo	
Ciclos:	60 HZ		

El primo motor de los generadores es un motor Shunt de corriente directa cuyas características de placa son las siguientes:

Volt.:	110 V	Trabajo continuo	
Amp.:	14 A	RPM:	1800
HP:	2	Temperatura de operación:	40° C

El campo del generador es alimentado por una señal proveniente de un autotransformador conectado a una fuente alterna, pasando luego por un puente de diodos y luego por un filtro para recibir una señal continua en sus bornes según se puede observar en la figura número uno.\*

El motor shunt de corriente continua que constituye el primo motor del

alternador tiene su control a través de un reostato cuya perilla de operación es maniobrable desde afuera del panel Hamden y así se puede controlar la potencia suministrada al alternador así como su velocidad. Una vez en operación el alternador se lo calibra manualmente para que funcione a su voltaje y velocidad de régimen con la perilla del campo y la perilla que regula la velocidad del primo motor y por consiguiente la frecuencia del alternador.

A medida que se aumenta la carga del alternador el voltaje y la frecuencia disminuye por lo que hay que regularlos manualmente aumentando el voltaje de campo y corrigiendo la velocidad del primo motor para mantener las características de régimen.

Para una idea más clara de lo que acontece con el voltaje y la frecuencia del alternador una vez que se incrementa la carga se han elaborado las figuras números tres y cuatro en base a las tablas números uno y dos que se obtuvieron con datos experimentales en el laboratorio.

La figura número dos muestra la variación del voltaje al aumentar gradualmente la carga manteniendo la frecuencia constante: sin regulación de voltaje.

La figura número tres muestra la variación de la frecuencia al aumentar gradualmente la carga manteniendo el voltaje constante: sin regulación de frecuencia.

De lo expuesto anteriormente se concluye que al aumentar o disminuir la carga de los generadores hay que regular manualmente tanto el voltaje como la frecuencia para mantener su características de régimen.

El problema que se plantea es diseñar y construir un aparato compuesto fundamentalmente de elementos estáticos que regulen automáticamente el voltaje de salida de un generador a medida que se incrementa o disminuya la carga, y otro aparato de las mismas características que regule automáticamente la frecuencia cuando se aumente o disminuya la carga.

El motivo de esta tesis es diseñar y construir el primero de los aparatos enumerados anteriormente es decir un regulador de voltaje con elementos estáticos para alternadores.

Los objetivos propuestos en el presente trabajo en lo que respecta a las características del regulador son las siguientes:

- 1.- El regulador debe ser capaz de funcionar en un rango de 450 a 650 voltios medidos en los instrumentos colocados después del transformador de 150 a 600 voltios instalado en las barras del generador.
- 2.- El voltaje regulado debe mantenerse dentro del rango de más o menos uno por ciento mientras la frecuencia varía de 57 a 63 Hertz y la corriente de carga varía en el rango de 0 a 1.5 amperios, es decir de cero a plena carga.

## II.- DISEÑO DEL REGULADOR

Una vez conocidos el comportamiento y el manejo del generador al cual se le va a adaptar el regulador, se procede primeramente a elaborar un diagrama de bloques que se ajuste a los requerimientos que necesitamos para nuestro objetivo.

Se pensó inmediatamente en un control automático realimentado, ya que de lo explicado anteriormente observamos que al controlar la señal de campo (corriente) estamos controlando la señal de salida del generador (voltaje). por lo que en primera instancia se debe obtener una señal de realimentación proveniente del campo.

Además de la señal de realimentación proveniente del campo, tenemos que proveernos de una señal comparadora que es la que va a establecer tanto el error como a fijar el voltaje al que deseamos trabajar. esta señal se la obtiene de la salida del generador.

Una vez que se obtiene esta señal se necesita el elemento electrónico de control apropiado que modifique la señal de campo inicial, este elemento se pensó desde un comienzo en un tiristor scr.

Ya con todos los elementos claros según se puede apreciar en el diagrama de bloques de la figura número cuatro, es de notar que la parte más complicada es el diseño del control del tiristor amplificador de potencia.

Se procede luego a diseñar parte por parte, copiando individualmente

cada bloque según la numeración de la figura número cuatro.

En primer lugar se procede a tomar lo que se ha designado como bloque número uno es decir el transformador reductor de voltaje.

Este elemento dentro del diagrama de bloques es obvio, ya que es mucho más económico cómodo y seguro trabajar con bajo voltaje, y además se necesita un transformador de aislamiento, por lo que se aprovecha de una vez para reducir el voltaje.

La relación de transformación se la escoge de uno a diez, es decir para obtener en el lado secundario de baja tensión del transformador entre quince y veinte voltios alternos, si la entrada en el lado primario del transformador oscila entre 150 y 200 voltios.

Debido a que se podían presentar desbalanceamientos del voltaje como consecuencia de un desbalanceamiento de carga, se toma el voltaje de las tres fases para compararlas.

Partiendo de la premisa anterior se forma un delta abierto en el primario y un delta abierto en el secundario, por medio de dos transformadores cuya conexión se muestra en la figura número cinco.

Ya que el voltaje que se va a comparar es trifásico, el puente rectificador de diodos, o lo que se denomina como bloque número dos, debe ser trifásico.

Se forma entonces este puente de diodos y se calcula aproximadamente el voltaje rectificado promedio que se va a obtener.

El puente rectificador de diodos se lo diseña de acuerdo a la figura número seis.

El voltaje rectificado que se obtiene a partir de este puente de diodos

es aproximadamente el que se muestra en la figura número siete y se calcula su promedio o el voltaje dc a partir de la siguiente fórmula:

$$V_{dc} = \frac{1}{T} \int_{-\pi/3}^{2\pi/3} \sqrt{2} V \text{ Sen } \omega t \, d\omega t$$

donde T es el período que vamos a tomar y V es el voltaje alterno medido.

Para nuestro caso tomamos  $T = \pi/3$  y  $V = 15$  voltios. lo que da un resultado de

$$V_{dc} = 20.25 \text{ voltios}$$

Una vez que se obtiene la señal que vamos a comparar es necesario diseñar el bloque número tres que nos va a dar el voltaje de referencia al que se va a trabajar así como el rango de voltaje que se ha fijado como característica del regulador en el numeral uno.

Se plantea el esquema de la figura número ocho como base para llegar al comparador que se necesita.

Como se verá más adelante los integradores que se utilizarán en el circuito impreso necesitan para su funcionamiento una fuente de más menos 15 voltios dc: luego es muy conveniente utilizar uno de estos dos voltajes como referencia para  $V_r$ . Se escogió menos quince voltios dc.

Es de notar que las dos resistencias  $r_1$  que se han marcado en la figura son iguales. Se lo hace con el propósito de tener una sola ganancia por efecto de las dos resistencias ya que en caso contrario las ganancias serían diferentes. El valor de estas resistencias generalmente están en el rango de 100 K $\Omega$  a 1 M $\Omega$ , en este caso se escogió 100 K $\Omega$ .

Si se toma en cuenta que el máximo voltaje de entrada es de 30 voltios dc. y que se puede dejar un margen de seguridad de un 30% y tomar como referencia unos 40 voltios dc. y que se disine una potencia de unos 50 milivatios como máximo en el potenciómetro  $P_2$ , éste resulta en el margen de los 30 y 40  $K\Omega$ . Se escogió uno de 50  $K\Omega$  por encontrarse con mayor facilidad en el mercado.

Si tomamos el mismo criterio para el potenciómetro  $P_1$ , éste resulta en el margen de los 5  $K\Omega$ .

Luego los resultados obtenidos para los parámetros de la figura número ocho son:

$$P_1 = 5 K\Omega$$

$$r_1 = 100 K\Omega$$

$$P_2 = 50 K\Omega$$

El cuarto de los bloques es el que constituye el error del sistema. es te bloque es un integrador de la forma  $K_1/s$ ; de tal forma que al tener como entrada un escalón la salida será una función rampa, cuya pendien te dependerá de la constante  $K_1$  del sistema.

El valor de  $K_1$  que depende de los valores de resistencia  $r_1$  que fué cal culado en el párrafo anterior y de la capacidad del condensador  $C_1$  de la figura número nueve es calculado en un paso más adelante cuando se examine todo el sistema en conjunto.

El quinto bloque, es decir el amplificador de la señal de realimenta - ción se lo escogió de la siguiente forma:

$$\frac{K_f}{1 + T_f S}$$

Ya que la señal de respuesta de este bloque, a diferencia de la señal de la rampa tiende a estabilizarse en una asíntota como se puede observar en la figura número diez, cuando la señal de entrada es un escalón.

El bloque con sus elementos componentes está representado en la figura número once, en la que las resistencias se las ha escogido del mismo valor para obtener  $K_f = 1$ ; los valores de resistencias se los escoge igual a  $470 \text{ K}\Omega$ .

El valor del condensador  $C_2$  se lo determina en el análisis que a continuación se presenta.

Las señales que entran al bloque número seis, según el análisis hecho hasta el momento son una rampa, y una curva similar a la de la figura número diez. Las dos curvas se las puede observar en la figura número doce.

La idea se concreta en encontrar los valores de los condensadores  $C_1$  y  $C_2$  de las figuras número nueve y once respectivamente: de tal manera que la curva resultante en el comparador o bloque número seis no presente picos u oscilaciones como se muestra en la curva punteada de la figura número doce, ya que estas oscilaciones complican tanto el estudio como el funcionamiento del sistema.

Para lograr este propósito primeramente se consideró que  $C_1$  debe de ser lo suficientemente grande como para obtener una pendiente de la rampa pequeña, y por consiguiente un valor de  $C_2$  lo suficientemente pequeño como para que la pendiente de la curva de la figura número diez sea mayor que la pendiente de la rampa: pero sin que se produzca un sa

brésese de la asíntota de la curva de la figura número doce.

Se tantea con algunos valores de capacitores y se encuentra los valores de capacitores que reúnen en forma satisfactoria las condiciones previstas. Estos valores son:

$$C_1 = 2 \text{ uF}$$

$$C_2 = 100 \text{ nF}$$

*Alto de la curva de la figura número doce*

Con esto se obtiene practicamente completo el diseño de los bloques número cuatro y cinco por lo que se calculan las constantes respectivas que resultan:

$$K_f = \frac{R_1}{R_2} = 1 \quad ; \quad T_f = R_2 C_2 = 0.047$$

$$K_1 = \frac{1}{R_1 C_1} = 5$$

Se presenta a continuación un análisis del sistema completo: en primer lugar sin la realimentación de campo y luego con la realimentación: para observar el comportamiento del sistema y su mejora.

Para dicho efecto se asume que los bloques uno, dos, siete y ocho de la figura número cuatro son unas simples ganancias: ya que lo que interesa por el momento para este análisis es solo el comportamiento de la realimentación.

Se asumen los siguientes valores de ganancias:

Para los bloques uno y dos que se los denomina  $K_3 = 1$ .

Para los bloques siete y ocho que se los denomina  $K_2 = 3$ .

Estos valores de constantes se los escoge debido a que en un momento dado las relaciones de voltaje entre las salidas y entradas de dichos

bloques en el comportamiento real del sistema con el alternador incorporado puede oscilar entre esos valores.

Partiendo de esta premisa se procede primeramente a analizar el sistema sin la realimentación del campo, por lo que queda el diagrama de bloques de la figura número trece.

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K_1 K_2 / s}{1 + K_1 K_2 K_3 / s}$$

$$C(s) = \frac{K_1 K_2}{s + K_1 K_2 K_3} R(s)$$

Si hacemos que la entrada sea un escalón, tenemos que:

$$R(s) = \frac{1}{s}$$

$$C(s) = \frac{K_1 K_2}{s(s + K_1 K_2 K_3)}$$

$$C(t) = \frac{1}{K_3} (1 - e^{-K_1 K_2 K_3 t})$$

$$C_1(t) = 1 - e^{-15 t}$$

Cuya gráfica se muestra en la figura número catorce.

Luego se analiza el sistema considerando la realimentación del campo: por lo que el diagrama de bloques se muestra como en la figura número quince y cuyo desarrollo es el siguiente:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K_1 K_2 / s}{1 + \frac{K_2 K_f}{1 + s T_f} + \frac{K_1 K_2 K_3}{s}}$$

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K_1 K_2 (1 + s T_f)}{s^2 T_f + s (1 + K_2 K_f + T_f K_1 K_2 K_3) + K_1 K_2 K_3}$$

Si hacemos que la entrada sea un escalón se obtiene:

$$R(s) = \frac{1}{s}$$

$$C(s) = \frac{K_1 K_2 (s + 1/T_f)}{(s^2 + s(\frac{1 + K_2 K_f}{T_f} + K_1 K_2 K_3) + \frac{K_1 K_2 K_3}{T_f}) s}$$

Si hacemos las siguientes igualdades:

$$a = \frac{1}{T_f}$$

$$b = \frac{1 + K_2 K_f}{T_f} + K_1 K_2 K_3$$

$$c = \frac{K_1 K_2 K_3}{T_f}$$

$$K_1 K_2 = K$$

Se obtiene lo siguiente:

$$C(s) = \frac{K(s + a)}{s(s^2 + bs + c)}$$

Si encontramos las raíces del polinomio  $s^2 + bs + c$ , se obtiene que:

$$x_1 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4c}}{2} \quad ; \quad y$$

$$x_2 = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4c}}{2}$$

Observando los valores que se obtienen para b y c, se puede encontrar que el valor dentro del radical es positivo.

De esta forma observamos que:

$$C(s) = \frac{K(s + a)}{s(s - x_1)(s - x_2)}$$

Y descomponiendo en fracciones parciales se obtiene que:

$$C(s) = \frac{A}{s} + \frac{B}{s - x_1} + \frac{C}{s - x_2}$$

Evaluando las constantes A, B y C de la siguiente manera:

$$A = \left. \frac{K(s+a)}{(s-x_1)(s-x_2)} \right|_{s=0}$$

$$B = \left. \frac{K(s+a)}{s(s-x_2)} \right|_{s=x_1}$$

$$C = \left. \frac{K(s+a)}{s(s-x_1)} \right|_{s=x_2}$$

Se obtienen los siguientes valores para las constantes:

$$A = \frac{Ka}{c}$$

$$B = \frac{K/2(-b + \sqrt{b^2 - 4c} + a)}{(-b + \sqrt{b^2 - 4c})\sqrt{b^2 - 4c}}$$

$$C = \frac{-K/2(b + \sqrt{b^2 - 4c} - a)}{(b + \sqrt{b^2 - 4c})\sqrt{b^2 - 4c}}$$

Utilizando la transformada inversa de Laplace se pasa  $C(s)$  a la función de tiempo, la que resulta:

$$C(t) = A + B e^{-x_1 t} + C e^{-x_2 t}$$

Reemplazando los términos obtenidos en letras por sus valores numéricos equivalentes se obtiene la siguiente expresión:

$$C_2(t) = 1 - 0.178 e^{-3.3 t} - 0.0714 e^{-96.7 t}$$

Se tabularon los datos de las ecuaciones  $C_1(t)$  y  $C_2(t)$  en la tabla número IX para graficar las dos funciones y observamos la diferencia de su comportamiento en la figura número diez y seis.

Como se puede observar en la figura número diez y seis la respuesta de  $C_2(t)$  es mucho más rápida que  $C_1(t)$ : de aquí la importancia de la alimentación de campo.

El bloque número seis es un simple comparador de señales formado por resistencias que se lo examinaré junto con el bloque número siete.

El amplificador que se lo denomina como el bloque número siete debido a que solamente va a comparar señales y amplificarlas sus elementos son únicamente resistencias como se muestra en la figura número diez y siete.

A continuación se procede a diseñar el bloque número ocho es decir el tiristor amplificador de potencia.

Como se puede observar en la figura número uno se tiene un puente rectificador que es el que manda la señal al campo del generador.

La idea se concentra en reemplazar los diodos señalados con línea punteada en la figura número diez y ocho por tiristores scr. De tal manera que con un circuito apropiado de disparo se puede controlar el tiempo de disparo del tiristor como se observa en la figura número diez y nueve: de tal forma que a mayor ángulo de disparo menor será el voltaje promedio que se obtiene y viceversa.

La señal para hacer funcionar los tiristores debe ser pulsos con la frecuencia deseable para obtener nuestro propósito.

La emisión de estos pulsos se los obtiene de un transformador de pulsos accionado por un circuito compuesto de: un UJT un condensador y un transistor que sirve para regular el paso de corriente que va a cargar el condensador y de cuya rapidez de carga depende el disparo del UJT.

Además se necesitan diodos de bloqueo y diodos zener para estabilizar y fijar el voltaje como se muestra en el diagrama de la figura número veinte.

Como se observe en la figura, en primer lugar el circuito tiene que ser simétrico para ambos tiristores. Se coloca un potenciómetro  $R$ , para balancear la corriente de base de los transistores y por ende el disparo de los tiristores.

Los condensadores  $C_1$  que se muestran en la misma figura deben de ser pequeños para obtener una constante de tiempo pequeño, de tal manera que pueda cargarse hasta el voltaje de disparo del UJT en un rango de cero a un doscientos cuarentavo de segundo, que es la mitad de tiempo de la media onda.

En el laboratorio se dispone de un conjunto de pruebas el que cuenta con transistores nuevos como el BCY 70 que sirve para nuestro caso como interruptor.

El voltaje de referencia que se dispone es de menos quince voltios, por lo que se lo escoge junto con el potenciómetro  $P_2$  de 5 K $\Omega$ us sirve para prender o apagar el circuito cuando la realimentación no esta funcionando.

Los diodos zener son usualmente para estos casos de veinte y dos voltios un watio de potencia. Los diodos  $D_1$  son para propósitos generales para una baja corriente de bloqueo.

Los diodos  $D_2$  deben ser para doscientos voltios; ya que el voltaje a.c. de entrada es de ciento diez voltios.

Los UJT con que se cuentan en el equipo de prueba son los 2N 2646; que

serven para el propósito de este control.

La corriente en el transistor se la debe limitar de tal forma que se escoge 500 miliamperios como máximo.

Se escoge un circuito de resistencias de tal forma que el voltaje de base del transistor oscile entre 10 ó 12 voltios en el peor de los casos cuando el potenciómetro se encuentre en menos quince voltios. una combinación de las resistencias es la siguiente:

$$R = 10 \text{ K}\Omega \quad R_6 = 4.7 \text{ K}\Omega \quad R_7 = 22 \text{ K}\Omega \quad R_5 = 2.2 \text{ K}\Omega$$

Buscando un rango bastante amplio para que el condensador se pueda cargar con suficiente rapidez se escoge un condensador  $c_1$  igual a 100 nanofaradios. con el cual se dispone en el equipo de prueba.

De esta forma practicamente se tiene completo el prototipo de regulador el cual se lo resume en los gráficos de las figuras números veinte y veinte y dos.

### III.- OBTENCION DE LAS FUNCIONES TRANSFERENCIA

En base al diseño previo que se realizó en el capítulo anterior se obtienen los diagramas de bloque de los diferentes componentes.

El objeto de estos diagramas de bloques es analizar el sistema y simularlo en el computador analógico de tal forma de obtener un comportamiento aproximado del sistema.

Uno de los puntos fundamentales de anotar son las aproximaciones que se han realizado para facilitar y simplificar el análisis por lo que los resultados que se obtienen en ningún caso tendrán el carácter de exactos.

#### 3.1. Función Transferencia del modelo de máquina.

La máquina que se utiliza en este estudio es un alternador cuya función de transferencia real se la puede obtener de las ecuaciones que determinan el funcionamiento de la máquina pero que producen un diagrama de bloques muy complicado.

Para obviar este problema y simplificar el análisis se toma la función transferencia típica de un generador de corriente continua similar a la que sigue:

$$T(s) = \frac{K_2}{1 + T_2 s}$$

De esta manera lo que se elimina es la componente sinusoidal obteniéndose el comportamiento de la envolvente la que a su vez nos

muestra el comportamiento de una sola fase: mientras que el alternador en estudio es trifásico, consideración que se debe tener en cuenta para el análisis de los resultados.

