

ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA DEL LITORAL

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA

"ESTUDIO COMPARATIVO DE RESPUESTAS DADAS POR
DIVERSOS TIPOS DE REGULADORES DE VOLTAJE
EN UN SISTEMA DE EXCITACION UTILIZANDO
SIMULACION ANALOGICA"

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

PRESENTADA POR:
HUGO PACHECO ALVAREZ

GUAYAQUIL

ECUADOR

1.981

AGRADECIMIENTO



D-6634

AL ING. LEO SALOMON F., Director
de tesis, por su ayuda y colabo-
ración en la realización de este
trabajo.

AL ING. HUGO VILLAVICENCIO,
Profesor del Departamento de
Ingeniería Eléctrica.

DEDICATORIA

A MIS PADRES

A MIS HERMANOS


ING. LEO SALOMON F.
Director de Tesis

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).

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Hugo Pacheco Alvarez', written in a cursive style with a horizontal line underneath.

HUGO PACHECO ALVAREZ

INDICE GENERAL

	Pág.
CAPITULO 1	
INTRODUCCION	8
CAPITULO 2	
RESEÑA DE LOS DIVERSOS REGULADORES DE VOLTAJE	9
2.1. Generalidades	9
2.2. Tipos de reguladores de voltaje	24
2.2.1. Electromecánicos	24
<i>Diactor</i>	25
<i>Silverstat</i>	33
<i>Allischalmers (BROWN-BOVERI)</i>	42
<i>Tirril</i>	50
2.2.2. Reguladores de voltaje con amplificador rotativo.	55
2.2.3. Reguladores de voltaje con amplificador magnético	61
2.2.4. Reguladores de voltaje de estado sólido.	67
CAPITULO 3	
DESCRIPCION DE LOS REGULADORES A SER ANALIZADOS	75
3.1. Razones de selección	75
3.2. Regulador de voltaje con amplidina	76
3.3. Regulador de voltaje <i>Silverstat</i>	98
CAPITULO 4	
SISTEMA A SER ANALIZADO	100

	Pág.
4.1. Descripción del sistema	100
4.2. Valores a ser empleados	102
CAPITULO 5	
SIMULACION DEL SISTEMA	115
5.1. Diagramas de bloques	115
5.2. Diagramas para aplicarlos al compu- tador.	120
5.3. Escalamiento	127
5.4. Resultados de la simulación en el dominio del tiempo	144
CAPITULO 6	
ANALISIS DE LOS RESULTADOS	170
CAPITULO 7	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	193
APENDICE A	197
APENDICE B	201
APENDICE C	203
BIBLIOGRAFIA	207

CAPITULO 1

INTRODUCCION

El motivo fundamental del presente trabajo es analizar el comportamiento de la excitatriz y en especial el del regulador de voltaje dentro de la operación y funcionamiento de un generador de poder.

En la primera parte se hace una descripción de los diversos tipos de reguladores de voltaje y sus componentes principales. Para efecto del análisis del comportamiento se emplea el computador analógico (MINIAC) del laboratorio de control automático de la ESPOL y se efectúa la simulación de 2 tipos de reguladores diferentes dentro del sistema de control de excitación de una unidad generadora con turbina a vapor de 33 MW.

Para cumplir con la finalidad de este trabajo se desarrolla la excitatriz y el regulador de voltaje en su totalidad, simplificando al máximo las ecuaciones del generador de poder.

El comportamiento de la excitatriz se lo analiza en el dominio del tiempo para lo cual se calculan sus principales características con 2 reguladores de voltaje.

CAPITULO 2

RESEÑA DE LOS DIVERSOS REGULADORES DE VOLTAJE

2.1. GENERALIDADES

La finalidad primordial del regulador de voltaje es mantener el voltaje de salida del generador de poder dentro de un rango preestablecido.

Al producirse variaciones externas como sobrecargas o cortocircuitos, el voltaje del generador tiende a variar interviniendo inmediatamente el regulador de voltaje, el cual de acuerdo a su circuito sensor de voltaje actuará para restablecer el generador a su valor de voltaje operativo.

El regulador de voltaje normalmente actúa de una manera indirecta, es decir que opera en el campo de la excitatriz para que esta a su vez intervenga en el campo principal del generador. El sistema regulador-excitatriz que utiliza tiristores es el único tipo que actúa directamente sobre el campo del generador.

Si una excesiva sobrecarga ocasiona la caída de voltaje del generador, el regulador por medio de los transforma

dores de potencial, el filtro rectificador y su bobina sensora detecta este decremento del voltaje. Inmediatamente y dependiendo del tipo de regulador disminuye la resistencia del campo de la excitatriz y por lo tanto aumenta el voltaje en el campo del generador restableciendo su voltaje.

Para evitar el denominado sobrealcance, es decir el movimiento excesivo de sus componentes electromecánicos, los reguladores utilizan el denominado circuito de amortiguamiento o de estabilización que no es otra cosa que un transformador de potencial conectado en los terminales de la excitatriz, cuya finalidad es sensor las variaciones bruscas de voltaje en los terminales de la excitatriz y enviar una señal a la bobina sensora del regulador.

Otro circuito típico de los reguladores de voltaje es el denominado compensación de corriente reactiva utilizado cuando el generador trabaja en paralelo con otros y debe efectuar una repartición equitativa de la corriente reactiva.

Algunos reguladores utilizan un reactor y otros una resistencia teniendo en cada caso una conexión particu-

lar. En las figuras 2-1, 2-2 y 2-3 se observan las conexiones y diagramas vectoriales de este circuito.

Más adelante se explicarán cada uno de estos circuitos detalladamente.

De una manera general se clasifica a los reguladores de voltaje en:

- electromecánicos: Acción directa
Acción indirecta
- Con amplificador rotativo
- Con amplificador magnético; y
- estado sólido

En las figuras N° 2-4 a 2-9, se presentan una serie de configuraciones con los principales sistemas de excitación y los respectivos reguladores de voltaje que son: Excitatriz con escobillas, excitatriz sin escobillas, excitatriz sin escobillas con magneto permanente y excitación estática.

SISTEMAS DE EXCITACION PARA GENERADORES DE GRAN CAPACIDAD

En vista de que la capacidad de los generadores ha aumentado y se han desarrollado mejores y más eficientes

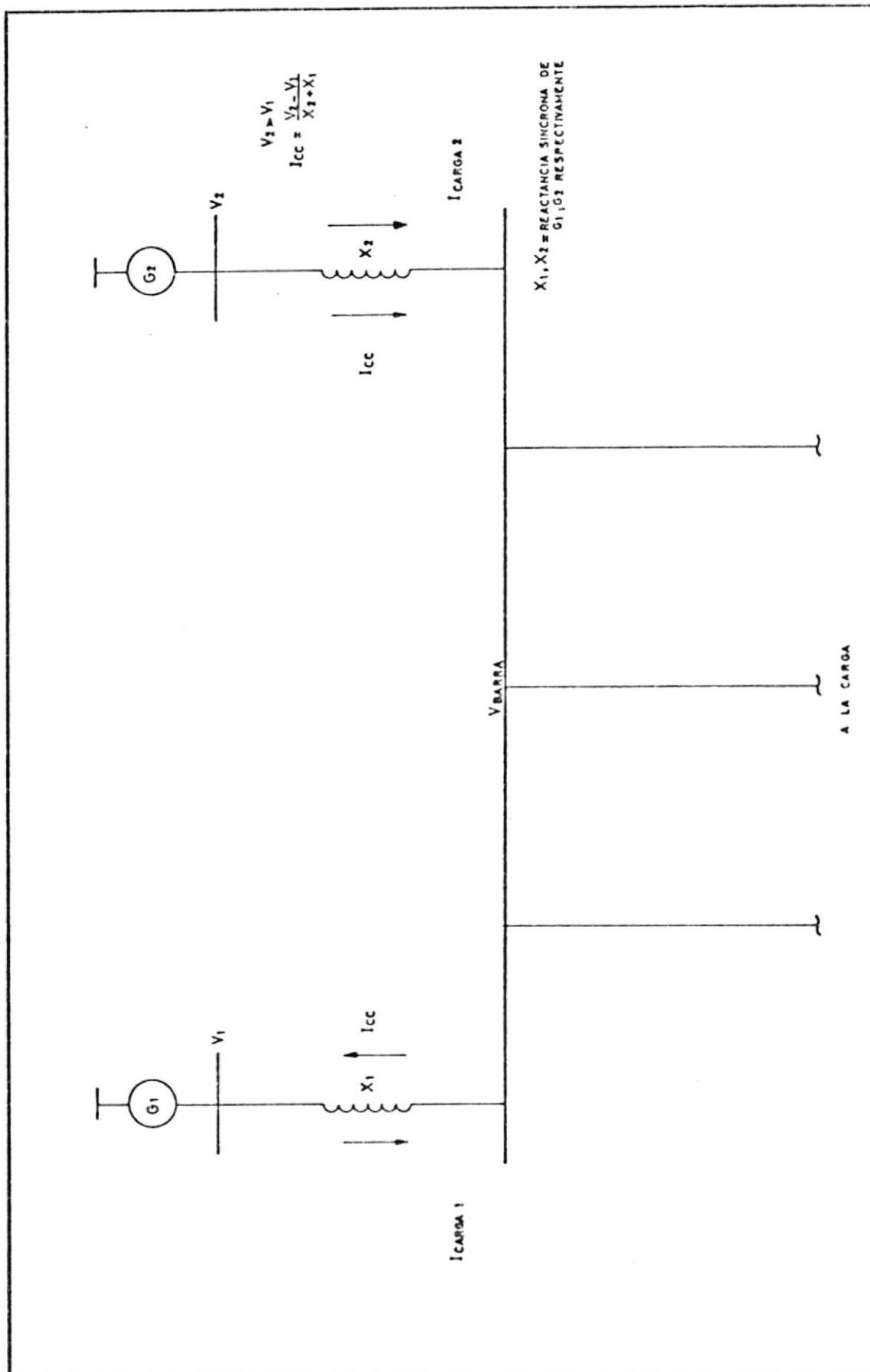


FIG. N.º 2-1. GENERACION EN PARALELO CON VOLTAJES INTERNOS DESIGUALES PRODUCIENDO CIRCULACION DE CORRIENTE (I_{cc})

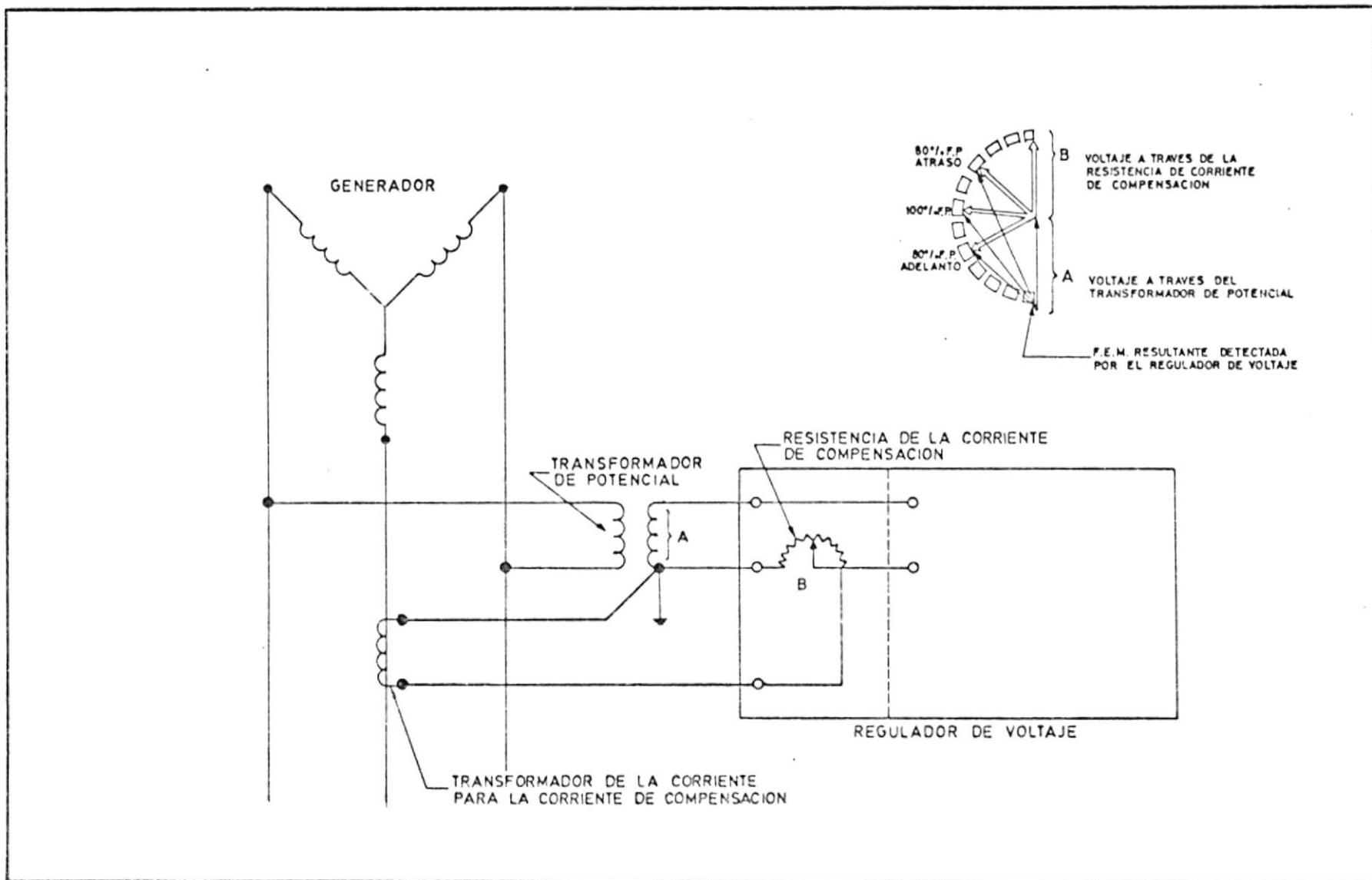


FIG. N.º 2-2. CORRIENTE DE COMPENSACION

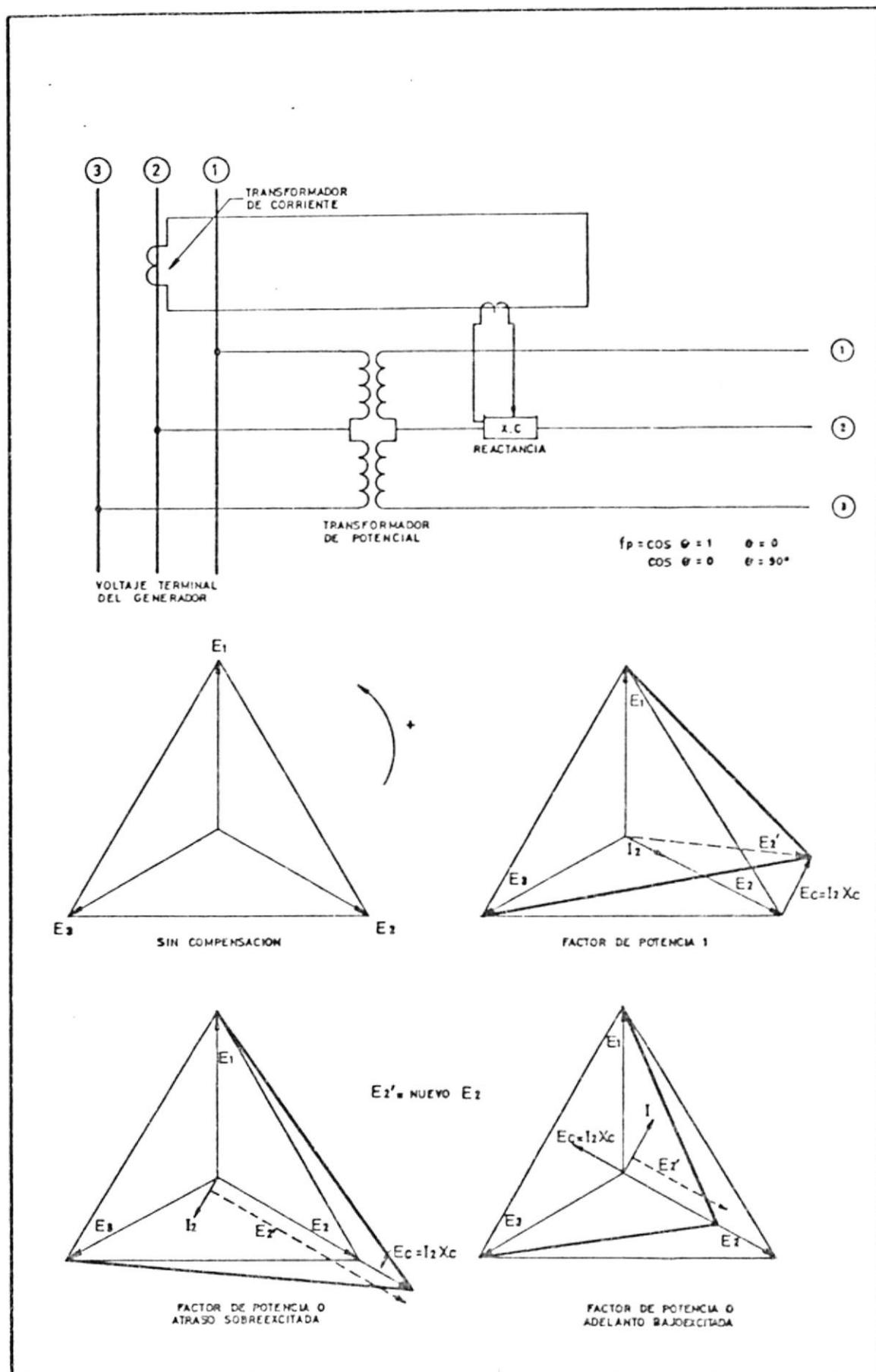


FIG. N.º 2-3. DIAGRAMA VECTORIAL DEL CIRCUITO DE COMPENSACION DE CORRIENTE REACTIVA

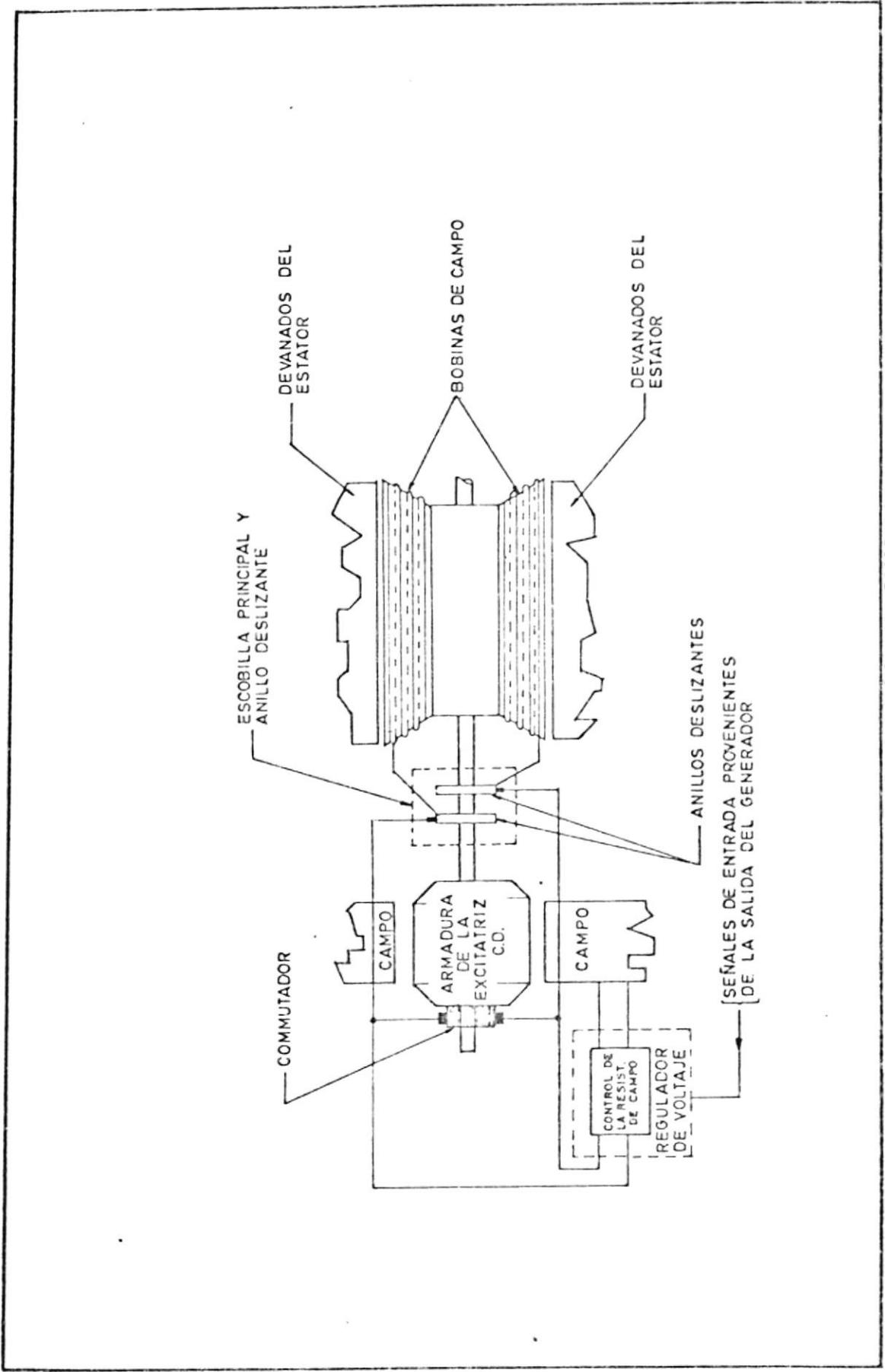


FIG. N.º 2-4, SISTEMA DE EXCITACION CON ESCOBILLA (ESTACIONARIA)

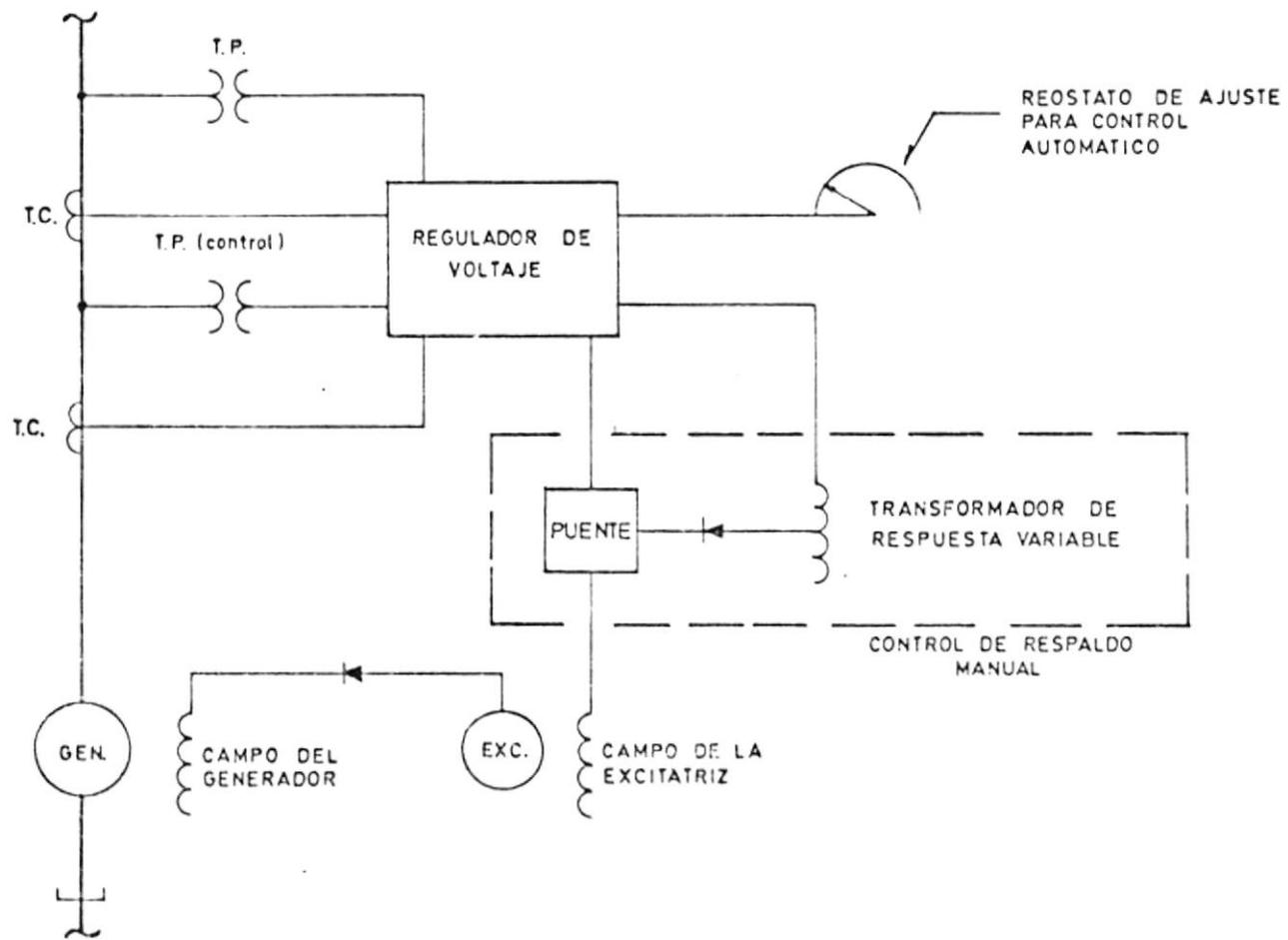


FIG. N.º 2-5. DIAGRAMA ESQUEMATICO DE UNA LINEA PARA UN SISTEMA DE CONTROL DE UN GENERADOR (EXCITATRIZ ROTATIVA SIN ESCOBILLAS)

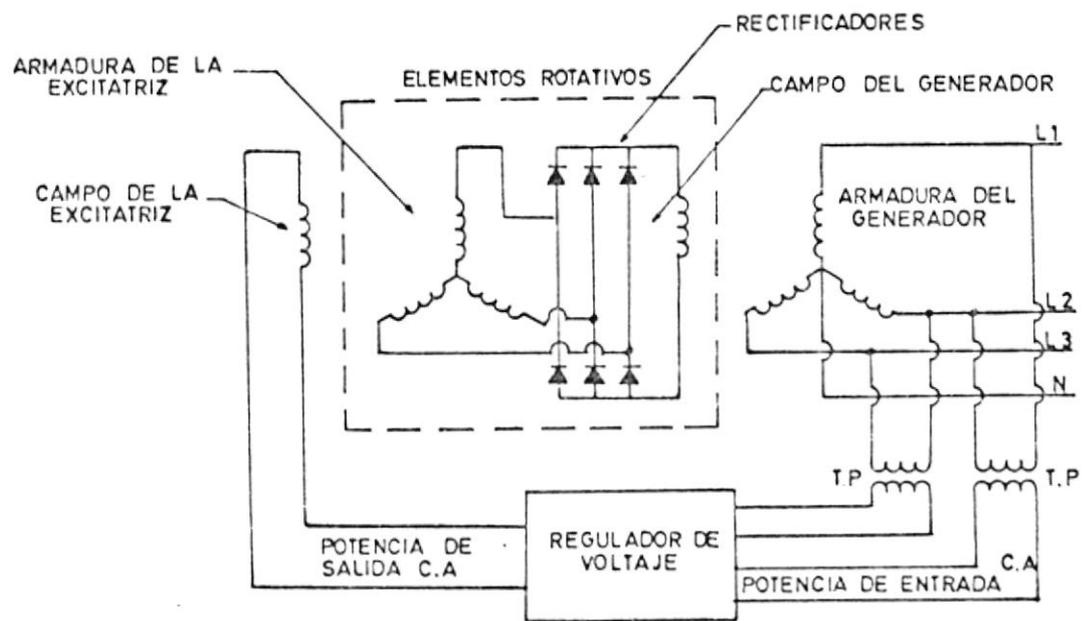
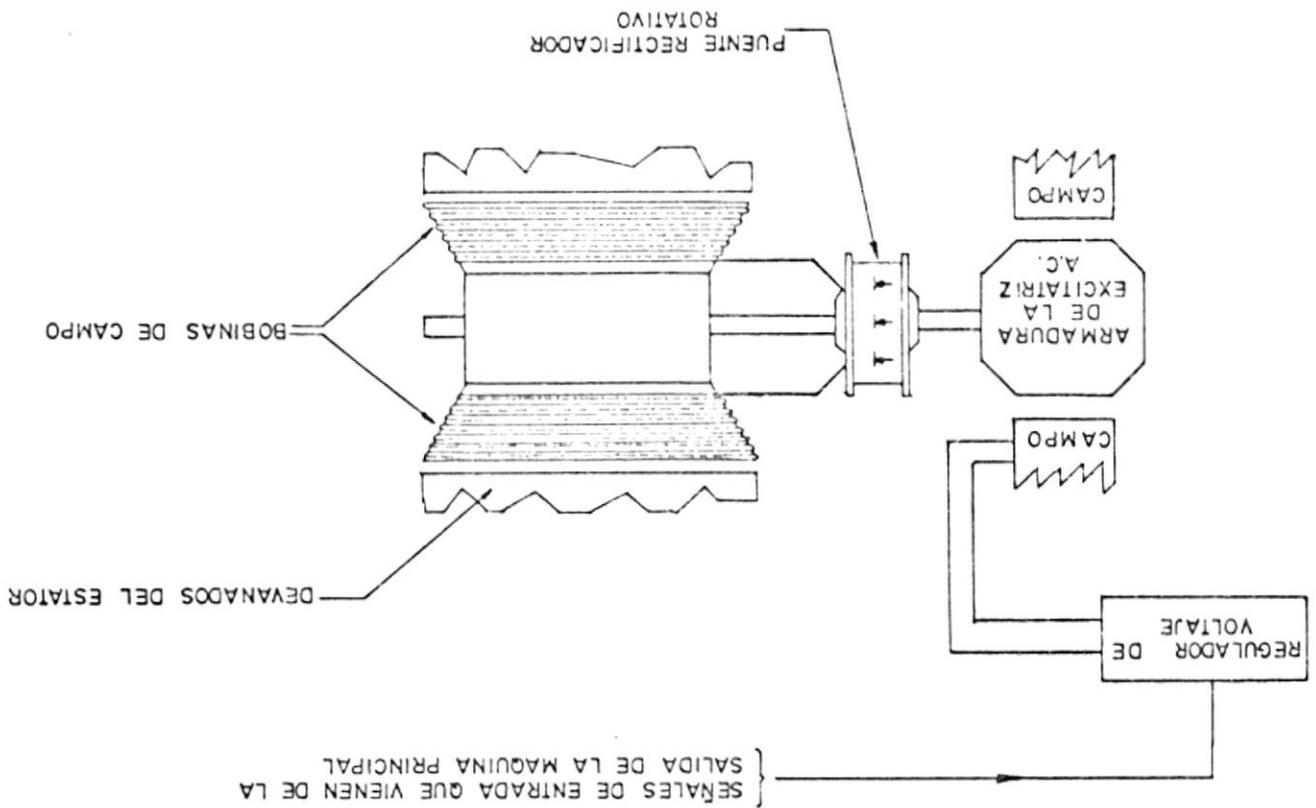