Las constantes de esta máquina se la obtienen en el siguiente capítulo.

### 3.2. Función transferencia del regulador

Si denominamos como regulador a la parte que comprende a los tiristores amplificadores de potencia: notamos que la función transferencia exacta de este sistema es demasiado complicada y que para el análisis que se está realizando no se justifica: por lo que se procede a realizar otra aproximación.

Si se analiza el comportamiento de este amplificador de potencia se nota que su función básicamente es la de amplificar una determinada señal que recibe para modificar la señal de campo del generador.

Bajo la premisa anterior se toma la función transferencia del regulador como una ganancia que se la denomina  $K_2$ .

### 3.3. Función transferencia del sistema completo.

De acuerdo a lo obtenido en los numerales anteriores se puede armar el diagrama de bloques completo del sistema el cual se muestra en la figura veinte y tres.

Con este diagrama de bloques se realiza la simulación en el computador analógico y luego el estudio de estabilidad del sistema.

Las únicas constantes que faltan de determinar son las constantes  $K_g$  y  $T_g$  del generador que son obtenidas en forma experimental en el siguiente capítulo.

#### IV.- OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA MÁQUINA

Como se analizó en el capítulo anterior la función transferencia que se utiliza para representar la máquina es de la siguiente forma:

$$T(s) = \frac{K_g}{1 + T_g s}$$

Se debe determinar ahora las constantes  $K_g$  y  $T_g$  que determinan totalmente la función transferencia.

La determinación de estas constantes se les hace experimentalmente utilizando el generador que sirve para el propósito de este trabajo, además de un osciloscopio con memoria para graficar el comportamiento -- transiente de la máquina en el arranque.

Primeramente se calibra la máquina para que funcione con su voltaje y velocidad de régimen por medio de la señal de campo y del primo motor. Una vez funcionando la máquina se desconecta el campo por medio de su disyuntor.

Se alista el osciloscopio de tal forma que al introducir un escalón en el campo de la máquina se grafique en él, el voltaje transiente en los terminales del alternador. La curva obtenida fue una similar a la figura número veinte y cuatro.

Realmente se realizan dos mediciones. la primera con una escala debarrido de veinte milisegundos por división para determinar la constante de tiempo  $T_g$ ; que es el tiempo necesario para alcanzar el 63% del valor

máxima de estado estable y que en nuestro caso es de:

$$T_G = 0.029 \text{ seg.}$$

En ambas mediciones la escala para medir la amplitud de estado estable es de 50 voltios por 17.

La segunda medición se la realiza con una escala debarrido de 50 mV por segundos por división con el objeto de acrecentar mejor el valor de la amplitud de estado estable la que resulta 4.22 divisiones.

Haciendo un pequeño análisis de la función transferencia y obteniendo

la función en tiempo se tiene que:

$$T(s) = \frac{K}{s + T_G}$$

si hacemos que:

$$T(s) = \frac{R(s)}{C(s)}$$

entonces:

$$C(s) = \frac{K}{s + T_G} R(s)$$

Si la entrada es como en este caso una función escalón. Luego:

$$C(t) = K (1 - e^{-t/T_G})$$

Donde  $K$  es el valor de estado estable y que en este caso resulta de

4.22 divisiones es decir 211 voltios.

Luego:

$$K = 211 \text{ voltios}$$

$$T_G = 0.028 \text{ seg.}$$

## V.- SIMULACION DEL SISTEMA EN EL COMPUTADOR ANALOGICO

Para la simulación se parte del diagrama de bloques de la figura número veinte y tres.

De este diagrama se toman los bloques parte por parte así, se toma el lazo pequeño de realimentación luego el generador y por último el sistema en general.

Para esto es necesario encontrar las funciones transferencias de las partes y darle cierta forma matemática para poder llevar en forma simple al computador analógico dicha expresión.

Primeramente se toman el lazo cerrado pequeño es decir, la función - transferencia  $C / X_1$  lo que resulta:

$$\frac{C}{X_1} = \frac{K' (T_f s + 1)}{T' s + 1}$$

Donde:

$$K' = \frac{K_2}{1 + K_2 K_f}$$

Y

$$T' = \frac{T_f}{1 + K_2 K_f}$$

$$C T' s + C = K' T_f s X_1 + K' X_1$$

$$C T' s = K' T_f s X_1 + K' X_1 - C$$

$$C = \left( \frac{K' X_1}{T'} - \frac{C}{T'} \right) s^{-1} + \frac{K'}{T'} T_f X_1$$

Cue llevando esta expresión a los elementos del computador analógico resulta la figura número veinte y cinco.

Luego se procede a elaborar el mismo procedimiento para el generador cuya función  $V_g / C$  es como sigue:

$$\frac{V_g}{C} = \frac{K_g}{1 + T_g s}$$

$$V_g + V_g T_g s = K_g C$$

$$V_g T_g s = K_g C - V_g$$

$$V_g = \left( \frac{K_g}{T_g} C - \frac{V_g}{T_g} \right) s^{-1}$$

Y cuyo diagrama se muestra en la figura número veinte y seis.

Una vez con todos estos elementos se forma el diagrama completo como se muestra en la figura número veinte y siete cuyos valores para las constantes son los siguientes:

$$K' = \frac{K_2}{1 + K_2 K_f} = 0.6$$

$$T_r = 0.047$$

$$K_2 = 1.5 \text{ (valor experimental)}$$

$$K_f = 1$$

$$T' = \frac{T_r}{1 + K_2 K_f} = 0.0199$$

$$K_1 = 5$$

$$K_2 = \frac{1}{20} \text{ (valor experimental)}$$

$$K_Q = 211$$

$$T_Q = 0.028$$

$$\frac{K^f}{T^f} = 31.21$$

$$\frac{K^f T_f}{T^f} = 1.50$$

$$\frac{K_Q}{T_Q} = 7.535.71$$

Una vez con todos los datos y el diagrama completo se simula el programa en el computador analógico. Se observa que ciertos integradores presentan saturación por lo que se encuentra la necesidad de realizar escalamiento tanto en tiempo como en magnitud.

Para el escalamiento en tiempo se escoge la constante:

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{100}$$

Para el escalamiento en magnitud es necesario introducir nuevas variables en las ecuaciones. las que resulten de la siguiente manera:

$$\left( \frac{C}{C_m} \right) = \left( \frac{K^f X_{1m}}{C_m T^f} \left( \frac{X_1}{X_{1m}} \right) + \frac{1}{T^f} \left( -\frac{C}{C_m} \right) \right) S^{-1} + \frac{K^f T_f X_{1m}}{T^f C_m} \left( \frac{X_1}{X_{1m}} \right)$$

Donde:

$C_m$  = valor máximo asumido para  $C = 10$

$X_{1m}$  = valor máximo asumido para  $X_1 = 10$

$$\left( \frac{V_Q}{V_{gm}} \right) = \left( \frac{K_Q C_m}{T_Q V_{gm}} \left( \frac{C}{C_m} \right) - \frac{1}{T_Q} \left( \frac{V_Q}{V_{gm}} \right) \right) S^{-1}$$

$V_{gm}$  = valor máximo asumido para  $V_Q = 211$

$$\left( \frac{X_1}{X_m} \right) = \frac{K_1 E_m}{X_{1m}} \left( \frac{E}{E_m} \right) \frac{1}{S}$$

$E_m$  = valor máximo asumido para  $E = 5$

$$\left( \frac{E}{E_m} \right) = \frac{R_m}{E_m} \left( \frac{R}{R_m} \right) - \frac{K_2 V_{00}}{E_m} \left( \frac{V_0}{V_{0m}} \right)$$

$R_m$  = valor máximo asumido para la referencia  $R = 15$

Con este nuevo panorama de ecuaciones se forma el diagrama de bloques de la figura número veinte y ocho con sus respectivos valores en los potenciómetros listos para simularlo en el computador analógico.

Con el diagrama armado en el tablero del computador analógico se pone en funcionamiento dicho computador con las siguientes características:

Barrido en el tiempo del computador = 2.4 segundos por pulgada.

Amplitud de voltaje del computador = 0.5 voltios por pulgada.

Con la ayuda del gráfico se obtienen los resultados en la figura número veinte y nueve: donde se muestran cuatro estados diferentes: el uno sin carga en el generador y los siguientes tres estados con disturbios de 5, 8 y 10 voltios introducidos al momento que marca la línea punteada en la figura.

Es de notar que el tiempo real  $T_r$  es igual a:

$$T_r = \frac{T_c}{\alpha}$$

Donde  $T_c$  es el tiempo de computadora y  $\alpha$  en nuestro caso igual a cien por lo que el barrido en el tiempo real es de 0.024 segundos por pulgada. Además el voltaje real es igual a:

$$V_g = V_{gm} V_c$$

Donde  $V_c$  es amplitud de la computadora y  $V_{gm}$  en nuestro caso igual a 211; por lo que la escala de la amplitud real es de 105.5 voltios por pulgada.

VI.- ESTUDIO DE ESTABILIDAD DEL REGULADOR

Uno de los puntos más importantes que se debe tratar una vez concluido el diseño es el estudio de estabilidad. Es decir analizar si el sistema es o no estable, y su estabilidad relativa.

Para analizar la estabilidad se parte del diagrama de bloques de la figura interior el diagrama de bloques se reduce al de la figura número veinte y tres. Si de este diagrama se resuelve el lazo de retroalimentación se obtiene el diagrama de bloques de la figura veinticuatro. Y una vez se obtiene el diagrama de bloques de la figura veinticuatro se reduce a un sistema de primer orden.

$$K_1 = \frac{1 + K_2 K_f}{K_2}$$

$$T_1 = \frac{T_0}{1 + K_2 K_f}$$

Volviendo a resumir el diagrama de bloques como se muestra en la figura número treinta y uno, se puede analizar de una forma más simple la estabilidad del sistema.

Si hacemos que:

$$K_1 K_2 K_f = K$$

Y que:

$$G(s) = \frac{s (T_1 s + 1) (T_2 s + 1)}{K (T_3 s + 1)}$$

Y

$$H(s) = K_f$$

Y aplicando el criterio de Nyquist para la estabilidad, se obtiene el diagrama  $G H (s)$  usando su mismo contorno con su respectivo manejo, lo que se muestra en la figura número treinta y dos.

Como se puede observar en esta figura el diagrama de Nyquist no encierra el punto  $(-1, 0)$  ni una sola vez. Condición necesaria y suficiente para que el sistema sea estable.

En lo que respecta a la estabilidad relativa del sistema nuevamente se emplea el criterio de Nyquist, en lo que se refiere a las medidas de margen de ganancia y margen de fase, las que se definen así:

"El margen de ganancia es definido como el recíproco de la ganancia  $G H (j\omega)$  en la frecuencia a la cual el ángulo de fase alcanza los  $180^\circ$ ". (1)

Es decir el margen de ganancia es el factor por el cual la ganancia del sistema tienen que ser incrementada para que el punto de  $G H (j\omega)$  pase por el punto  $u = -1 ; v = 0$ , en el plano  $G H (j\omega)$ , plano que se lo obtiene de llevar la función en estudio por medio de un manejo.

"El margen de fase es definido como el ángulo de fase a través del cual la localización de  $G H (j\omega)$  debe ser rotada a fin de que la magnitud  $G H (j\omega) = 1$  pase a través del punto  $(-1, 0)$  en el plano  $G H (j\omega)$ ." (1)

Es decir, es el ángulo de fase requerido antes de que el sistema llegue a ser inestable.

Primeramente se obtuvo la función  $G H (s)$  con sus respectivos valores lo que resultó:

$$G H (s) = \frac{71.6 ( 0.047 s + 1 )}{s ( 0.0183 s + 1 ) ( 0.028 s + 1 )}$$

A partir de esta función se obtiene los diagramas aproximados de Bode, lo que se muestra en la figura número treinta y tres, de donde se ob-

tienen los respectivos márgenes de fase y de ganancia.

Margen de ganancia igual infinito.

Margen de fase igual  $55^\circ$  .

El margen de ganancia es infinito ya que la curva de fase de la función  $G H (s)$  tiende a  $- 180^\circ$ : siendo esta coordenada su asíntota.

## VII.- CONSTRUCCION DEL REGULADOR PROTOTIPO EN EL LABORATORIO

La construcción del regulador se la divide en varias partes que se detallan y explican a continuación cada una de ellas. Se construye primeramente la placa con los circuitos impresos, luego los transformadores de aislamiento se adantan los tiristores que se van a utilizar y por último se construye una caja metálica que contiene todos los elementos del regulador.

El primer paso en el proceso de construcción es el de circuito impreso. Esta tarjeta contiene todos los elementos electrónicos de control, es decir lo que abarca la línea punteada de las figuras números veinte y uno y veinte y dos.

Se diseña primeramente en un papel transparente con cinta negra adhesiva los recorridos de las líneas de cobre de la placa que se utiliza. Después de algunos intentos encontramos el diseño de la tarjeta impresa como se muestra en la figura número treinta y cuatro cuyo tamaño es exactamente igual al real.

Se utiliza para este circuito impreso un tipo de proceso fotográfico. La placa de cobre fotosensible es de carácter foto resistente positiva que se la vela con el circuito diseñado en el papel transparente por medio de luz ultravioleta exponiéndola durante unos cinco minutos.

Posteriormente durante unos veinte minutos se saca el exceso de cobre de la placa por medio de ácido cloruro férrico.

Una vez la placa lista se hacen las perforaciones necesarias para sol  
dar los elementos.

Uno de los problemas que se presentan en esta etapa es la de conseguir  
la fuente que suministre más menos quince voltios dc.

Es fácil conseguir un regulador de voltaje de más 15 voltios dc: pero  
el de menos 15 voltios dc difícilmente se lo encuentra en el mercado.  
La única alternativa es la de diseñar un regulador de menos 15 voltios  
dc: por lo que se utiliza el esquema de la figura número treinta y cin  
co.

Con este diseño del regulador para menos 15 voltios prácticamente se  
obtiene todo el esquema para la fuente de voltaje que se necesita el  
que se muestra en la figura número treinta y seis quedando de esta  
forma la placa del circuito impreso completa.

Se construye tres transformadores. Dos de ellos para formar el delta  
abierto cuya relación de transformación es de 200 a 20 voltios y cuya  
máxima capacidad es de 1 amperio en el secundario.

El otro transformador tiene una relación de 110 a 20 voltios, y es el  
que se muestra en la figura número treinta y seis de una capacidad  
máxima de 1 amperio en el secundario.

Los tiristores scr que se necesitan para este trabajo se encuentran en  
el laboratorio de sistemas de potencia con una capacidad de 40 amperios  
y un voltaje de aislamiento de 500 voltios.

A estos tiristores es necesario adaptarles un radiador para disipar el  
calor.

Una vez con todos los elementos contruídos se diseña una caja metálii

ca que contiene todos los componentes del regulador en su interior.

La caja metálica se la construye en plancha metálica de 1/20 pulgadas de espesor de color gris.

El aspecto exterior de la caja se lo muestra en la figura número treinta y siete, donde están acotadas las dimensiones aproximadas de la misma.

### VIII.- PRUEBAS DEL REGULADOR PROTOTIPO

Una vez construido el aparato es necesario realizar todas las pruebas que determinen el funcionamiento práctico del equipo: pruebas cuyos resultados son comparados con las condiciones iniciales que se propusieron al iniciar este trabajo en el numeral uno.

La primera prueba que se realiza es para observar como se mantiene el voltaje del generador al aumentar gradualmente la carga y luego al disminuirla para de esta forma determinar si el regulador se mantiene dentro del porcentaje (1%) que se establece al comienzo de este trabajo: y en caso contrario determinar su diferencia: así como también comparar con la figura número dos que muestra como varía el voltaje del generador sin el regulador al aumentar gradualmente la carga.

Se tabulan los datos en la tabla número tres y se los grafica en la figura número treinta y ocho.

En este mismo gráfico se observa al regulador cambiando el nivel de voltaje con la referencia del sistema: con el objeto de comparar el funcionamiento del regulador con diferentes niveles de voltaje. Los datos se tabulan en las tablas números cuatro y cinco.

Una última prueba que se realiza es la que permite observar el comportamiento del regulador cuando se varía la frecuencia entre 57 y 63 Hz. Para las pruebas se escoge los dos extremos y el normal 60 Hz. Se tabulan los datos en las tablas números seis y siete y se los grafica

en la figura número treinta y ocho.

Además de las pruebas anteriores se prueba el regulador con carga des balanceada. Se registran los datos en la tabla número ocho y se los grafica en la figura número treinta y ocho.

Las conclusiones y resultados de las comparaciones de las distintas pruebas se analizan en el siguiente capítulo.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones y recomendaciones sobre el trabajo realizado se las presenta en base a los resultados obtenidos en las pruebas del regulador y al desarrollo mismo del trabajo.

### Conclusiones :

1. En la figura número treinta y nueve se observa el comportamiento

del regulador con dos diferentes niveles de frecuencia. Con 57 Hz de frecuencia el generador tiene una caída de voltaje a plena carga aproximada del 1% mientras que con 53 Hz la caída de voltaje es del 2% a plena carga: es decir tiene un mejor funcionamiento con frecuencia inferior a la normal que con frecuencia mayor.

En general el regulador reúne las características deseadas en el primer capítulo en lo que respecta a la frecuencia.

2. En la figura número treinta y ocho se observa el comportamiento del regulador con diferentes niveles de voltaje con carga balanceada:

y desbalanceada.

Con carga balanceada se tiene aproximadamente una caída de tensión de un 2% a plena carga, mientras que las características deseadas en el primer capítulo se establece el 1%.

Con carga desbalanceada la caída de tensión a plena carga aumenta

a un 3%.

El tipo es objeto de lo dicho anteriormente, el regulador no está

encuadrado rígidamente dentro de las especificaciones en lo que a caída de tensión se refiere. Para un modelo prototipo es aceptable el porcentaje de caída de tensión que presenta.

7. Al cambiar los niveles de voltaje el comportamiento del regulador permanece inalterable entre el rango especificado de 450 a 650 voltios: por lo que respecta a esta característica sí reúne las condiciones especificadas.
4. Al aumentar la carga progresivamente al generador es de notar la deflexión de la aguja del voltímetro hasta recuperar su posición normal: es decir la respuesta del regulador se la nota un tanto lenta: pero en realidad tiene mucha incidencia en este efecto la caída de voltaje por pérdida de velocidad, ya que el generador no tiene un regulador automático de velocidad y como es un generador pequeño no cuenta con la inercia suficiente como para cambiar su velocidad en forma amortiguada.
5. Según el análisis de estabilidad teórico del sistema se encuentran que éste es siempre estable lo que en la realidad no es cierto pues en ciertas condiciones el sistema empieza a oscilar, debiéndose se cambiar su señal de campo para evitar dichas oscilaciones.
6. En el análisis de la computadora analógica de la figura número veinte y nueve es de notar que al aumentar gradualmente la carga se siente el disturbio: pero al regresar al estado estable no hay caída de tensión lo cual en la práctica no es cierto: ya que se ha establecido un 2 y hasta 3% de caída de tensión a plena carga. Lo expresado anteriormente es debido a las aproximaciones que se debia

ron realizar para simplificar el análisis.

Recomendaciones :

1. Una de las primeras recomendaciones es la de analizar el sistema con un regulador automático de frecuencia, ya que esto va a mejorar en mucho el comportamiento del regulador y se podrá establecer cuáles son las verdaderas necesidades del aparato para optimizarlo.
2. Una vez establecidas las necesidades del aparato para optimizarlo, se recomienda encontrar la función transferencia exacta del regulador para analizar su comportamiento con la ayuda del computador: ya que para el análisis en este trabajo se asumió al regulador como una simple ganancia lo cual es inexacto.
3. Ya establecida la función transferencia del regulador, se recomienda que a partir de la ecuación matricial que determina el funcionamiento de un alternador obtener su función transferencia así como su diagrama de bloques. Después de esto determinar los parámetros necesarios del alternador en estudio en el laboratorio.
4. Una vez obtenidos todos los diagramas se recomienda simular el sistema completo para determinar su estabilidad relativa exacta y de esta forma encontrar la red de compensación que haga el sistema más estable optimizando así el regulador.

ANEXO Nº 1

TABLAS

Generador de potencia número tres: sin regulador; de cero a plena carga. Frecuencia constante en 60 Hz. curva potencia vs voltaje.

Tabla I

Potencia (Kw)	Voltaje (volt.)
0.04	600
0.08	590
0.10	570
0.105	560
0.310	540
0.590	480
0.690	435
0.750	410
0.790	400
0.810	385
0.820	320

Generador de potencia número tres: sin regulador; de cero a plena carga. Voltaje constante a 600 voltios. curva potencia vs velocidad.

Potencia (Kw)	Velocidad (Hz)
0.10	59.6
0.40	58.5
0.90	56.5
1.26	55.5

TABLA III

Generador de potencia número tres con regulador de voltaje: frecuencia constante a 60 Hz. carga balanceada: nivel de voltaje 600 voltios.

Potencia (Kw)	Voltaje (volts)
0.4	600
0.5	598
0.6	595
0.8	594
0.9	592
0.7	593
0.6	595
0.5	597
0.4	600

TABLA IV

Generador de potencia número tres. con regulador de voltaje: frecuencia constante a 60 Hz carga balanceada: nivel de voltaje 550 Voltios.

Potencia (Kw)	Voltaje (volts)
0.3	550
0.4	548
0.6	542
0.7	540
0.8	539

Potencia (Kw)	Voltaje (volts)
0.3	600
0.4	600
0.5	599
0.6	598
0.7	595
0.8	595

Generador de potencia número tres: con regulador de voltaje: frecuencia constante a 57.5 Hz nivel de voltaje 600 voltios; carga balanceada.

TABLA VI

Potencia (Kw)	Voltaje (volts)
0.5	640
0.6	638
0.7	635
0.8	634
0.9	632

Generador de potencia número tres: con regulador de voltaje: frecuencia constante a 60 Hz. carga balanceada nivel de voltaje 640 voltios.

Tabla V

Generador de potencia número tres: con regulador de voltaje: nivel de frecuencia 60 Hz, nivel de voltaje 600 voltios, carga balanceada.

TABLE VII

Potencia (kw)	Voltaje (volts)
0.3	600
0.4	598
0.5	595
0.6	592
0.7	590
0.8	590

Generador de potencia número tres: con regulador de voltaje: nivel de frecuencia 60 Hz nivel de voltaje 600 voltios, carga desbalanceada.

Potencia (kw)	Voltaje (volts)	Amperaje en fases		
		A	B	C
0.40	600	0.50	0.30	0.60
0.56	590	0.76	0.30	0.80
0.66	590	0.91	0.30	0.97
0.74	590	1.03	0.3	1.10
0.86	585	1.20	0.3	1.26

TABLA IX

$C_1(t)$  = sistema sin realimentación

$C_2(t)$  = sistema con realimentación

<u>t</u>	<u><math>C_1(t)</math></u>	<u><math>C_2(t)</math></u>
0.01	0.1327	0.8006
0.03	0.3624	0.8349
0.05	0.5276	0.8485
0.08	0.6988	0.8633
0.10	0.7769	0.8720
0.12	0.8347	0.8802
0.15	0.8946	0.8915
0.18	0.9328	0.9017
0.20	0.9502	0.9080

ANEXO Nº 2

FIGURAS

DIAGRAMA DE LA ALIMENTACION A LA SENAL DE CAMPO DEL GENERADOR.

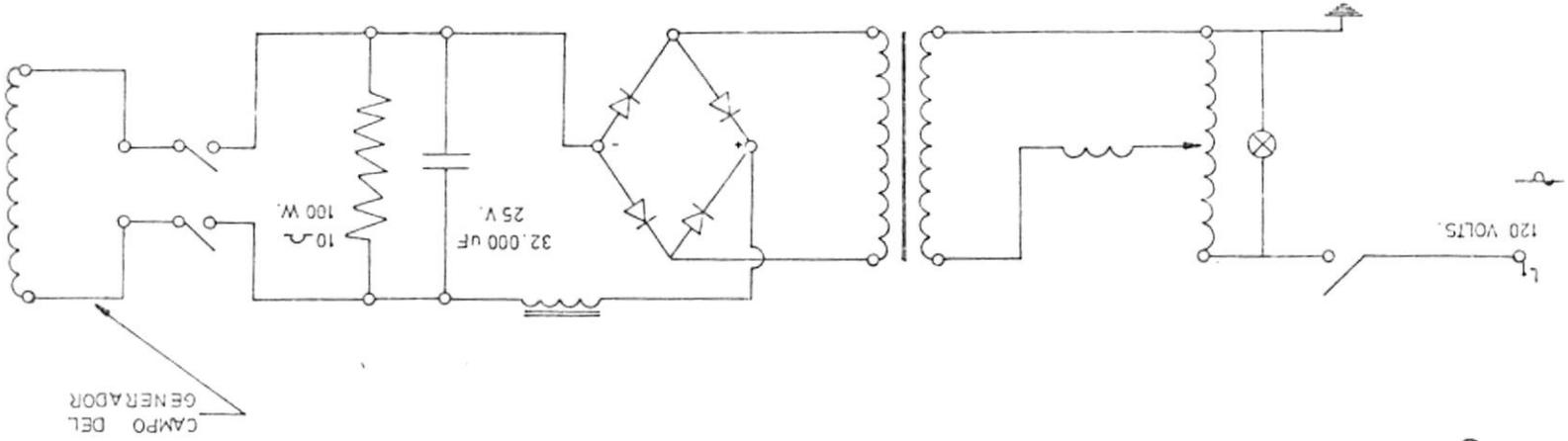
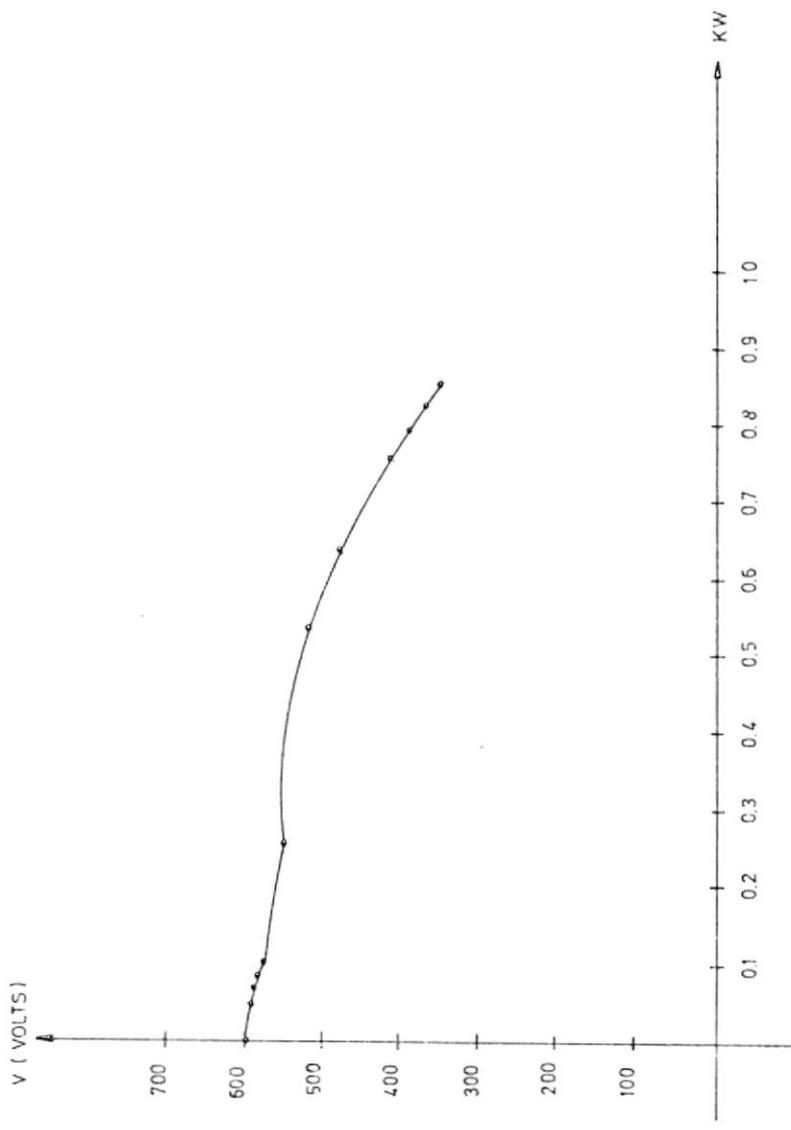


Figura Nº 1

Figura N° 2



VOLTAJE VS POTENCIA. VELOCIDAD CONSTANTE.

FRECUENCIA VS POTENCIA VOLTAJE CONSTANTE

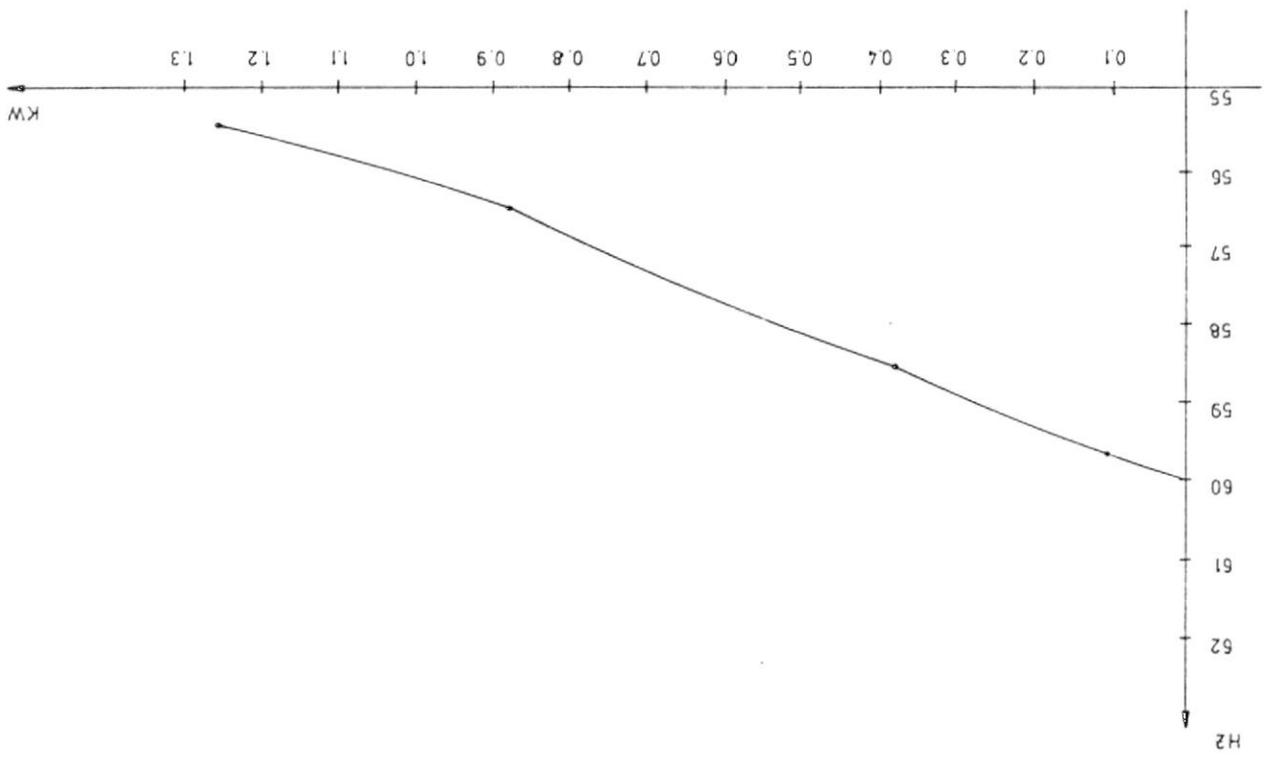


Figura N° 3

Figura N° 4

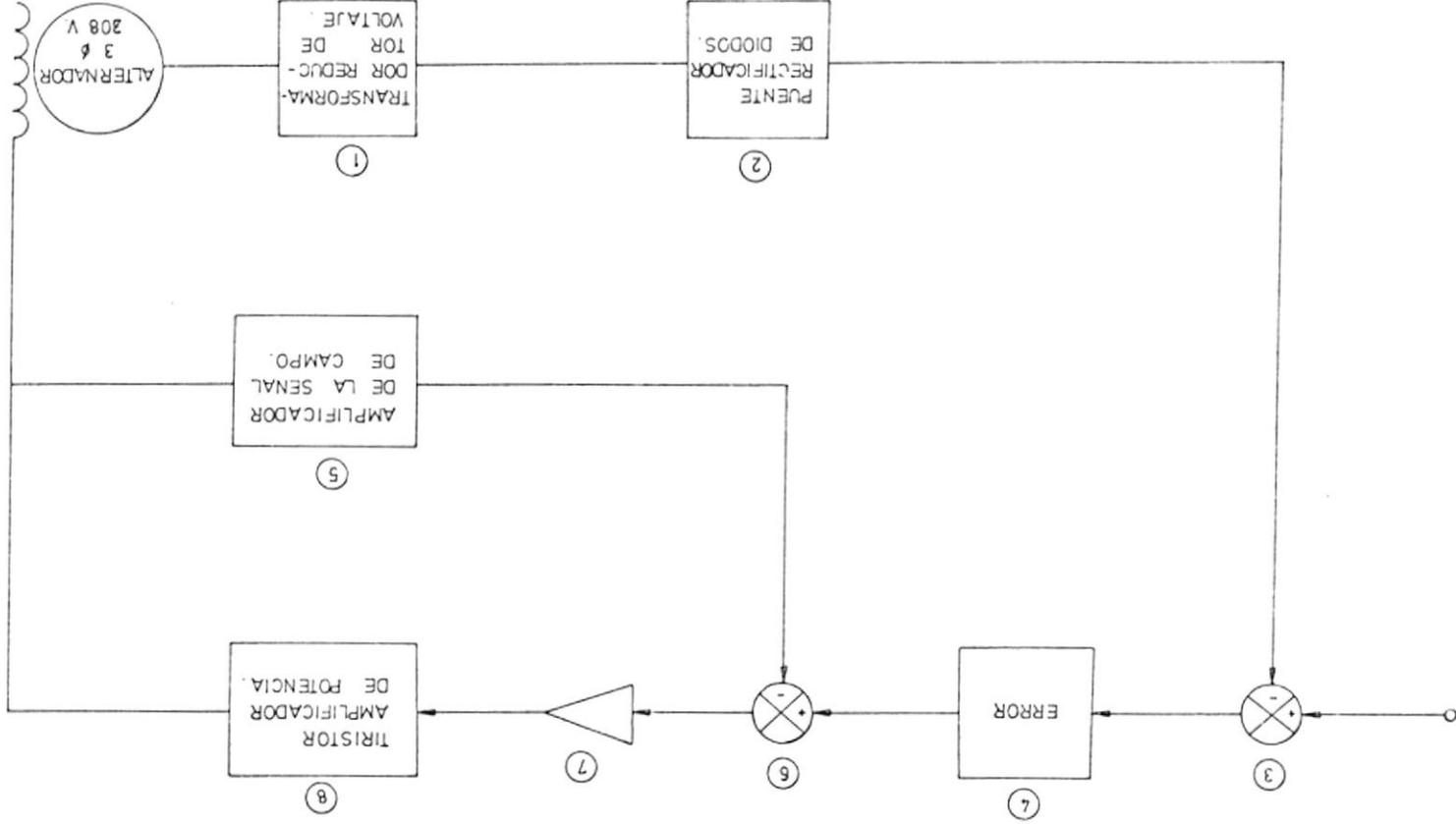
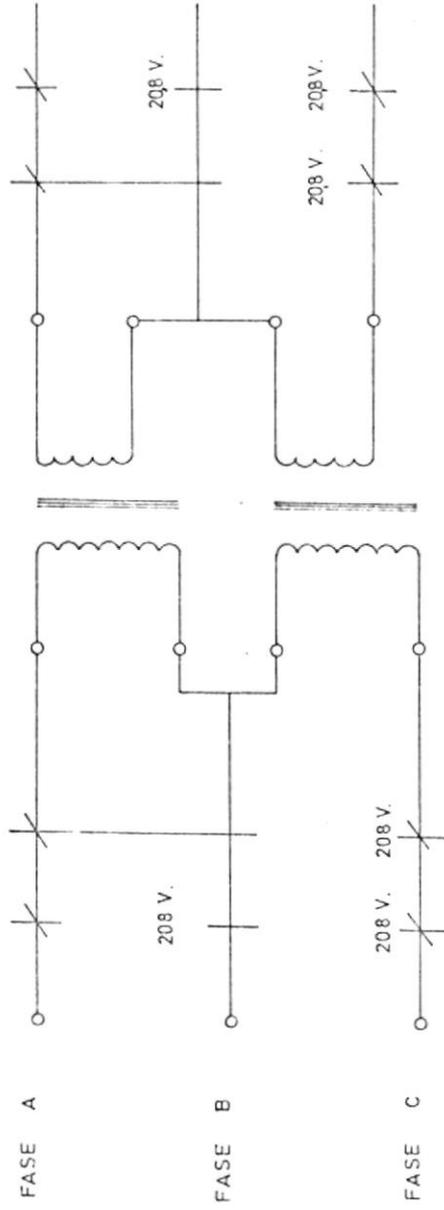


DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA COMPLETO.

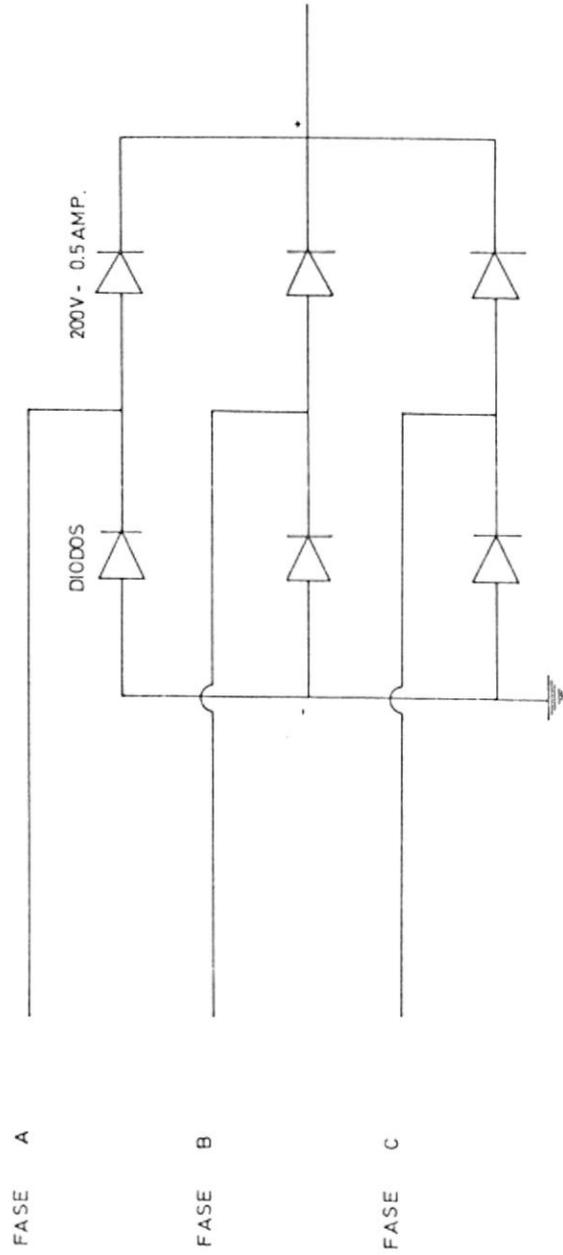
Figura N° 5



BLOQUE N° 1

CONEXION DELTA ABIERTA DE LOS TRANSFORMADORES.