FIG. Nº2-6. DIAGRAMA ESQUEMATICO - EXCITATRIZ ROTATIVA SIN ESCOBILLAS

FIG. Nº 2-7. SISTEMA DE EXCITACION SIN ESCOBILLAS



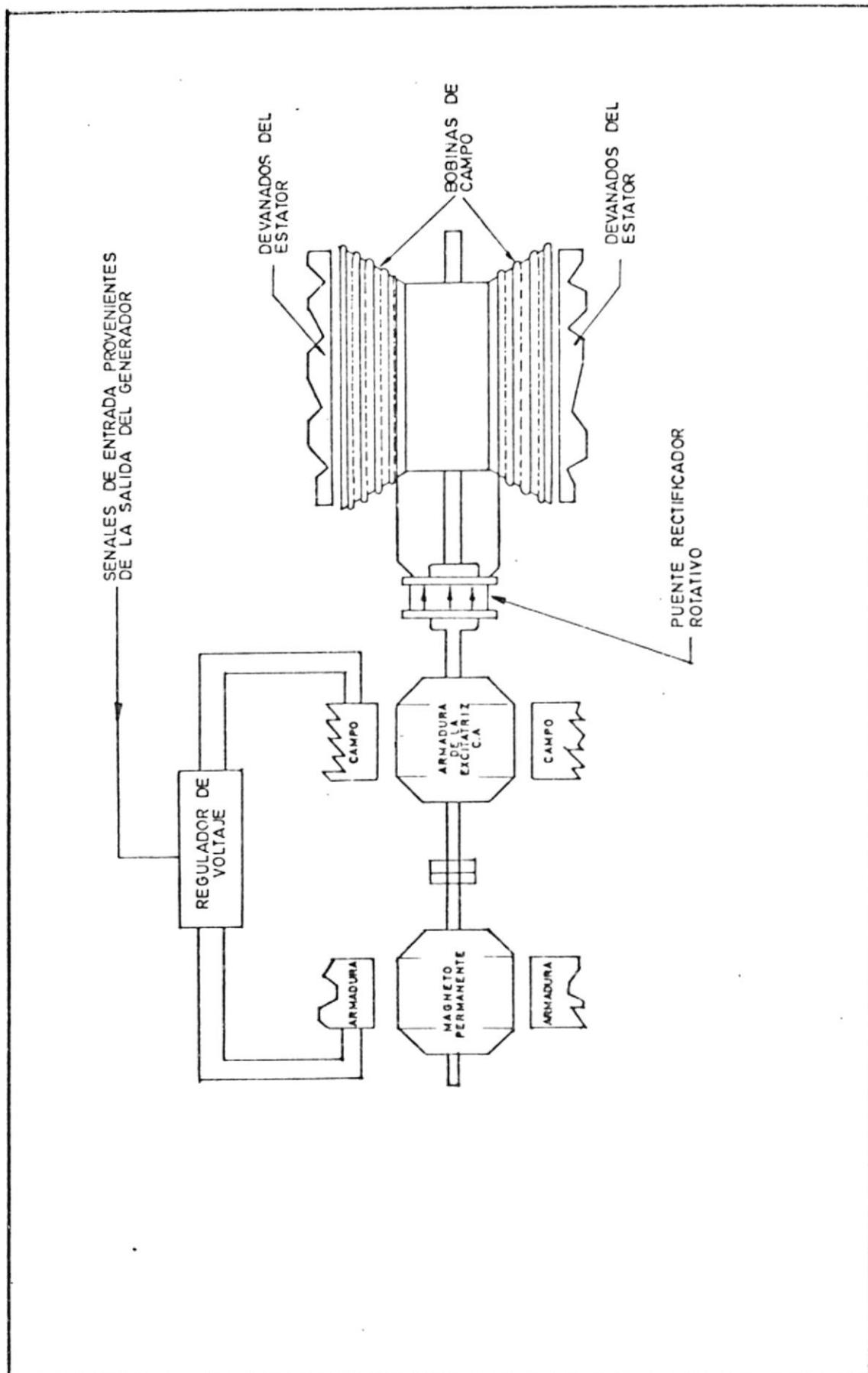


FIG. N.º 2-8. SISTEMA DE EXCITACION SIN ESCOBIILLAS CON GENERADOR DE MAGNETO PERMANENTE (PMG)

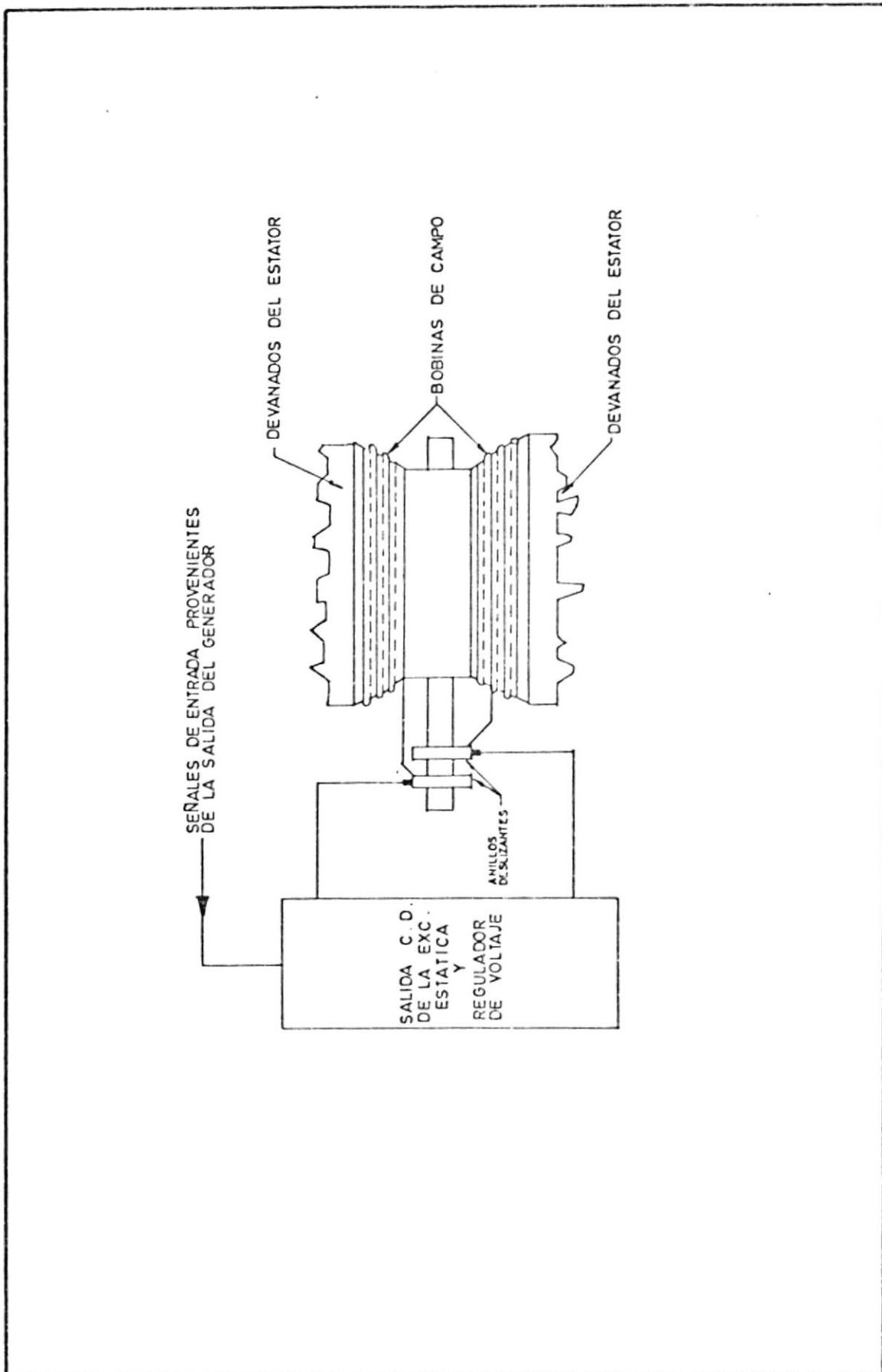


FIG. N° 2-SISTEMA DE EXCITACION ESTÁTICA

métodos de enfriamiento de los rotores, los requerimientos de potencia de excitación también se han incrementado.

Los problemas de diseño y mantenimiento de las excitatrices de C.D. directamente acopladas a un mismo eje (del generador), han limitado su utilidad para generadores de hasta 60 o 100 megavatios. De igual manera las excitatrices de corriente directa de baja velocidad, acopladas al eje del generador por medio de engranajes, se volvieron antieconómicas para generadores con capacidades de hasta 275 megavatios.

Desde la década anterior diversos sistemas alternativos, basados principalmente en el rápido desarrollo de rectificadores de estado sólido, particularmente diodos de silicón y más recientemente tiristores, han desplazado completamente a la excitatriz de corriente directa.

Estos sistemas de desarrollo han tenido lugar en dos líneas principales:

- a. Sistemas rectificadores estáticos en los cuales la salida de corriente directa hacia el rotor principal

es suministrada a través de anillos deslizantes. Estos sistemas pueden ser subdivididos en dos tipos:

- (1) diodos
- (2) tiristores

- b. Sistemas sin escobillas, en donde la unidad rectificadora gira junto con el rotor. Esto evita la utilización de anillos deslizantes y escobillas. La desventaja en este tipo de sistema consiste en la imposibilidad de leer directamente la corriente de excitación.

CAPACIDADES DE EXCITACION

Los rangos de excitación varían entre 70 KW para generadores de 20 MW hasta 500 MW para los de máxima capacidad (ver fig. N° 2-10). Para generadores de hasta 120 MW con requerimientos de excitación de hasta 450 KW se utiliza casi exclusivamente diodos de silicón sin emplear el sistema de escobillas.

A continuación se analiza cada uno de los tipos de reguladores de voltaje, sus componentes y sus circuitos principales.

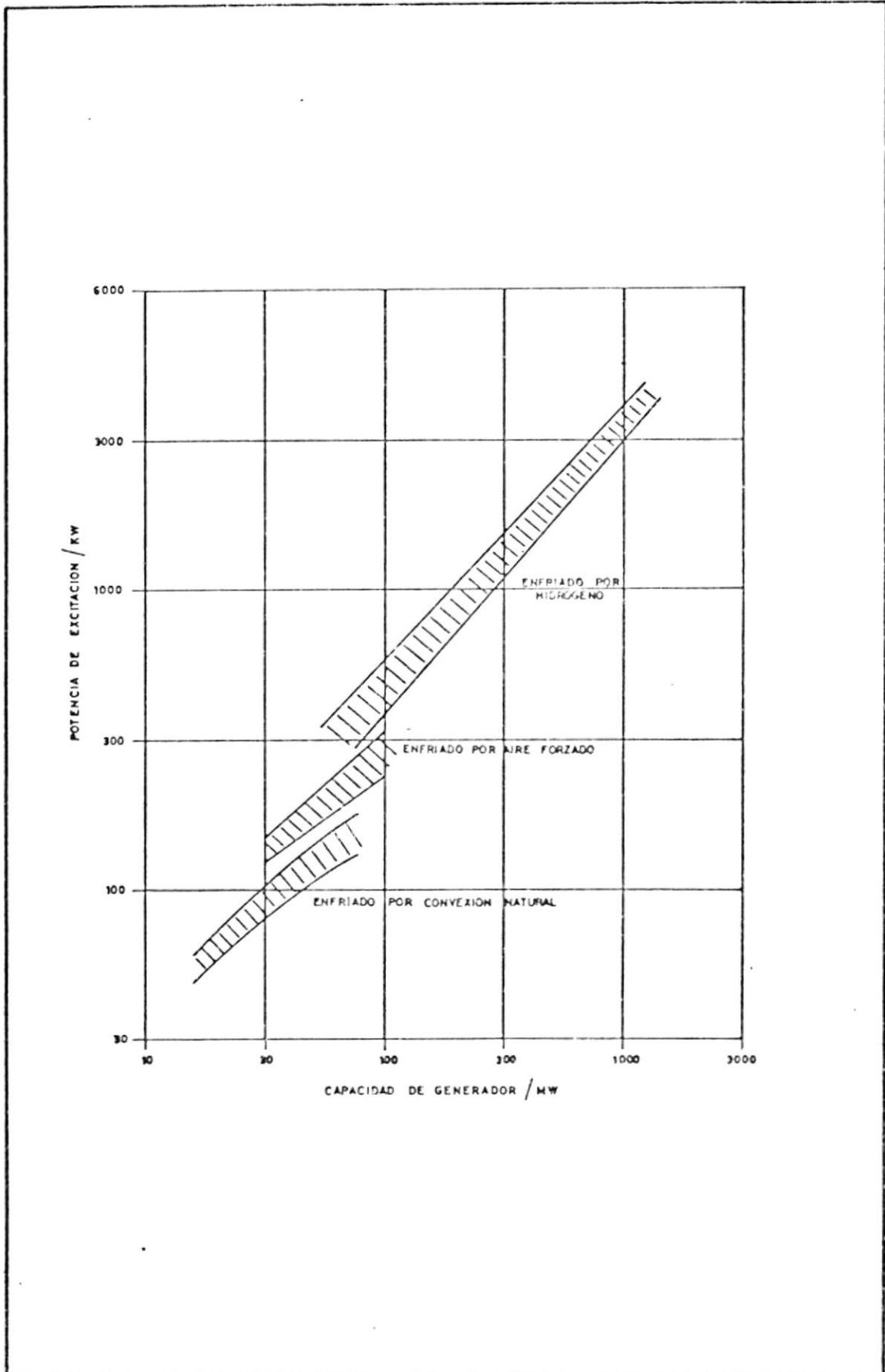


FIG. N.º 2-10. POTENCIA DE EXCITACION PARA GENERADORES DE 3000 REV / MIN

2.2. TIPOS DE REGULADORES DE VOLTAJE

2.2.1. Electromecánicos

Este tipo de regulador de voltaje se caracteriza por tener un elemento sensor (bobina electromagnética) de voltaje y elementos móviles, en este caso resistencias que van en serie con el campo de la excitatriz. Normalmente se clasifican en dos tipos:

- a. *Acción directa.*- El regulador reostático de acción directa controla el voltaje de salida del generador, variando directamente su resistencia de regulación en el campo de la excitatriz principal. A este tipo de regulador de voltaje pertenecen el Diactor, Tirril, Silverstat, Allis Chalmers, etc.
- b. *Acción indirecta.*- El regulador reostático de acción indirecta controla el voltaje de una máquina de corriente alterna, variando la resistencia en el campo de la excitatriz, al igual que el tipo de regulador anterior, pero el elemento sensor de voltaje es generalmente un relé que abre o cierra contactos en el campo de

la excitatriz de acuerdo a la señal recibida. En otras ocasiones el elemento sensor es un motor de torque polifásico. En este tipo, el torque de salida es proporcional al promedio del voltaje trifásico del generador: Este torque es tá balanceado con un resorte en torsión, de modo que cada valor de voltaje corresponde a una posición angular diferente del rotor.

Reguladores de voltaje electromecánicos

DIACTOR

El regulador de voltaje Diactor controla el voltaje de un generador de corriente alterna, traba jando directamente en el circuito de campo de la excitatriz. Al controlar la excitación de la excitatriz de una manera apropiada, el voltaje del alternador se lo mantiene en un valor deseado.

El Diactor puede ser utilizado para el control del voltaje del sistema o control del factor de potencia.

Descripción General.- El regulador Diactor consiste de dos partes: el regulador propiamente di cho y una caja auxiliar.

El regulador consta de los siguientes elementos: base de montaje, elementos reostáticos, elemento magnético, sensor de voltaje, acople mecánico ajustable entre el elemento reostático y el elemento sensor de voltaje y un reóstato de ajuste de voltaje.

La caja auxiliar consta de: una base de acero, - estabilizador del regulador de voltaje, rectificador de tipo seco, una resistencia fija para el circuito de control de voltaje, un reóstato de ajuste para el estabilizador y un reóstato de compensación (cuando se operan en paralelo con otras unidades).

El elemento de sensar el voltaje lo constituye un electroimán en forma de "U", en el cual va localizada la armadura. (Fig. N° 2-11).

La armadura está sostenida por medio de un brazo liviano que tiene movimiento solamente en sentido vertical. Este brazo va acoplado a una platina horizontal fija por medio de dos resortes verticales y dos resortes horizontales, las cuales están arregladas de tal manera que casi no ofre-

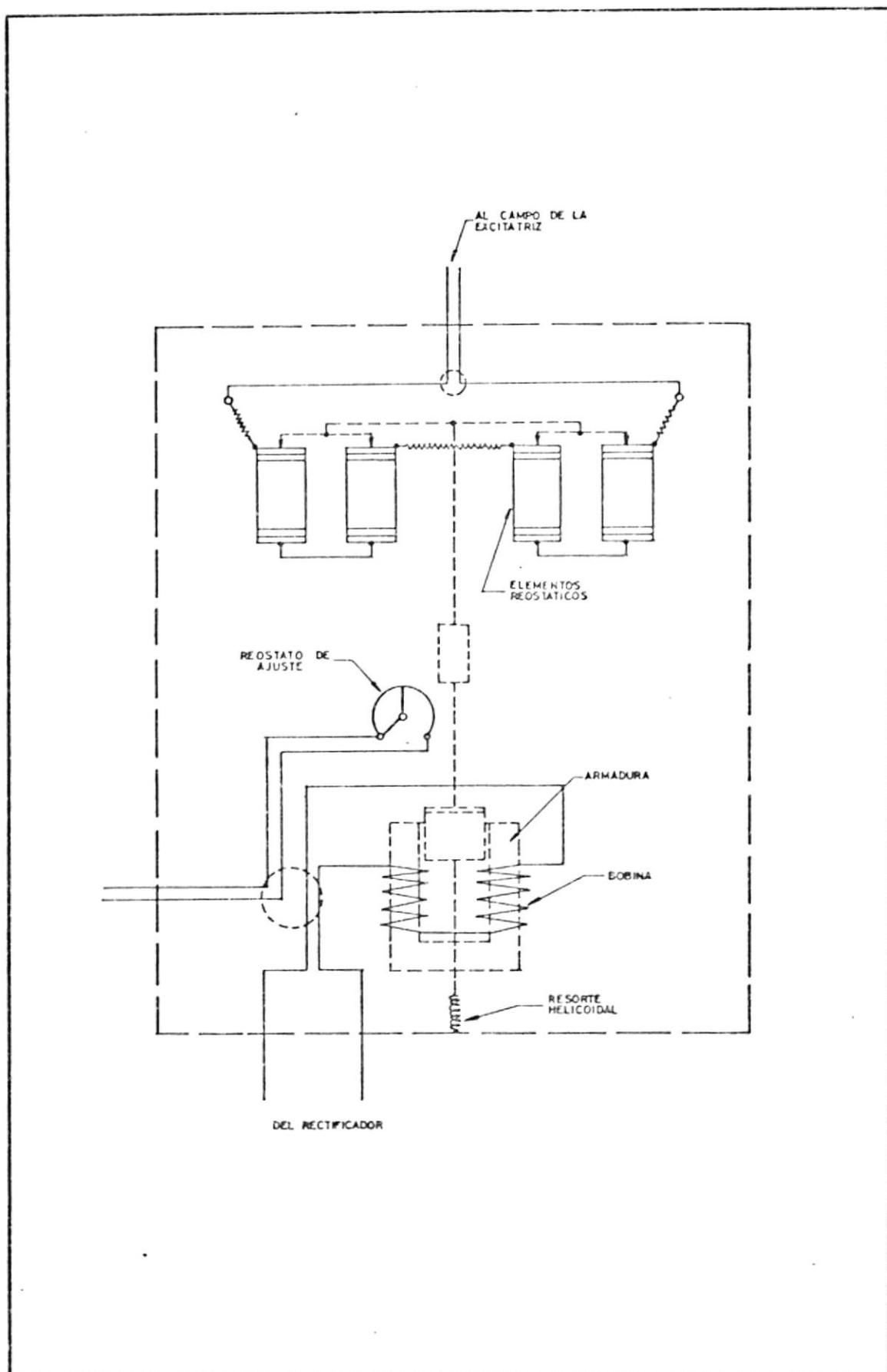


FIG. Nº2-11. DIAGRAMA DE CONEXION INTERNA DEL REGULADOR DE VOLTAJE DIACTOR

cen resistencia al desplazamiento vertical, pero ofrecen elevada resistencia al desplazamiento lateral. El electroimán recibe corriente directa desde un rectificador; existen dos bobinas, una en cada brazo de la "U", las cuales excitan al electroimán.

Cuando circula la corriente a través de las bobinas, la armadura recibe una fuerza magnética que la empuja hacia abajo; lo cual es compensado en parte por un largo resorte helicoidal. El resto de la fuerza magnética es utilizada para operar los elementos reostáticos hacia adelante o hacia atrás - para incrementar o disminuir la resistencia en el circuito del campo de la excitatriz.

Es suficiente que se produzcan pequeños cambios - de corriente en las bobinas para que el elemento sensor de voltaje controle la excitatriz a través de un amplio rango de variaciones de voltaje y carga en el generador de poder.

El elemento reostático del Diactor consiste de dos a cuatro grupos de placas de resistencias no metálicas. Cada placa tiene insertada un pequeño con

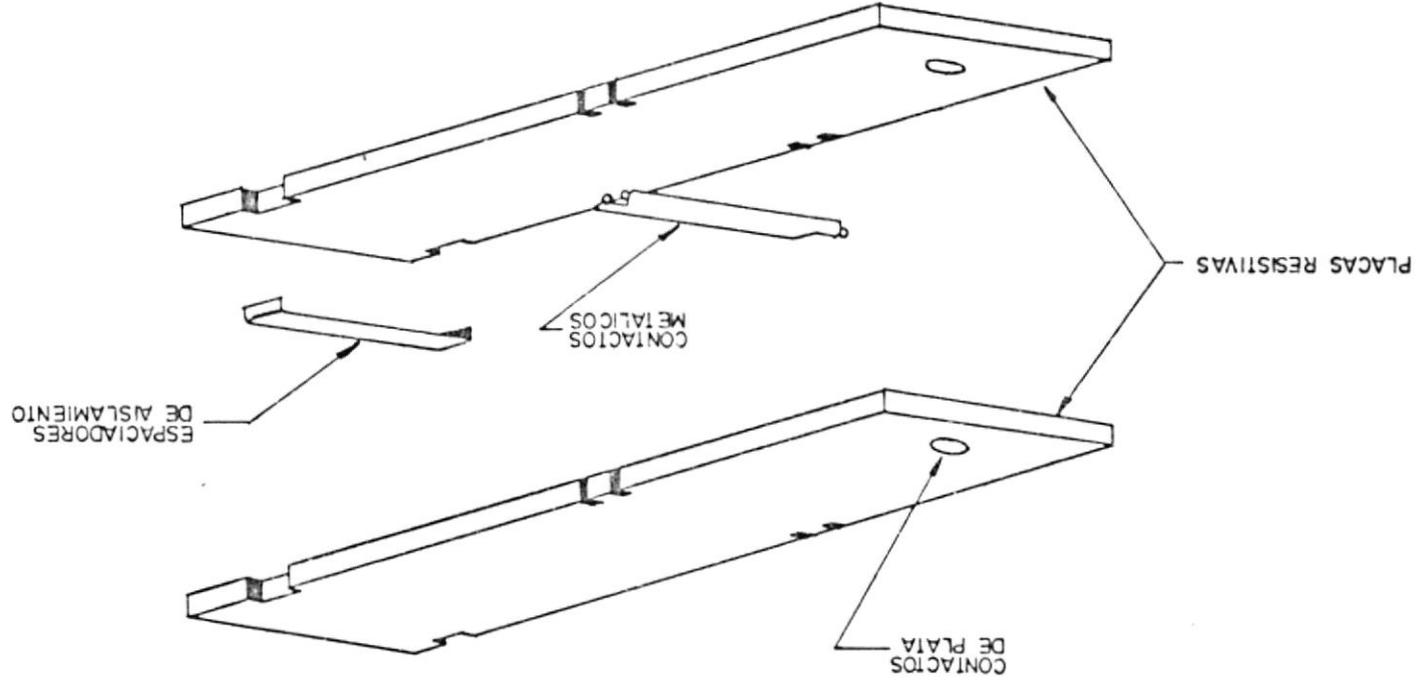
tacto de plata en la parte frontal. Todas las placas están separadas entre sí por espaciadores de aislamiento; en el centro de los grupos hay contactos metálicos entre las placas de resistencia. [Fig. N° 2-12].

Como los contactos metálicos en el centro de las placas son más gruesos que los pequeños contactos de plata en la parte frontal y que los espaciadores de aislamiento de la parte posterior, sirven de punto de apoyo para que las placas resistentes hagan pivot y aumenten o disminuyan la resistencia de acuerdo a la orden emitida por el elemento sensor.

Cuando los contactos de plata están separados entre ellos, se produce la máxima posición de resistencia y al contrario, es decir cuando todos los contactos de plata se tocan entre ellos se produce la mínima resistencia. (Fig. N° 2-13).

Cuando el regulador de voltaje Diactor se usa en generadores que operan en paralelo es necesario realizar una adecuada repartición de la potencia reactiva entre los generadores, para la cual se

FIG. Nº2-12. PLACAS RESISTIVAS Y ESPACIADORES



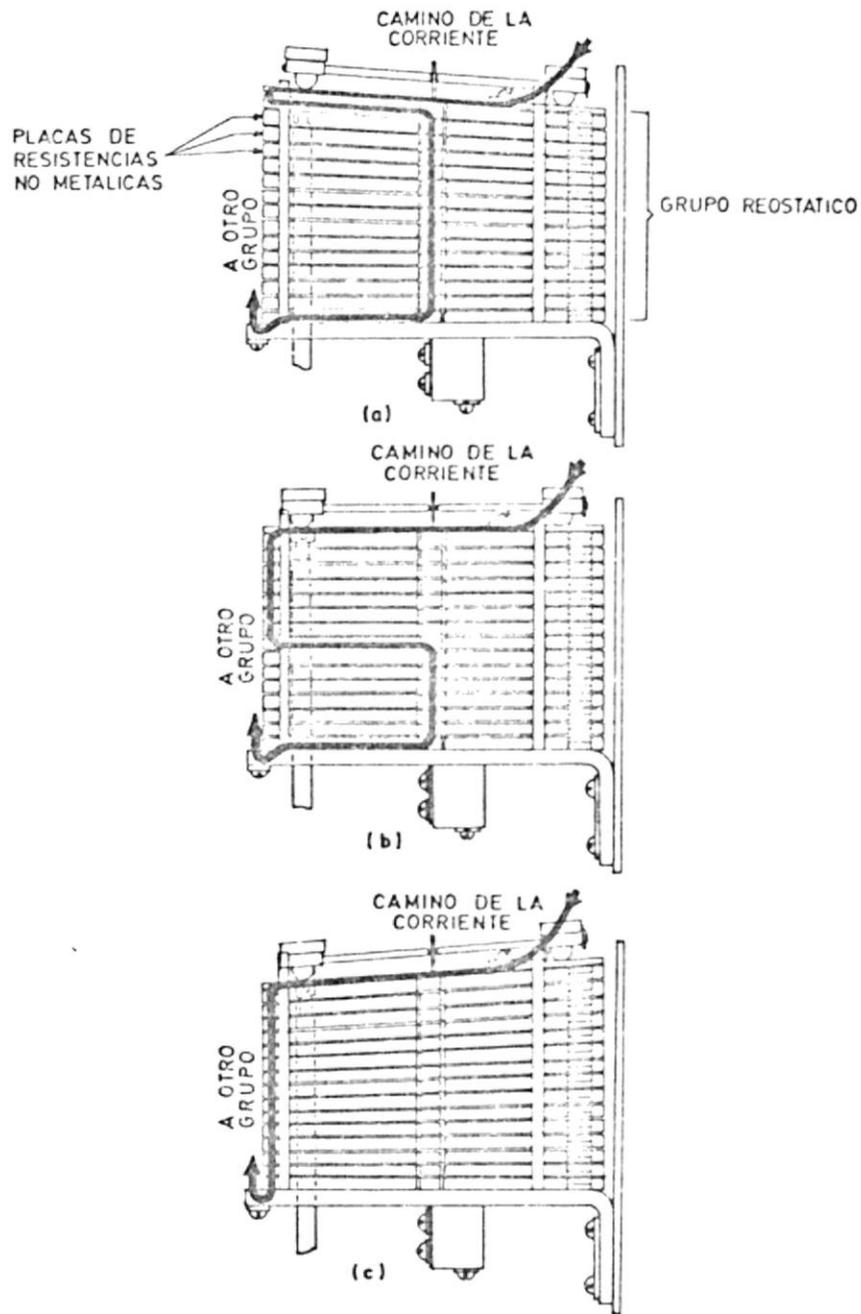


FIG. Nº 2-13 CAMINOS DE LA CORRIENTE A TRAVÉS DE UN GRUPO REOSTATICO DEL REGULADOR DE VOLTAJE DIACTOR. (a) MÁXIMA POSICIÓN DE RESISTENCIA; (b) POSICIÓN MEDIA DE RESISTENCIA; (c) MÍNIMA POSICIÓN DE RESISTENCIA.

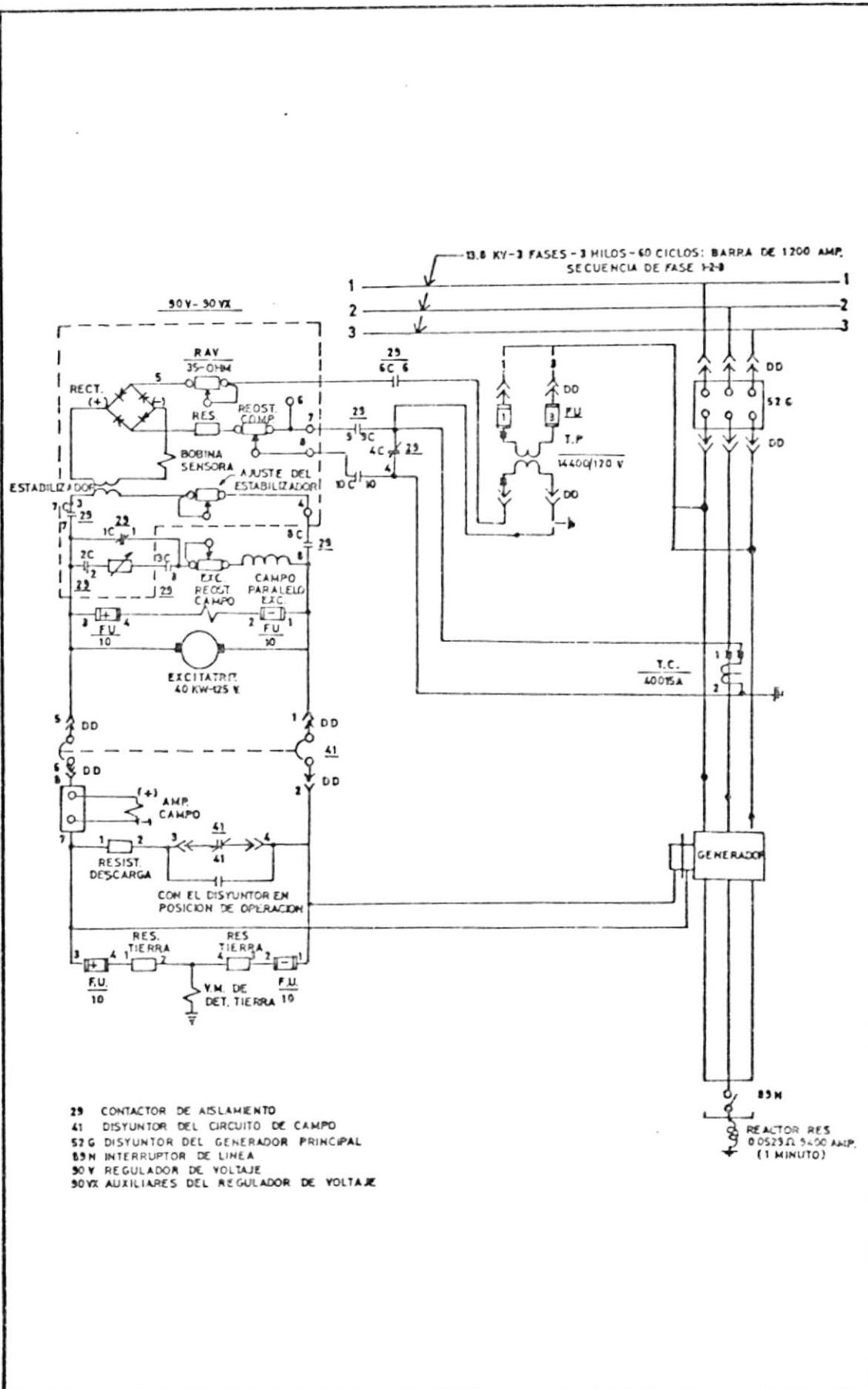


FIG. Nº 2-14 DIAGRAMA DE UNA LINEA DE UN SISTEMA DE CONTROL DE EXCITACION CON REGULADOR DE VOLTAJE DIACOR

hace pasar una corriente denominada de compensación a través de una resistencia variable (de compensación) colocada en serie con el circuito de potencial a la salida del generador enviando al elemento que sensa la variación de voltaje en el regulador, una señal haciendo que aumente o disminuya la excitación en el campo del generador.

También se incluye en el circuito de alimentación al regulador un transformador de amortiguamiento para evitar los movimientos excesivos del brazo móvil del regulador encargado de incrementar o disminuir elementos reostáticos en el campo de la excitatriz.

En la figura N° 2-14 se presenta al regulador de voltaje Diactor trabajando en el sistema de excitación de un generador de poder con los circuitos de amortiguamiento y compensación.

SILVERSTAT

El regulador de voltaje Silverstat actúa sobre el campo de la excitatriz del generador de Poder cambiando sus condiciones de resistencia de acuerdo a la regulación requerida.

El montaje consiste del regulador propiamente dicho, un transformador de amortiguamiento y un elemento rectificador denominado "Rectox"; este elemento rectificador está diseñado para un rango de 100 a 125 voltios en el lado de su entrada de corriente alterna. Cuando el voltaje terminal del generador no es de la misma magnitud que el requerido para el rectificador, es necesario el uso de transformadores de potencia que tengan en su lado primario características de voltaje y frecuencia de acuerdo al generador de corriente alterna que se desea regular y en su lado secundario un voltaje nominal de 120 voltios.

El elemento que sensa el voltaje actúa directamente sobre un brazo que aumenta o disminuye el corriente resistivo que se encuentra en serie en el campo de la excitatriz.

Este tipo de regulador se diferencia del anterior en que el elemento reostático es estático y los elementos móviles están constituidos por una serie de caminos separados uno de otros por piezas aislantes. Cada lámina tiene en uno de sus extremos pequeños contactos de plata y el otro está unido

en diferentes puntos al elemento reostático. En la Figura N° 2-15 podemos apreciar claramente el elemento sensor de voltaje que está constituido por una bobina, un magneto y la armadura.

Normalmente cuando está sin energía la bobina, el brazo que empuja las láminas con los contactos de plata (debido a la fuerza del resorte) hace que la resistencia de regulación esté totalmente cortocircuitada. A medida que se va incrementando el voltaje en la bobina del regulador, el brazo es atraído junto a la armadura y los contactos de plata se empiezan a separar unos de otros, aumentando la resistencia paulatinamente hasta llegar a su valor máximo cuando todos los contactos estén separados.

Existen diversas combinaciones de este elemento reostático según las necesidades requeridas, así tenemos los reguladores "SILVERSTAT" del tipo SRA-1 y SRA-2 con un elemento reostático (figura 2-15), del tipo SRA-3 con dos elementos reostáticos (figura N° 2-16), del tipo SRA-4 con cuatro elementos reostáticos y del tipo SRA-5 con seis elementos reostáticos.

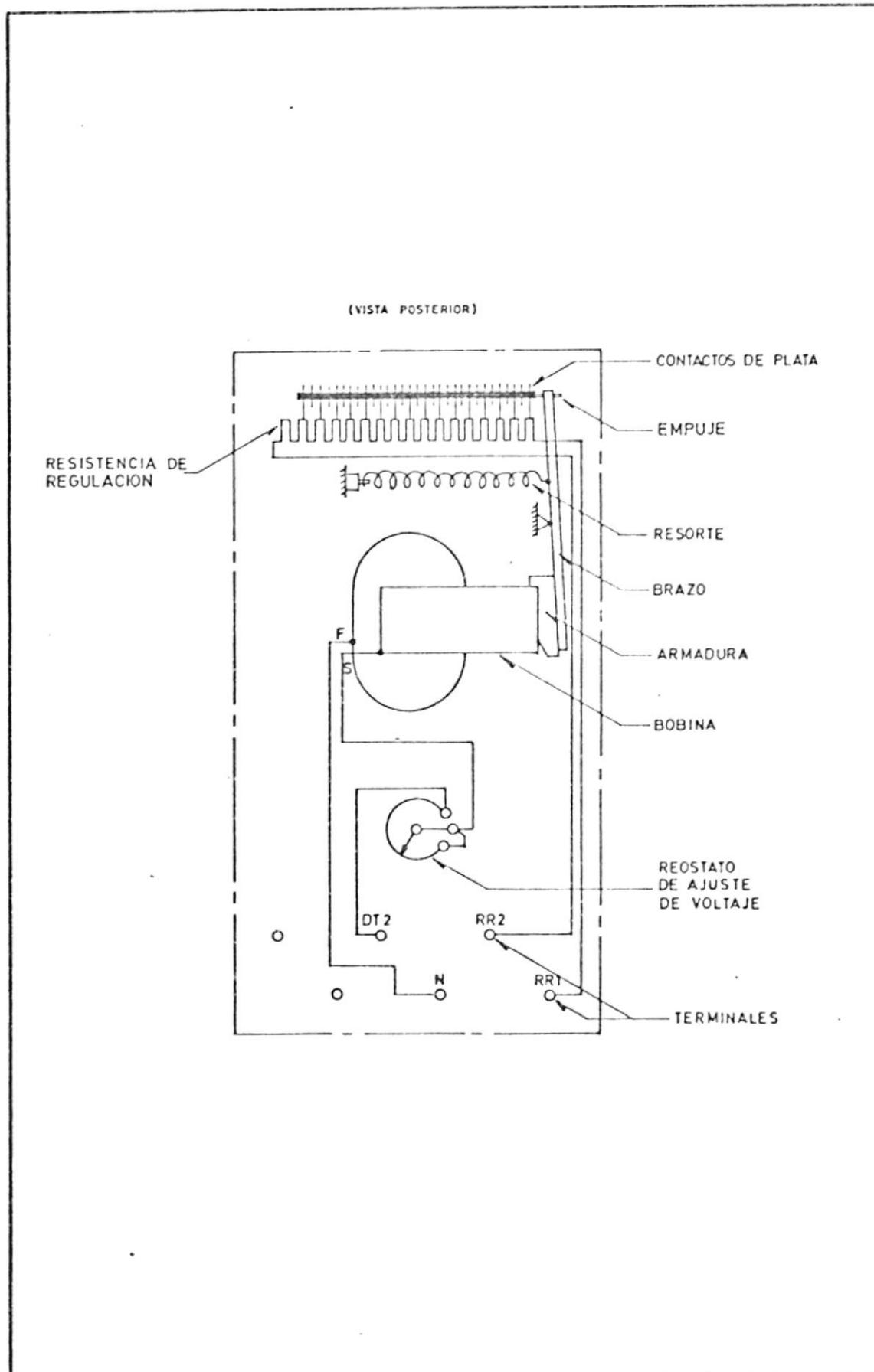


FIG. Nº2-15. REGULADOR "SILVERSTAT" TIPO SRA-1 DIAGRAMA DE CONEXIONES INTERNAS

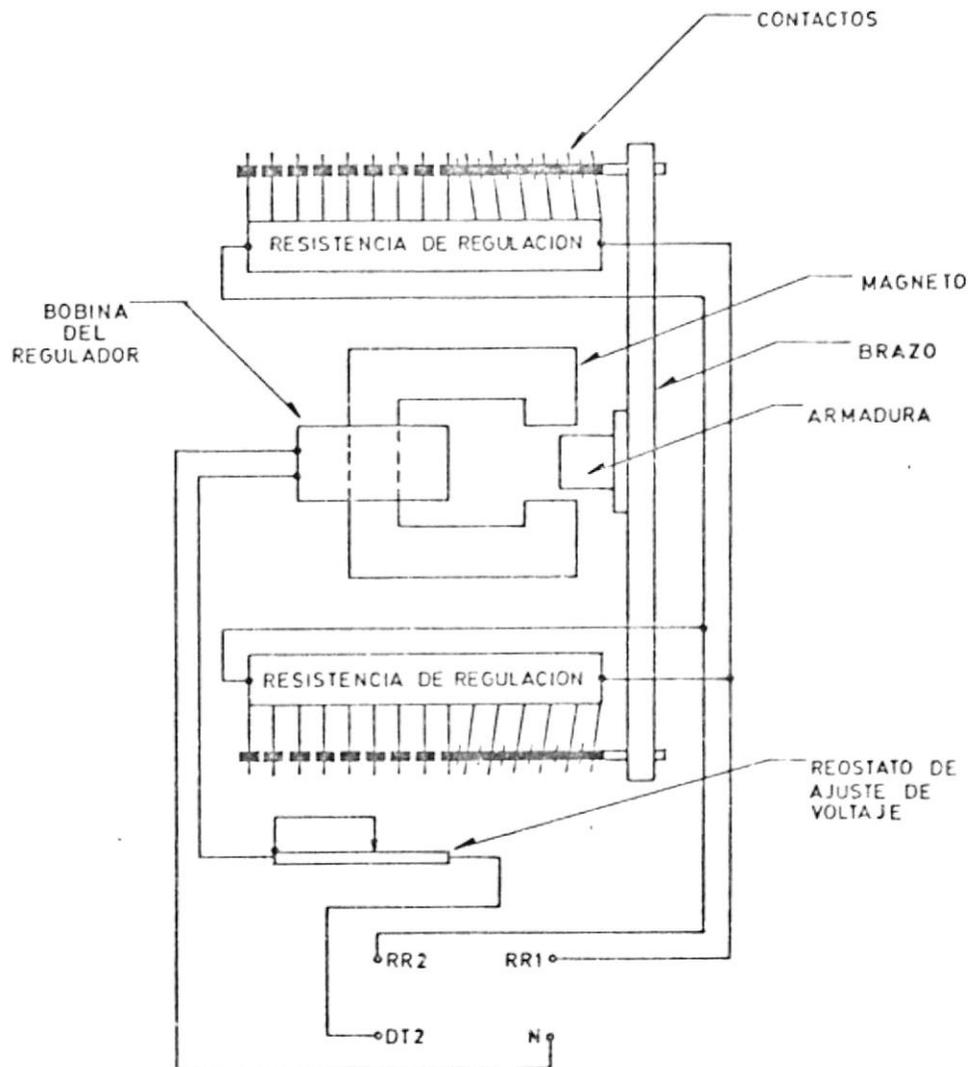


FIG. Nº 2-16 DIAGRAMA INTERNO DEL REGULADOR SILVERSTAT (SRA-3)

Cuando se produce una súbita caída de voltaje en el circuito de corriente alterna entre 10 a 12%, el tiempo requerido para que se efectúe la regulación automática es de 0.05 segundos ó tres ciclos, en un sistema de 60 ciclos. En la figura N^o 2-17 se observa un esquema completo de un regulador Silverstat trabajando en el campo de la excitatriz, también se observa el transformador de amortiguamiento, el circuito de compensación y el rectificador.

Cuando se considera que el máximo rendimiento del equipo íntegro del regulador de voltaje se puede ver afectado por el valor máximo de la corriente de campo de la excitatriz, se emplea una resistencia fija en el circuito de campo.

El reóstato de campo de la excitatriz y el reóstato de campo del generador se utilizan básicamente para efecto de regulación de voltaje manual, es decir, cuando el regulador está fuera de operación.

La corriente de excitación del campo del generador puede ser variada aumentando el voltaje de la excitatriz ó manteniendo éste constante y variando la

resistencia del campo del generador; cuando el regulador de voltaje está en operación, controlando el voltaje del generador, los reactores de campo de la excitatriz y del generador son puestos en su posición de mínima resistencia.

Para prevenir oscilaciones por cambios bruscos de condiciones en la excitatriz se utiliza un transformador de amortiguamiento como puede observarse en la figura N° 2-17.

También se dispone de un circuito de compensación para operación en paralelo de generadores C.A. En la figura N° 2-17 se ve claramente que a la salida del generador se conecta un transformador de corriente en la fase kibre, es decir la que no ha sido utilizada por el transformador de potencia. Esta señal de corriente al pasar por la resistencia variable de compensación, produce una caída de voltaje emitida por el transformador de potencia. La señal rectificada llega al elemento sensor de voltaje del regulador y cuando se está en llegando demasiado reactivo el regulador la "ve" como un excedente en el voltaje, aumenta automáticamente la resistencia en el campo de la excitatriz.

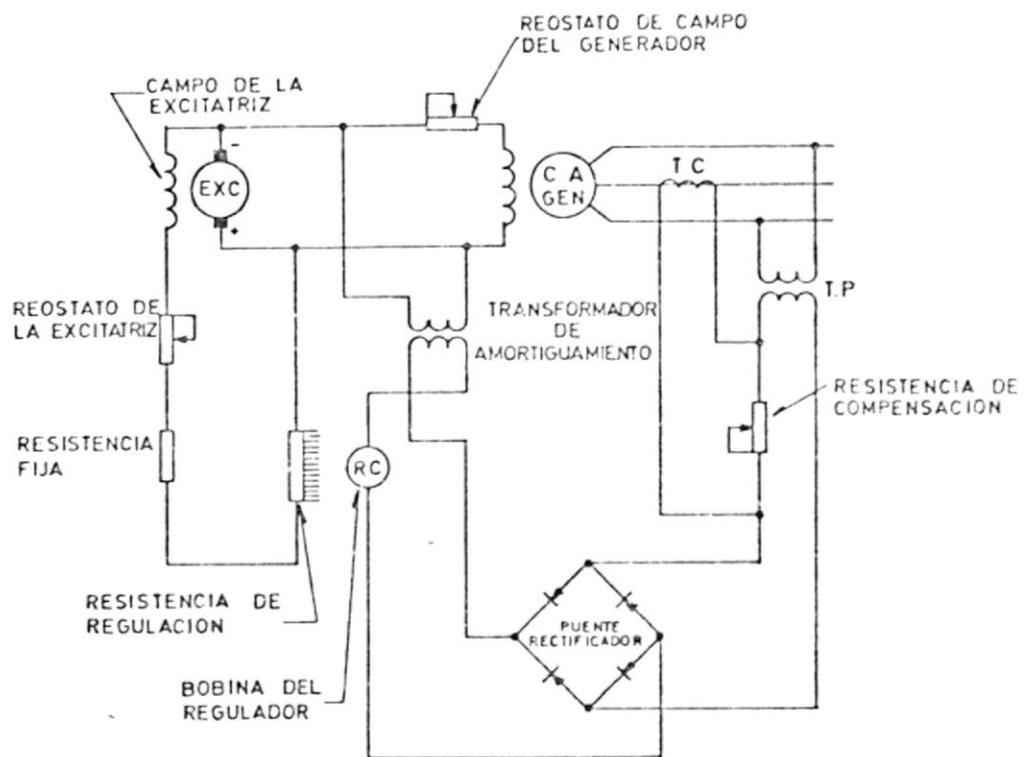


FIG. Nº2-17. EXCITATRIZ AUTOEXCITADA CON REGULADOR DE VOLTAJE SILVERSTAT

triz y disminuye la corriente de excitación.

Los rangos de sensibilidad de los reguladores de voltaje Silverstat (SRA) dependen de la capacidad del regulador, así tenemos:

TIPO REGULADOR	SENSITIVIDAD
SRA - 1	$\pm 2 \frac{1}{2} \%$
SRA - 2	$\pm 1 \frac{1}{2} \%$
SRA - 3	$\pm 1 \%$
SRA - 4	$\pm 1/2 \%$
SRA - 5	$\pm 1/2 \%$

REGULADORES DE VOLTAJE DE ACCION RAPIDA. TIPO AB (BROWN-BOVER)

Este tipo de regulador puede ser utilizado en diversas funciones:

1. Generadores C.A. ó C.D. trabajando individualmente.
2. Generadores C.A. ó C.D. trabajando en paralelo con otros generadores.

Al igual que los reguladores de voltaje descritos anteriormente, el elemento sensor trabaja directamente sobre los elementos resistivos localizados en serie con el campo de la excitatriz.

Normalmente los reguladores de voltaje van acompañados de una caja auxiliar donde van localizados los elementos estabilizadores, de compensación en paralelo, amortiguamiento y el rectificador. Los reguladores de acción rápida tienen la ventaja de poseer bobinas sensoras de voltaje intercambiables de acuerdo a la aplicación que se le da al regulador; estas bobinas pueden ser para corriente alterna o para corriente continua, es decir, que se elimina el uso del rectificador, además, los elementos de amortiguación y compensación en paralelo, van localizados en el regulador propiamente dicho quedando desechado el uso de cualquier elemento auxiliar al regulador de voltaje.

Básicamente el regulador Allis Chalmers consiste de los siguientes elementos:

- a. Elemento matriz
 - b. Elemento resistivo o reostático; y
 - c. Elemento de amortiguación
- a. Elemento Matriz.- Produce la potencia de regulación necesaria, consiste de una bobina móvil Figura N° 2-18, campo en el cual están situados los devanados de alta resistencia (voltaje) y

de baja resistencia (corriente).

El devanado de alta resistencia, la bobina móvil y la resistencia auxiliar se hallan conectados en serie a través del voltaje a ser regulado. El torque producido por la conexión mencionada es proporcional al cuadrado del voltaje terminal.

$$T \propto V_t^2$$

donde: T = torque

V_t = voltaje terminal

Este torque es contrarrestado por el resorte principal y el resorte auxiliar, éste último trabaja sobre el resorte principal de manera que el torque mecánico resultante permanece constante durante la regulación.

El ángulo de deflexión de la bobina está limitada a un valor máximo de 60° .

- b. Elemento Resistivo. - Al igual que el regulador de voltaje Silverstat, el elemento resistivo es fijo; cada elemento de esta resistencia está conectado a un conmutador que consta de varios segmentos aislados entre ellos. Este conmutador tie-

ne una forma cóncava, es decir que todos los segmentos están distribuidos en un arco circular. (Figura N° 2-19).

El contacto móvil tiene forma convexa, pero con un radio de curvatura menor que el del conmutador. Este contacto efectúa un movimiento de balanceo al rededor de un eje insertando o eliminando resistencias al hacer contacto con el conmutador. El movimiento del contacto es imprimido por el elemento motriz descrito anteriormente.

Cuando el generador está en vacío o con carga pequeña, la excitación se reduce y la bobina se sitúa en una posición tal que la mayoría de los elementos resistivos se encuentran dentro del circuito del campo de la excitatriz.

Cuando se incrementa la carga, el voltaje terminal del generador disminuye y el torque del resorte vence a la bobina móvil haciéndola girar en sentido contrario a las manecillas del reloj, hasta que el contacto móvil cortocircuite los elementos resistivos necesarios e incrementa la excitación lo suficiente para restaurar el voltaje nominal del generador.

c. Elemento de amortiguación. - En el regulador existen dos magnetos permanentes entre los cuales está localizado un disco de aluminio el cual va acoplado al eje del regulador a través de un brazo y un resorte; este elemento produce un efecto de amortiguación evitando que se produzcan oscilaciones en el regulador al existir variaciones bruscas de carga.

Es preciso observar que el sistema de amortiguación - en este tipo de regulador es mecánico, a diferencia de los anteriores en que el sistema es eléctrico, es decir, que tomando una señal de voltaje en la salida de la excitatriz, se la introduce en serie a la entrada de la bobina sensora de las fluctuaciones de voltaje.

En la figura N° 2-20, se observa el diagrama de conexión de un regulador Allis Chalmers en un sistema de excitación. Tal como se mencionó anteriormente, este tipo de regulador también se lo utiliza en generadores de corriente directa y se efectúa un circuito adicional para los generadores que trabajan individualmente o en paralelo (compensación en paralelo), como puede observarse en las figuras N° 2-20 y 2-21.