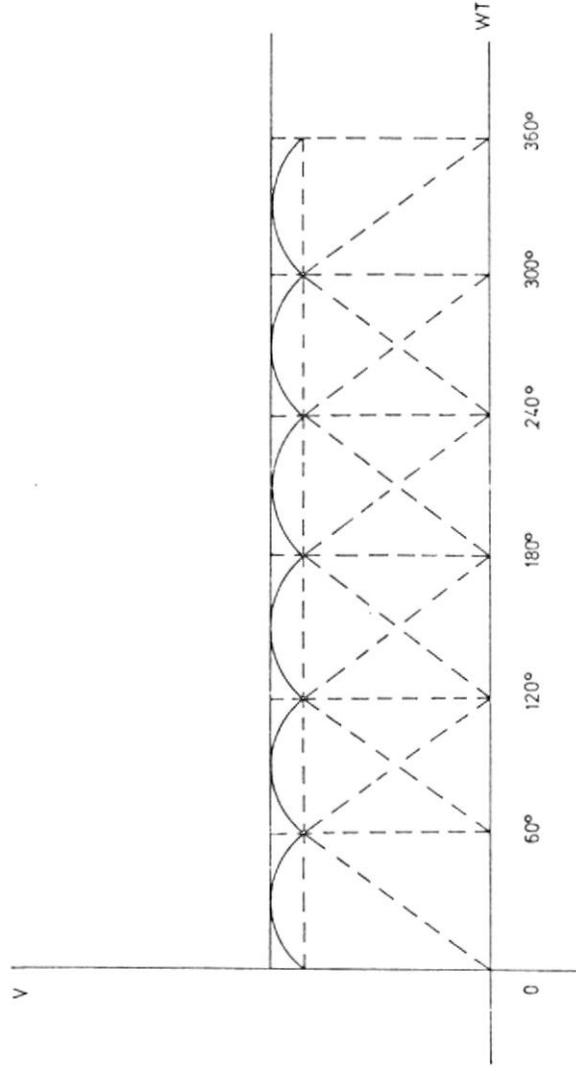
Figura N° 6



BLOQUE N° 2

RECTIFICADOR TRIFASICO.

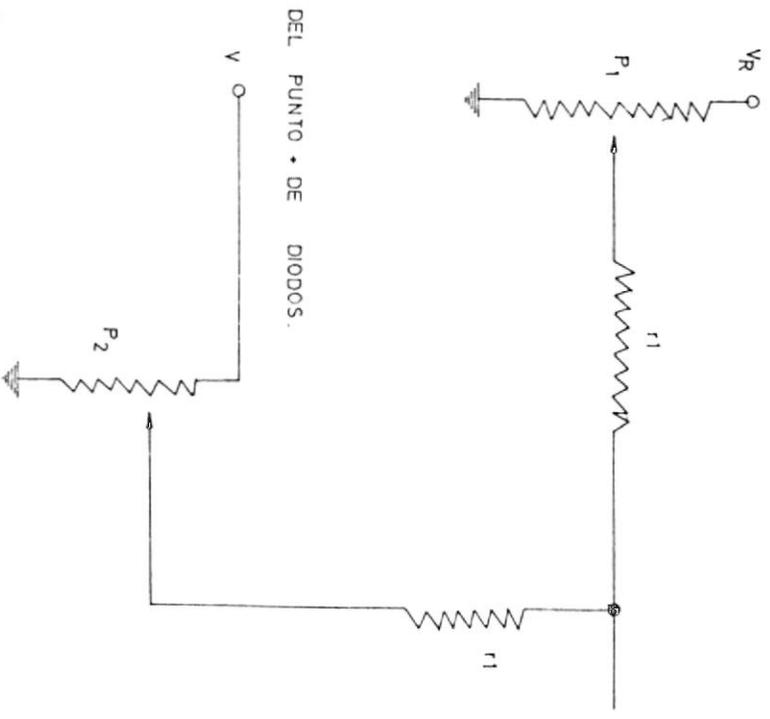
Figura N° 7



ONDA DE SALIDA DEL RECTIFICADOR .

Figura N° 8

- $P_1 = 5K$  
- $r_1 = 100K$  
- $P_2 = 50K$  



BLOQUE N° 3

Figura N° 9

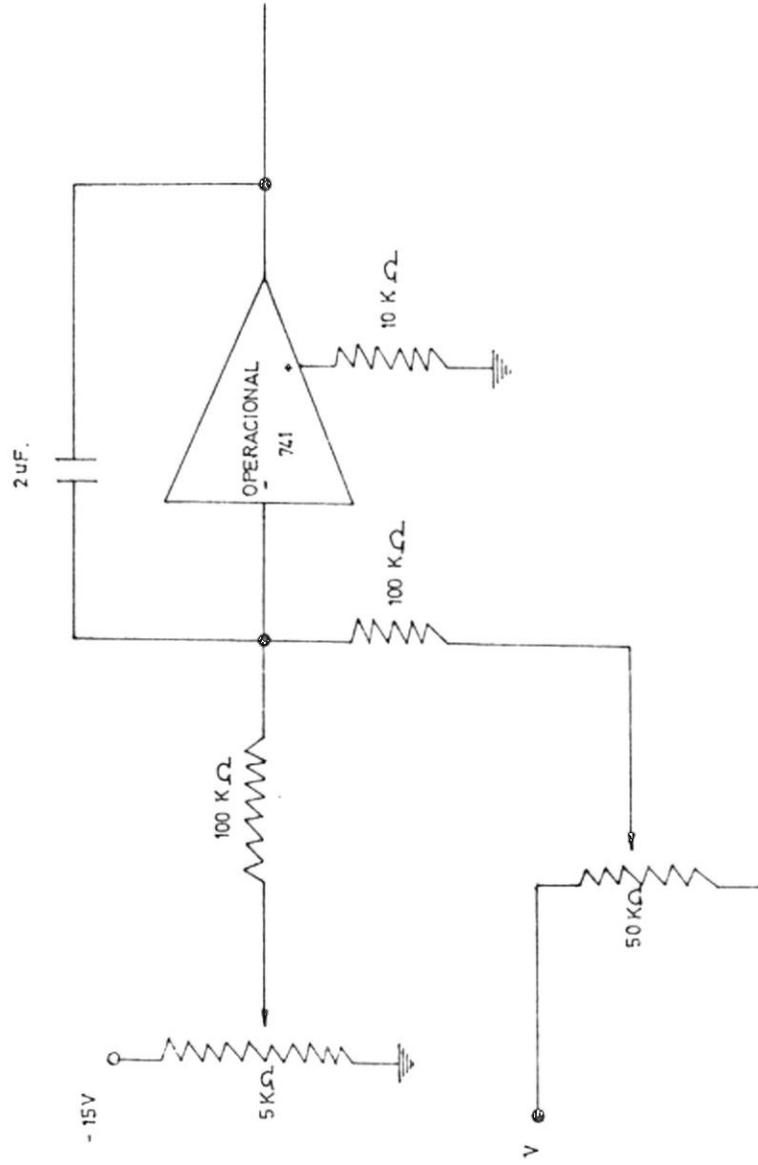
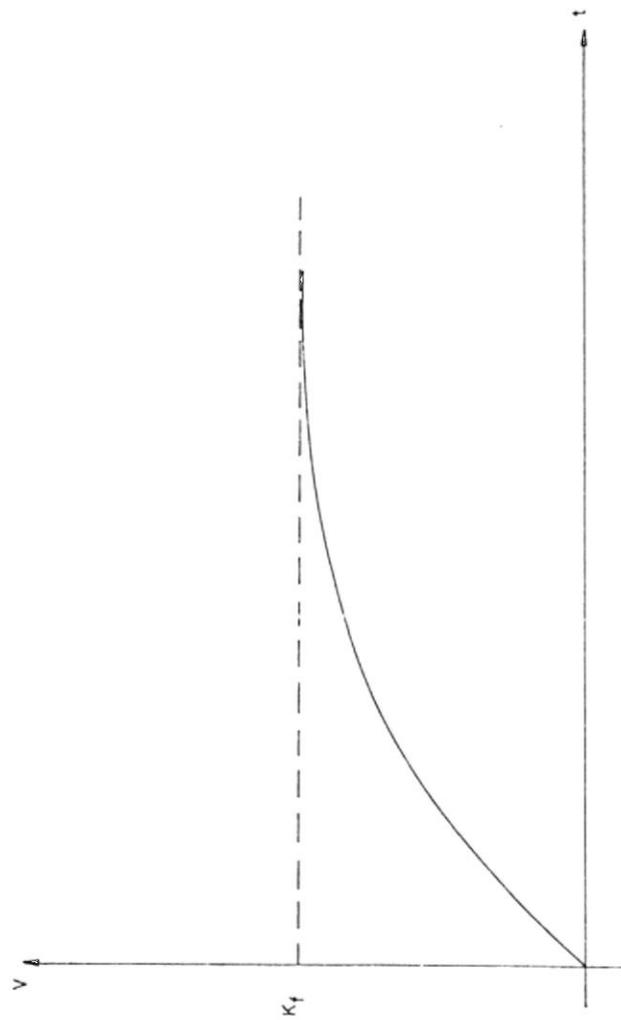
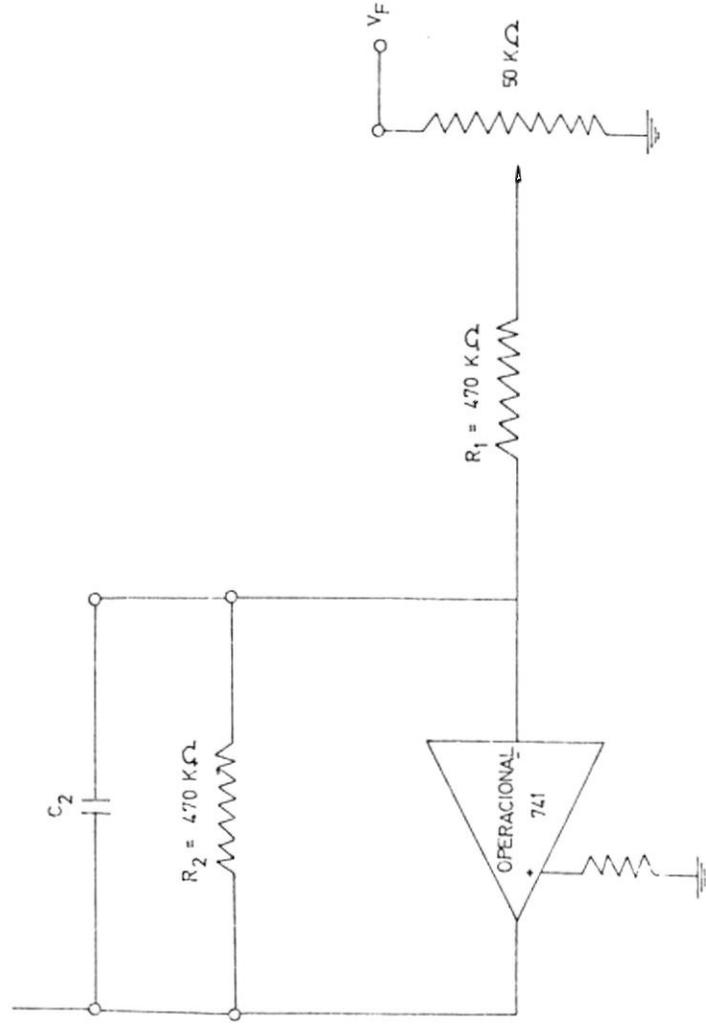


Figura N° 10



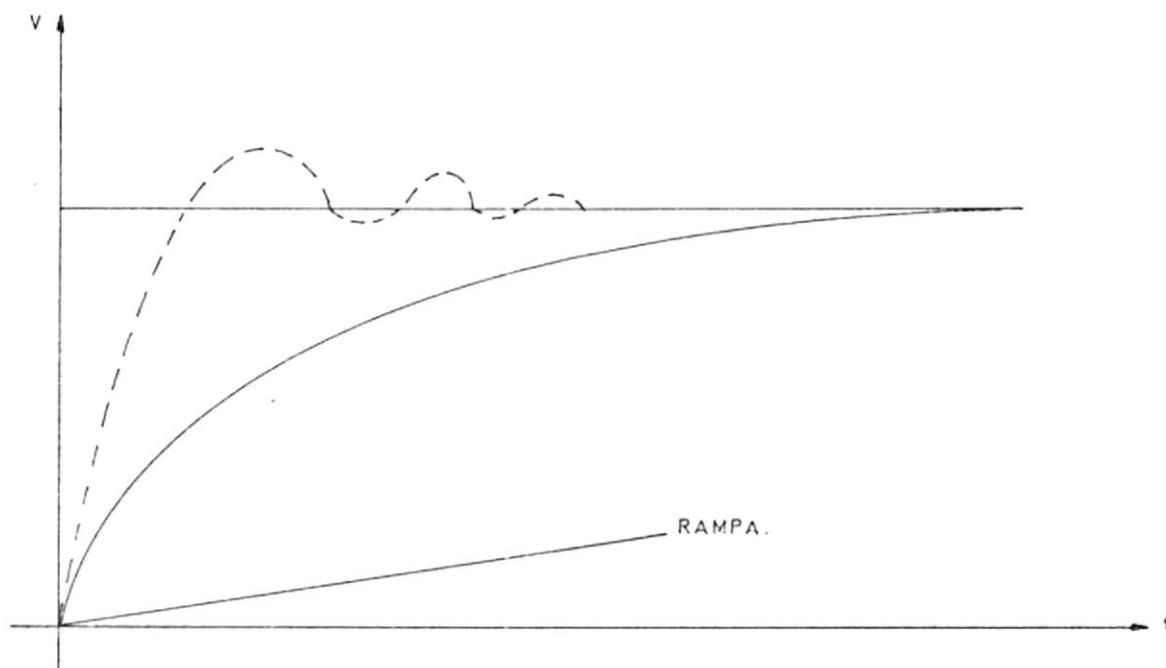
$$\text{RESPUESTA A UN ESCALON DE BLOQUE } \frac{K_f}{1+T_f S}$$

Figura N° 11



BLOQUE N° 5

Figura N° 12



COMPARACION DE LA RESPUESTA DE LOS BLOQUES  
N° 4 y 5 A UN ESCALON DE ENTRADA.

Figura N°13

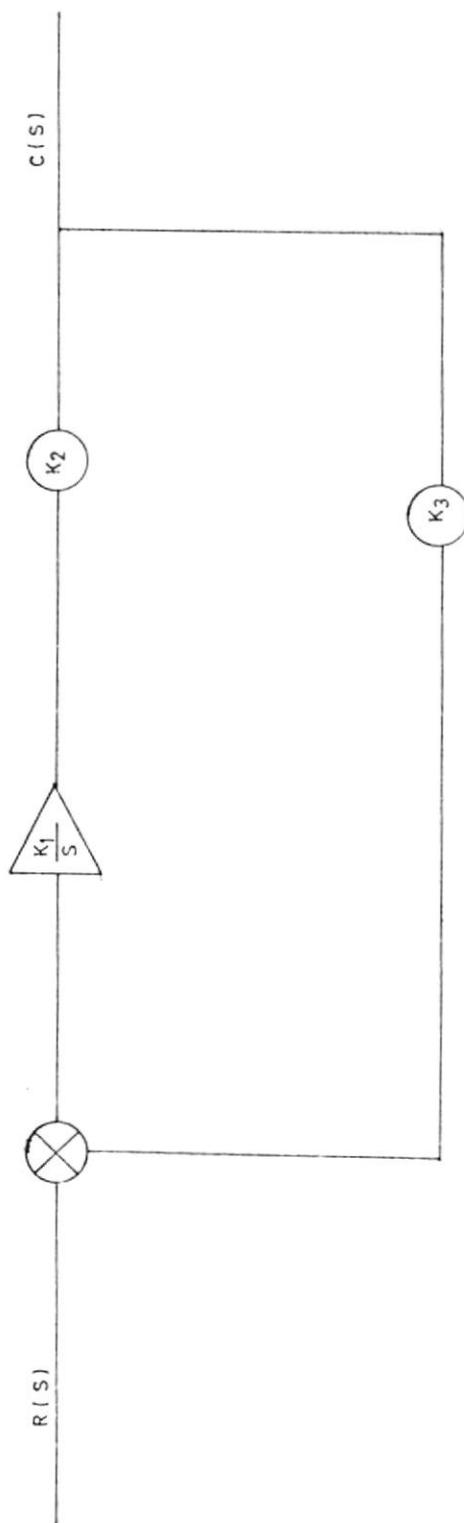


DIAGRAMA SIN REALIMENTACION DE CAMPO.