La compensación se provee para incrementar el voltaje

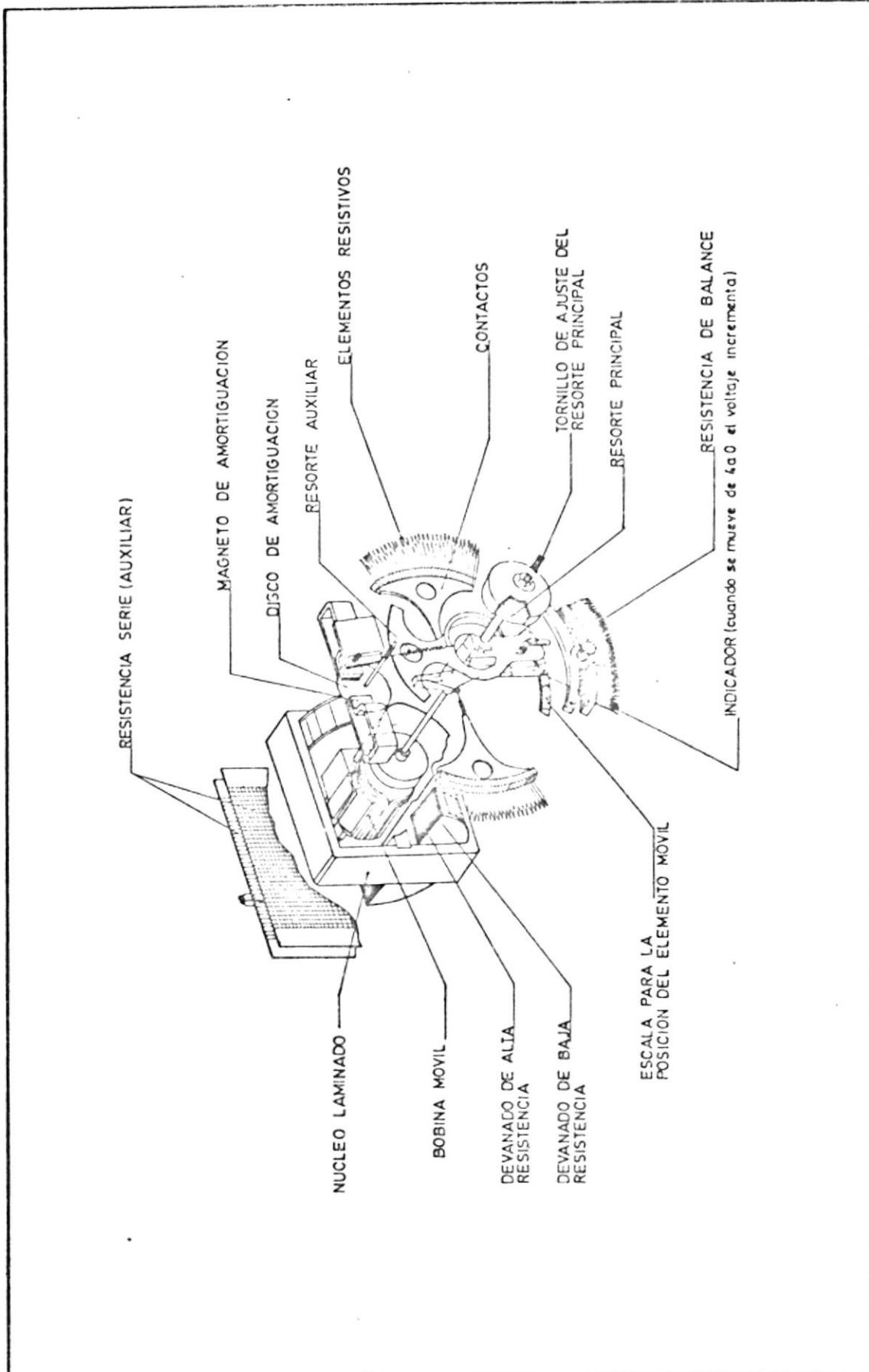


FIG. Nº 2-18 REGULADOR BROWN-BOYER

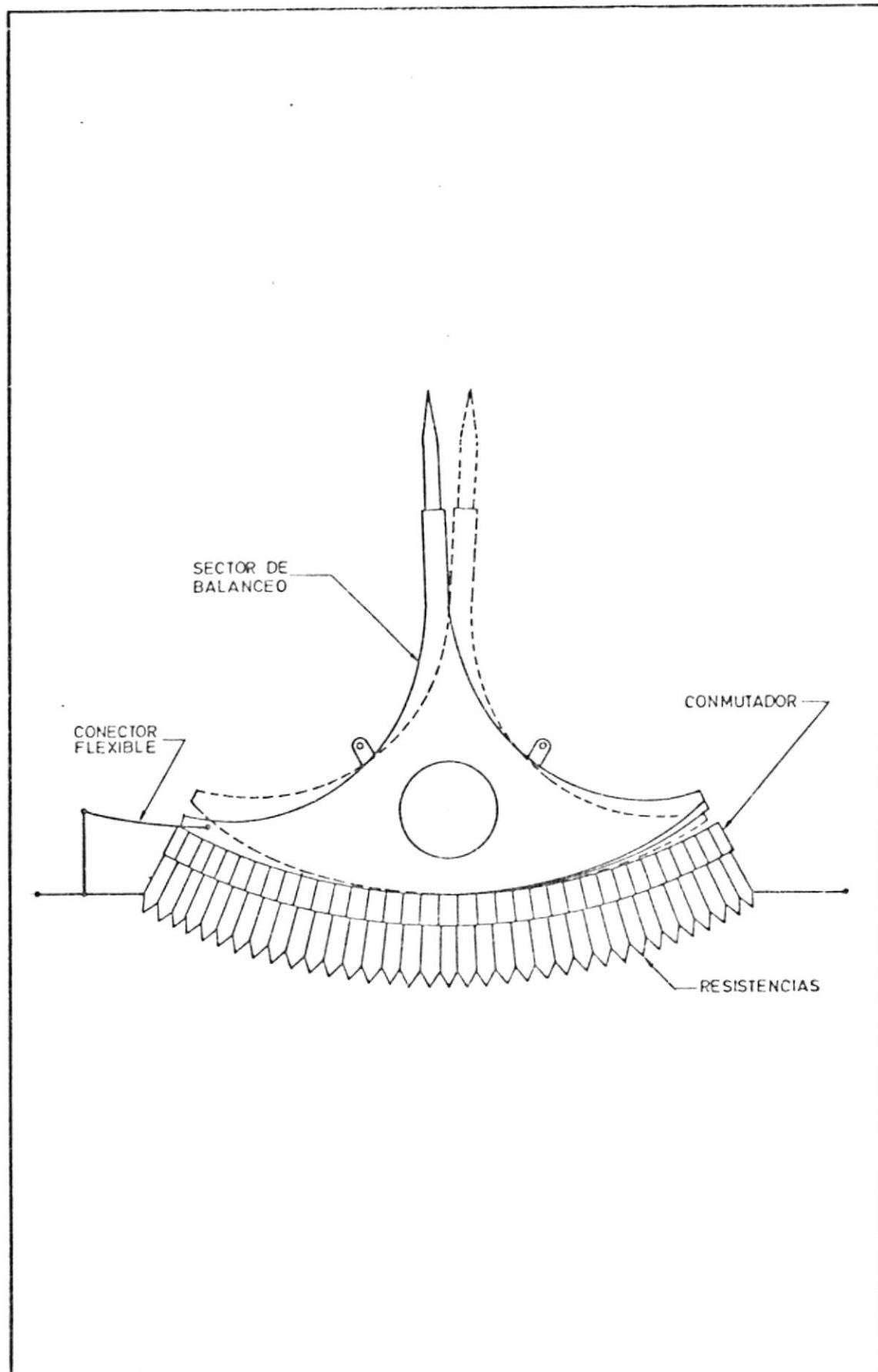


FIG. Nº2-13. REOSTATO DE CONTACTO DE BALANCEO UTILIZADO POR LOS REGULADORES DE VOLTAJE BROWN - BOVERI

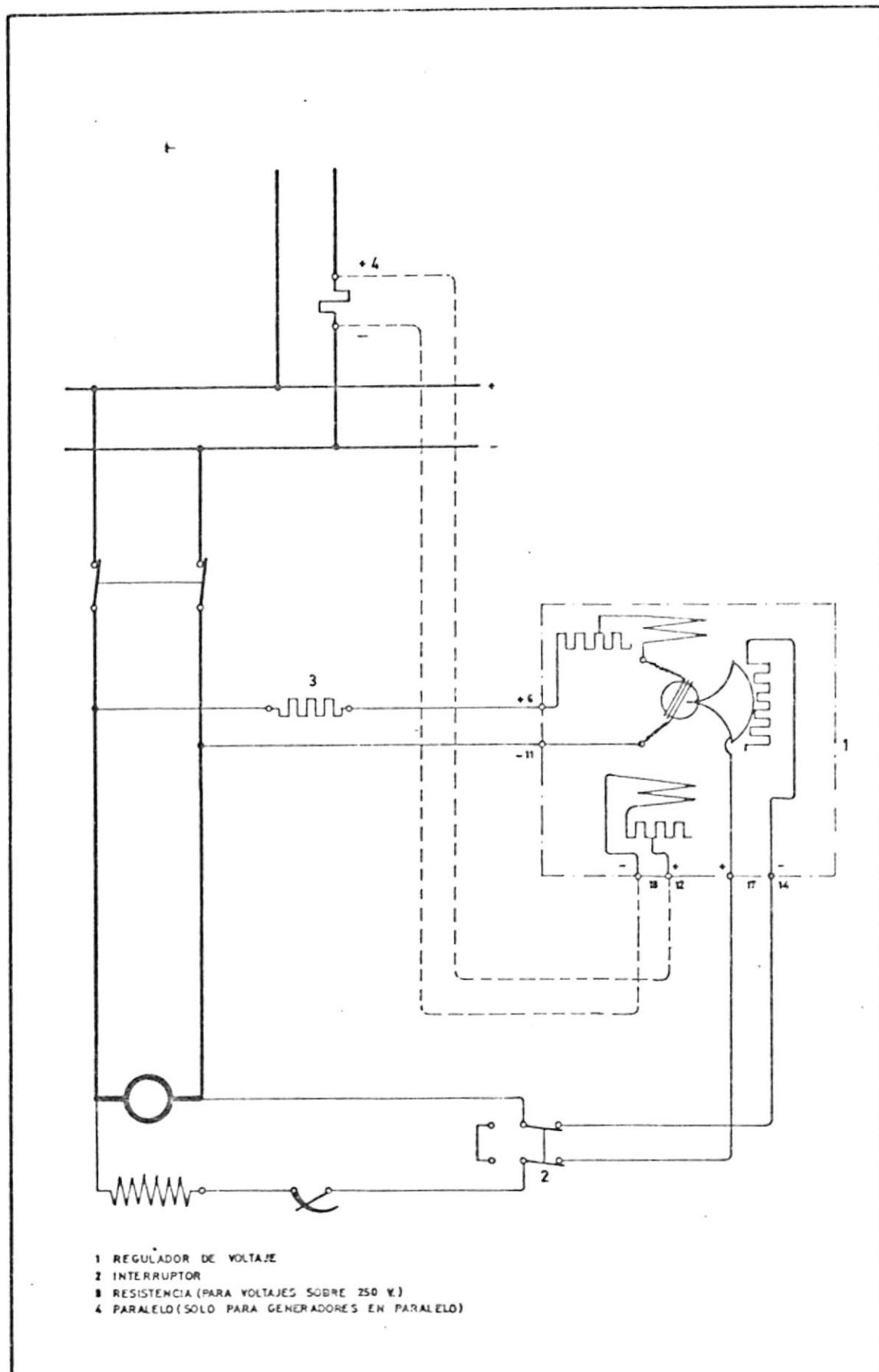
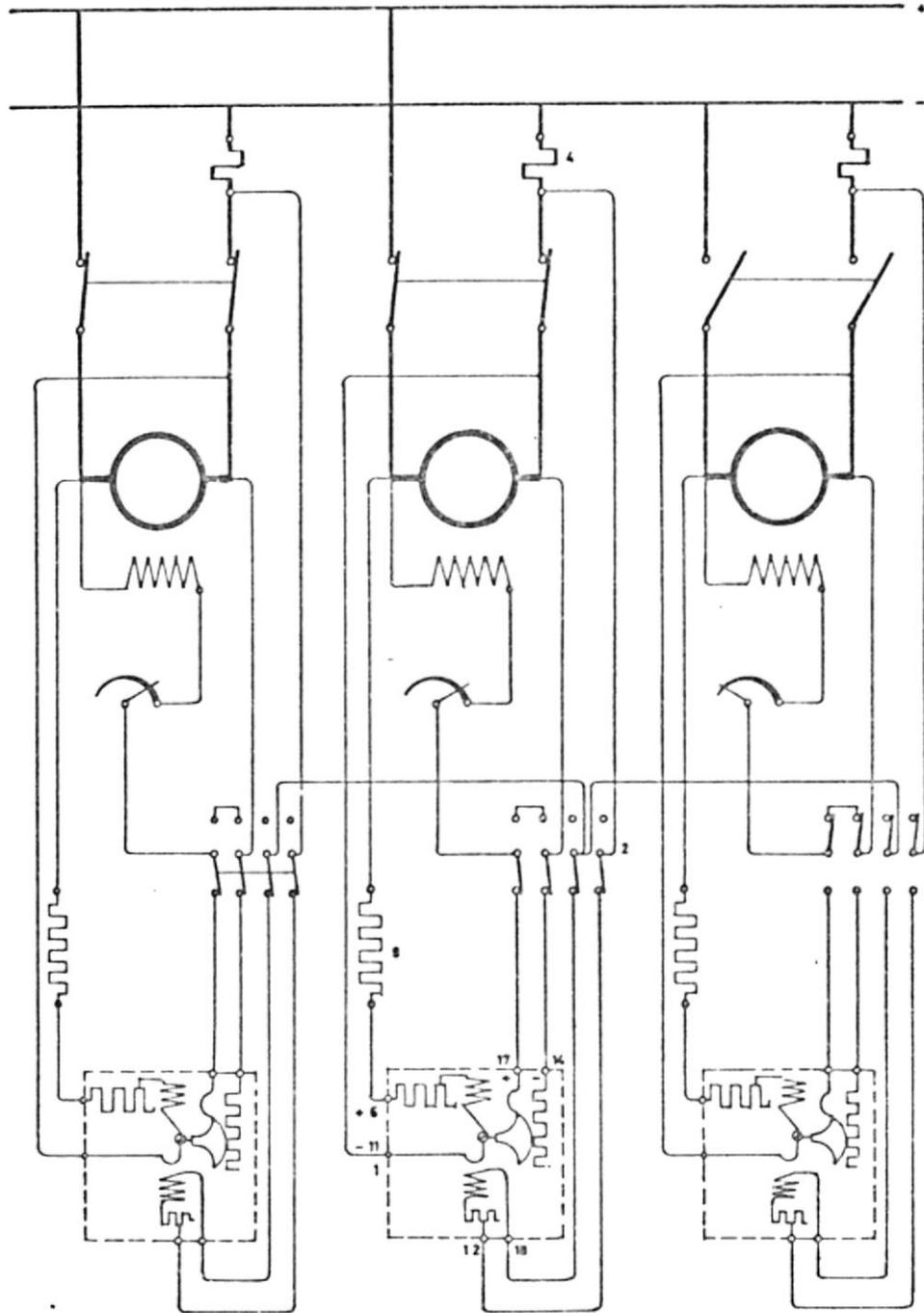


FIG. Nº 2-20 REGULACION DE VOLTAJE DE UN GENERADOR C.D TRABAJANDO SOLO



- 1 REGULADOR DE VOLTAJE
- 2 INTERRUPTOR
- 3 RESISTENCIA (PARA VOLTAJE SOBRE 250 V.)
- 4 PARALELO

FUG. N.º 2-21 REGULADOR DE VOLTAJE DE GENERADORES TRABAJANDO EN PARALELO CON REGULADORES DE ESTABILIZACION

regulado en relación con la corriente de carga de modo que se puede mantener constante el voltaje en puntos remotos.

REGULADOR DE VOLTAJE TIRRIIL

El regulador de voltaje TIRRIIL se caracteriza por tener la respuesta más rápida entre todos los reguladores electromecánicos, estando su tiempo de operación comprendido en el rango de 0.0. hasta 0.1 segundo de acuerdo al tipo de ejecución. Este regulador asegura una exactitud de regulación del $\pm 0.5\%$ hasta $\pm 1\%$ desde que el generador síncrono de corriente alterna está en vacío hasta llegar a su capacidad de plena carga sin que intervengan el factor de potencia ni el calentamiento.

En el esquema de la figura N° 2-22 se observa el esquema del principio del regulador Tirril funcionando dentro de un sistema de excitación de un generador de corriente alterna.

La magnitud a ser regulada (V_{Gen}) se la toma a través de un transformador de potencial y se envía esta señal a una bobina (4) produciéndose en ella una fuerza de tracción. En la bobina penetra un núcleo de hierro

cuyo extremo superior va fijo a un brazo móvil cuyo centro oscila sobre un pivote. El peso del núcleo - mantiene la palanca en equilibrio frente a la fuerza de tracción de la bobina, esto viene a constituir el punto de ajuste del regulador al pasar por encima o debajo del punto de ajuste de la tensión, se altera el equilibrio y la palanca se vuelva. Con esto varía también la posición del contacto (6) que se encuentra en su extremo.

Otro sistema de bobina, el sistema de excitación (5) consiste asimismo de una bobina con núcleo de hierro que penetra en ella. En el arrollamiento de esta bobina existe la tensión (E_{EX}) de la excitatriz (2); el núcleo de hierro actúa aquí también sobre una palanca, la fuerza de tracción de la bobina (5) se mantiene en equilibrio por resortes en el otro brazo de palanca. Esta palanca tiene en extremo el contacto (7). El regulador funciona como sigue:

Supongamos que al principio están cerrados los contactos (6) y (7), la resistencia adicional (8) en el circuito del campo de la excitatriz está así en corto, es decir, que aumenta la tensión de ésta y pugna por llegar al valor $E_{EX \text{ max}}$. (Figura N° 2-23), - pero así es atraído el núcleo de la bobina de exci-

tación (5), mueve la palanca con el contacto (7) y abre a éste. La resistencia (8) vuelve así a estar conectada, baja la tensión de la excitatriz y tiende a llegar al valor E_{EX} . La fuerza de tracción de la bobina (5) disminuye, la palanca se mueve al revés y cierra de nuevo el contacto (7). Este juego se repite con unas cuatro a siete maniobras por segundo.

La tensión de la excitatriz oscila alrededor de un valor medio determinado, el cual depende, no obstante, de la posición del contacto (6). Si se produce un cambio a regular de tal modo que la tensión del alternador V_{Gen} sea menor que el valor teórico, es entonces, más pequeña la fuerza de tracción de la bobina (4). El núcleo de hierro es atraído con menos fuerza y el contacto (6) se mueve hacia arriba. Pero de este modo tiene que subir el valor medio de la tensión de excitación al objeto de que se conserve el proceso de dos puntos (Fig. N° 2-23).

Por el contrario aumentará la fuerza de tracción de la bobina (4) al ser demasiado alta la tensión del alternador. El contacto (6) se mueve entonces hacia abajo y se disminuirá el valor medio de la tensión de excitación.

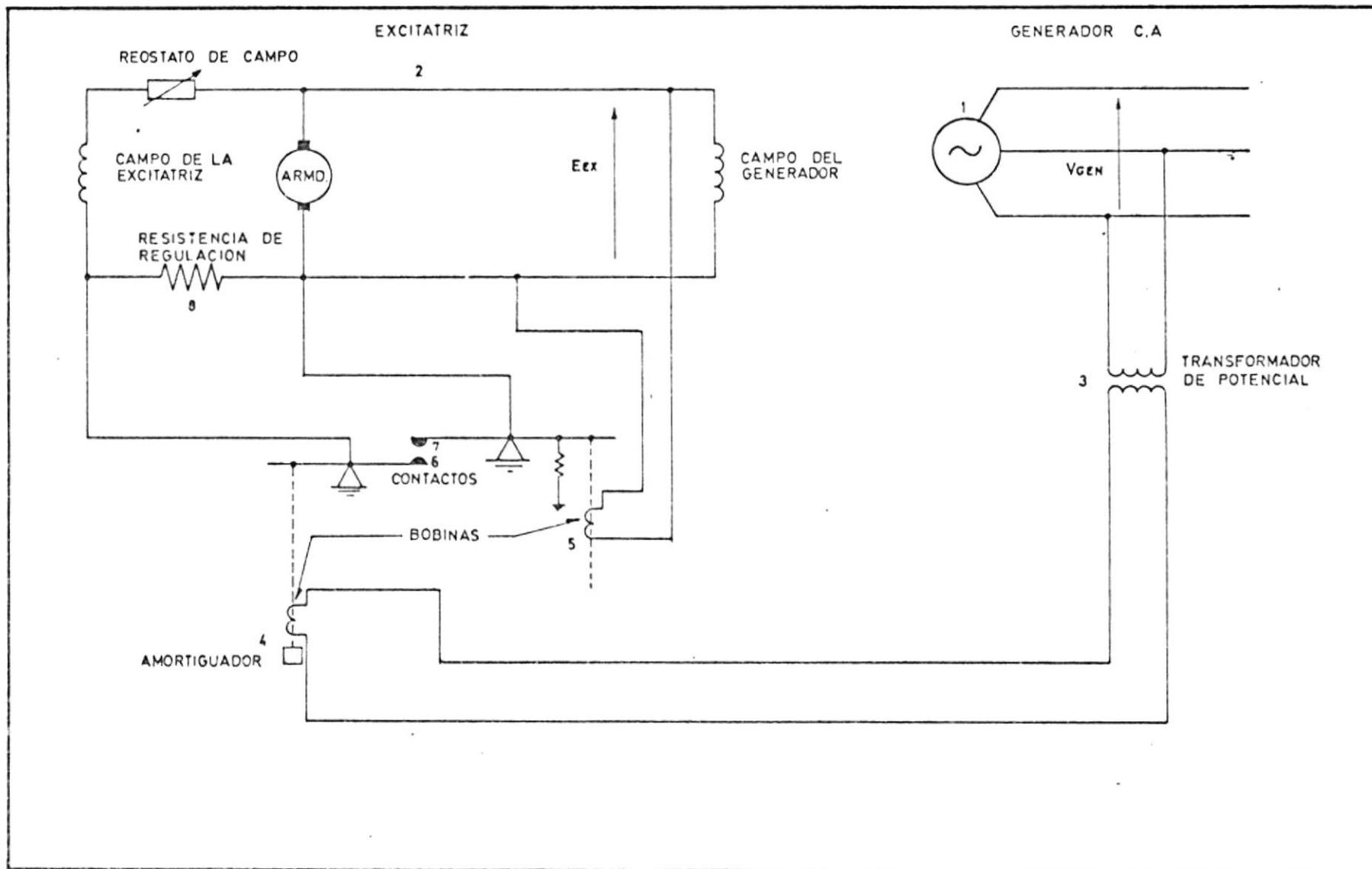
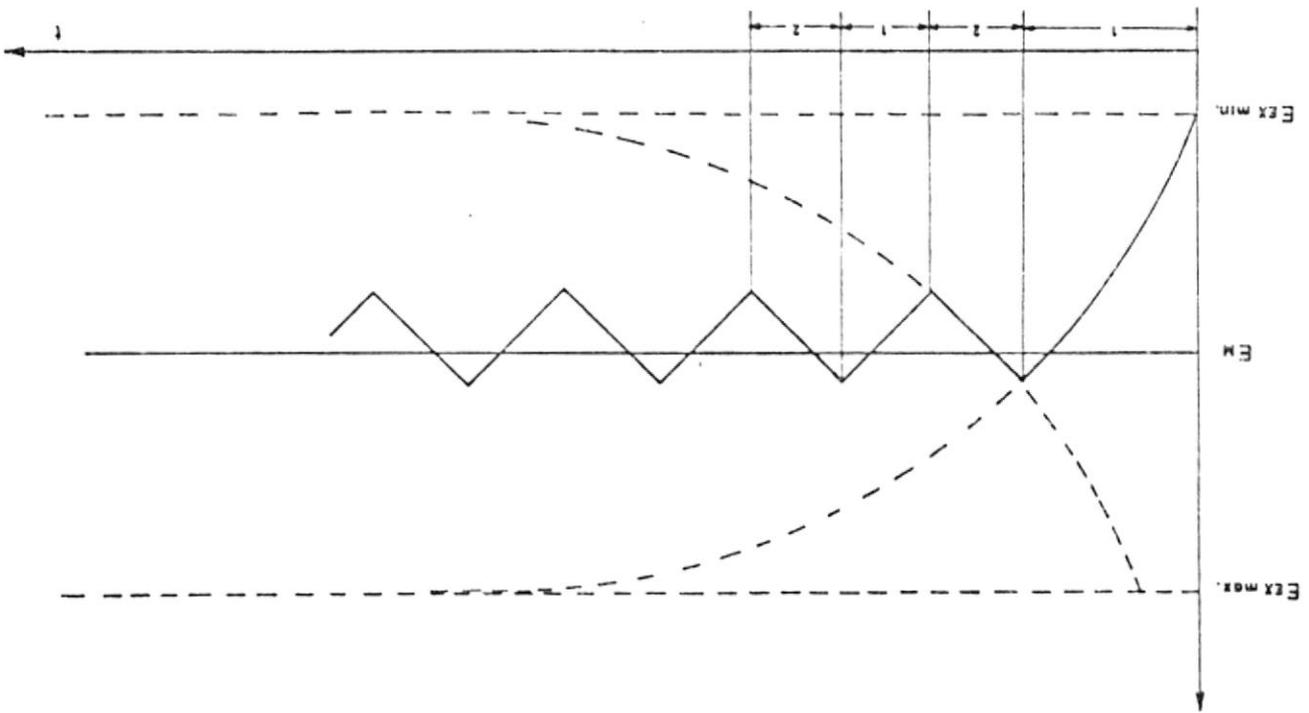


FIG. Nº 2-22 REGULADOR DE VOLTAJE TIRIL EN UN SISTEMA DE EXCITACION

FIG. Nº2-23 PROCESO DE REGULACION DE DOS PUNTOS EN EL CIRCUITO DE LA EXCITATRIZ
1 CONTACTOS CERRADOS 2 CONTACTOS ABIERTOS



El comportamiento del regulador en función del tiempo es determinado por una amortiguación por aceite e elástica aplicada en el núcleo de la bobina de inmersión [4].

2.2.2. Reguladores de Voltaje con amplificador rotativo

Generalmente ha existido la controversia en lo que respecta si es que el amplificador rotativo es parte del regulador de voltaje o si se puede considerar como un variante de una excitatriz piloto. Desde el punto de vista de regulación se considera al amplificador rotativo como la última etapa del regulador de voltaje.

Debido a la desventaja que tienen los elementos sensores de voltaje electromecánicos, tal cual se utilizan en sensores de voltaje de acción directa o indirecta, se prefiere utilizar elementos estáticos o transistorizados para obtener una detección de voltaje eficaz y colocarla en la entrada del regulador.

Los sistemas de control de excitación que poseen amplificadores rotativos tienen en su diseño la ventaja de que por cualquier eventualidad se puede eliminar el amplificador por medio de un determinado control y efectuar la regulación variando la resistencia

del campo de la excitatriz principal.

Usualmente se refleja esta ventaja en los tipos de excitatrices que utilizan amplificadores rotativos cuando se necesita efectuar mantenimiento; de esta manera, el generador de corriente alterna tendrá siempre su excitación ya sea automática (amplificador rotativo) o manual; básicamente un amplificador es un elemento que, gobernado por potencias pequeñas, es capaz de controlar una potencia mayor.

Con esta referencia se puede considerar que el generador de corriente continua es un amplificador de potencia.

Una potencia elevada se puede obtener controlando la excitación de uno de varios generadores colocados en serie. La desventaja de esta formación es la lentitud de la respuesta y la pérdida de flujo por dispersión.

El amplificador rotativo, que en este caso es una amplidina, se caracteriza por tener un circuito magnético y por lo menos dos circuitos eléctricos en el rotor.

El estator tiene un devanado de control de campo o de excitación en el eje directo, además posee un devanado de compensación diseñado para crear un flujo igual

y de sentido contrario al producido por la corriente de armadura en el eje directo.

Un par de escobillas CiC' (figura N° 2-24) están localizadas en el eje en cuadratura (al igual que un generador de corriente continua convencional), de modo que en ellos se induce una fuerza electromotriz. Cuando el generador está girando a una velocidad constante y despreciando la saturación magnética el voltaje inducido en las escobillas del eje en cuadratura de la armadura será:

$$E_{cc'} = K_c i_e$$

donde:

$E_{cc'}$ = Fuerza electromotriz inducida en el eje en cuadratura.

K_c = Constante

i_e = Corriente de campo o de excitación.

Al cortocircuitarse las escobillas del eje en cuadratura circula entre ellas una corriente, creándose a su vez un flujo; en este punto se ha producido la primera etapa de amplificación. Este par de escobillas actúan como el devanado de un estator creando un flujo que a su vez inducen una fuerza electromotriz en otro par de escobillas localizadas en el eje directo de la armadura; de igual manera, si el generador continúa -

girando a una velocidad constante y despreciando la saturación magnética, el voltaje inducido en las escobillas dd' será:

$$E_{dd'} = K_d \cdot i_c$$

donde:

$E_{dd'}$ = Fuerza electromotriz inducida en el eje directo

K_d = Constante

i_c = Corriente entre las escobillas cc'

Como se mencionó al principio tiene un devanado de compensación en cuyos terminales se conecta la carga.

El retardo de tiempo más sensible detectado en la amplidina es el producido por la constante de tiempo (T_{aq}) del eje en cuadratura que fluctúa entre 0.02 y 0.25 segundos.

Al emplear la amplidina en un sistema de excitación se lo conecta en serie con el campo de la excitatriz principal de modo que cree un voltaje de elevación-disminución de acuerdo a las condiciones de operación del generador.

Un regulador de voltaje apropiado que sensa las variaciones de las condiciones externas del generador de corriente alterna proporciona excitación a la amplidina

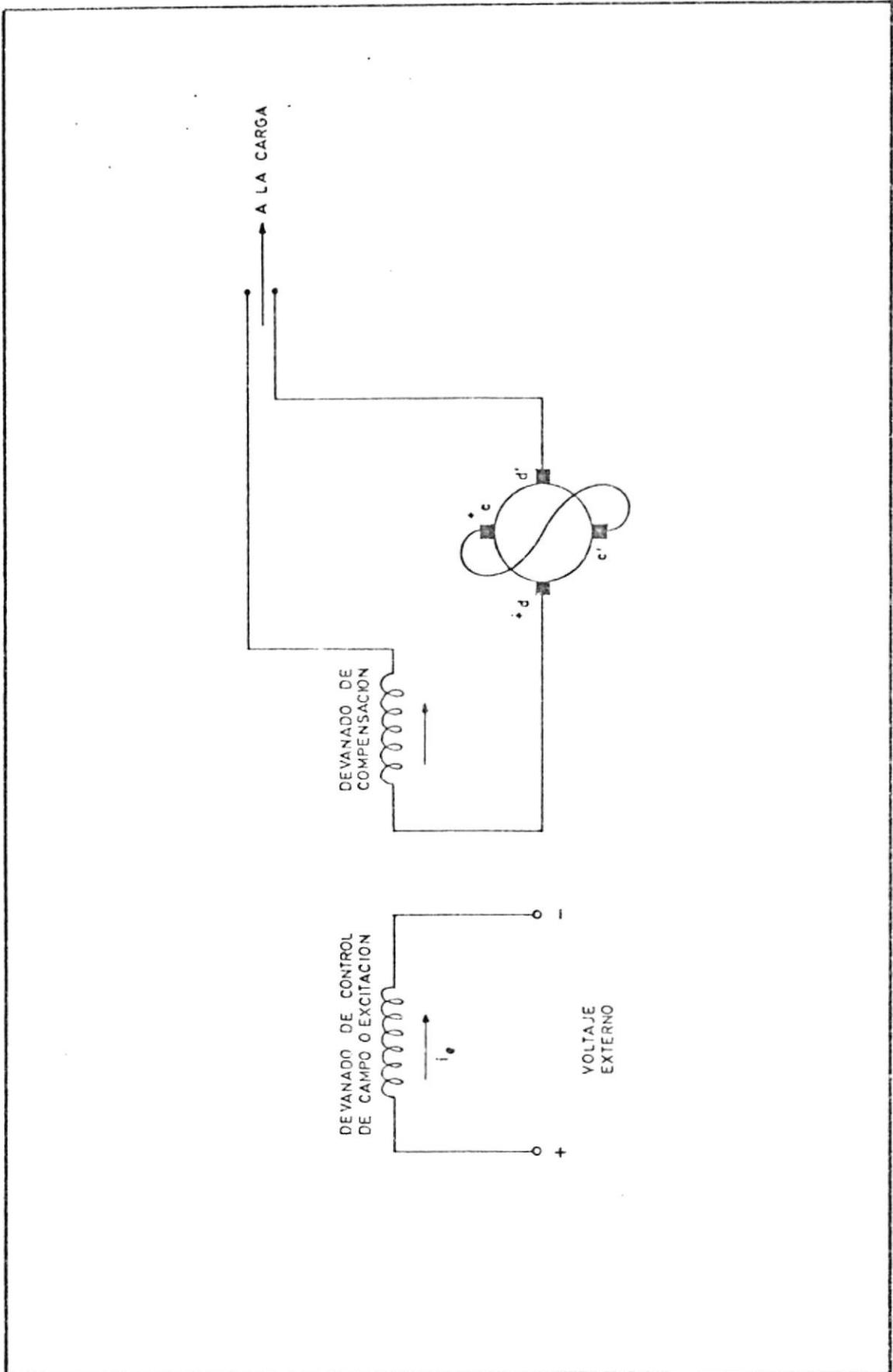


FIG N°2-24 CIRCUITO ELEMENTAL DE UNA AMPLIDINA

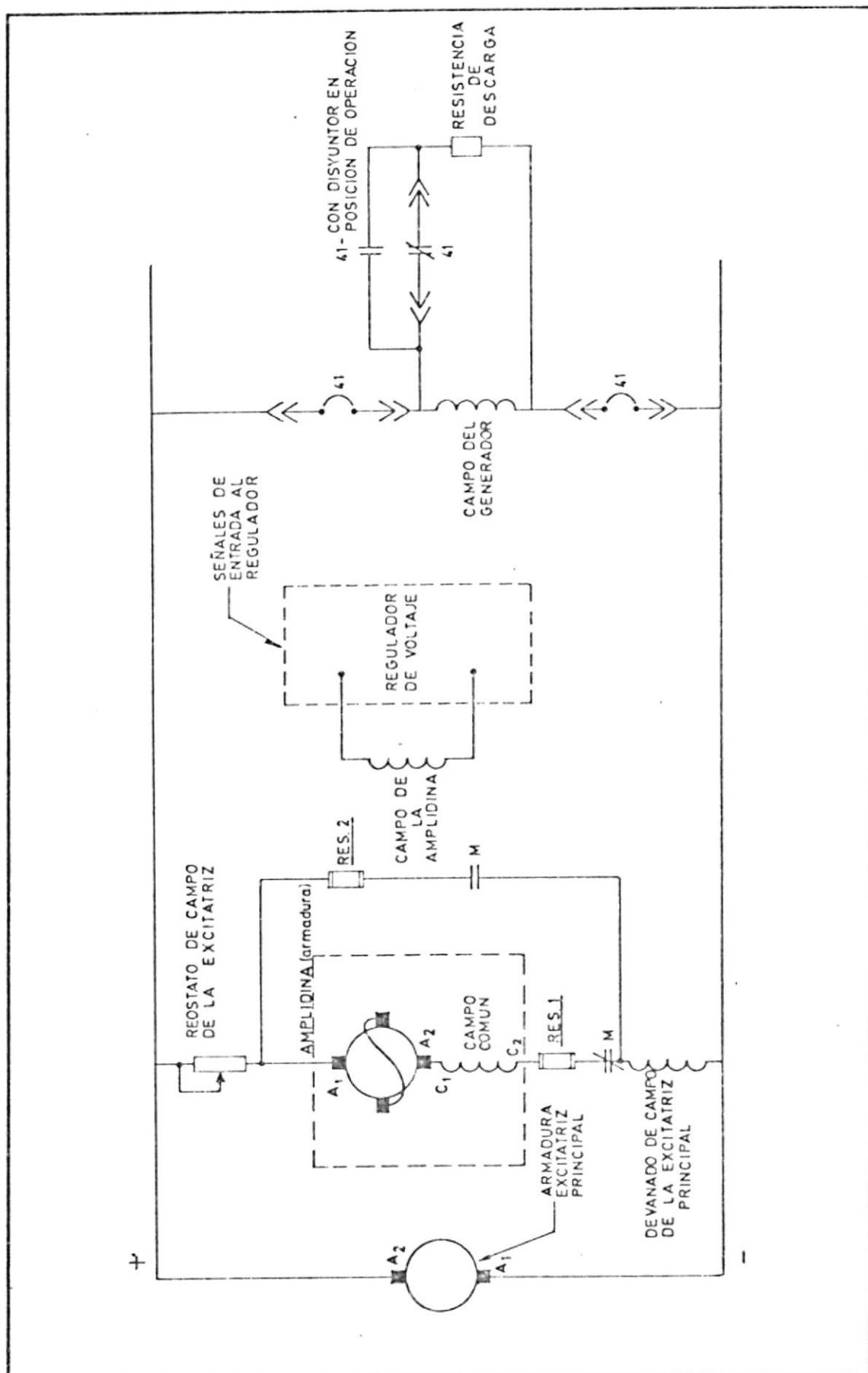


FIG. 25. DIAGRAMA DE UNA LINEA DE UN SISTEMA DE EXCITACION CON AMPLIDINA

na, la cual amplifica el voltaje recibido ya sea de elevación o disminución controlando el campo de la excitatriz principal y de esa manera el campo del generador síncrono.