Figura Nº 14

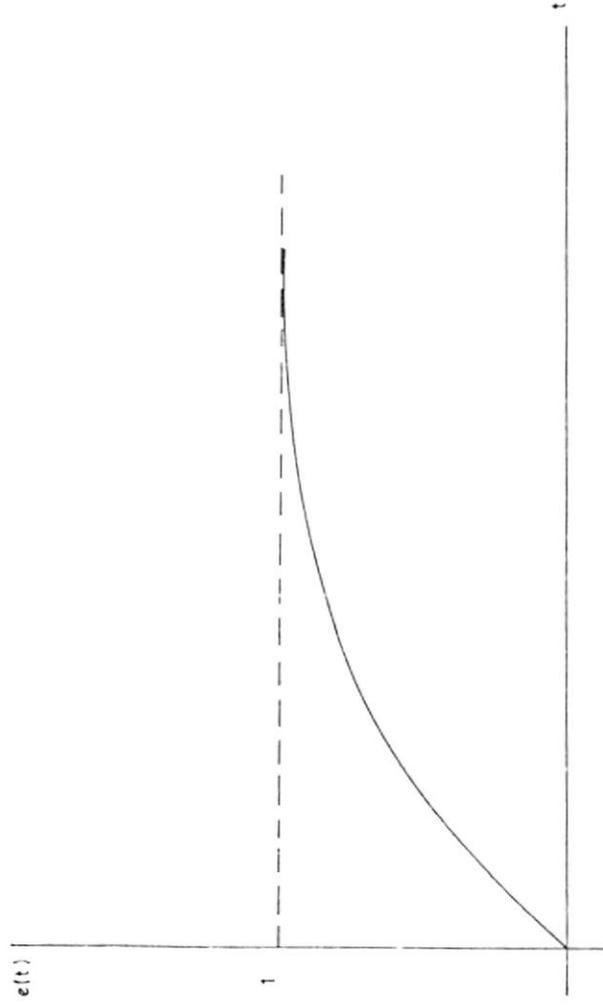


GRAFICO DE  $C_1(t) = 1 - e^{-15t}$

Figura Nº 15

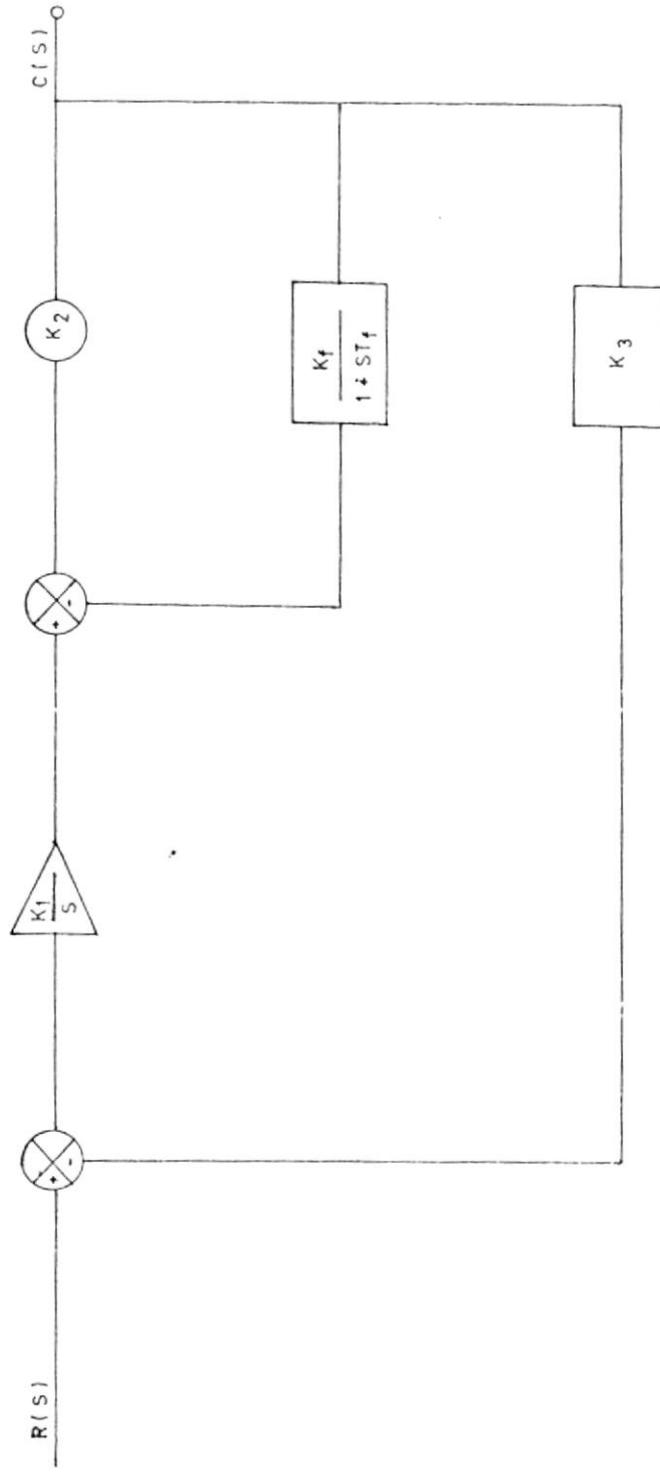
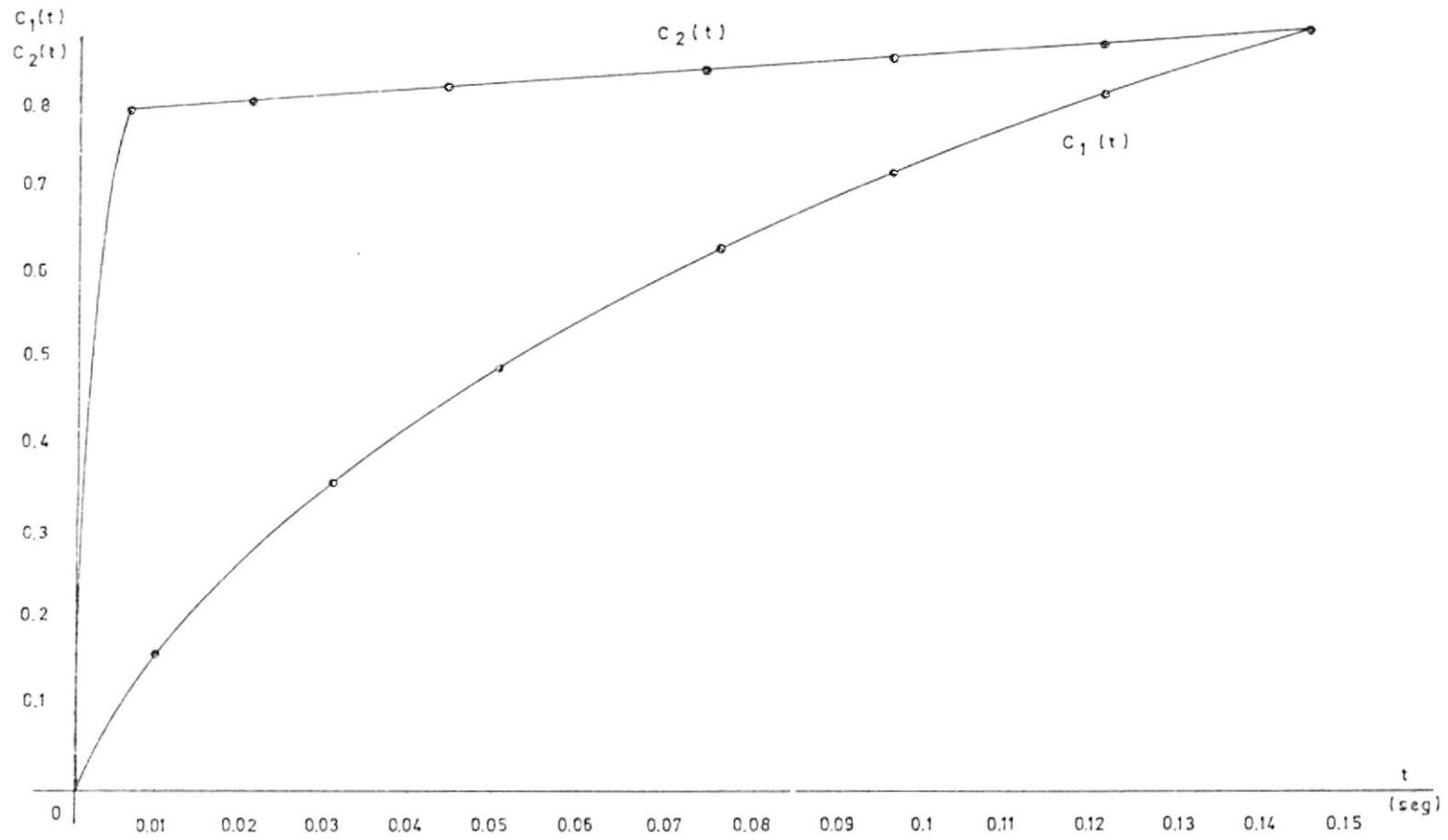


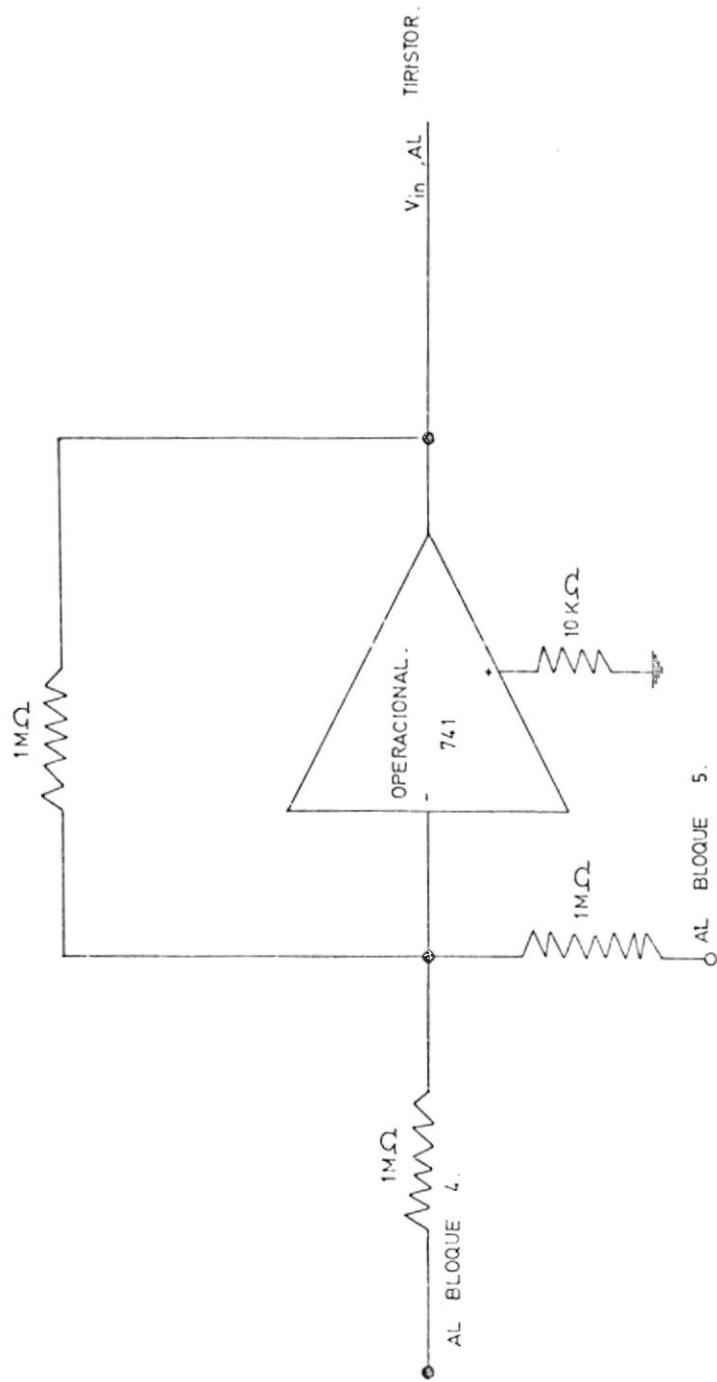
DIAGRAMA CON REALIMENTACION DE CAMPO

Figura N° 16



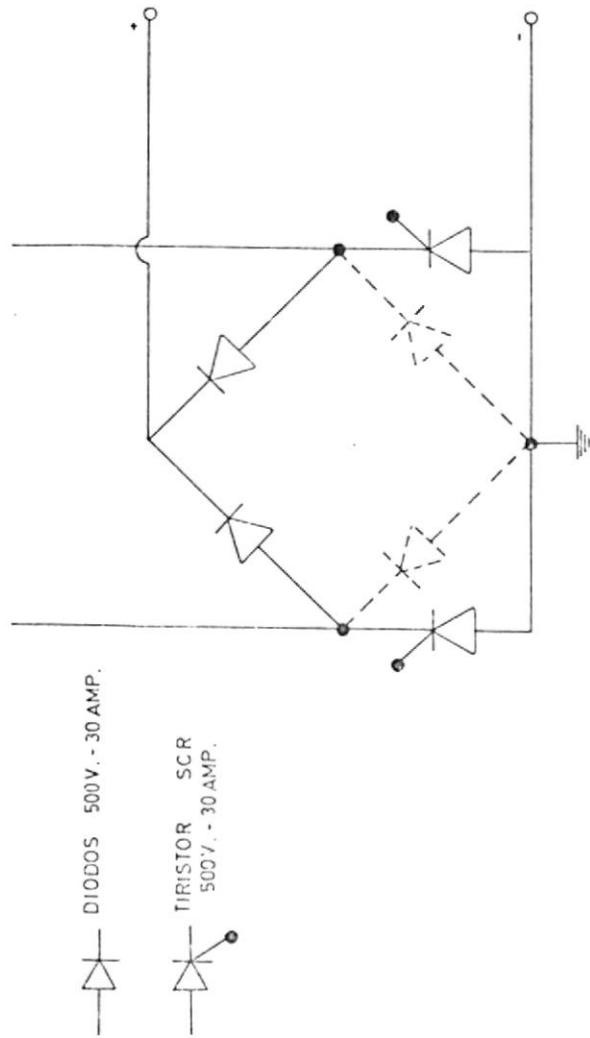
GRAFICOS DE  $C_1(t)$  Y  $C_2(t)$ .

Figura N° 17



BLOQUE N° 7

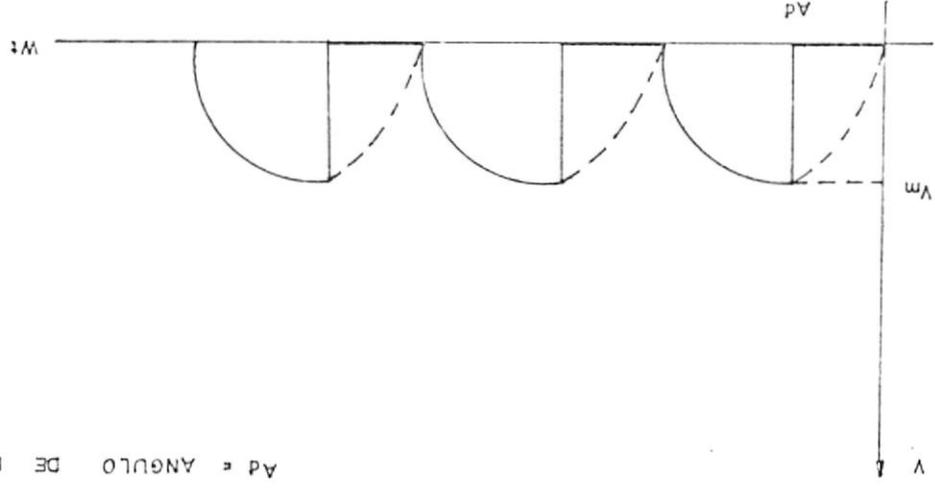
Figura N° 18



PUENTE RECTIFICADOR .

Figura N° 19

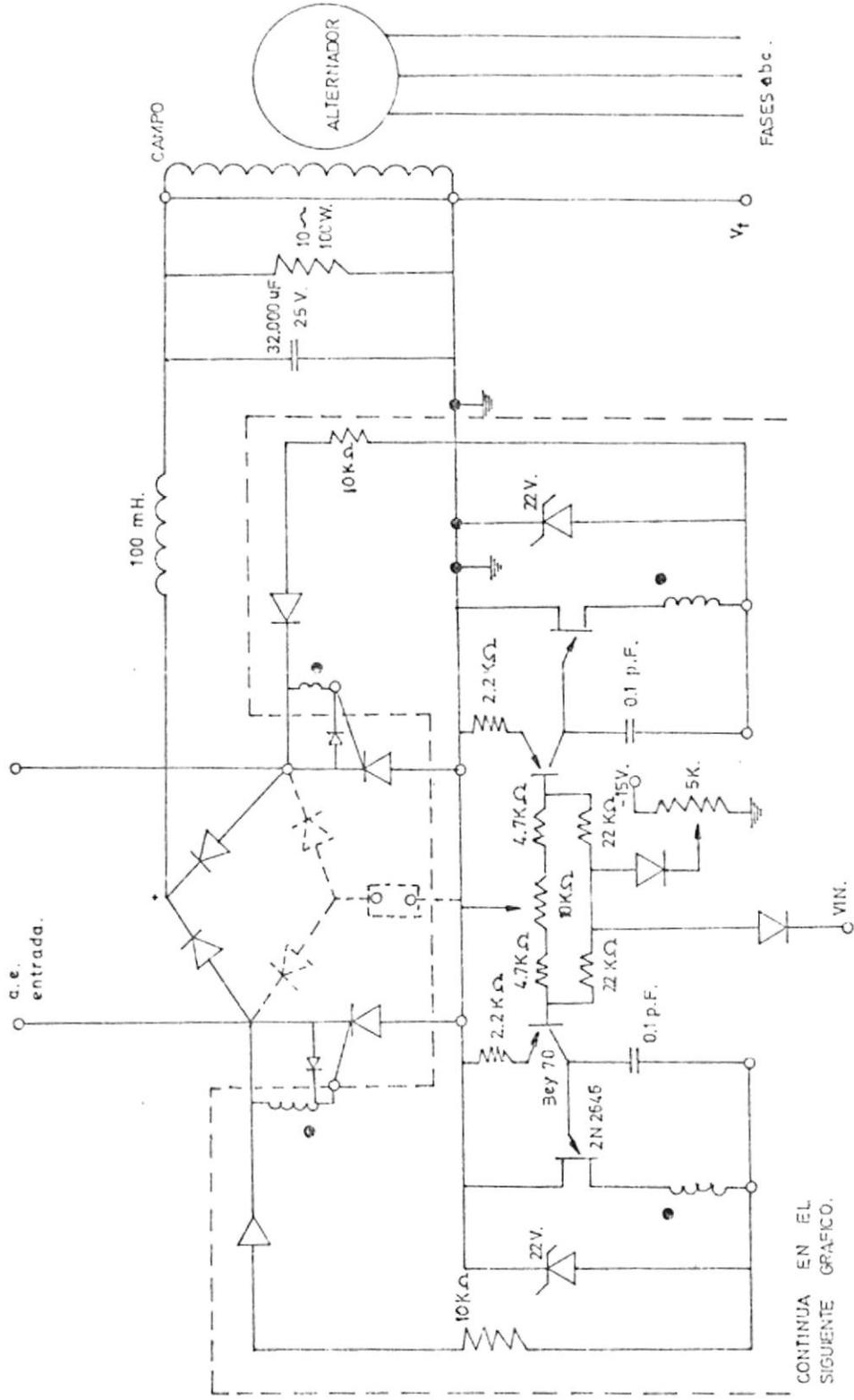
$V_m$  = VOLTAJE MAXIMO.  
 $\alpha$  = ANGULO DE DISPARO.



SALIDA DEL PUENTE RECTIFICADOR CON TIRISTORES.

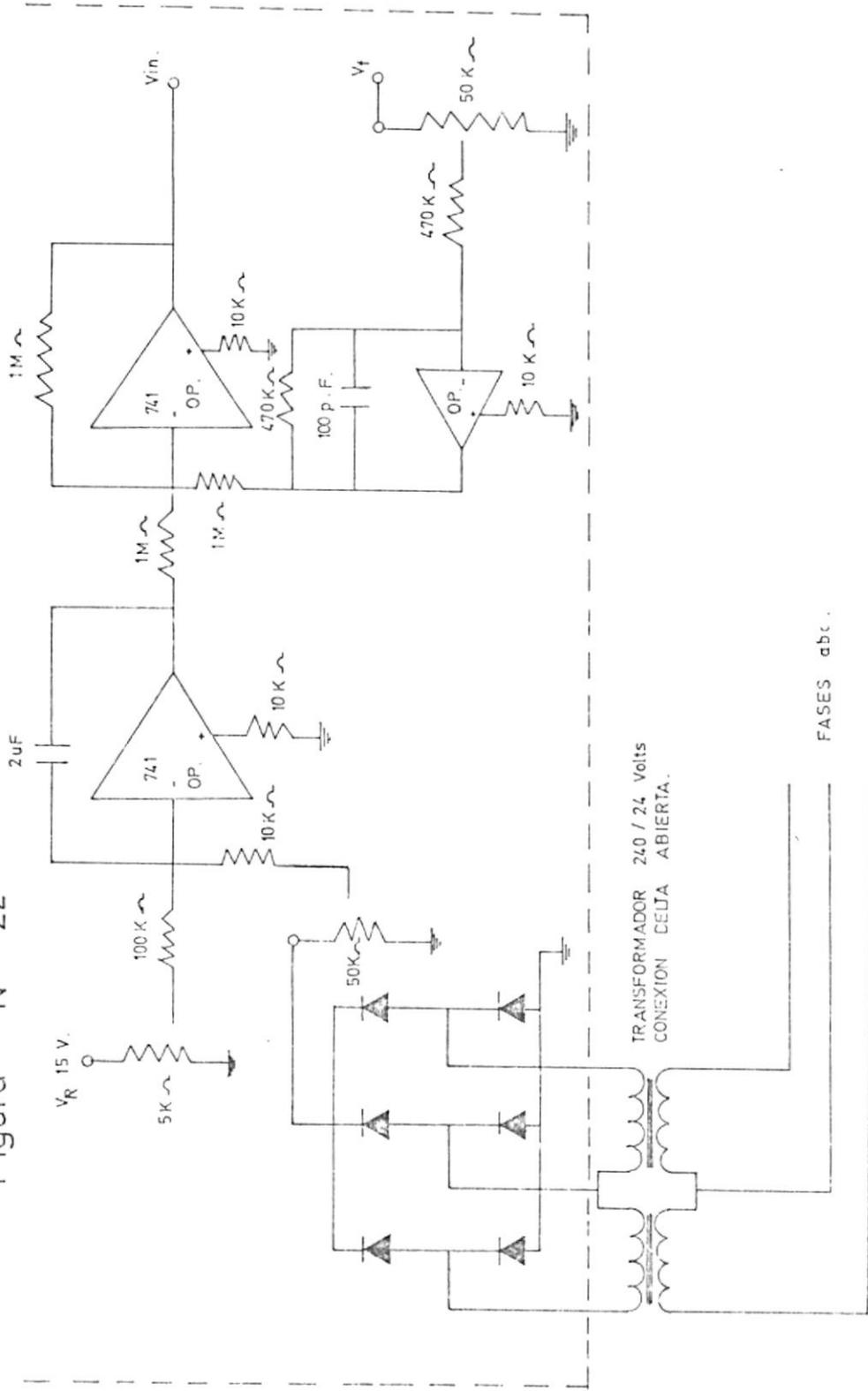


Figura N° 21



SISTEMA COMPLETO DEL REGULADOR.