En la figura N° 2-25 se observa un diagrama básico de la operación de un amplificador rotativo (amplidina). El regulador de voltaje sensa señales tanto de voltaje como de corriente a la salida del generador síncrono y excita a la amplidina para que aumenta o disminuya el voltaje en el circuito de la excitatriz principal.

Los contactos M se emplean para efectuar selección de funcionamiento de la excitatriz, es decir, regulación manual ó automática.

2.2.3. Reguladores de voltaje con amplificador magnético

Al utilizar un reactor saturable junto a un grupo de rectificadores se obtienen propiedades amplificadoras en el sentido de que efectuando pequeñas variaciones en la entrada o circuito de control, se obtienen grandes variaciones en la potencia de salida.

Básicamente el amplificador magnético consta de un reactor saturable, el cual generalmente es un núcleo cerrado laminado de hierro, 2 ó 3 grupos de bobinas, un

inductor y un rectificador aparte de una fuente alterna y otra directa.

En la figura N° 2-26 se observan ilustraciones: la a) nos muestra un reactor saturable y la b) el mismo reactor saturable, con la variante de que se encuentra conectado un rectificador en el circuito CA, dándole características de amplificador.

La propiedad más importante del reactor que le da características de amplificador es su capacidad para variar el grado de saturación del núcleo al cambiar la fuerza magnetomotiva (FMM) del devanado de control.

Cuando el núcleo no está saturado, la salida del devanado de la bobina localizada en el circuito de corriente alterna donde va localizada la carga, presenta una elevada impedancia, la cual va disminuyendo hasta considerársela despreciable cuando el núcleo está completamente saturado.

Cuando la relación del número de vueltas del devanado de control al número de vueltas del devanado de la salida es grande, es posible controlar una elevada corriente en el circuito de corriente alterna con pequeños cambios en el circuito de excitación de un generador lo que equivaldría a la señal de realimentación -

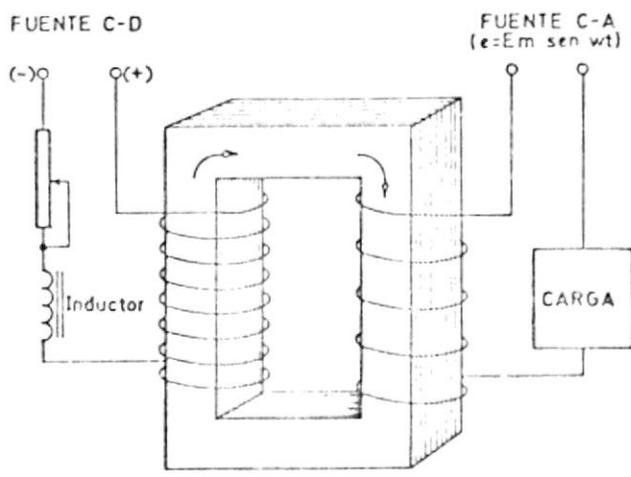
para efectos de la regulación del voltaje.

En la figura N° 2-26 (a) al variar el voltaje en el devanado de control, se amplifica la corriente que circula por la carga durante el semiciclo positivo de la onda de voltaje, pero en el semiciclo negativo la fuerza magnetomotiva efectúa una acción negativa o de oposición sobre la fuerza magnetomotiva del devanado de control, produciendo un efecto de desaturación con lo cual aumenta la impedancia en el circuito de corriente alterna y disminuyendo la corriente de la carga.

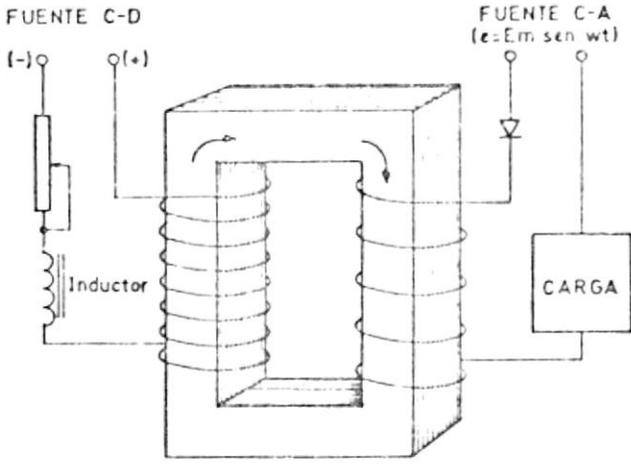
Para contrarrestar este efecto de oposición, en la figura N° 2-26(b) se halla colocado un rectificador el cual elimina el semiciclo negativo, por lo cual se suman las dos F.M.M. y se produce el proceso de amplificación. Esta es la diferencia básica entre un reactor saturable y un amplificador magnético.

El inductor que se observa es para garantizar que no se induzca fuerza magnética del circuito de corriente alterna al circuito de corriente continua.

En la figura 2-27(b) están graficadas la curva de voltaje de C.A. y la de la corriente de carga para cuatro condiciones diferentes de premagnetización.

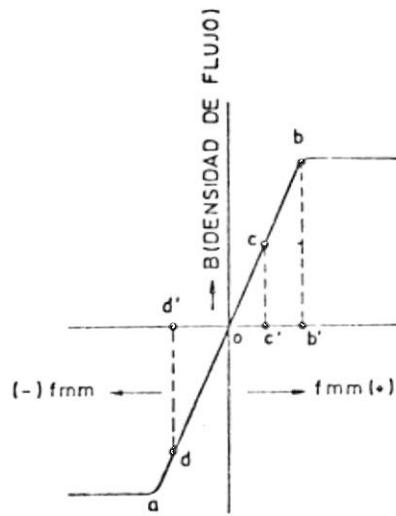


(a)

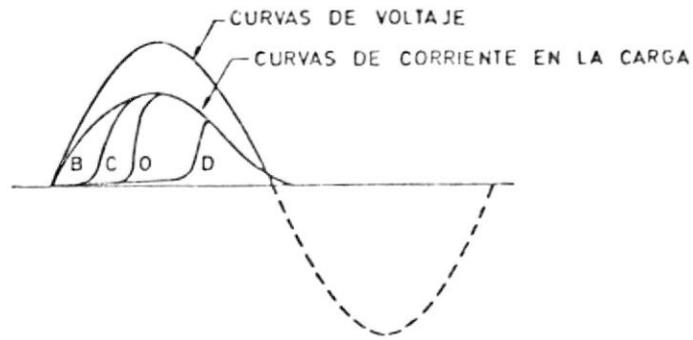


(b)

FIG. Nº 2-26. DIFERENCIAS ENTRE UN REACTOR SATURABLE SENCILLO (a) Y UN AMPLIFICADOR MAGNETICO (b)



a) CURVA DE MAGNETIZACION



b) CURVAS DEL AMPLIFICADOR MAGNETICO

El tiempo que se demora la corriente de carga en empezar su forma ascendente depende de la cantidad de premagnetización que tenga el reactor antes de su saturación, es decir, mientras menos excitación inicial se produzca en su devanado de control, el reactor tomará más tiempo en saturarse y la corriente de la carga demorará más en aumentar. Así tenemos entonces observando la figura 2-25(a) en que se muestra la curva de magnetización del reactor, que si se excita el devanado de control con una corriente que produzca una FMM en d' , deberá esperarse a que esta FMM se incremente hasta llegar al valor de b' en donde se produce la saturación, empezando a crecer la corriente de carga tal como se puede apreciar en la curva D de la figura 2-27(b); de igual modo se puede analizar las curvas B, C y D en las mismas gráficas.

Con un diseño adecuado del núcleo y del devanado de control con corrientes de excitación extremadamente pequeñas, se pueden controlar corrientes de carga muy elevadas.

En la práctica, al trabajar el amplificador magnético tiene 2 devanados de campo para poder efectuar su subida y bajada de voltaje, puesto que no tienen polaridad reversible.

Los amplificadores magnéticos pueden ser utilizados para amplificar una señal de error de voltaje a un nivel de potencia suficiente como para aplicarlo al campo de un amplificador rotativo (amplidina). También pueden enviar la señal amplificada directamente al campo de la excitatriz.

El amplificador magnético tiene ventaja sobre el amplificador rotativo en el sentido que no tiene partes móviles (rotativos), el tiempo de calentamiento es cero, larga vida útil y construcción firme.

2.2.4. Reguladores estáticos de voltaje (Estado sólido)

Como se ha mencionado, los reguladores controlan el voltaje de salida de un sistema generador de potencia, controlando la cantidad de corriente aplicada a la excitatriz o al campo del generador. Esto incluye excitatrices rotativas con escobillas, sin escobillas o excitación directa sobre el campo del generador.

Específicamente el regulador de voltaje tipo estático SR H (Basler Electric) tiene una corriente nominal continua de salida de 20 amperios (corriente directa) a su voltaje nominal respectivo con una capacidad de alcanzar voltajes de techo hasta un valor

de 40% sobre el nominal.

Este regulador consiste de un circuito integrado, - transistores de silicón, transformadores, diodos de silicón, resistencias y condensadores no electrolíticos.

El regulador SR H tiene las siguientes características:

- Regulación $\pm 1/2$ del 1% de vacío a plena carga.
- Desviación de la Regulación. Menos de $\pm 1/2\%$ para cambio de temperatura de 50°C.
- Respuesta de Regulación Menos de 17 milisegundos
- Subida de Voltaje Provee subida de voltaje del generador con un voltaje residual del 10%.
- Rango de ajuste de voltaje. $\pm 10\%$ del nominal.
- Protección de sobrevoltaje. Provee protección interna de sobrevoltaje que limita la salida del generador a un 135% del nominal.
- Temperatura ambiente de operación. -40°C a + 70°C (-40°F a + 158°F)
- Temperatura de almacenamiento. -40°C a + 100°C (-40°F a + 212°F).

Operación del regulador de voltaje.- Tomando como referencia al diagrama de bloques del regulador de la figura N° 2-28 se describirá de una forma general el funcionamiento y operación de cada uno de los bloques.

Potencia de entrada (alimentación).- Es aplicada a los terminales 3 y 4 y luego a la etapa de potencia del rectificador de silicón (SCR).

Etapa de potencia (SCR).- El ángulo de conducción del SCR es el que determina la cantidad de corriente de salida hacia el campo de la excitatriz del generador. El ángulo de conducción a su vez es controlado por los pulsos intermitentes sobre la puerta del SCR que provienen del circuito sensor y de disparo. Mientras mayor es el ángulo de conducción de los SCR, mayor es la corriente de salida hacia el campo de la excitatriz.

Transformadores de Potencial.- Son los encargados de sensor el voltaje de salida del generador ya sea en una conexión trifásica o monofásica y entregarlo reducido proporcionalmente a un valor de operación al circuito sensor.

El voltaje de salida del devanado secundario del transformador luego de ser rectificado se lo aplica a través de un divisor de voltaje al circuito sensor y de

disparo de los SCR.

Circuito sensor y de disparo. - Está formado por componentes electrónicos los cuales sensan cualquier cambio en el voltaje de salida del generador, y transforman dichas variaciones en pulsos de puerta que constituyen el circuito de disparo de los SCR y permiten a la etapa de potencia (SCR) conducir y proveer la adecuada corriente al campo de la excitatriz para mantener constante el voltaje del generador. Cuando el circuito sensor y de disparo determine que la salida del generador es demasiado baja, el pulso de puerta es aplicado al principio del ciclo lo que repercute en un mayor período de conducción, circulando mayor corriente en la excitatriz y elevando el voltaje de salida del generador. Cuando la salida del generador es elevada, el pulso de puerta actúa al final del ciclo produciendo menor circulación de corriente en la excitatriz, disminuyendo el voltaje de salida del generador.

Subida de voltaje inicial. - El circuito sensor y de disparo produce la elevación de voltaje inicial sin necesidad de utilizar fuente externa. Envía pulsos de puerta a los SCR cuando el voltaje en los terminales de alimentación es de 5% al 10% del valor nominal. Estos pulsos hacen que los SCR conduzcan excitando el

campo y elevando el voltaje del generador a su valor de operación.

Ajuste de estabilidad.- Se aplica al circuito sensor y de disparo una señal de realimentación tomada de la salida de la excitatriz. Esta señal controlada por el reóstato de ajuste de control de estabilidad, evita que el voltaje del sistema oscile.

Ajuste de voltaje.- Utilizando un reóstato se puede ajustar el valor generado en un rango $\pm 10\%$ del valor nominal.

Compensación de paralelo.- Si se va a operar el generador en paralelo con otros, se toma una señal de voltaje para los transformadores de potencial. Esta corriente es proporcional en magnitud y fase a la de la línea. El secundario del transformador de corriente utilizado para tomar la señal se conecta en serie con el secundario de los transformadores de potencial y el puente rectificador. El voltaje de C.A. aplicado al rectificador, será la suma vectorial del voltaje de los transformadores de potencial y de la señal del T.C. Se obtiene por consiguiente que si dos generadores operan en paralelo y la excitación de uno de ellos es excesiva, el circuito compensador de paralelo, repartirá la corriente de excitación entre los

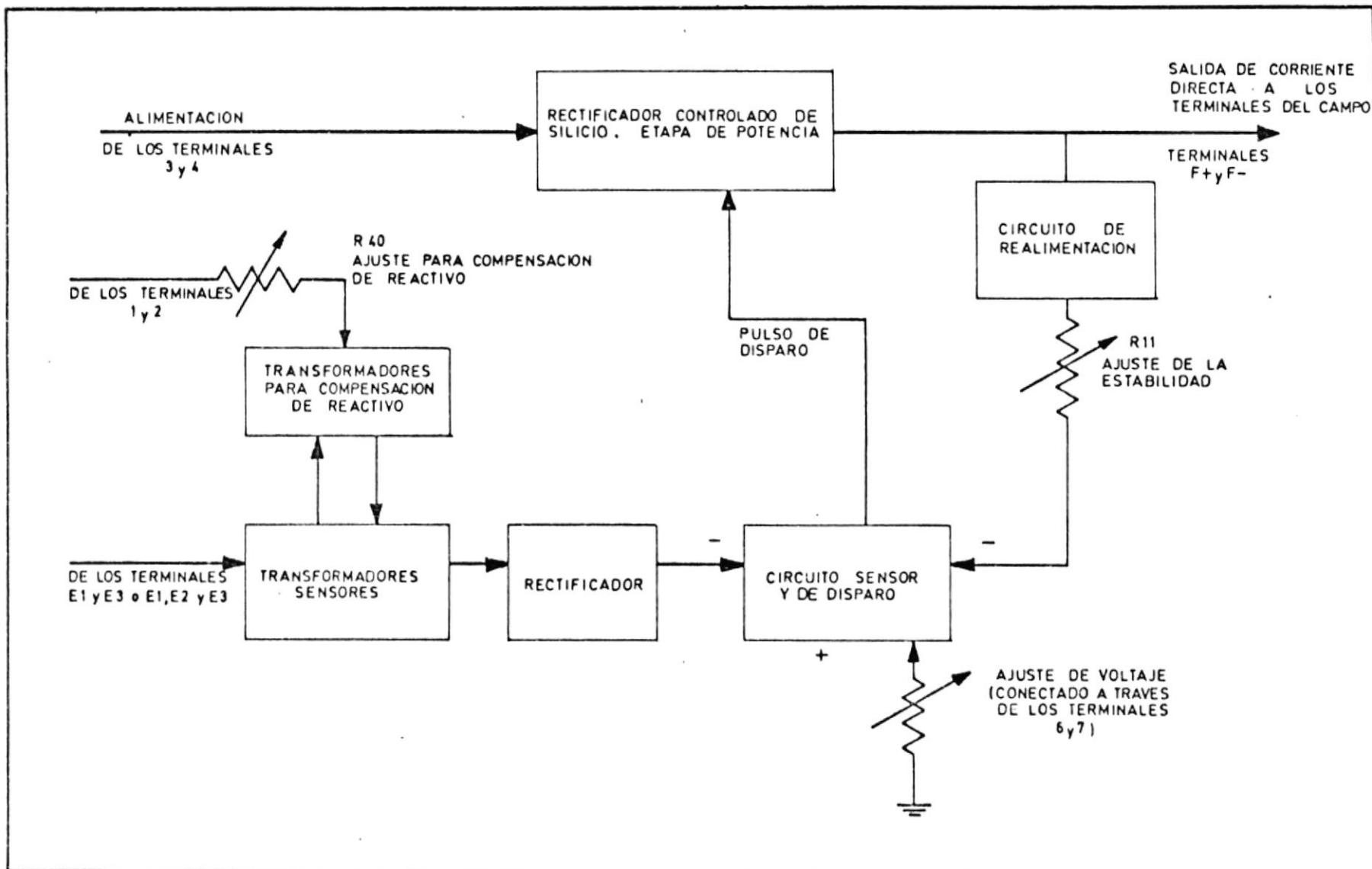


FIG. Nº 2-28 DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN REGULADOR DE VOLTAJE ESTATICO

generadores, de modo que las corrientes circulares - se minimizarán y cada uno entregará una cantidad de reactivo proporcional.

En la figura Nº 2-29 se encuentra el regulador de voltaje descrito anteriormente actuando sobre el campo de la excitatriz de un generador. Esta conexión constituye el circuito del diagrama de bloques de la figura Nº 2-27.

Se observa en la figura Nº 2-28, el transformador de corriente y el transformador de potencia distribuido utilizados para el circuito de compensación. En los terminales 1 y 2 se conecta un interruptor que se cierra para proteger el transformador de corriente en caso de no utilizarse el circuito de compensación.

REGULADOR DE VOLTAJE

compensacion paralela	1
potencia de entrada	2
	3
	4
	5
reostato de ajuste de voltaje	6
	7
	8
	F0
potencia de campo	F+
voltaje del generador	E1
	E2
	E3

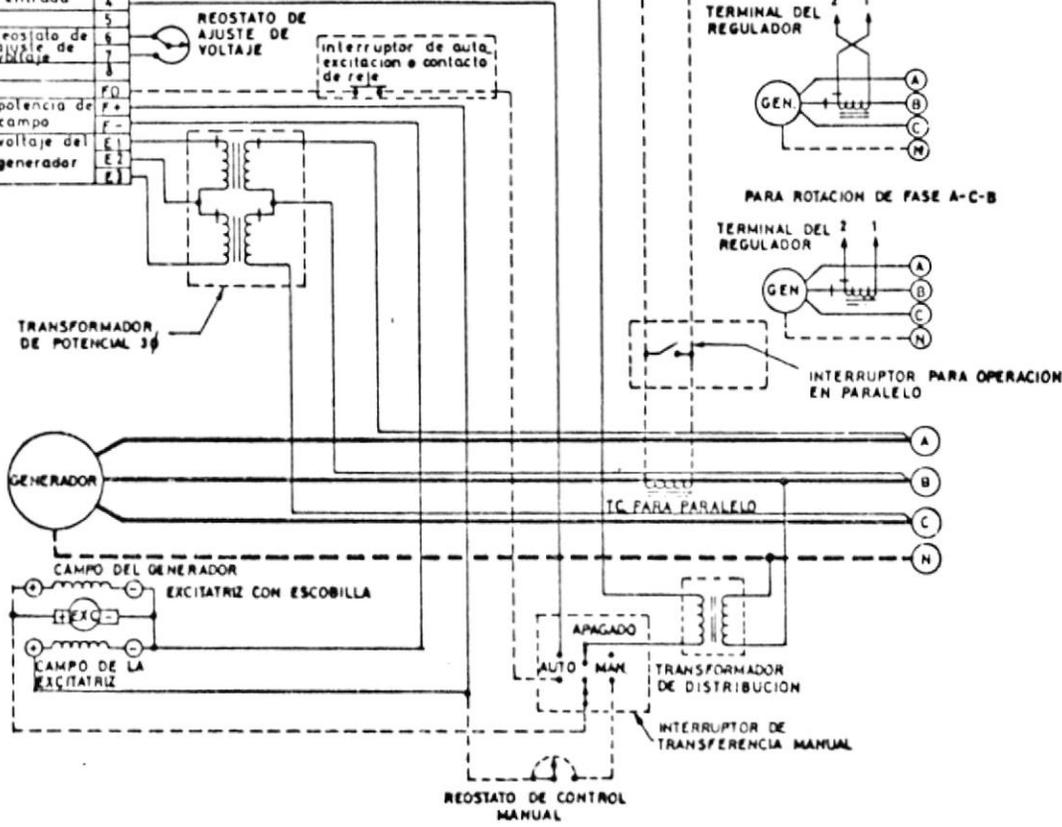


FIG. Nº2-29 DIAGRAMA DE INTERCONEXION PARA EXCITACION CON ESCOBILLAS

CAPITULO 3

DESCRIPCION DE LOS REGULADORES A SEP ANALIZADOS

3.1. RAZONES DE SELECCION

Utilizando una misma unidad generadora con su respectivo sistema de excitación se escogieron dos tipos de reguladores para efectuar un estudio comparativo de su comportamiento a la respuesta de la excitación en estado normal y sometida a perturbaciones (carga).

Los reguladores de voltaje escogidos corresponden a diferentes fabricantes, así tenemos que el regulador NA - 101 con amplidina en la excitatriz pertenece a la General Electric y puede ser clasificado dentro del grupo de sistemas de excitación con amplificador rotativo. El otro regulador de voltaje el Silverstat, pertenece a la Westinghouse, tiene elementos electromecánicos y se lo ubica en el grupo de sistemas de excitación con reguladores de voltaje de acción directa.

Para efecto de realizar una comparación como en el presente estudio, es necesario situar los elementos comparados bajo un esquema único, someterlo a cambios y observar los resultados. Debido a lo mencionado anteriormente, los reguladores de voltaje NA-101 con Amplidina y Silverstat

stat, por sus elementos y formas de respuesta encajan bajo un mismo tipo de sistema tal cual se muestra en el capítulo 5, se colocan los valores correspondientes a cada una de sus constantes de tiempo y ganancias, y se observan las respuestas de cada uno de ellos.

El Silverstat es un regulador que ha estado en uso por muchos años pero su utilidad ha decaído y ha sido desplazado por otro tipo de reguladores. La Amplidina en conjunto con el regulador NA-101 tiene un uso más efectivo que el anterior por poder ser utilizada en conjunto con excitatrices de mayor capacidad. Si bien es cierto su respuesta es mejor que la del Silverstat aún distta mucho de ser el sistema de excitación efectiva para una adecuada respuesta de voltaje de un elemento generador.

3.2. REGULADOR DE VOLTAJE CR 7931-NA-101 CON AMPLIDINA

El regulador de voltaje CR 7931-NA-101 está diseñado para regular automáticamente el voltaje terminal de generadores síncronos.

El regulador está normalmente equipado con un circuito limitador de baja excitación el cual evita que el generador de corriente alterna tome valores más bajos de excitación que el de un valor deseado preestablecido.

También posee un circuito limitador de sobreexcitación que tiene como finalidad evitar el exceso de excitación sobre un valor ya establecido.

En la simulación se verá que estos valores vienen dados por $V_{Lm\acute{a}x}$ (voltaje máximo del limitador) y $V_{Lm\grave{i}n}$ (voltaje mínimo del limitador).

Un reactor de repartición es incluido para permitir la división apropiada de corriente reactiva y para regular el flujo y repartición de reactivo entre generadores operando en paralelo.

Este regulador de voltaje incluye las siguientes unidades:

- Panel de control: Motor de transferencia, arrancador del primotor.
- Panel auxiliar: Estabilizadores, transformadores de potencial, reactor de repartición.
- Panel del regulador de voltaje; y
- Panel limitador de amperios reactivos.

A continuación se presenta una breve descripción de cada uno de los elementos mencionados.

REGULADOR DE VOLTAJE.- Tal como se indica en la figura N° 3-6, el regulador puede ser incluido o excluido del

sistema de excitación mediante el uso del interruptor de control del regulador (CS).

Cuando el voltaje terminal del generador es mayor que el normal, el regulador entregará corriente de control de campo a la amplidina, de modo que el voltaje de ésta se opondrá y disminuirá el voltaje de excitación de la excitatriz y consecuentemente el del campo del generador, regresando el voltaje terminal del generador a su valor nominal.

Cuando el voltaje terminal del generador disminuye, se produce el proceso inverso al anterior, es decir aumenta el voltaje de la amplidina en sentido positivo, del campo de la excitatriz, del campo del generador y por consiguiente el voltaje terminal del generador aumenta también.

El reostato del campo de la excitatriz es ajustado de modo que cuando la unidad es sincronizada el voltaje de la amplidina es cero. A medida que la carga aumenta, el regulador de voltaje envía una señal al campo de control de la amplidina, la cual aumenta su voltaje, aumentando también la excitación del generador en un esfuerzo por mantener constante el voltaje terminal.

Este cambio en el voltaje terminal de la excitatriz (EXI)

se lo observa en la figura N^o 5-15.

Al arrancar la unidad y obtener valores normales de voltaje y carga, la excitatriz mantiene un voltaje constante, al igual que el generador. Al producirse un disturbio, el voltaje del generador cae ligeramente pero inmediatamente se recupera gracias a la actuación del regulador de voltaje. La excitatriz trabaja en otro punto de operación, es decir, aumenta su voltaje hasta que cesa el disturbio (Figura N^o 5-16).

CIRCUITO DEL REGULADOR DE VOLTAJE

El regulador de voltaje recibe señal de voltaje a través del primario del transformador 1T (Figura N^o-3-6 b) el cual efectúa un cambio de voltaje: de trifásico a bifásico.

La resistencia A1R y el reactor lineal A1X transforman el voltaje bifásico en monofásico el cual básicamente es un promedio de la señal de voltaje trifásica original. La combinación del transformador 1T, el reactor A1X y la resistencia A1R se la denomina circuito de respuesta trifásica.

El reactor A2X y varios capacitores están conectados en paralelo con la resistencia A1R del circuito de respuesta trifásico. Estos elementos forman un circuito sensitivo.

vo de frecuencia nominal. Las capacitancias pueden ser incluidas o excluidas del circuito, de modo que la frecuencia de resonancia disminuya o aumente respectivamente de acuerdo al valor deseado. El circuito sensitivo de frecuencia mencionado anteriormente, es denominado circuito de compensación de frecuencia. Básicamente este circuito se utiliza para variar el voltaje de salida monofásico como función de la señal de frecuencia.

El circuito de compensación de frecuencia se lo aplica a los principales circuitos del regulador de voltaje: lineal, no lineal y de comparación.

En la figura N° 3-1(a) se aprecia el circuito lineal y en la figura N° 3-1(b) su característica voltaje - corriente, la cual es de tipo lineal. La resistencia de carga es imaginaria pues en realidad se aplica al campo de la amplidina. Al incrementar el voltaje, la corriente lo hará también en forma directamente proporcional.

El elemento básico del circuito no lineal es un reactor saturable. En la Figura N° 3-2 observamos los elementos del circuito (a) y su característica voltaje - corriente (b) y (c).

Cuando el reactor AISX empieza a saturarse, su reactan

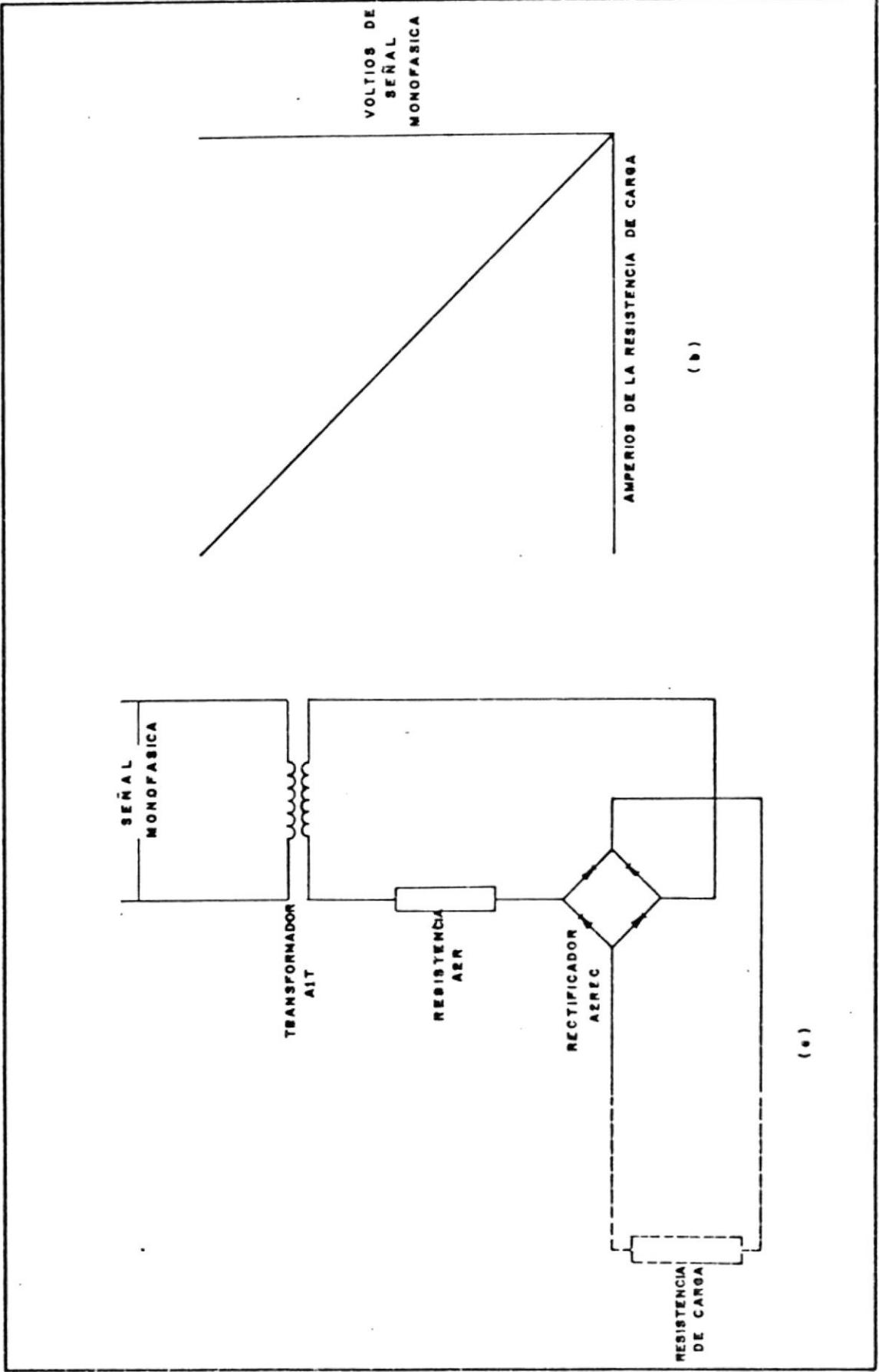


Fig.Nº3-1 Circuito Lineal y su característica Voltaje - Corriente de carga.