Figura N° 22



SISTEMA COMPLETO CCN REGULADOR. (continuación)

Figura N° 23

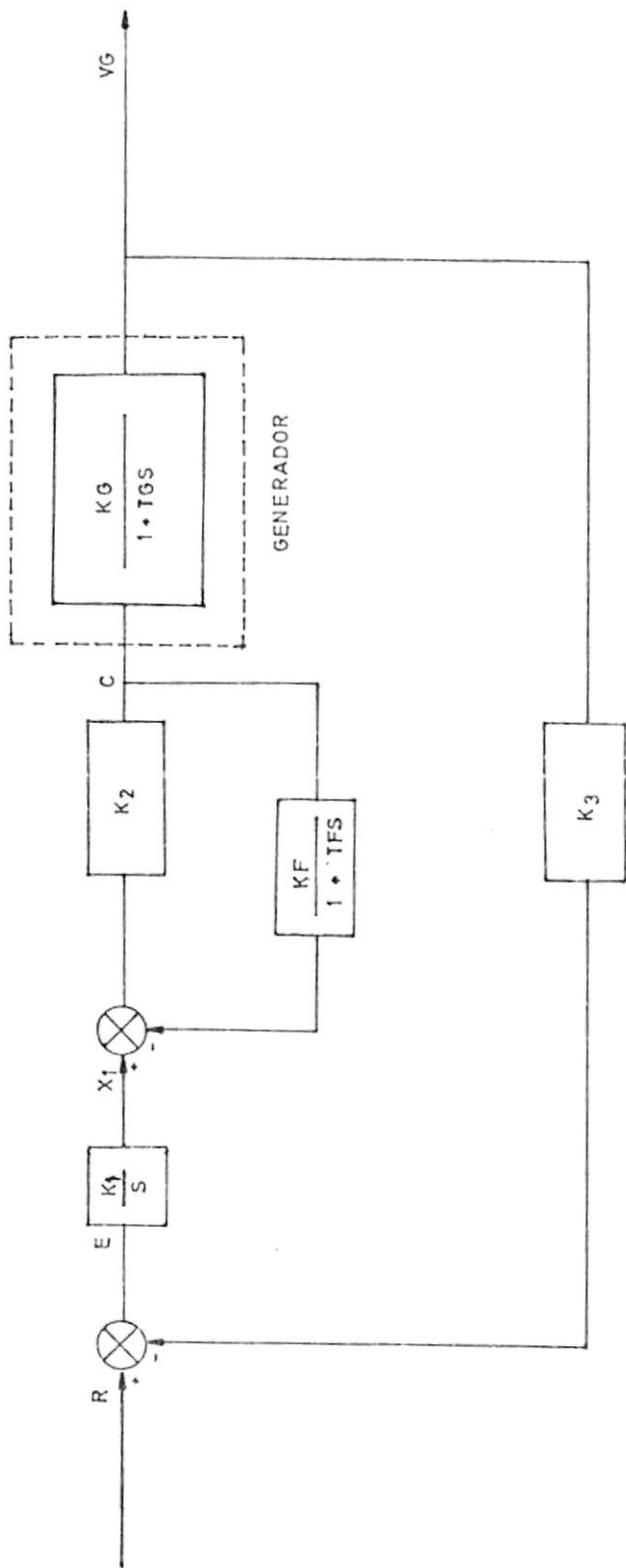
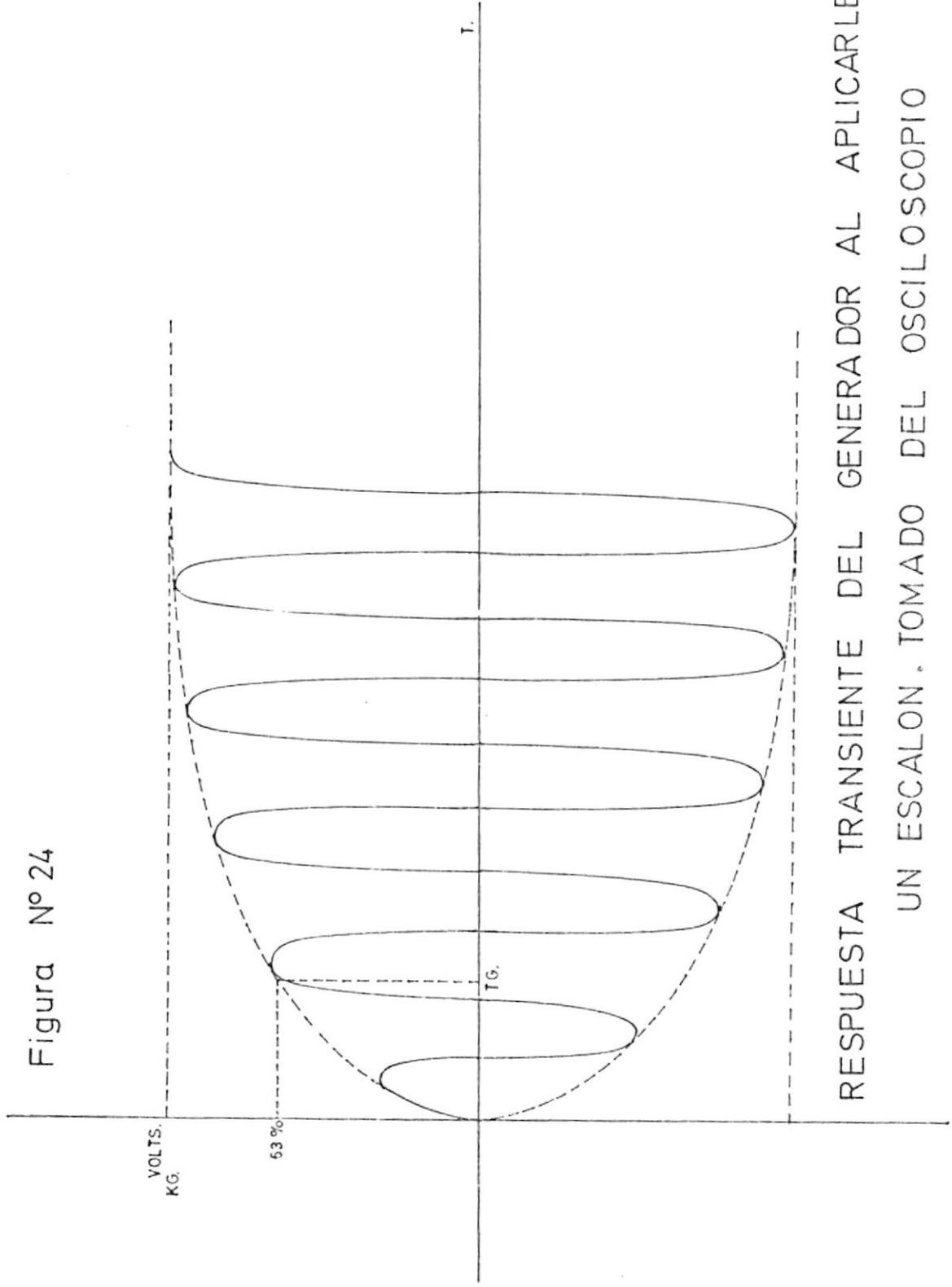


DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA COMPLETO.

Figura N° 24



RESPUESTA TRANSIENTE DEL GENERADOR AL APLICARLE  
UN ESCALON. TOMADO DEL OSCILOSCOPIO

Figura N° 25

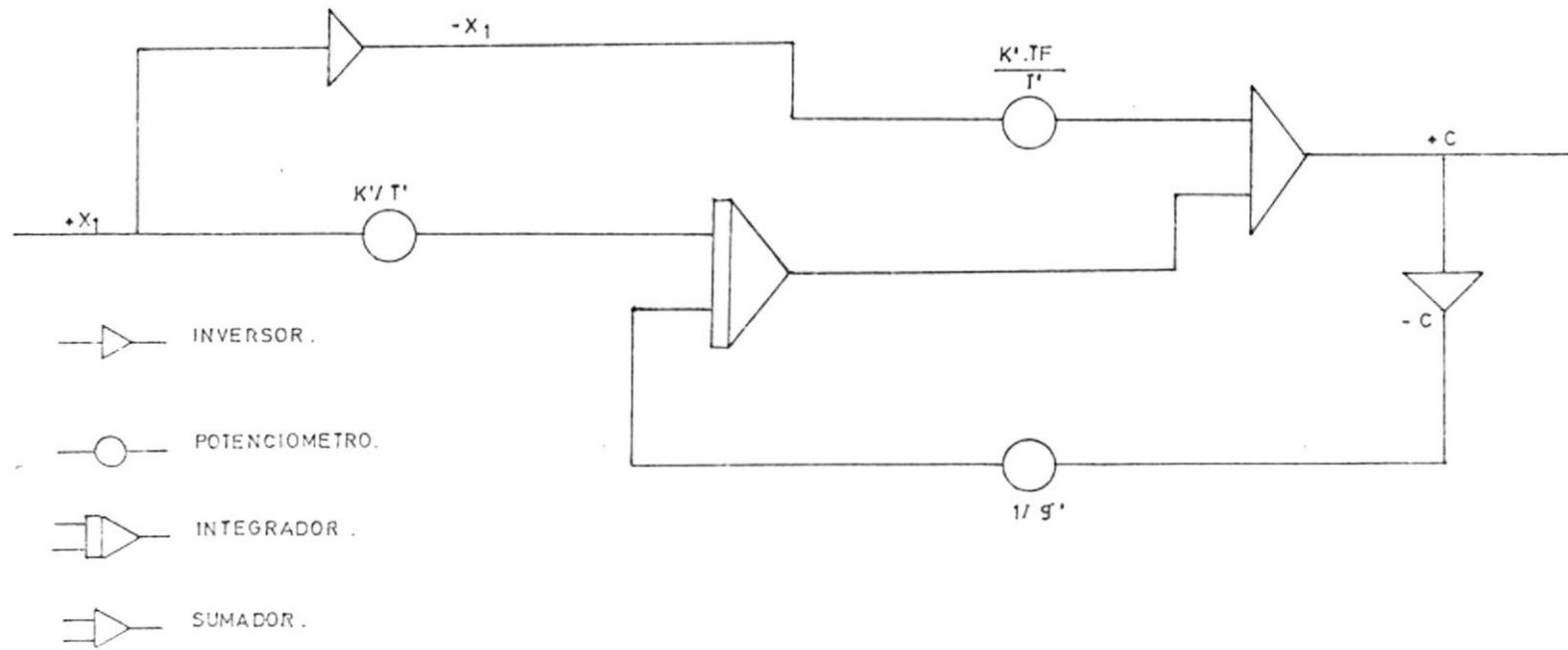


DIAGRAMA DE BLOQUES DEL REGULADOR.

Figura N° 26

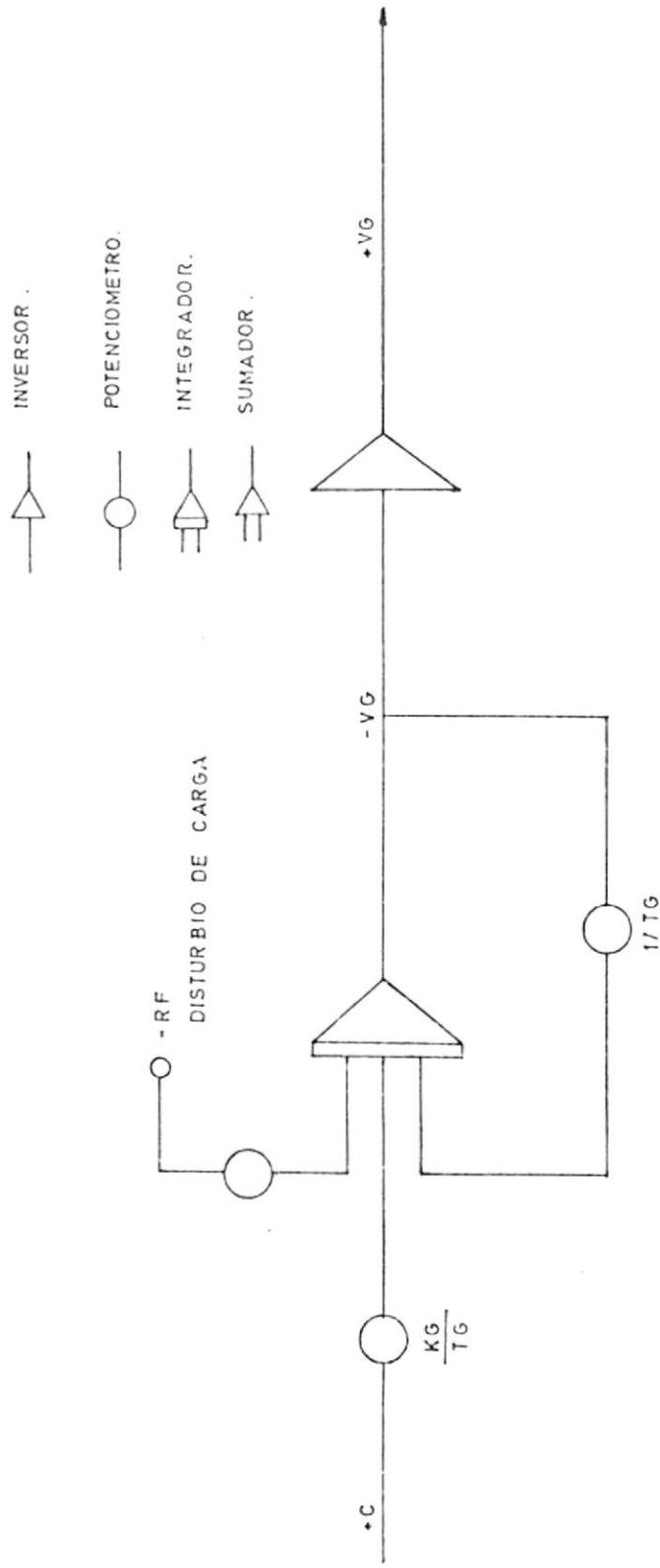


DIAGRAMA DE BLOQUES DEL GENERADOR.

Figura No 27

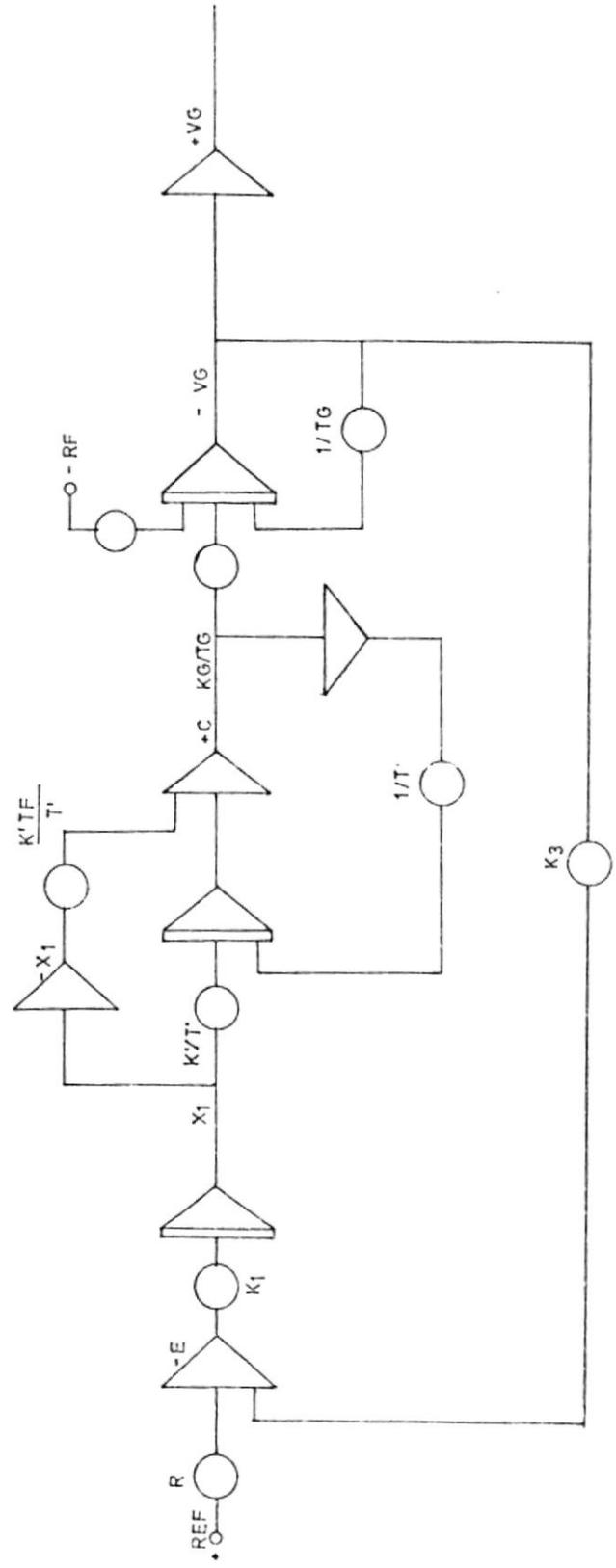


DIAGRAMA DE BLOQUES SIN ESCALAMIENTO.