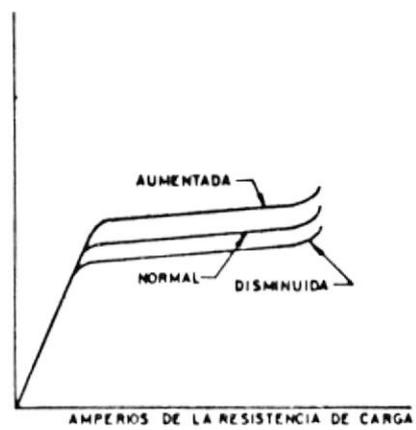
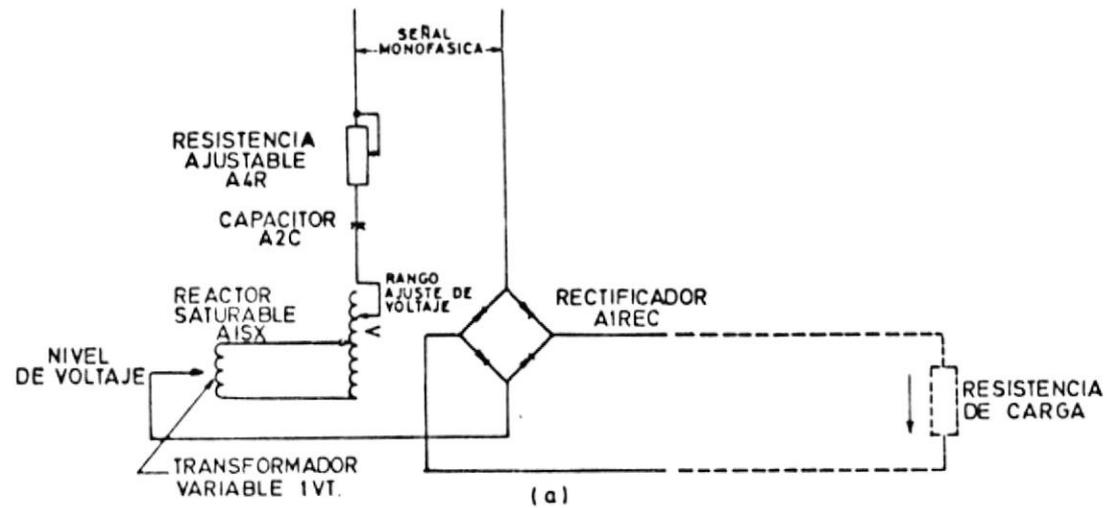
cia decrece y circulan corrientes elevadas con pequeños incrementos de voltaje. Al final del rango de saturación, la reactancia capacitiva empieza a predominar y la curva nuevamente aumenta su pendiente. La parte plana de la curva puede variar su pendiente variando el valor de la resistencia A4R tal cual se observa en la figura N° 3-2(c).

El circuito no lineal, en síntesis es una manera de obtener elevadas variaciones de corriente con pequeños cambios en la señal de voltaje sobre un valor preestablecido.

El transformador variable 1VT ayuda a seleccionar el voltaje deseado y la resistencia variable A4R la sensibilidad del circuito.

El circuito de comparación (figura N° 3-3) consta de la salida de los circuitos lineal y no lineal, la resistencia A3R, el reactor A3X y los rectificadores A1REC y A2REC en paralelo con el campo de control de la amplidina $F_1 - F_2$.

Si la salida de los dos circuitos es igual, el voltaje en F_1 será igual al voltaje en F_2 . Si la salida del circuito no lineal es mayor que la del circuito lineal, el voltaje F_2 será mayor que el de F_1 y se producirá una corriente en el campo de la amplidina que hará bajar el voltaje de



CIRCUITO CARACTERISTICO MOSTRANDO EL INCREMENTO O DECREMENTO DEL NUMERO DE VUELTAS DEL REACTOR SATURABLE (b)



CIRCUITO CARACTERISTICO MOSTRANDO EL EFECTO DEL INCREMENTO O DECREMENTO DE LA RESISTENCIA SERIE (c)

FIG. N.º 3-2 CIRCUITO NO LINEAL Y SU CARACTERISTICA VOLTAJE - CORRIENTE DE CARGA

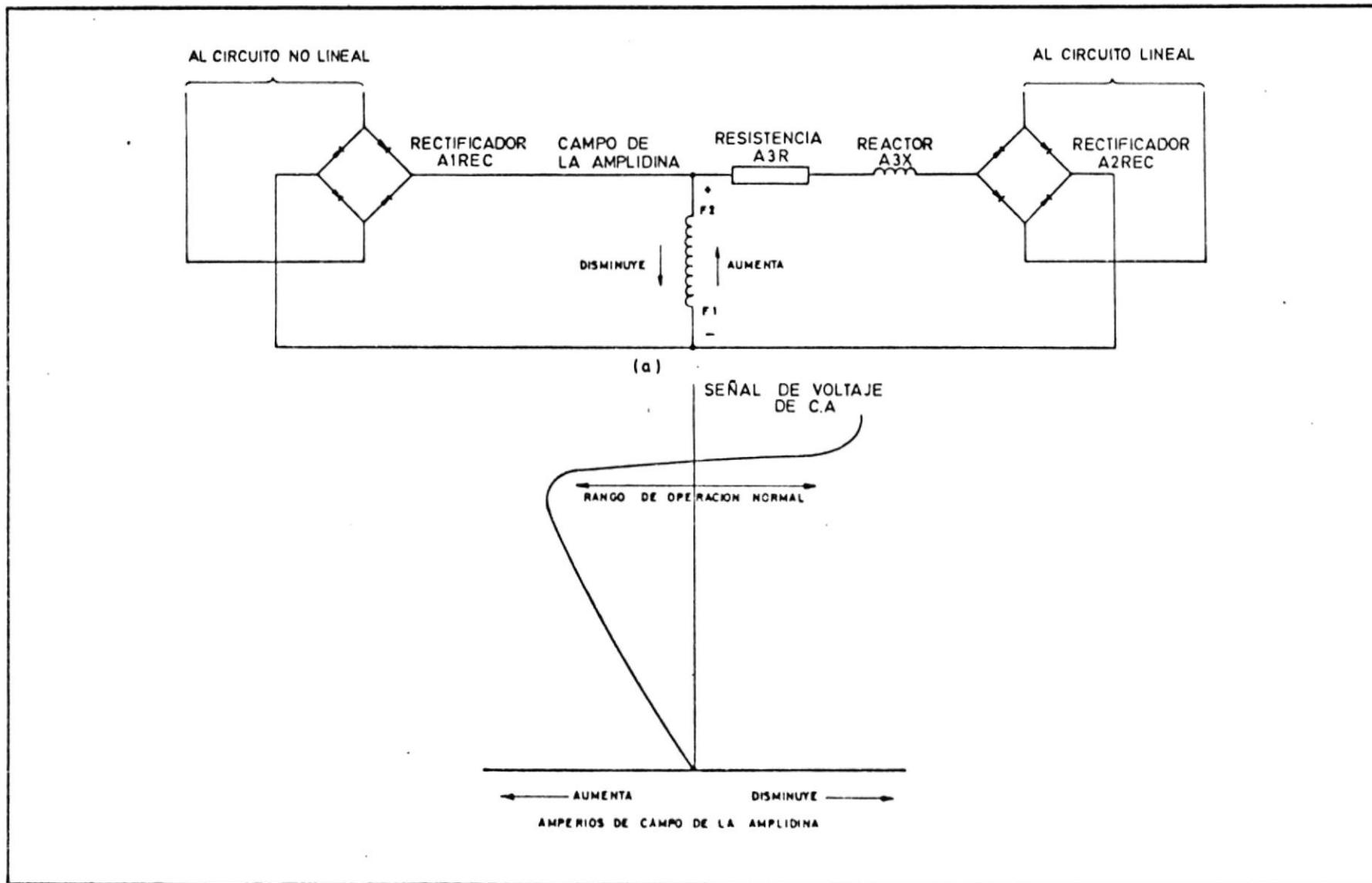


FIG. N.º 3-3 CIRCUITO DE COMPARACION Y LA CARACTERISTICA VOLTAJE - CORRIENTE DE CAMPO DE LA AMPLIDINA

esta disminuyendo el voltaje de excitación.

Cuando la salida del circuito lineal es mayor, el voltaje terminal del generador aumentará.

La característica completa del circuito del regulador se observa en la figura N^o 3-6(b). Se nota que es una combinación de las características del circuito lineal y del no lineal.

Con voltaje normal, las salidas de los circuitos lineal y no lineal serán iguales, por lo tanto no circulará ninguna corriente a través del campo de la amplidina.

Resumiendo podemos concluir que para alcanzar el valor normal de voltaje, actúa el circuito lineal; la operación normal del regulador es en la parte horizontal de la curva característica y para disminuir el voltaje actúa preponderantemente el circuito no lineal.

TRANSFORMADOR DE ESTABILIZACION

Este regulador al igual que los descritos en el capítulo anterior, utiliza un transformador de estabilización o de amortiguamiento, el cual evita que el regulador y por tal la excitatriz responda de una manera oscilatoria no amortiguada, ayudando además a obtener estabilidad de voltaje.

El presente regulador utiliza tres transformadores de estabilización (1ST, 2ST y 3ST) (figura N° 3-6a), los primarios de los cuales están conectados a los terminales de la excitatriz (armadura). Los secundarios de los transformadores están conectados en serie con el campo F₃-F₄ de estabilización de la amplidina.

Cuando el voltaje de la excitatriz empieza a elevarse, a través del secundario del transformador de amortiguamiento circula una corriente por el campo de estabilización de la amplidina en una dirección tal que se opone al incremento de voltaje en la excitación para evitar picos e inestabilidad. Cuando el voltaje de la excitatriz decae, se produce la operación contraria.

En las figuras N° 6-5 y 6-6 se observa claramente el efecto de la respuesta de voltaje tanto de la excitatriz como del generador cuando se elimina el circuito de estabilización, es decir se abre la alimentación del transformador de estabilización.

La resistencia 6R está conectada en serie con el primario de los transformadores de estabilización 1ST, 2ST y 5ST y permite el ajuste de la resistencia del circuito primario.

LIMITE DE MINIMA EXCITACION

Para evitar que un generador de corriente alterna disminuya su voltaje terminal a un valor tal que pueda llegar a perder estabilidad, se utiliza un limitador de amperios reactivos bajo excitados. Cuando el generador se encuentra operando en condiciones normales con el regulador y el limitador en servicio, la corriente reactiva bajo excitada es menor que el punto de trabajo del limitador, es decir que este no opera en estas circunstancias.

Si por algún motivo el regulador de voltaje reduce la excitación del generador a un valor por debajo del punto de ajuste, el limitador operará evitando que la excitación siga disminuyendo al mismo tiempo como su salida está conectada a un circuito de reposición de voltaje, este recalibra el valor del regulador para mantener un voltaje mayor en los terminales del generador, evitando así su pérdida de sincronismo.

En la figura N° 3-4 se muestra la curva de capacidad característica de un generador de corriente alterna. La línea llena indica el límite de operación estable del generador, mientras que la línea punteada indica una cierta posición de ajuste del circuito limitador de amperios reactivos bajo excitados.

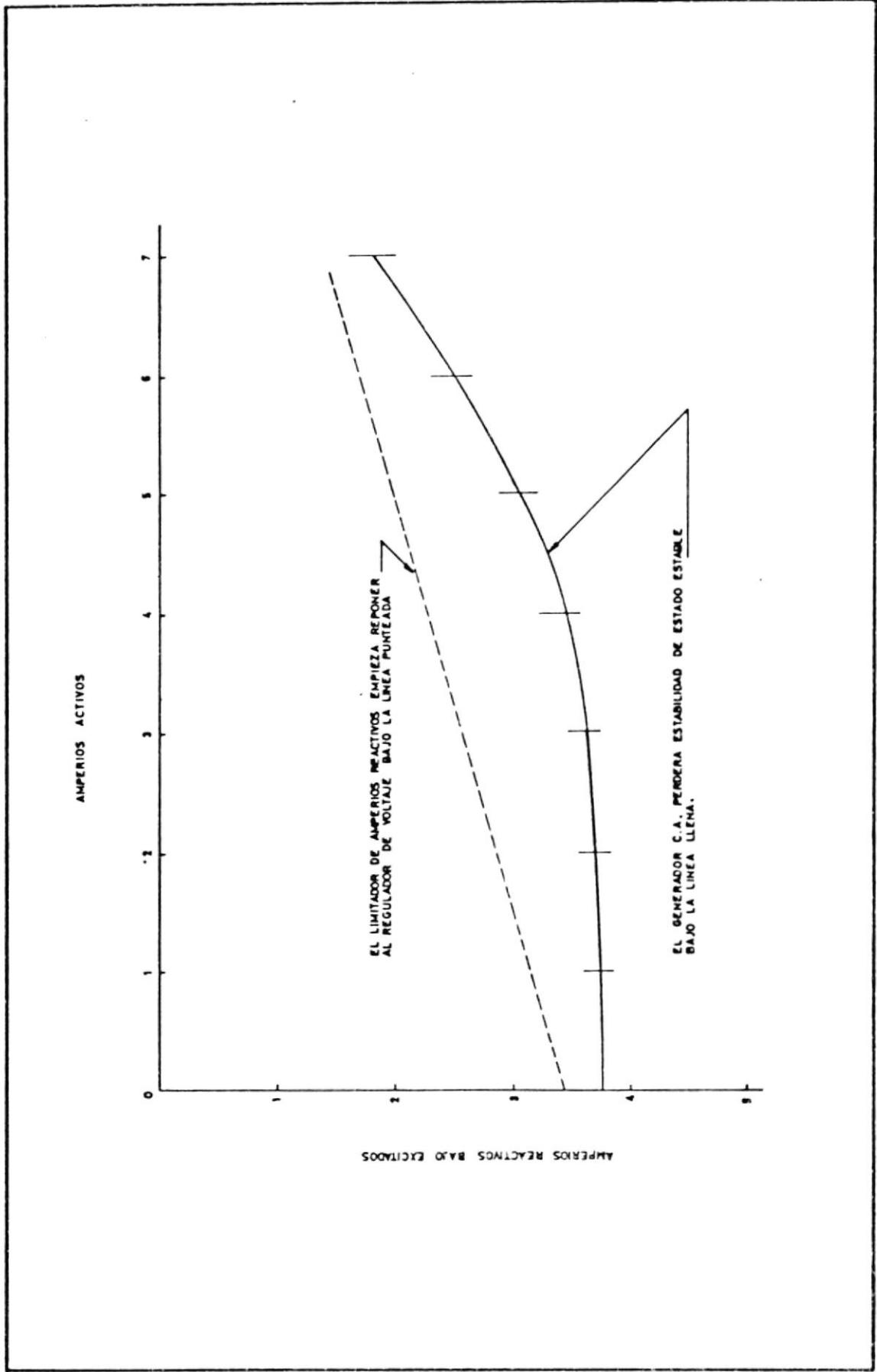


FIG. N.º 3-4 CARACTERÍSTICAS DE UN GENERADOR C.A. (Limitador de amperios reactivos i curva de capacidad)

auxiliar.

Su finalidad al igual que en otros reguladores es efectuar una repartición equitativa de la potencia reactiva y evitar la circulación de corriente reactiva entre los generadores cuando funcionan en paralelo. Tal cual se indica en las figuras N° 3-5 y 3-6(a) el devanado de ajuste del reactor está conectado al secundario de un transformador de corriente localizado en los terminales del generador sincrónico, mientras que el devanado aislado del reactor (fijo) está conectado a una de las fases del secundario de los transformadores de potencia localizada

COMPENSADOR DE CORRIENTE REACTIVA

También se lo denomina reactor de repartición quien junto al transformador de amortiguamiento y a los transformadores de potencia forman parte del denominado equipo auxiliar.

La distancia entre ambas curvas representa un margen de seguridad entre el punto de operación del limitador de ampieros reactivos bajo excitados y la característica de estabilidad de estado estable.

Se observa en esa figura que el generador en vacío puede operar dentro del límite de estabilidad con una cantidad mayor de ampieros reactivos bajo excitados que cuando trabaja a plena carga.

dos a la salida del generador, debiendo siempre ambos devanados del reactor estar conectados a la misma fase. El reactor variará principalmente la señal de voltaje al regulador en esta fase como función de la corriente reactiva del generador.

Cuando la corriente reactiva sobreexcitada aumenta, el voltaje en los terminales del generador se incrementará, de manera que la señal de voltaje entregada al regulador aumentará, obligándolo a bajar la excitación, reduciendo la corriente reactiva sobreexcitada si el generador está operando en paralelo con otro. Si el generador trabaja en la región bajo excitada, el regulador actuará en la forma contraria a la descrita anteriormente.

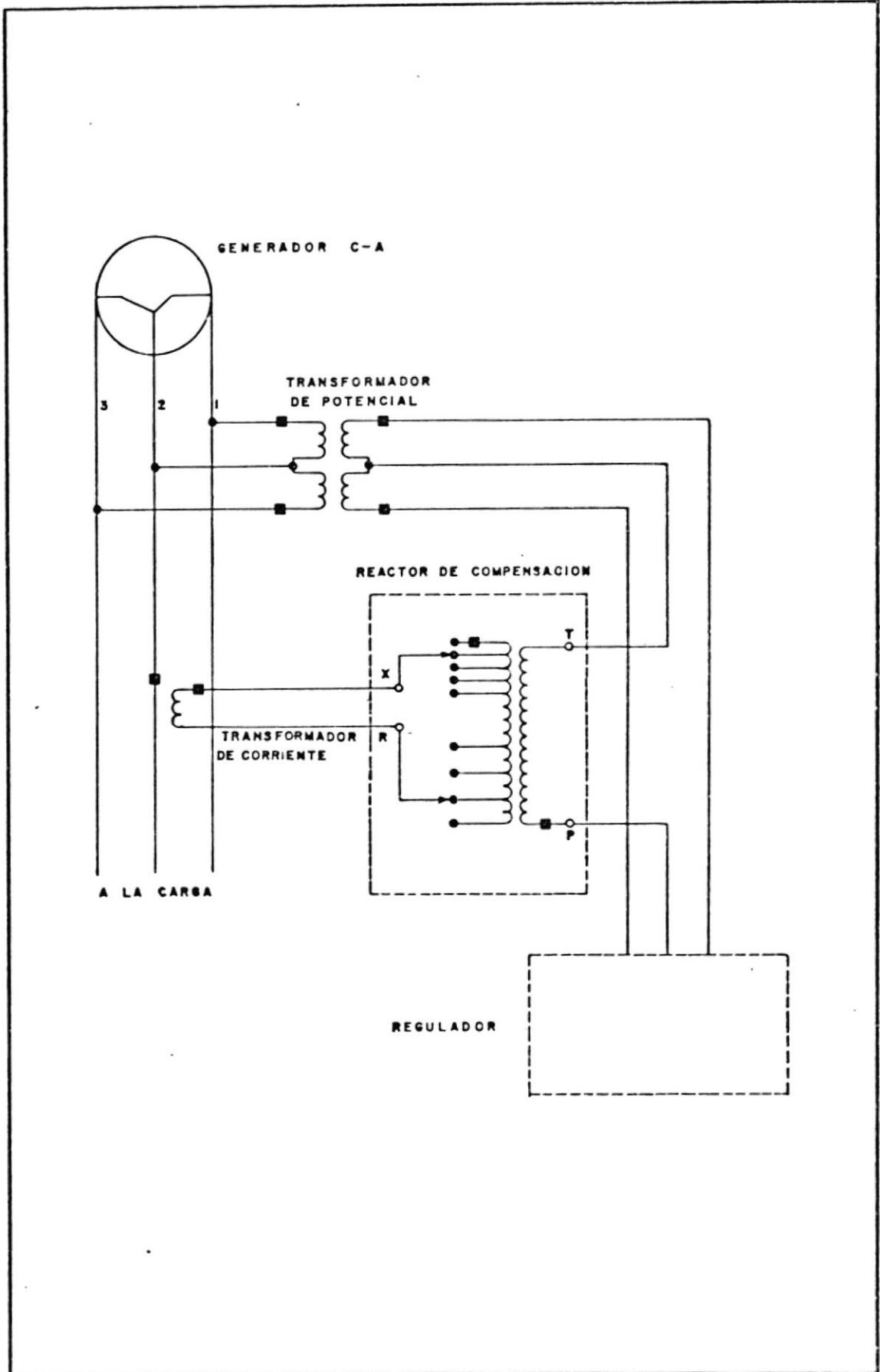
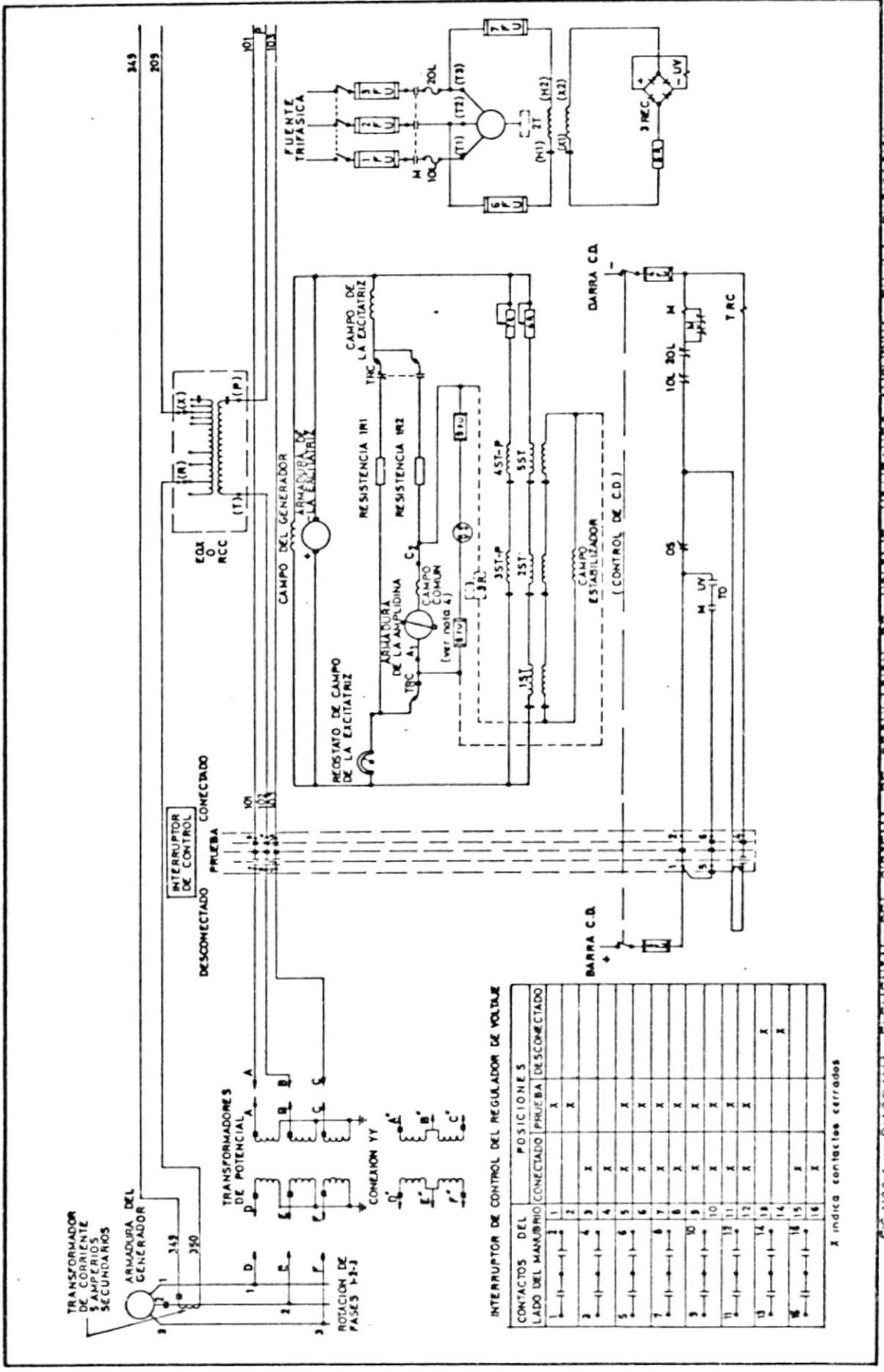


FIG. Nº3-5 CONEXIONES DEL REACTOR DE COMPENSACION



INTERRUPTOR DE CONTROL DEL REGULADOR DE VOLTAJE

CONTACTOS DEL LADO DEL MANDRIBO	POSICIONES	
	CONECTADO	DESCONECTADO
1	X	
2	X	
3		X
4		X
5	X	
6	X	
7	X	
8	X	
9	X	
10	X	
11	X	
12	X	
13		X
14		X
15	X	
16	X	

X indica contactos cerrados

FIG N3-6 a DIAGRAMA ELEMENTAL DEL SISTEMA DE REGULACION DE VOLTAJE UTILIZANDO AMPUDINA EN LA EXCITACION (cont. FIG. N2)

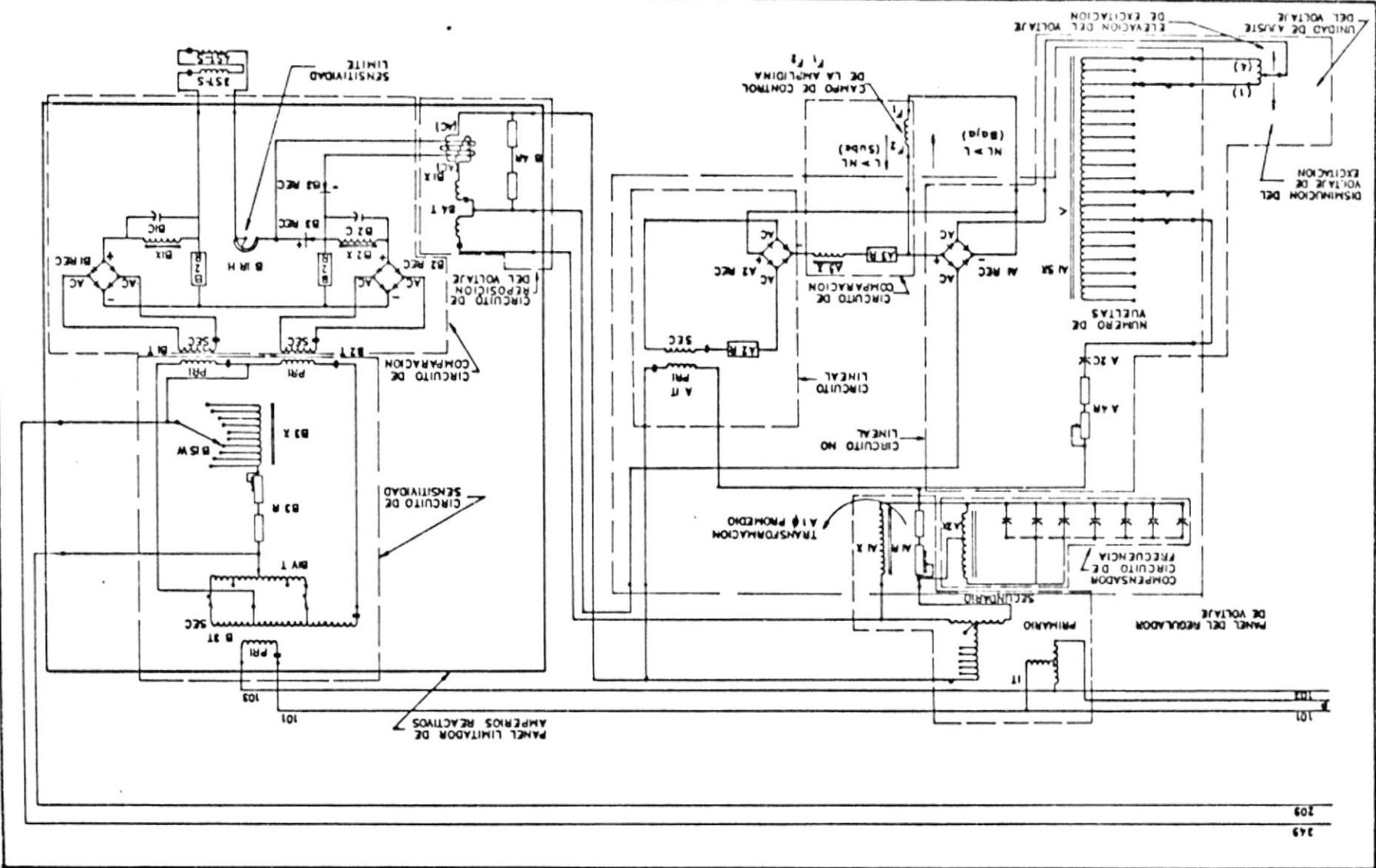


FIG No 3-6-B DIAGRAMA ELEMENTAL DEL SISTEMA DE REGULACION DE VOLTAJE UTILIZANDO AMPERINA EN LA EXCITACION (PARTIAL FIGURE 8)

NOMENCLATURA UTILIZA EN LAS FIGURAS 3-6(a) y 3-6(b)

MOTOR C.A.	Amplidina
OS	Interruptor de sobrevelocidad
EQX	Reactor
1FU, 2FU, 3FU	Fusibles
4FU, 5FU	Fusibles
6FU, 7FU	Fusibles
8FU, 9FU	Fusibles
M	Contacto magnético
10L, 20L	Calentadores de los relés de sobrecarga.
3 REC	Rectificador
1R1, 2R1	Resistencia
9R	Resistencia 1800 Ohmios, 200 Vatios
5R	Resistencia
6R, 7R	Resistencia
1ST, 2ST, 5ST	Estabilizadores
3ST, 4ST	Estabilizadores
CS	Interruptor del control del regulador del voltaje.
1T	Transformador
2T	Transformador
TRC	Contacto de transferencia
UV	Relé de bajo voltaje

V	Voltímetro de la amplidina
1VT	Unidad de ajuste de voltaje - transformador variable.
T.O.	Contacto con apertura <u>temporizada</u> .