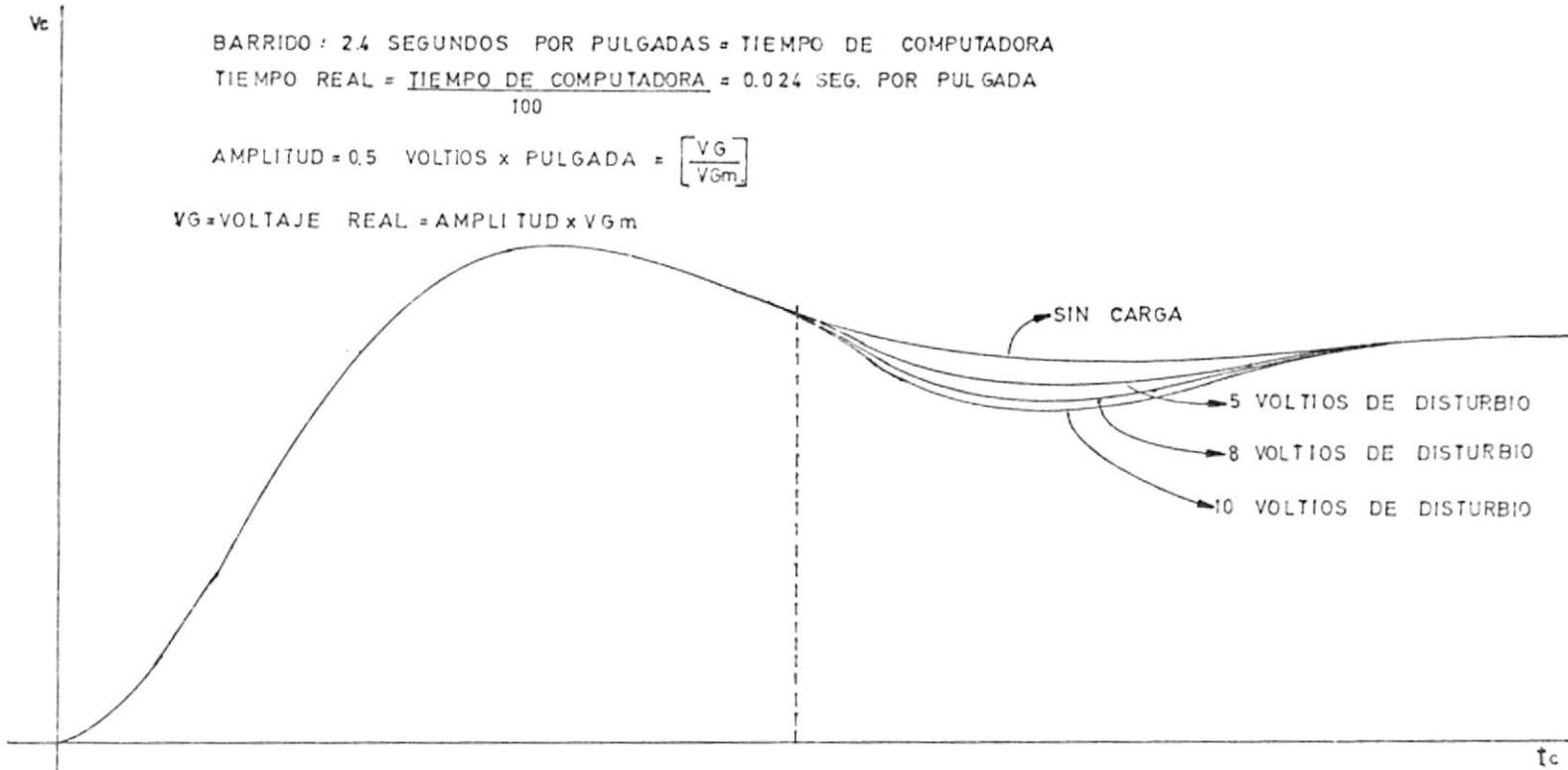


Figura N° 29

GRAFICO DE  $\frac{VG}{V_m}$  TOMADA DEL COMPUTADOR  
 ANALOGICO.

Figura N° 30

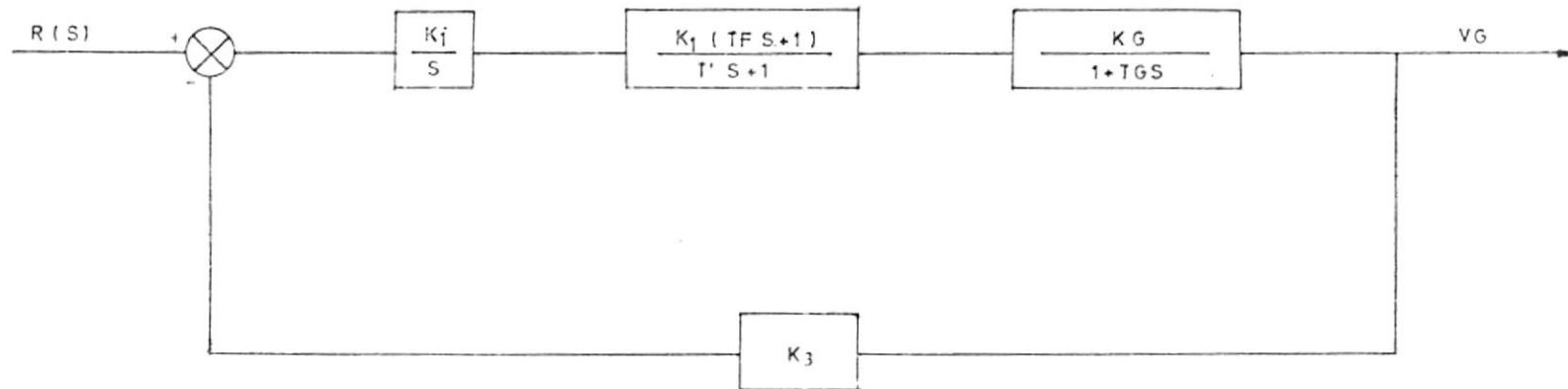


DIAGRAMA DE BLOQUES RESOLVIENDO EL LAZO INTERIOR DE LA FIGURA N° 23

Figura N° 31

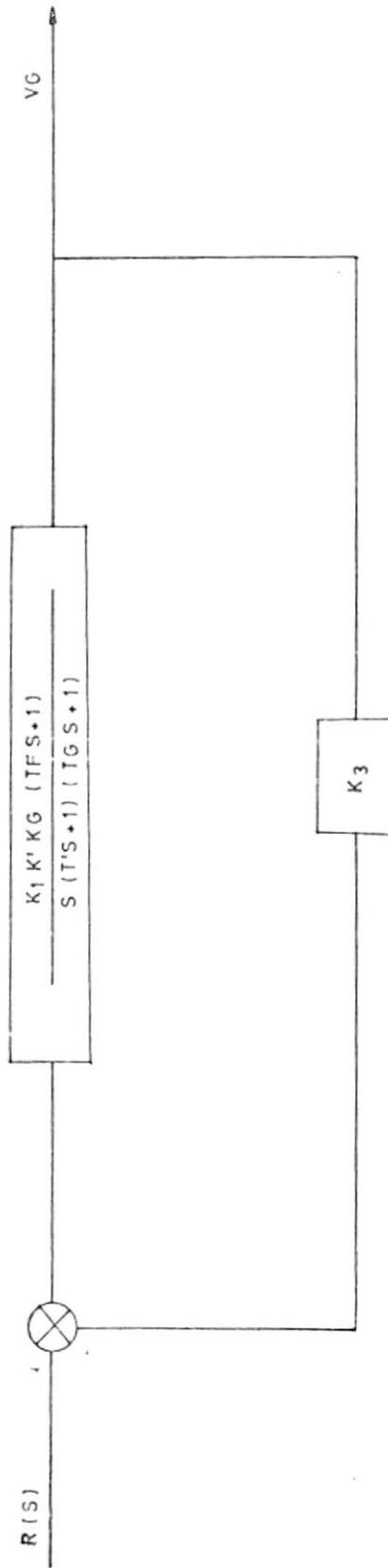


DIAGRAMA DE BLOQUES SIMPLIFICADOS

Figura N°32

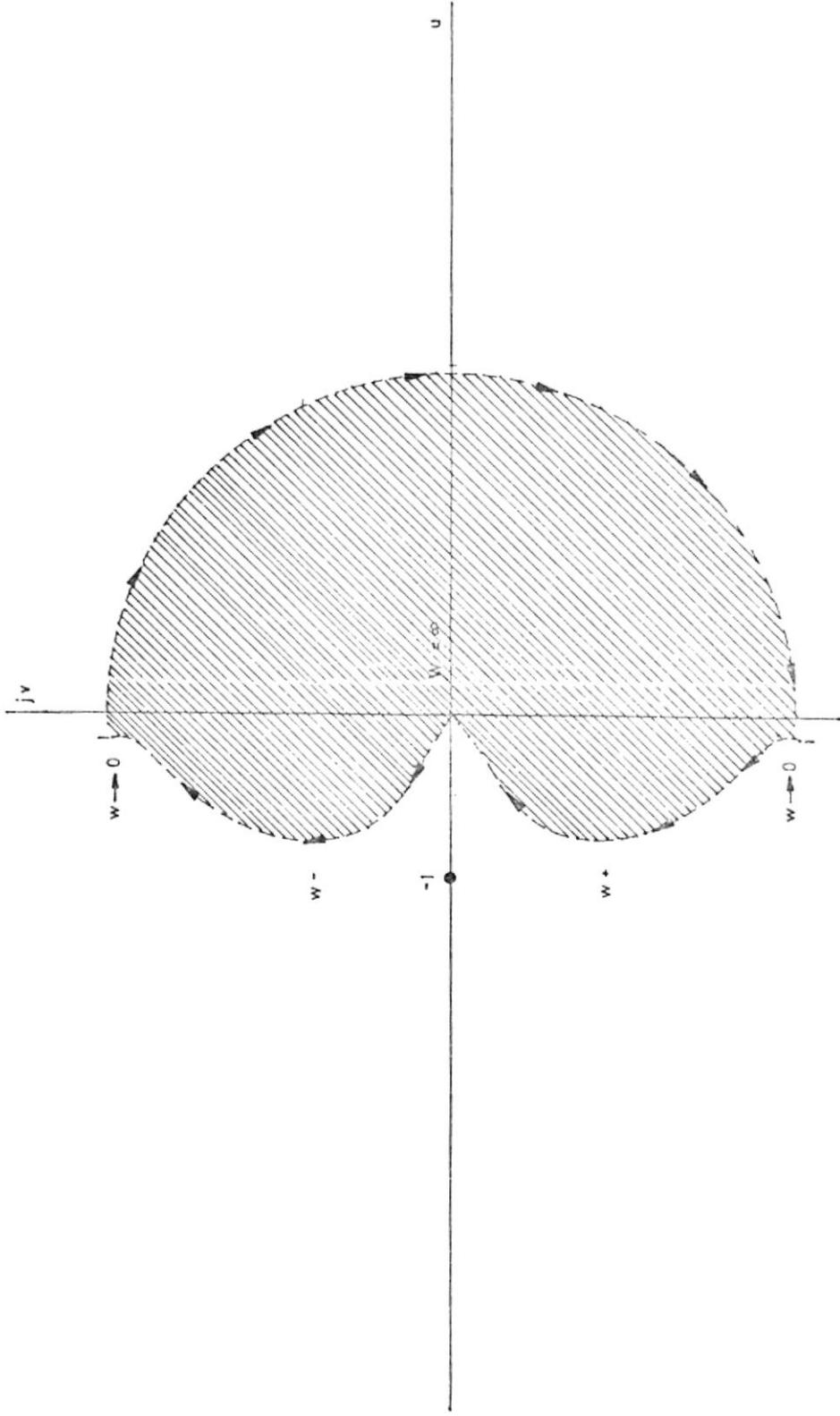


DIAGRAMA DE NYQUIST PARA  $GH(s) = \frac{KK3(TF S+1)}{S(T' S+1)(TGS+1)}$

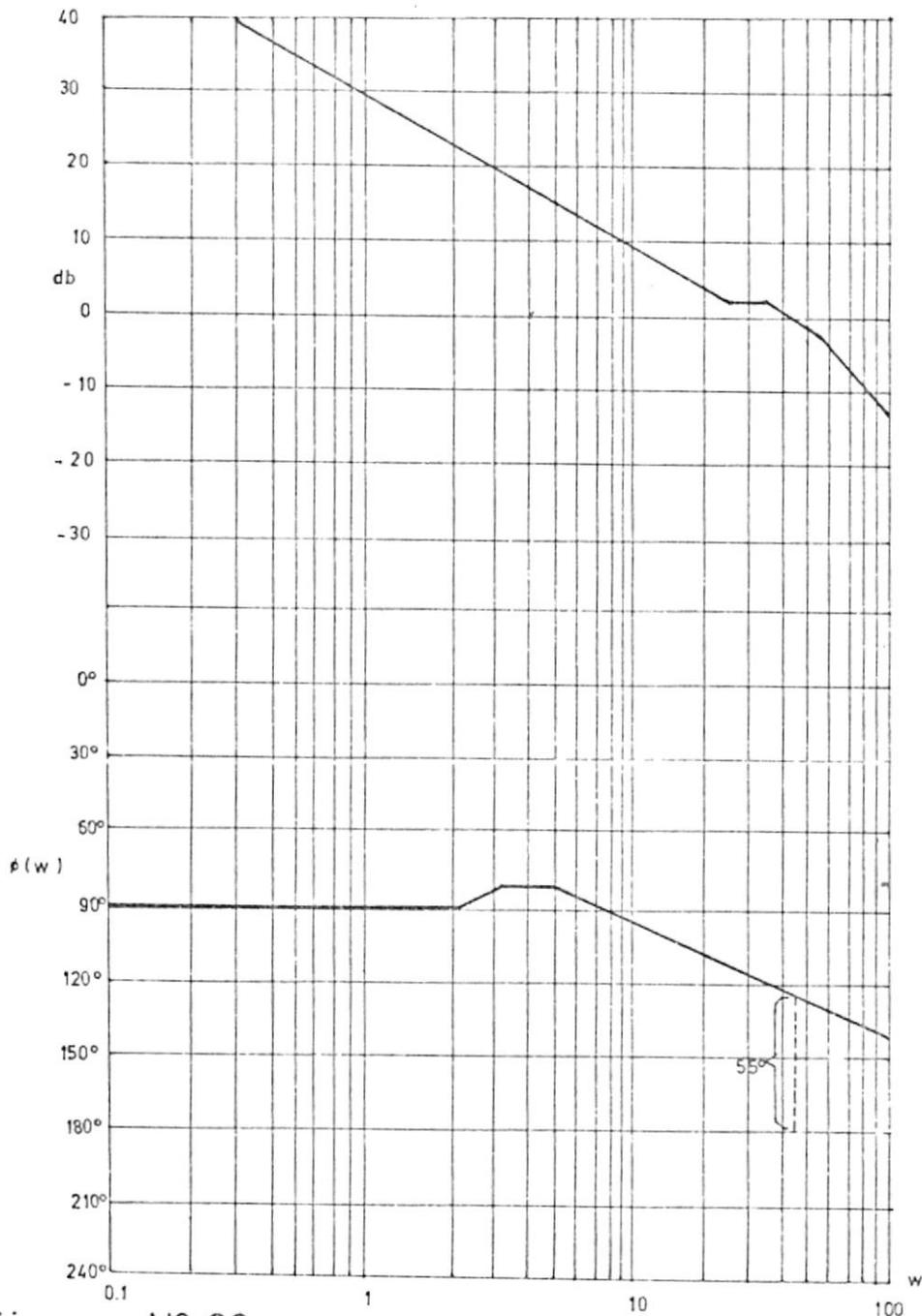


Figura N° 33

DIAGRAMA DE BODE APROXIMADO PARA

$$GH(jw) = \frac{31.6(0.047 S + 1)}{S(0.0188 S + 1)(0.028 S + 1)}$$

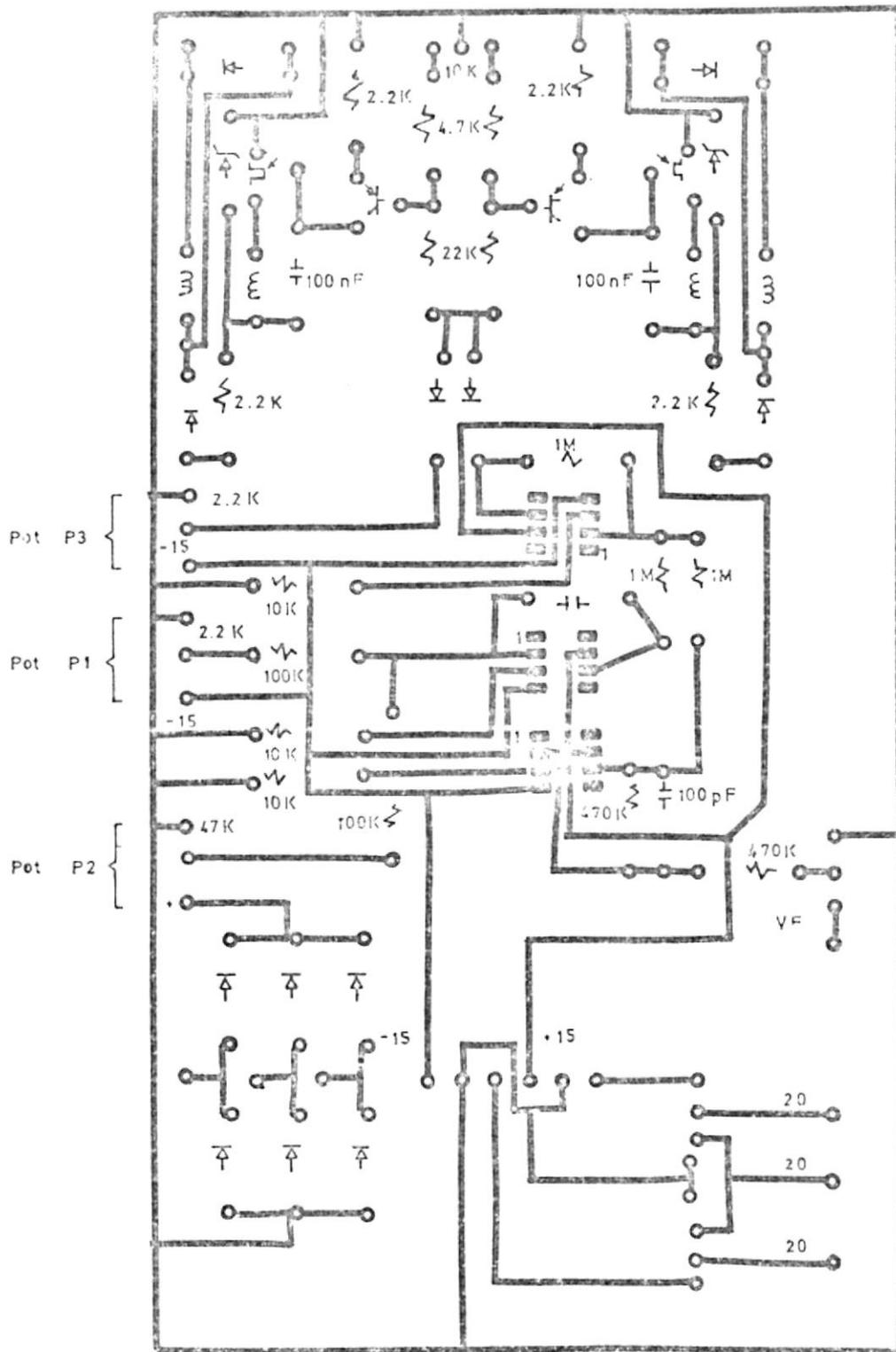
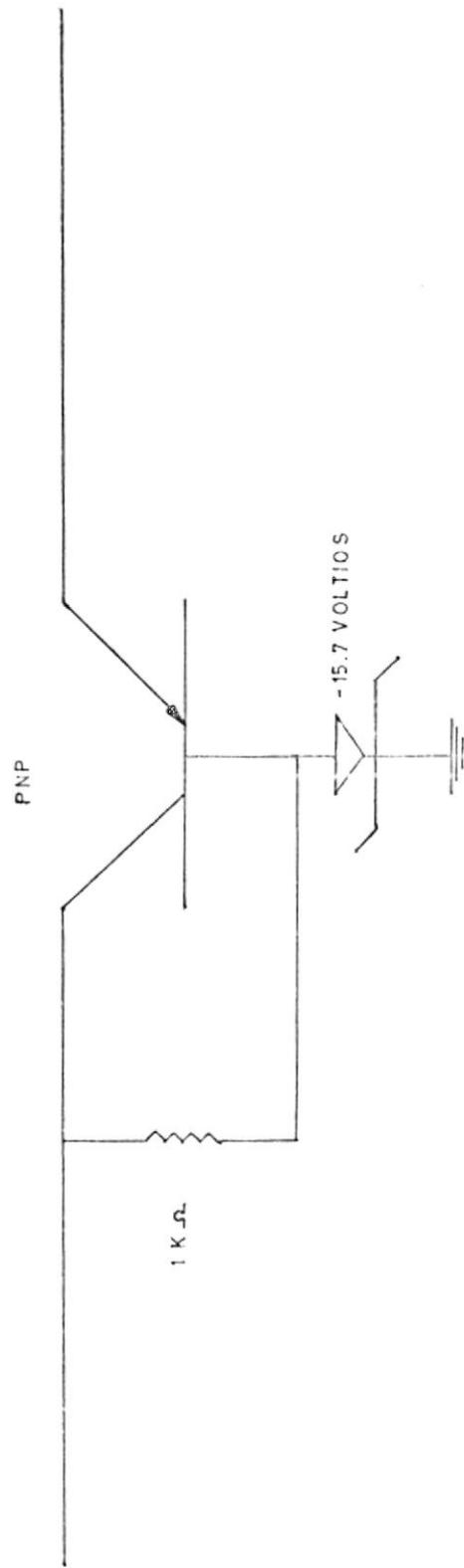