PANEL DEL REGULADOR DE VOLTAJE

A1C1	Capacitor, 6MFD 0 4 MFD
A1C2	Capacitor, 0.25 MFD
A1C3	Capacitor, 0.5 MFD
A1C4, 5,6, 7	Capacitor, 1 MFD
A2C	Capacitor, 20 MFD
A2R, A3R	Resistencia, 25 Ohmios
A4R	Resistencia, Ohmios
A1 REC	Rectificador
A2 REC	Rectificador
A1SX	Reactor Saturable
A1T	Transformador
A1X	Reactor
A2X	Reactor
A3X	Reactor

PANEL LIMITADOR DE AMPERIOS REACTIVOS

B1C, B2C	Capacitores, 0.5 MFD
B1R, B2R	Resistencia, 200 Ohmios
B3R	Resistencia (ajustada a 8 ohmios)

B4R	Resistencia, 150 ohmios
B1 REC, B2 REC	Rectificador
B3 REC	Rectificador
B1RH	Reóstato, 500 Ohmios
B1SW	Interruptor de varias posiciones
B1SX	Reactor saturable
B1T, B2T	Transformador
B3	Transformador
B4T	Transformador
B1VT	Transformador variable
B1X, B2X	Reactor
B3X	Reactor

NOTAS:

1. Los devanados de compensación y control de campo principal de la amplidina tienen el mismo eje magnético que el de la corriente de carga en la armadura.
2. El interruptor de control del regulador de voltaje (CS) tiene 3 posiciones:
 - a. Con el interruptor en "desconectado", el regulador está fuera de servicio.
 - b. Con el interruptor en "prueba", el regulador es energizado solo para efecto de ajuste pero no entra en servicio.
 - c. Con el interruptor en "conectado", el regulador está en servicio.

3. Los primarios y secundarios de los transformadores no son mostrados juntos pero están marcados P ó S.
4. Los terminales de la armadura de la amplidina están marcados A₁ y C₂ y cuando el generador está en operación la polaridad de los terminales depende de la magnitud y dirección de la corriente que fluye a través de los devanados de control de campo de la amplidina. Si el campo F₁, F₂ se energiza con el terminal F₁ positivo, el terminal C₂ de la armadura se hace positivo.
5. Las polaridades instantáneas de los voltajes inducidos en los devanados de cada transformador, a excepción del transformador 1T, están indicadas por las marcas de polaridad, indicadas en los devanados en el diagrama elemental.
6. Los transformadores de potencial tienen una relación -tal, que proporcionen 115 voltios al regulador del voltaje.

3.3. REGULADOR DE VOLTAJE SILVERSTAT

La constitución básica y el funcionamiento de este regulador electromecánico de acción directa fue descrita en forma amplia en el Capítulo 2 del presente estudio.

Es necesario apuntar que su uso común es para excitatrices autoexcitadas de 125 voltios directos nominales cuyo generador no tenga una capacidad mayor a los 10 megavatios. Sin embargo, es posible su acoplamiento al sistema de excitación de un generador de corriente alterna de mayor capacidad (como en el presente caso) cuyo valor nominal sea 250 voltios con la finalidad de efectuar una comparación más acertada con el otro tipo de regulador.

La caja auxiliar de este regulador lleva una resistencia ajustable la cual está conectada en serie con el devanado primario del transformador de amortiguamiento.

Esta resistencia no es necesaria cuando la excitatriz tiene un valor nominal de 125 voltios.

Este regulador de voltaje no tiene limitador de corriente reactiva, razón por la cual el relé de pérdida de excitación debe operar en el punto que normalmente lo

hace el limitador de corriente bajo excitada.

En la simulación analógica del sistema generador-excitatriz no se incluye el limitador por lo expuesto anteriormente.

CAPITULO 4

SISTEMA A SER ANALIZADO

EXCITACION DE UNA UNIDAD GENERADORA CON TURBINA A VAPOR (Unidad N^o 1 EEE).

4.1. DESCRIPCION DEL SISTEMA

La finalidad del presente trabajo es analizar el comportamiento de un sistema de excitación en el dominio del tiempo al operar con dos reguladores de voltaje diferentes. Las variaciones de voltaje en la salida del generador y por lo tanto del sistema deben ser detectadas por el sistema de control de excitación, el cual por mayor simplificación que se trate de efectuar en el análisis debe considerar el generador de poder.

La simulación y el análisis del generador de poder síncrono requieren un estudio bastante detallado debido a las múltiples ecuaciones que se necesitan desarrollar y al modelo matemático específico que se adapte al sistema bajo estudio, además se requiere utilizar una computadora analógica de suficiente capacidad en la cual se puedan introducir todas las variables y constantes necesarias.

Debido a lo mencionado anteriormente, el generador utilizado en conjunto con la excitatriz se lo linealiza,

tratando en lo posible de no alterar sus valores y dimensiones originales, trabajando de igual manera con valores reales del fabricante.

El generador eléctrico tiene una salida normal continua de 35.294 KVA con un factor de potencia de 0.85, 13800 voltios, trifásico, 60 Hertz, 3600 RPM y 0.035 Kg/cm² (0.5 p.s.i.) de presión de hidrógeno.

La capacidad del generador se incrementa a 44.118 KVA aumentando la presión de hidrógeno hasta 2.11 Kg/cm² (30 p.s.i.). Si se enfría sólo con aire, la capacidad máxima del generador es de 21.176 KVA.

La excitación es entregada por una excitatriz acoplada directamente con una capacidad de 140 kilovatios, corriente directa con regulación de voltaje utilizando amplidina. Se utiliza una excitatriz auxiliar de emergencia movida por un primotor trifásico, 250 HP, 60 Hertz y 2300 voltios.

Para efecto del análisis del sistema de control de excitación se tomarán en cuenta únicamente el generador de poder conectado a una barra infinita, la excitatriz y el circuito de realimentación entre ambos.

En lo que respecta a la excitatriz se considera solamente la realimentación producida por el lazo estabilizador

y la función saturación de la excitatriz. No entra en consideración el reactor de compensación de corriente reactiva pues no se analiza al generador funcionando en paralelo con otros y además se simplifica la saturación del generador.

En las figuras 4-1, 4-2 y 4-3 se muestran las curvas de capacidad del generador y de saturación de la excitatriz y del generador respectivamente.

En la curva de saturación de la excitatriz se han tomado valores de amperaje y voltaje que se utilizan en el programa analógico.

La excitatriz es del tipo autoexcitado (paralelo) con reóstato de campo para variación manual de voltaje y lleva en su campo colocado en serie una resistencia variable o un voltaje variable dependiendo del regulador de voltaje utilizado.

4.2. VALORES A SER EMPLEADOS

Los valores suministrados por el fabricante son los que se indican a continuación:

SISTEMA DE GENERACION Y EXCITACION

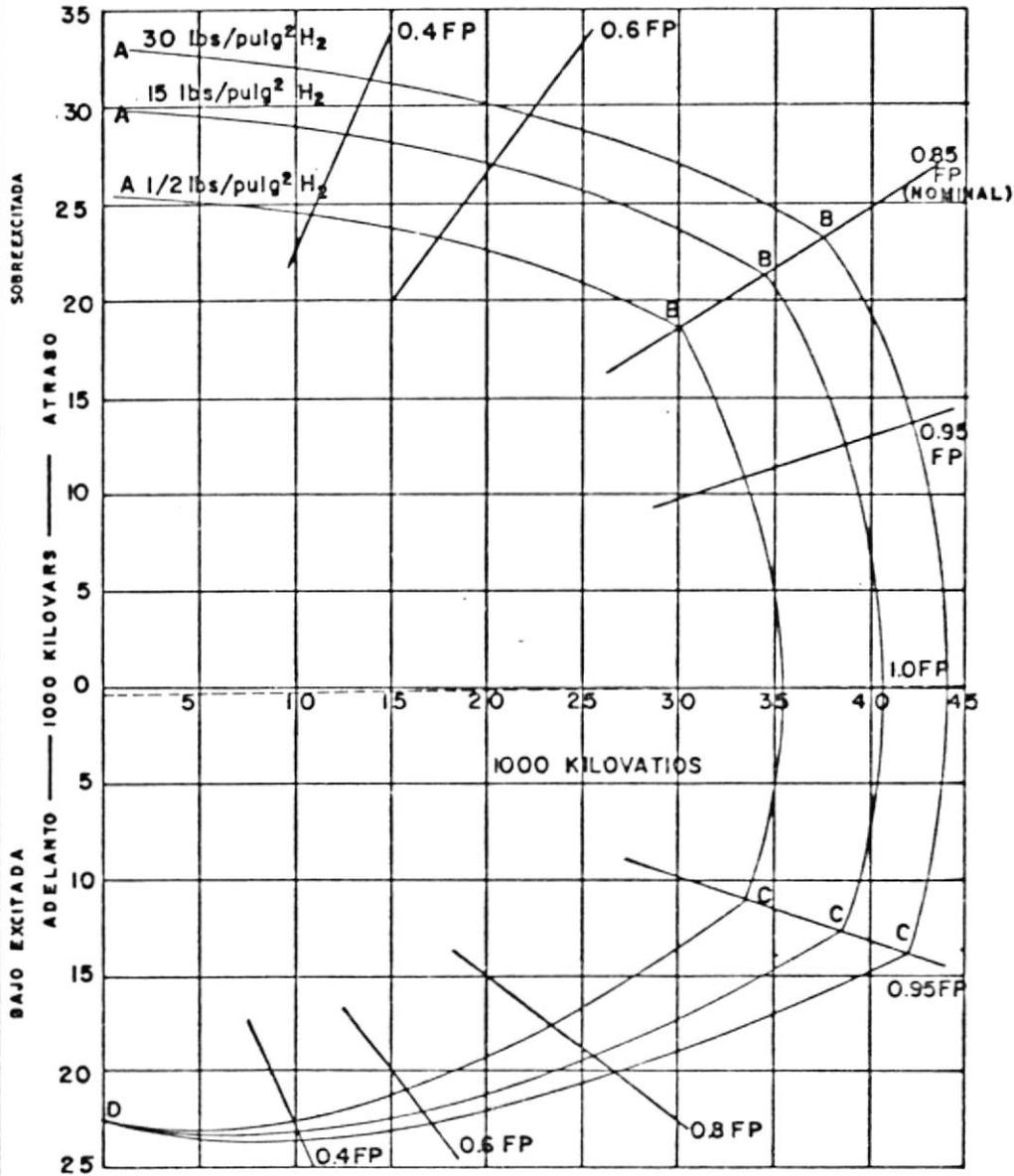
DATOS DEL GENERADOR: DATOS DE PLACA

2 polos

3 fases

CURVA DE CAPABILIDAD REACTIVA
 UNIDAD GENERADORA CON TURBINA A VAPOR

ATB-2-POLOS-44118 KVA, 3600 RPM, 13800 VOLTIOS, 0.83 FP
 30 Lb/Pulg² H₂, 1846 AMPS, 250 VOLTIOS DE EXITACION.



CURVA AB LIMITADA POR CALENTAMIENTO DE CAMPO.
 CURVA BC LIMITADA POR CALENTAMIENTO DE LA ARMADURA.
 CURVA CD LIMITADA POR CALENTAMIENTO DE LA ARMADURA DEL ESTATOR.

FIG. Nº 4-1 CURVA DE CAPABILIDAD REACTIVA

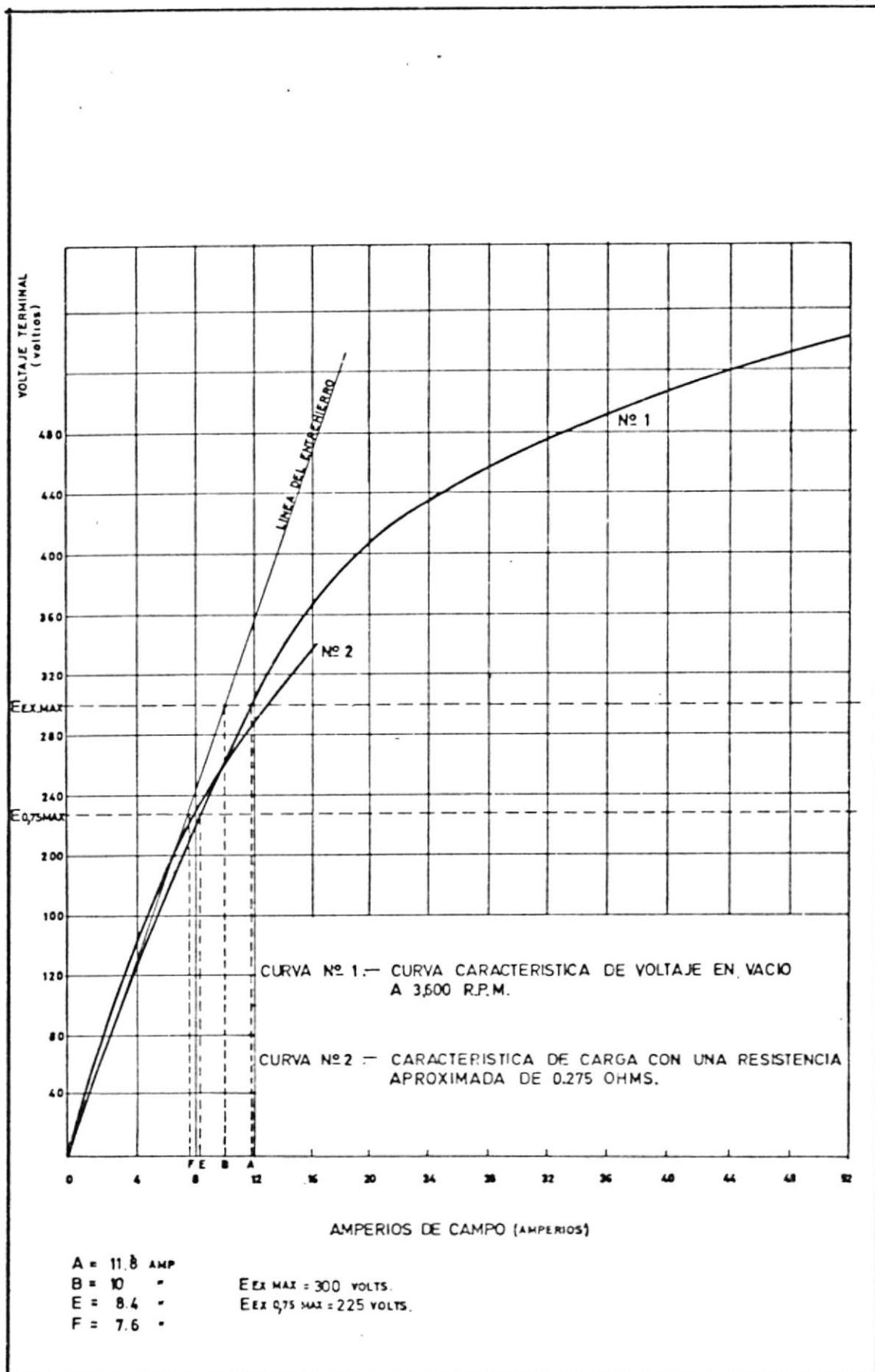


FIG. Nº 4-2 CURVA DE SATURACION DE LA EXCITATRIZ

CURVAS ESTIMADAS DE SATURACION E IMPEDANCIA SINCRONA
 35294 KVA - 3600 RPM - 13.800 VOLTS. - 0.85 FP.
 1477 AMP. DE ARMADURA - 250 VOLTS. DE EXCIT.

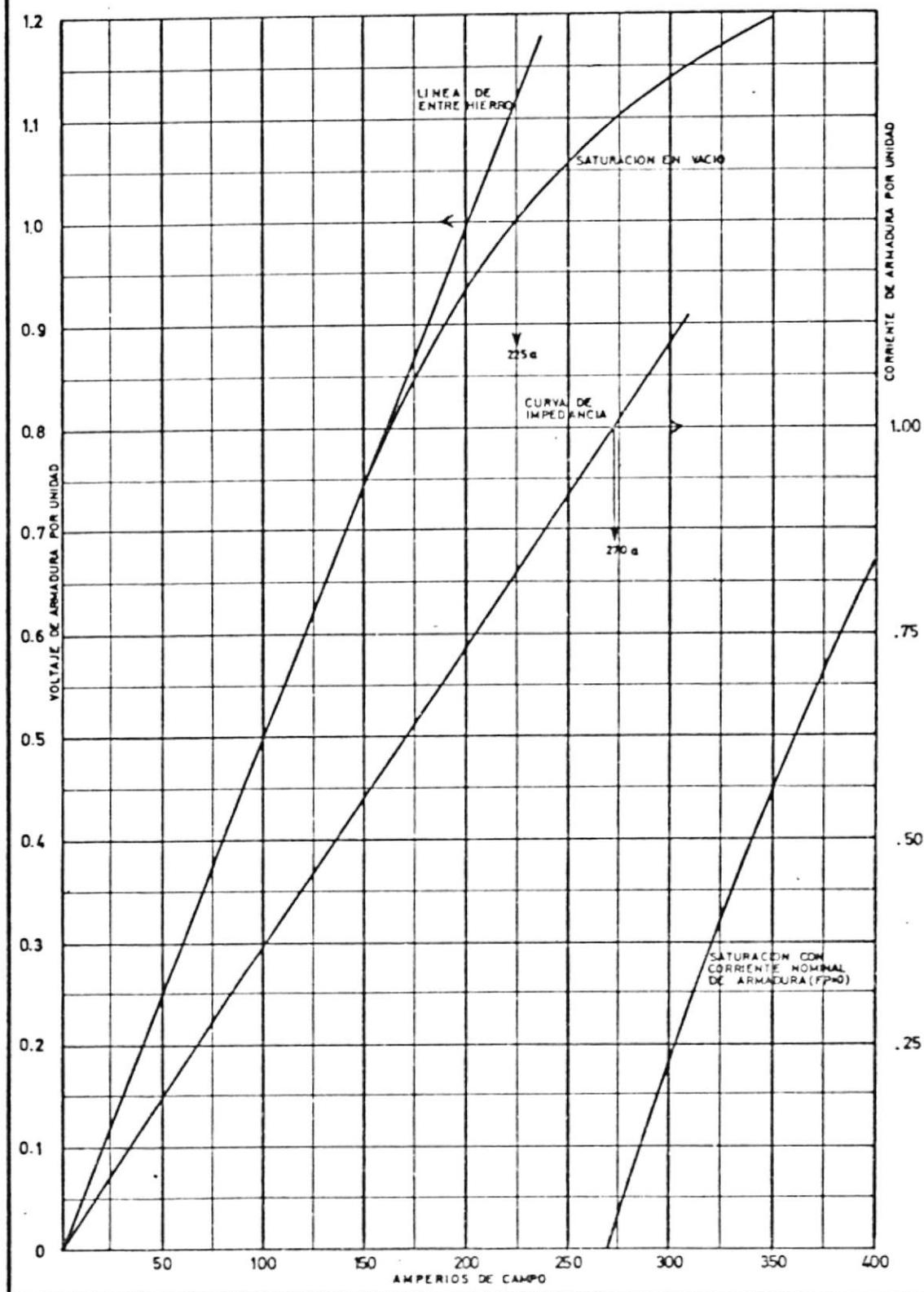


FIG. N.º 4-3. CURVAS ESTIMADAS DE SATURACION E IMPEDANCIA SINCRONA

Conexión estrella

60 Hertz

Máxima temperatura garantizada: 100°C en la armadura (de
tector). 125°C en el campo (resistencia).

Máxima temperatura del gas de enfriamiento: 40°C

Presión de H ₂ (Lb/pulg ²)	0.5	15	30
KVA	35294	40588	44118
Corriente de armadura	1477	1700	1846
Voltaje de armadura	13800	13800	13800
Corriente de campo	442	481	507
Voltaje de excitación	250	250	250
Factor de potencia	0.85	0.85	0.85

DATOS DE DISEÑO:

Corriente de campo en vacío	225 amperios
Capacitancia de la armadura a tierra (por fase)	0.05 microfaradios
Resistencia del devanado de la armadura (por fase)	0.0076 ohmios a 25°C
Resistencia del devanado de campo.	0.333 Ohmios a 25°C

DATOS DE REACTANCIA: (Por unidad)

Síncrona no saturada	(x _d)	1.35
Transiente saturada	(x' _d)	0.171
Transiente no saturada	(x' _d)	0.240

<i>Subtransiente saturada</i>	(x''_{dv})	0.130
<i>Saturada de secuencia negativa</i>	(x_2v)	0.130

DATOS DE CONSTANTES DE TIEMPO DEL CAMPO: (125°C)

<i>Circuito abierto</i>	(T'_{do})	7.01
<i>Transiente de cortocircuito trifásico.</i>	(T'_{d3})	0.87
<i>Transiente de cortocircuito de línea a línea</i>	(T'_{d2})	1.4
<i>Transiente de cortocircuito de línea a neutro</i>	(T'_{d1})	1.56
<i>Subtransiente de cortocircuito</i>	(T''_d)	0.047

COMPONENTE DE TIEMPO DE C.D. DE LA ARMADURA (100°C)

<i>Cortocircuito trifásico</i>	(T_{a3})	0.223
<i>Cortocircuito línea a línea</i>	(T_{a2})	0.223
<i>Cortocircuito línea a neutro</i>	(T_{a1})	0.175

CARACTERISTICAS DEL CAMPO

	AMPERIOS	VOLTIOS
<i>Sin carga y voltaje terminal nominal del generador</i>	210	83
<i>Carga nominal y voltaje terminal nominal del generador</i>	442	250

DATOS DE LA AMPLIDINA (Para efecto de la simulación)

$$T_R = 0.06 \text{ seg.}$$

$$K_A = 25 \text{ p.u.}$$

$$T_A = 0.2 \text{ seg.}$$

$$V_{Lm\acute{a}x} = 2.2892 \text{ p.u.}$$

$$V_{Lm\grave{m}n} = 0.0 \text{ p.u.}$$

$$K_E = 0.0582 \text{ p.u.}$$

$$T_E = 0.6544 \text{ seg.}$$

$$K_F = 0.105 \text{ p.u.}$$

$$T_F = 0.35 \text{ seg.}$$

$$K_R = 1$$

DATOS DEL REGULADOR DE VOLTAJE SILVERSTAT (para efecto de la simulación)

$$T_R = 0.105 \text{ seg.}$$

$$K_A = 200 \text{ p.u.}$$

$$T_A = 0.2 \text{ seg.}$$

$$V_{Lm\acute{a}x} = 0 \text{ p.u.}$$

$$V_{Lm\grave{m}n} = 0 \text{ p.u.}$$

$$K_E = 0.17 \text{ p.u.}$$

$$T_E = 0.5 \text{ seg.}$$

$$K_F = 0.028 \text{ p.u.}$$

$$T_F = 0.5 \text{ seg.}$$

$$K_R = 1$$

DATOS DEL GENERADOR

$$K_G = 0.3072$$

$$T_G = 7.01$$

La solución de sistemas dinámicos involucra ecuaciones diferenciales e integrales. Ciertos sistemas de control son descritos por una gran cantidad de ecuaciones diferenciales. La solución de dichas ecuaciones es factible realizarlas utilizando computación analógica lo cual es la finalidad del presente trabajo.

Antes de entrar en la simulación analógica propiamente dicha es necesario efectuar el cálculo de los valores de los parámetros y constantes necesarios, es decir que en esta sección se calcularán la mayor parte de los valores numéricos para dejar el siguiente capítulo exclusivamente para la simulación.

Un inconveniente que se presenta al representar máquinas eléctricas con acoplamiento magnético como en el presente caso, la excitatriz de un generador síncrono, es la disparidad existente entre los valores numéricos del estator que se presenta en el rango de los kilovoltios y el voltaje de campo (excitatriz) a un nivel más bajo. Este es el motivo por el cual se normalizarán las ecuaciones a un valor base conveniente expresando todos los valores de vol-

taje en por unidad, es decir en porcentaje del valor base.

No es motivo del presente trabajo la deducción de las ecuaciones diferenciales del generador ni de la excitatriz y tal cual se mencionó en el capítulo anterior se toma en cuenta el generador sólo como medio de referencia dado el caso que el objetivo es estudiar el comportamiento de la excitatriz y del regulador de voltaje en particular.

En el Apéndice B se han desarrollado una serie de fórmulas y una breve descripción de como se obtienen estos valores. Es de añadir que la obtención de aquellos se ha basado en la referencia (1).

En las ecuaciones del generador síncrono es ventajoso convertir los valores del rotor (campo) tales como corriente, enlaces de flujo o voltaje en un valor equivalente a la fuerza electromotriz inducida en el estator, por lo tanto como en el capítulo de la simulación se necesitará enlazar la excitatriz con el generador se usarán los valores adecuados para interconectar ambos tipos de ecuaciones. Para convertir valores de campo a valores de F.E.M. del generador se utiliza el criterio de que con circuito abierto la corriente de campo en amperios corresponde a un valor $i_f \cdot \omega_p \cdot M_f$ en voltios de pico

de fuerza electromotriz (F.E.M.) inducida en el estator. La constante K que se utiliza en el apéndice B tiene un valor de $\sqrt{3/2}$, por lo tanto el valor E_{EX} (voltaje de la raíz cuadrada media de la F.E.M.) será:

$$\sqrt{2}E_{EX} = i_F \cdot \omega_R \cdot M_F \text{ volts}$$

$$E_{EX} = \frac{i_F \omega_R M_F \text{ Volts.}}{\sqrt{2}}$$

y siendo $K = \sqrt{3/2}$ entonces

$$E_{EX} = \frac{i_F \omega_R M_F K}{\sqrt{3}}$$

como $i_F = \frac{V_F}{r_F}$

$$E_{EX} = \frac{V_F \omega_R M_F K}{r_F \sqrt{3}}$$

Trabajando en por unidad $L_{AD} = \omega_R M_F K$, por lo tanto

$$E_{EX} = \frac{L_{AD}}{r_F \sqrt{3}} \text{ v}_f \text{ p.u.}$$

El valor $\frac{L_{AD}}{r_F \sqrt{3}}$ es la ganancia necesaria para poder interconectar las ecuaciones de la excitatriz con las del generador trabajando en por unidad, siendo este el único valor del generador que se procederá a calcular.

Se obtienen a continuación los valores base del generador y de la excitatriz.

a. VALORES BASE DEL GENERADOR

$$V_B = \frac{13800}{\sqrt{3}} = 7967.44 \text{ volts, por fase}$$

$$\omega_B = \omega_R = \frac{3600 \times 2\pi}{60} = 377 \text{ rad/seg.}$$

$$S_B = \frac{40.588}{3} = 13.53 \text{ MVA por fase}$$

$$I_B = 1700 \text{ amperios}$$

$$t_B = 1/377 = 0.002652 \text{ seg.}$$

$$L_B = \frac{7967.44}{377 \times 1700} = 0.0124 \text{ H}$$

$$I_{FB} = \frac{1700}{37.8} = 45 \text{ amperios}$$

$$V_{FB} = \frac{13.53 \times 10^6}{45} = 300666 \text{ voltios}$$

$$R_{FB} = \frac{274721}{45} = 6681.4 \text{ ohmios}$$

b. VALORES BASE DE LA EXCITATRIZ

Se considera como valor base, el voltaje de la excitatriz que produce voltaje nominal en el entrehierro del generador, en vacío. Este valor es proporcionado por el fabricante.

$$E_{EXB} = 83 \text{ voltios}$$

c. CALCULO DE LOS VALORES DEL GENERADOR

$$L_{md} = 5.28 \times 10^{-3} - 0.42 \times 10^{-3} = 4.86 \times 10^{-3} \text{ H.}$$

$$v = i_F \omega_R M_F \text{ sen } \phi \text{ cuyo valor pico ser\u00e1}$$

$$v = i_F \omega_R M_F$$

$$v = 7967.44 \times \sqrt{2}$$

$$M_F = \frac{v}{i_F \omega_R}$$

El valor $i_F = 200$ amperios se lo obtiene de la l\u00ednea del entrehierro de la curva de saturaci\u00f3n del generador sin carga a voltaje nominal (1 p.u.) (figura N\u00b0 4-3)

$$M_F = \frac{7967.44 \times \sqrt{2}}{200 \times 377} = 0.15 \text{ H}$$

$$K_F = \frac{\sqrt{3/2} \times 0.15}{4.86 \times 10^{-3}} = 37.8$$

d. VALORES POR UNIDAD DEL GENERADOR

El valor de la resistencia de campo del generador (r_f) est\u00e1 dado a una temperatura de 25°C utilizando la relaci\u00f3n n\u00famero 11 del ap\u00e9ndice B normalizamos el valor de r_f a 125°C .

$$r_f(125^\circ\text{C}) = 0.333 \times \frac{(234.5 + 125)}{234.5 + 25}$$

$$= 0.4613 \text{ ohmios}$$

$$r_f(125^\circ\text{C}) = \frac{0.4613}{6681.4} = \underline{\underline{6.9 \times 10^{-5} \text{ p.u.}}}$$

$$L_d = \frac{5.28 \times 10^{-3}}{0.0124} = 0.4258 \text{ p.u.}$$

$$L_d = \frac{\ell_d}{L_B} = \frac{0.42 \times 10^{-3}}{0.0124} = 0.03387 \text{ p.u.}$$

$$L_{AD} = L_d - \ell_d = 0.4258 - 0.03387 = \underline{\underline{0.39193}} \text{ p.u.}$$

Los valores en p.u. subrayados r_f y L_{AD} son los que se utilizan en el potenciómetro 34 para efecto de la simulación en el capítulo siguiente.

CAPITULO 5

SIMULACION DEL SISTEMA

5.1. DIAGRAMA DE BLOQUES

Para efectos de realizar el presente trabajo se utiliza un computador analógico, el cual permite simular el comportamiento del sistema de control de la excitación de un generador síncrono. Las ventajas del computador analógico resultan tanto más evidentes cuando más complejo es el sistema.

La ecuación que describe la operación del computador analógico es análoga a la que representa el sistema físico real.

Las variables del sistema real tales como salida, entrada, realimentación, error, etc. están representadas por valores de voltaje en diversos puntos del computador analógico.

Las ecuaciones que representan al generador síncrono tienen dos tipos de no linealidades: variables de estado y no linealidades trigonométricas. Además la computación analógica se presta para representar no linealidades del tipo saturación (en el circuito magnético) y limitación (en el circuito de la excitatriz).

La figura N° 5-1(a) muestra la representación del sistema de excitación con regulador de acción continua y excitatriz principal. Esta configuración en la cual pueden ser utilizados indistintamente el regulador de voltaje Silverstat y la amplidina, constituye una de las configuraciones presentadas por la referencia (4).