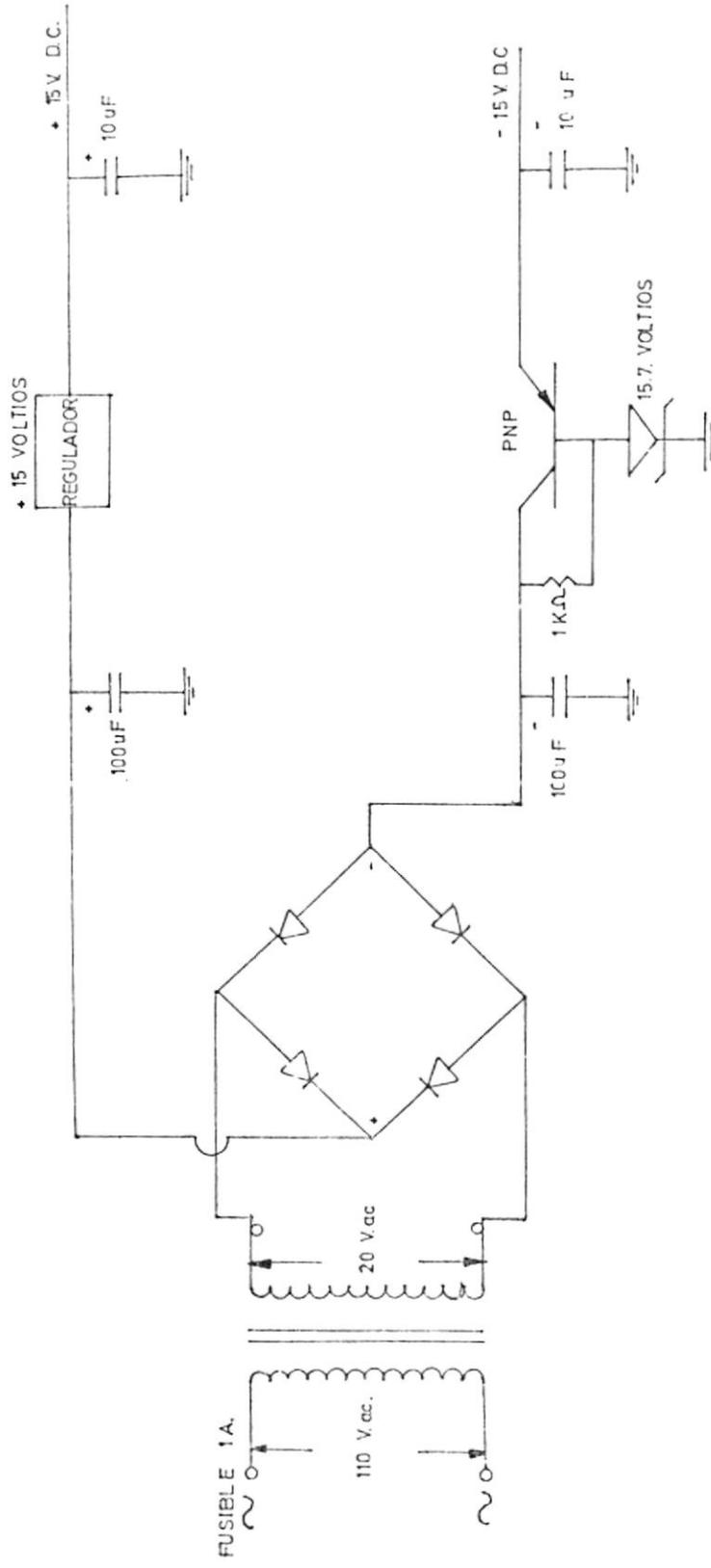
Figura N° 34 PLACA DEL CIRCUITO IMPRESO.

Figura N° 35



REGULADOR PARA  $-15\text{ V. DC.}$

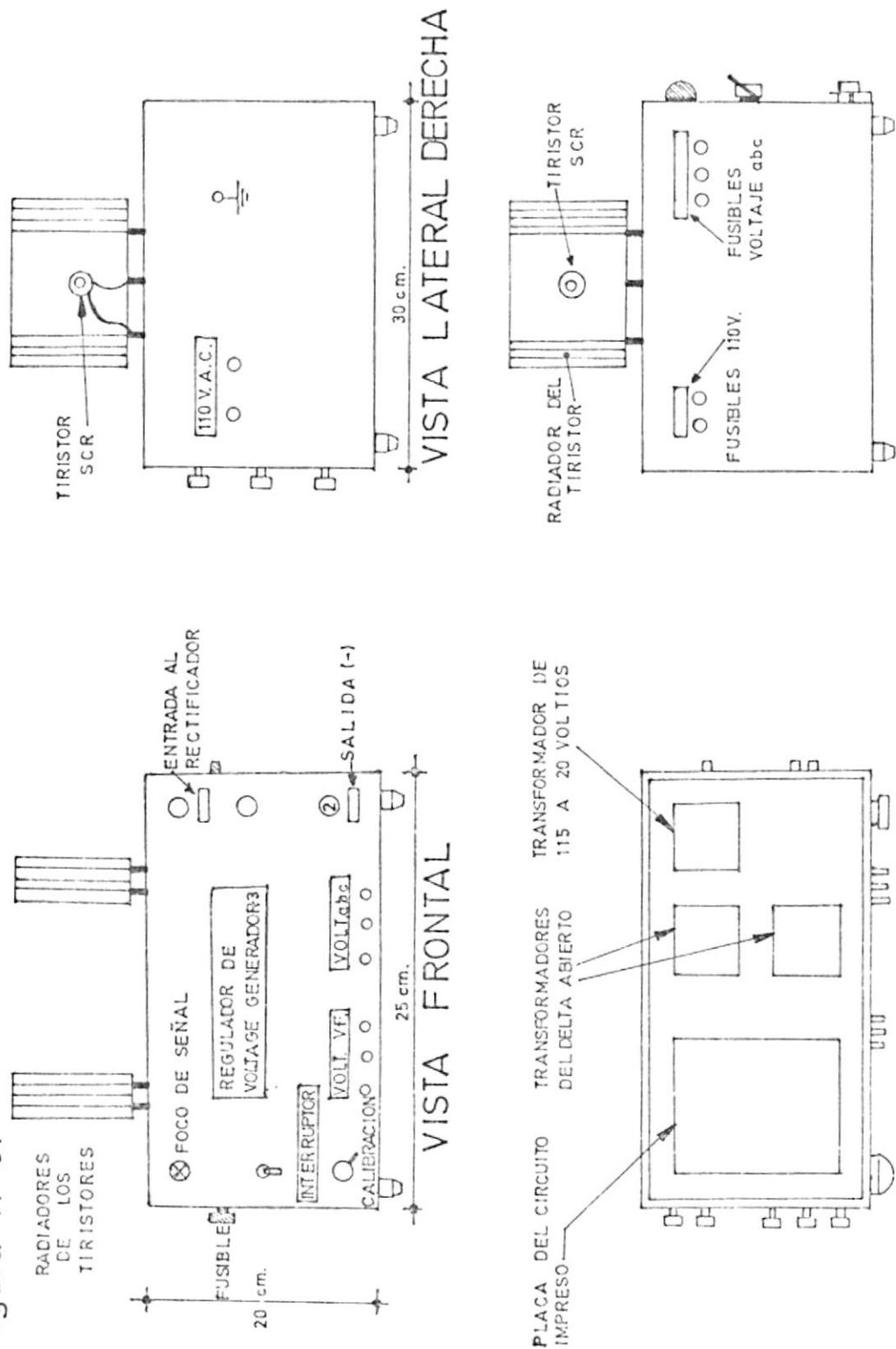
Figura N° 36



### FUENTE DE ALIMENTACION

+15 V. DC ; -15 V. DC

Figura No 37



VISTA INTERIOR SUPERIOR

VISTA LATERAL IZQUIERDA

GRAFICO VOLTAJE VS. POTENCIA A DIFERENTES NIVELES DE VOLTAJE.  
 FRECUENCIA: 60 HZ.

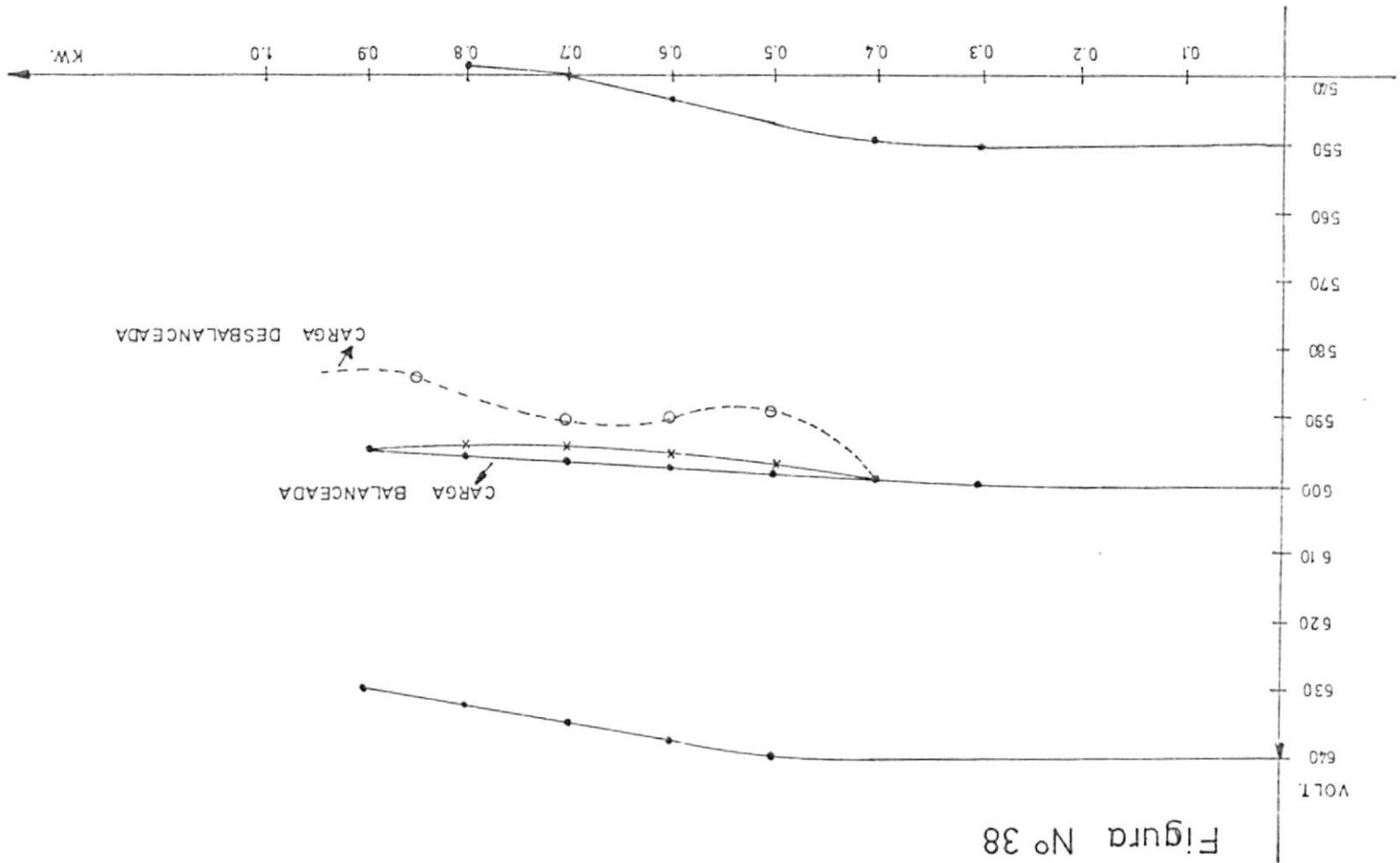


Figura No 38

GRAFICOS VOLTAJE VS. POTENCIA A DIFERENTES NIVELES DE FRECUENCIA. VOLTAJE: 600 V.

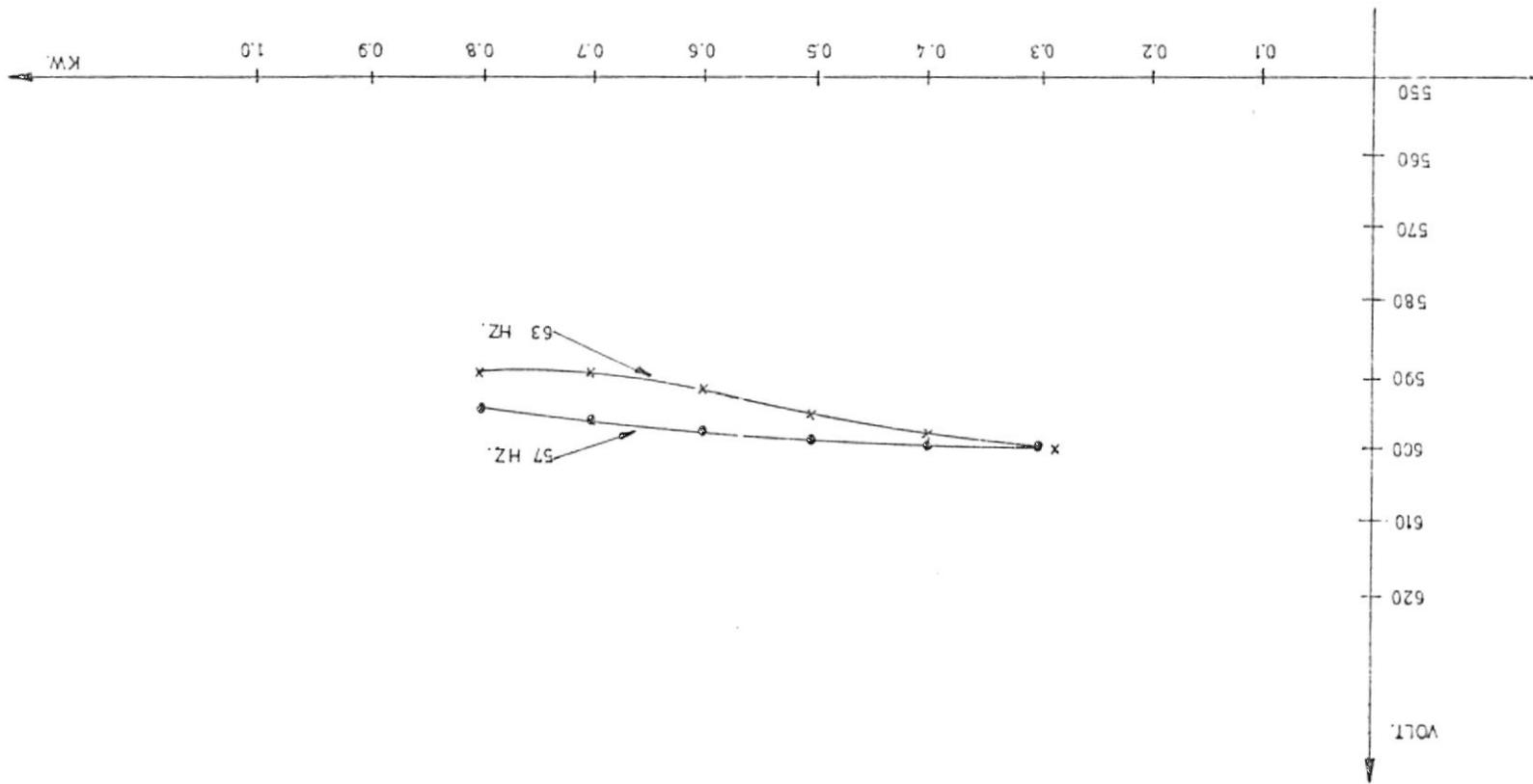


Figura No 39

ANEXO Nº 3

MANUAL DEL USUARIO

## MANUAL DEL USUARIO

### INTERCONEXION CON EL PANEL HAMDEN

Visto el panel Hamden de frente en su cara lateral izquierda se han adelantado unos terminales para la interconexión con el regulador de voltaje.

Los terminales rotulados con " Entrada al rectificador " deben ser conectados con sus terminales correspondientes del regulador de igual forma rotulado.

En el panel Hamden se encuentran dos terminales numerados con los números uno y dos conectados entre sí con una barra de cobre para su normal funcionamiento.

Para adaptar el regulador es necesario retirar el puente de cobre y unir el terminal numerado con el número dos con su correspondiente número dos del regulador.

Estos tres cables deben tener una capacidad mínima de conducción de treinta amperios.

En el panel Hamden se encuentran tres terminales que son las salidas de voltaje del generador número tres así como un terminal para el voltaje de campo  $B_f$  los que deben conectarse con los respectivos terminales de "fases a-b-c-" y "voltaje de campo".

La alimentación de 120 voltios así como la tierra debe traerse de los terminales del panel Hamden especificados como voltaje trifási-

co 208 voltios. Debe tenerse especial cuidado en conectar el regulador a 110-120 voltios: ya que otro voltaje causaría el daño del aparato.

Los tiristores ser deben ser conectados en la parte superior en los terminales rotulados como "Tiristores".

La tapa superior de la caja es abisagrada en su parte superior de tal forma que al abrir da acceso a la parte interior del aparato.

Los fusibles de la cara lateral izquierda del regulador deben tener una capacidad máxima de 1 amperio.

#### FUNCIONAMIENTO Y CALIBRACION

Una vez interconectado el aparato con el panel Hampden, se pone en funcionamiento el primo motor del alternador: luego se conecta el interruptor del regulador de voltaje. En este instante se enciende el foco en señal de que el regulador esta listo para funcionar.

Se conecta el campo del generador teniendo la perilla de la regulación del campo en el panel Hampden, en 0; luego se gira esta perilla a favor de las manecillas del reloj hasta que los tiristores disparan lo que sucede alrededor de la posición 7 a 9 de la escala del panel.

Una vez que dispararon los tiristores se puede reducir la señal de campo con la misma perilla hasta una posición entre 5 y 7.

Con la perilla del regulador rotulada con "Calibración" se ajusta el voltaje al cual se desea trabajar en un rango no mayor de más o menos 30 voltios del voltaje de régimen. La raya en el regulador indica la posición normal para trabajar en 600 voltios, leídos en

los instrumentos del panel Hamden.

Si se desea trabajar con un nivel de voltaje diferente a más o menos treinta voltios del voltaje de régimen se debe destapar el regulador y calibrar el potenciómetro marcado con  $P_2$  en la figura número treinta y cuatro la que nos muestra la réplica del circuito impreso.

El máximo y mínimo voltaje que se puede obtener es 650 y 450 voltios.

El potenciómetro  $P_3$  que se marca en la misma figura treinta y cuatro es el que prende o apaga el circuito de disparo de los tiristores; en ningún caso debe estar en la posición de tierra porque el circuito no funcionaría así como tampoco el regulador. Su posición normal es alrededor de los 7.5 voltios negativos.

El regulador tiene una caída de tensión normal de más o menos dos por ciento a plena carga.

## BIBLIOGRAFIA

1. DORF. Modern Control Systems, Addison-Wesley Publishing Company  
Inc., Massachusetts, 1974
2. RAVEN F. Ingeniería del Control Automático, H.A.S.A.  
Buenos Aires, 1971
3. WHITE-WOODSON. Electromechanical Energy Conversion,  
John Wiley & Sons, Inc., Publishers  
New York, 1959



A.F. 142264