Como en todo sistema de control de excitación, el sistema de control de realimentación incluye la máquina síncrona y la excitatriz, entre el voltaje de salida de la excitatriz (EEX) y el voltaje terminal del generador se incluye el bloque correspondiente al generador.

$$\frac{K_G}{1 + ST_G}$$

con lo cual el sistema quedaría como se indica en la figura N° 5-1(b), en la que representan también los voltajes a la salida de cada bloque. Para una mayor claridad sobre el significado de los voltajes en c/u de los puntos del sistema se representa a la máquina síncrona y a la excitatriz con sus valores referenciales (Figura N° 5-2).

El regulador de voltaje Silverstat no tiene el bloque limitador que tiene el regulador con amplidina.

El efecto del regulador de voltaje en el sistema de excitación es evidente, al observar que cuando el voltaje

terminal del generador (V_{Gen}) se incrementa, es transformado a un voltaje menor y rectificado en el bloque denominado filtro, este voltaje V_{DC} es de corriente directa y proporcional al voltaje de salida del generador. Esta señal se compara con el voltaje de referencia (V_{ref}) al cual se desea que opere el generador; la diferencia es denominada voltaje de error, el cual se suma algebraicamente con la salida del circuito estabilizador (V_S) y se amplifica en el bloque amplificador del regulador de voltaje. La señal amplificada disminuye el voltaje en el campo de la excitatriz habiendo pasado previamente por el limitador en el caso de los sistemas que lo utilicen. La excitatriz disminuye su voltaje terminal y por lo tanto el del generador (V_{Gen}) lo hace también.

De la salida de la excitatriz (E_{EX}) aparte del lazo que va al generador, existen dos derivaciones: una que corresponde al circuito de estabilización que en el circuito real lo hace a través de un transformador de amortiguamiento y otra correspondiente a la saturación de la excitatriz la cual a su salida entra al punto de suma de la salida del regulador de voltaje, es decir que cuando la excitatriz trabaja en la región saturada se produce un valor negativo proporcional a E_{EX} que se opone al valor del regulador de voltaje.

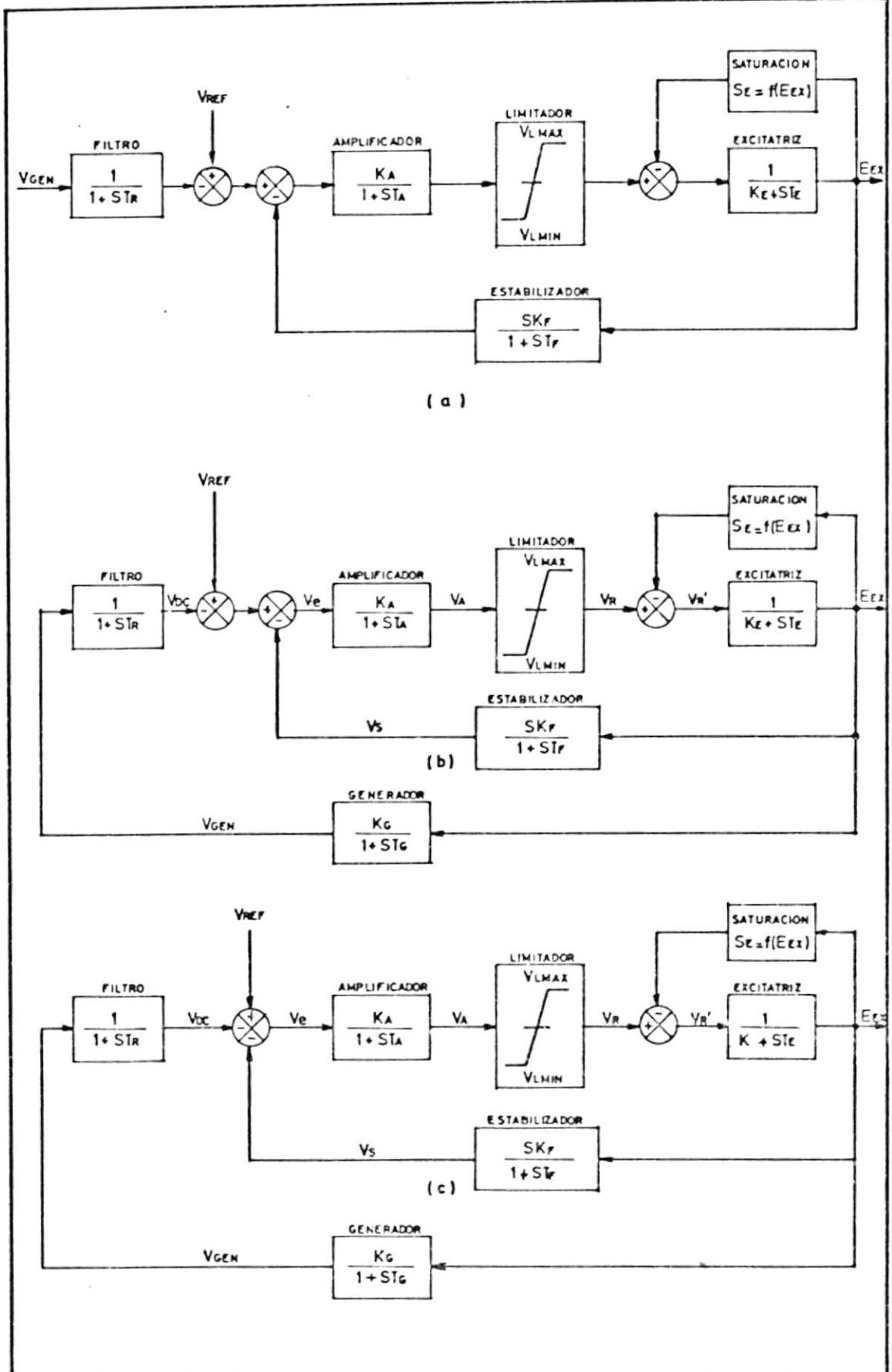


FIG. N25-1 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA DE CONTROL DE EXCITACION CON REGULADOR DE VOLTAJE DE ACCION CONTINUA a) SISTEMA DE EXCITACION b) SISTEMA DE CONTROL DE EXCITACION c) SISTEMA DE CONTROL DE EXCITACION SIMPLIFICADO

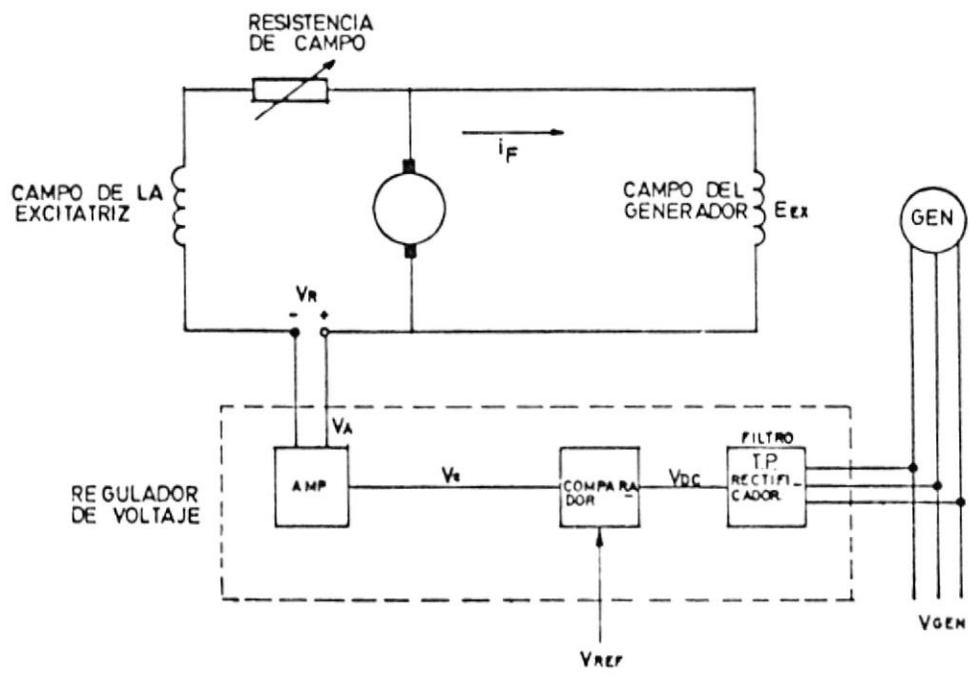


FIG. Nº 5-2 VOLTAJES DEL SISTEMA DE CONTROL DE EXCITACION EN CADA UNO DE LOS ELEMENTOS

El regulador de voltaje con amplidina tiene un limitador de los valores máximos y mínimos del regulador, es decir que este no debe permitir que circule corriente reactiva bajo excitada en un rango que pueda hacer perder sincronismo al generador de poder ni tampoco puede elevarse el voltaje sobre un valor deseado.

5.2. DIAGRAMAS PARA APLICARLOS AL COMPUTADOR

Los elementos analógicos básicos que se usan son: sumador, inversor, integrador y potenciómetro, los cuales se explican en detalle en el Apéndice C.

Tomando como referencia el diagrama de bloques de la figura N° 5-1 (c) se procede a desarrollar cada elemento de él; además en la figura N° 5-3 se muestra cada bloque con su respectiva representación analógica.

a. FILTRO. Incluye los transformadores de potencial y el rectificador

$$\frac{V_{DC}}{V_{Gen}} = \frac{1}{1 + STR}$$

$$T_R \dot{V}_{DC} = -V_{DC} + V_{Gen}$$

$$\dot{V}_{DC} = -\frac{1}{T_R} V_{DC} + \frac{V_{Gen}}{T_R}$$

b. SUMADOR

$$V_{ref} - V_{DC} - V_s = V_e$$

c. AMPLIFICADOR

$$\frac{V_A}{V_e} = \frac{K_A}{1 + ST_A}$$

$$T_A \dot{V}_A = -V_A + K_A V_e$$

$$- \dot{V}_A = \frac{1}{T_A} V_A - \frac{K_A}{T_A} V_e$$

d. EXCITATRIZ

$$\frac{E_{EX}}{V_{R'}} = \frac{1}{-K_E + ST_E}$$

$$T_E \dot{E}_{EX} = -K_E E_{EX} + V_{R'}$$

$$- \dot{E}_{EX} = \frac{K_E}{T_E} E_{EX} - \frac{V_{R'}}{T_E}$$

e. CIRCUITO DE ESTABILIZACION

$$\frac{V_S}{E_{EX}} = \frac{SK_F}{1 + ST_F}$$

$$\frac{V_S}{E_{EX}} = \frac{K_F}{1/S + T_F}$$

$$V_S / (1/S + T_F) = K_F E_{EX}$$

$$V_S / S + V_S T_F = K_F E_{EX}$$

dividiendo para T_F

$$\frac{V_S}{ST_F} + \frac{V_S T_F}{T_F} = \frac{K_F E_{EX}}{T_F}$$

$$V_S = \frac{K_F}{T_F} E_{EX} - S^{-1} \frac{V_S}{T_F}$$

f. GENERADOR

$$\frac{V_{Gen}}{E_{EX}} = \frac{K_G}{1 + ST_G}$$

$$V_{Gen} + V_{Gen} T_G = K_G E_{EX}$$

$$V_{Gen} = \frac{K_G}{T_G} E_{EX} - \frac{V_{Gen}}{T_G}$$

g. LIMITADOR

Este bloque tiene la característica de limitar el voltaje de salida del regulador a un valor máximo y a un valor mínimo. Es uno de los circuitos especiales del computador y su representación se la indica en la figura N° 5-3 (g).

h. SATURACION

La función saturación de la excitatriz se la simula utilizando el generador de funciones del Miniac, dando valores a las variables de la ecuación que se calculará en la sección del escalamiento.

	FUNCION DE TRANSFERENCIA		ECUACION	DIAGRAMA ANALOGICO
a		FILTRO	$\dot{V}_{DC} = -\frac{1}{T_r} V_{DC} + \frac{V_{GEN}}{T_r}$	
b		COMPARADOR	$V_{REF} - V_{DC} - V_S = V_c$	
c		AMPLIFICADOR	$-\dot{V}_A = \frac{1}{T_A} V_A - \frac{K_A}{T_A} V_c$	
d		EXCITATRIZ	$-\dot{E}_{ex} = \frac{K_e}{T_e} E_{ex} - \frac{V_{r'}}{T_e}$	
e		ESTABILIZADOR	$V_s = \frac{K_f}{T_f} E_{ex} - \frac{1}{S} \frac{V_s}{T_f}$	
f		GENERADOR	$\dot{V}_{GEN} = \frac{K_g}{T_g} E_{ex} - \frac{V_{GEN}}{T_g}$	
g		LIMITADOR		
h		SATURACION	GENERADOR DE FUNCION	

FIG. Nº 5-3 REPRESENTACION ANALOGICA DE CADA UNO DE LOS BLOQUES DEL SISTEMA DE CONTROL DE EXCITACION

Una vez que se tiene la representación analógica de cada uno de los circuitos del sistema de control de excitación, se interconectan entre ellos siguiendo la secuencia del diagrama de bloques original, utilizando los inversores y potenciómetros necesarios para obtener la señal correcta. Este arreglo se lo muestra en las figuras N° 5-4 y 5-5 para el regulador con amplidina y Silverstat respectivamente en donde se indica además el valor de los potenciómetros en base a los datos indicados en el capítulo anterior.

En la simulación del sistema de control con regulador de voltaje con amplidina, figura N° 5-4 el potenciómetro con valor $K_A/T_A = 125$, se lo puede representar como una constante de valor 12.5 con una ganancia de 10, pero se producirá saturación pues el valor máximo de los potenciómetros debido a la computadora utilizada es de 1 y la máxima ganancia de un integrador o sumador es de 10.

El mismo efecto se produce en la simulación que utiliza regulador de voltaje Silverstat (figura N° 5-5), razón por la cual es preciso efectuar escalamiento en tiempo o en magnitud para trabajar dentro del rango permisible del computador.

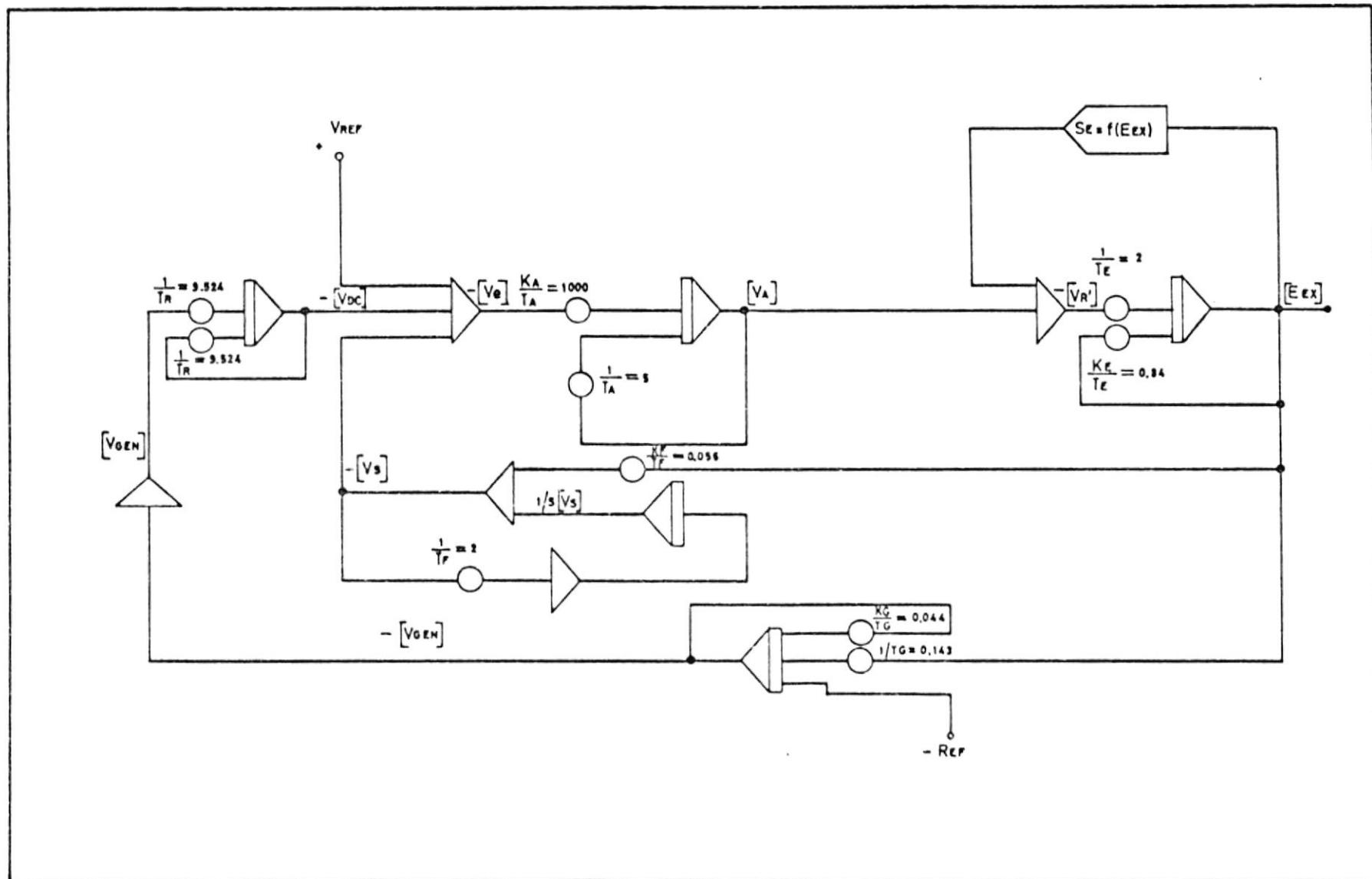


FIG. Nº 5-5 Representación analógica del sistema de control de excitación con regulador de voltaje SILVERSTAT

5.3. ESCALAMIENTO

Existen dos tipos de escalamiento en computación analógica: en magnitud y en tiempo.

El escalamiento en magnitud se lo utiliza para evitar - que ninguna variable exceda el valor nominal de los amplificadores del computador (en el presente caso 10 voltios).

Es preciso por lo tanto estimar valores máximos de todas las variables utilizadas y escalarlas de modo que ninguna exceda el límite de saturación de los amplificadores.

En el método denominado por unidad para efectuar escalamiento en magnitud, se seleccionan las variables de computadora de manera que el valor máximo de una variable en particular corresponda máximo a una unidad. Así por ejemplo si consideramos el voltaje de salida máximo de la excitatriz $E_{EX} = 200$ voltios, un valor adecuado para escalar en por unidad sería 250 voltios de modo que una unidad equivaldría a 250 voltios y la variable de computadora será $(E_{EX}/250)$. Como el valor máximo de voltaje es de 200 voltios, el valor máximo en por unidad, será $[200/250] = 0.8$. Como la computadora analógica que se trabaja es de 10 voltios, el valor máximo del amplifica

donde será $0.8 \times 10 = 8$ voltios.

De acuerdo a este ejemplo se puede concluir que la variable de computadora será la variable del problema dividida para el valor máximo esperado de esa variable.

Además como en todo sistema de excitación, el fenómeno se desarrolla muy rápidamente, para poder utilizar el graficador y obtener señales en diferentes puntos de la excitatriz, la simulación mediante el computador debe ser mucho más lenta. Llamando t al tiempo del problema o tiempo real, T al tiempo que cumpla el computador en simularlo, la ecuación $T = \alpha t$ relaciona ambas variables.

Si $\alpha = 1$ la solución se produce en tiempo real

Si $\alpha > 1$ la solución se produce en tiempo retardado; y

Si $\alpha < 1$ la solución se produce en tiempo acelerado.

En el programa escalado en tiempo, los integradores de la computadora integran con respecto a T introduciéndose la constante α en la ganancia del integrador, por lo tanto variando ésta por igual en todos y cada uno de los integradores, se escalará también en tiempo.

De lo anterior se deduce que el escalamiento en tiempo afecta solamente a los integradores. El escalamiento en tiempo afecta a la ganancia total de un lazo. En la presente simulación se utiliza un valor de $\alpha = 10$.

Una vez realizada una breve introducción sobre la finalidad del escalamiento, se procede a establecer los valores máximos esperados para c/u de las variables del problema.

- Valor máximo del voltaje salida del generador

$$V_{Genm\acute{a}x} = 15000 \text{ voltios}$$

- Valor máximo del voltaje de salida de los transformadores de potencial y del rectificador.

$$\text{Relación T.P.} = \frac{14400}{120} = 120$$

T.P. = transformadores de potencial

$$V_{DC} = \frac{1}{T} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} \sqrt{2} V_{Gen \max} \text{ Sen } \omega t \, d\omega t$$

$$V_{DC} = \frac{\sqrt{2}}{T} \left(-V_{Gen\max} \cos \omega t \right) \Bigg|_{\omega t = \pi/3}^{\omega t = 2\pi/3}$$

$$V_{Gen\max} = \frac{15000}{120} = 125 \text{ voltios}$$

$$V_{DC\max} = \sqrt{2} \frac{125}{\pi/3} = 168 \text{ VDC}$$

- Valor máximo del voltaje de referencia

$$V_{ref} = \sqrt{2} \frac{115}{\pi/3} = 155.3 \text{ voltios de corriente directa}$$

$$V_{ref\max} = 155.3 \text{ voltios}$$

- Valor máximo del voltaje del error
 - $V_e \text{ max} = 155.3$ voltios (amplidina)
 - $V_e \text{ max} = 74.7$ voltios (Silverstat)
- Valor máximo del voltaje del amplificador
 - $V_{A\text{max}} = 250$ voltios (amplidina)
 - $V_{A\text{max}} = 100$ voltios (Silverstat)
- Valor máximo de la salida del regulador de voltaje
 - $V_{R\text{max}} = 190$ voltios (amplidina)
 - $V_{R\text{max}} = 100$ voltios (Silverstat)
- Valor máximo de la salida de la excitatriz
 - $E_{EX} = 300$ voltios
- Valor máximo del voltaje a la salida del estabilizador
 - $V_{S\text{max}} = 100$ voltios

En la tabla N° 5-1 se indican los valores en por unidad de cada una de las variables de computadora tanto del regulador de voltaje con amplidina como del Silverstat.

Es preciso recordar que el valor base a utilizarse en la excitatriz es de 83 voltios, es decir el que produce voltaje nominal en el entrehierro del generador de poder, operando en vacío.

VARIABLE	VALOR MAXIMO		VARIABLE DE COMPUTADORA	
	AMPLIDINA	SILVERSTAT	AMPLIDINA	SILVERSTAT
V_{Gen}	1.506	1.506	$\left[\frac{V_{Gen}}{1.506} \right]$	$\left[\frac{V_{Gen}}{1.506} \right]$
\dot{V}_{Gen}	1	1	$\left[\frac{V_{Gen}}{V_{Genmax}} \right]$	$\left[\frac{V_{Gen}}{V_{Gen}} \right]$
V_{DC}	2.024	2.024	$\left[\frac{V_{DC}}{V_{DCmax}} \right]$	$\left[\frac{V_{DC}}{2.024} \right]$
\dot{V}_{DC}	3	3	$\left[\frac{V_{DC}}{V_{DCmax}} \right]$	$\left[\frac{V_{DC}}{3} \right]$
V_{ref}	1.8711	1.8711	$\left[\frac{V_{ref}}{V_{refmax}} \right]$	$\left[\frac{V_{ref}}{1.8711} \right]$
V_E	1.8711	0.9	$\left[\frac{V_E}{V_{Emax}} \right]$	$\left[\frac{V_E}{0.9} \right]$
V_A	3.012	1.2	$\left[\frac{V_A}{V_{Amax}} \right]$	$\left[\frac{V_A}{1.2} \right]$
\dot{V}_A	4	12	$\left[\frac{V_A}{V_{Amax}} \right]$	$\left[\frac{V_A}{12} \right]$
V_R	2.2892	-	$\left[\frac{V_R}{V_{Rmax}} \right]$	-
\dot{V}_R	2.2892	-	$\left[\frac{V_R}{V_{Rmax}} \right]$	-
V_S	1.2048	1.2048	$\left[\frac{V_S}{V_{Smax}} \right]$	$\left[\frac{V_S}{1.2048} \right]$
$\dot{E}EX$	3.6145	3.6145	$\left[\frac{E_{pmax}}{E_{pmax}} \right]$	$\left[\frac{EEX}{3.6145} \right]$
$\dot{E}EX$	3	3	$\left[\frac{EEX}{EEXmax} \right]$	$\left[\frac{EEX}{3} \right]$
$V_{R'}$	2.2892	1.2	$\left[\frac{V_{R'}}{V_{R'max}} \right]$	$\left[\frac{V_{R'}}{1.2} \right]$

TABLA N° 5-1.- TABLA DE ESCALAMIENTO

A continuación se procede a efectuar el escalamiento de cada una de las ecuaciones desahoradas en la figura N° 5-2 que se encuentran resumidas en la figura N° 5-3.

a. ESCALAMIENTO DEL FILTRO

$$V_{DC}^{max} = \frac{V_{DC}^{max}}{V_{DC}^{max}} \left[\frac{V_{DC}^{max}}{V_{DC}^{max}} + \frac{V_{DC}^{max}}{V_{DC}^{max}} \right] + \frac{V_{DC}^{max}}{V_{DC}^{max}} \left[\frac{V_{DC}^{max}}{V_{DC}^{max}} \right]$$

$$V_{DC}^{max} = \frac{V_{DC}^{max}}{V_{DC}^{max}} \left[\frac{V_{DC}^{max}}{V_{DC}^{max}} + \frac{V_{DC}^{max}}{V_{DC}^{max}} \right] + \frac{V_{DC}^{max}}{V_{DC}^{max}} \left[\frac{V_{DC}^{max}}{V_{DC}^{max}} \right]$$

b. ESCALAMIENTO DEL SUMADOR

$$V_e = V_{reg} - V_{DC} - V_s$$

$$\left[\frac{V_e}{V_e} \right] = \frac{V_{reg\ max}}{V_{reg\ max}} \left[\frac{V_{reg\ max}}{V_{reg\ max}} \right] - \frac{V_{DC\ max}}{V_{DC\ max}} \left[\frac{V_{DC\ max}}{V_{DC\ max}} \right] - \frac{V_{S\ max}}{V_{S\ max}} \left[\frac{V_{S\ max}}{V_{S\ max}} \right]$$

c. ESCALAMIENTO DEL AMPLIFICADOR

$$-\left[\frac{V_A}{V_A} \right] = \frac{V_A}{V_A} \left[\frac{V_{A\ max}}{V_{A\ max}} \right] - \frac{K_A V_{e\ max}}{T_A V_{A\ max}} \left[\frac{V_{e\ max}}{V_{e\ max}} \right]$$

d. ESCALAMIENTO DE LA EXCITATRIZ

$$-\left[\frac{E_{EX}}{E_{EX}} \right] = \frac{K_E E_{EX\ max}}{T_E E_{EX\ max}} \left[\frac{E_{EX\ max}}{E_{EX\ max}} \right] - \frac{T_E E_{EX\ max}}{V_{R\ max}} \left[\frac{V_{R\ max}}{V_{R\ max}} \right]$$

e. ESCALAMIENTO DEL SUMADOR DE LA EXCITATRIZ

$$- V_{R'} = - V_R + S E$$

$$- \left[\frac{V_{R'}}{V_{R' \max}} \right] = - \frac{V_{R \max}}{V_{R' \max}} \left[\frac{V_R}{V_{R \max}} \right] + \frac{S E_{\max}}{V_{R' \max}} \left[\frac{S E}{S E_{\max}} \right]$$

f. ESCALAMIENTO DEL CIRCUITO ESTABILIZADOR

$$- \left[\frac{V_S}{V_{S \max}} \right] = \frac{V_{S \max}}{T_F V_{S \max}} \left[\frac{V_S}{V_{S \max}} \right] S^{-1} - \frac{K_F E_{EX \max}}{T_F V_{S \max}} \left[\frac{E_{EX}}{E_{EX \max}} \right]$$

$$- \left[\frac{V_S}{V_{S \max}} \right] = \frac{1}{T_F} \left[\frac{V_S}{V_{S \max}} \right] S^{-1} - \frac{K_F E_{EX \max}}{T_F V_{S \max}} \left[\frac{E_{EX}}{E_{EX \max}} \right]$$

En la figura N° 5-6 se muestran las representaciones analógicas de cada uno de los escalamientos efectuados.

La función saturación puede aproximarse por medio de una función exponencial

$$S E = A \cdot e^B E_{EX}$$

donde A y B se obtienen de la curva de saturación de la excitatriz (figura N° 4-2).

REPRESENTACION DE LA SATURACION DE UNA EXCITATRIZ POR MEDIO
DE UN MODELO EXPONENCIAL

CALCULO DE LA FUNCION SATURACION DE LA EXCITATRIZ

S_E	Voltaje terminal de la excitatriz Volt. C.D.	Corriente de campo de la excitatriz (amps. C.D.)	
		Exponencial	Lineal
TECHO MAXIMO (máx)	300	A 11.8	B 10
0.75 máx	225	E 8.4	F 7.6
PLENA CARGA	200	C 7.0	D 6.6

S_E = Saturación de la excitatriz $f(E_{EX})$

$$S_{E_{max}} = \frac{A-B}{B} = \frac{11.8 - 10}{10} = 0.18$$

$$E_{EXbase} = 83 \text{ voltios}$$

$$S_{E_{0.75max}} = \frac{E - F}{F} = \frac{8.4 - 7.6}{7.6} = 0.1053$$

$$E_{EXmax} = \frac{300 \text{ volt}}{83} = 3.614 \text{ p.u.}$$

$$S_{E_{plena carga}} = \frac{C-D}{D} = \frac{7-6.6}{6.6} = 0.0606$$

POR DEFINICION

$$S_E = A e^{B E_{EX}}$$

donde:

$$A = \frac{S_{E_{0.75max}}^4}{S_{E_{max}}^3} = \frac{0.1053^4}{0.18^3} = 0.02108$$

$$B = \frac{4}{E_{EXmax}} \ln \frac{S_{E_{max}}}{S_{E_{0.75max}}} = \frac{4}{3.614} \ln \frac{0.18}{0.1053} = 0.5934$$

FUNCION DE SATURACION DE LA EXCITATRIZ

$$S_E = A \cdot e^{B E_{EX}}$$

donde:

$$A = \frac{S_{E^{0.75 \max}}^4}{S_{E^{\max}}^3}; \quad B = \frac{4}{E_{EX \max}} \ln \frac{S_{E \max}}{S_{E^{0.75 \max}}}$$

$$A = 0.02108$$

$$B = 0.5934$$

$$E_{EX \max} = 3.614 \text{ p.u.}$$

$$S_E = 0.02108 e^{0.5934 E_{EX}}$$

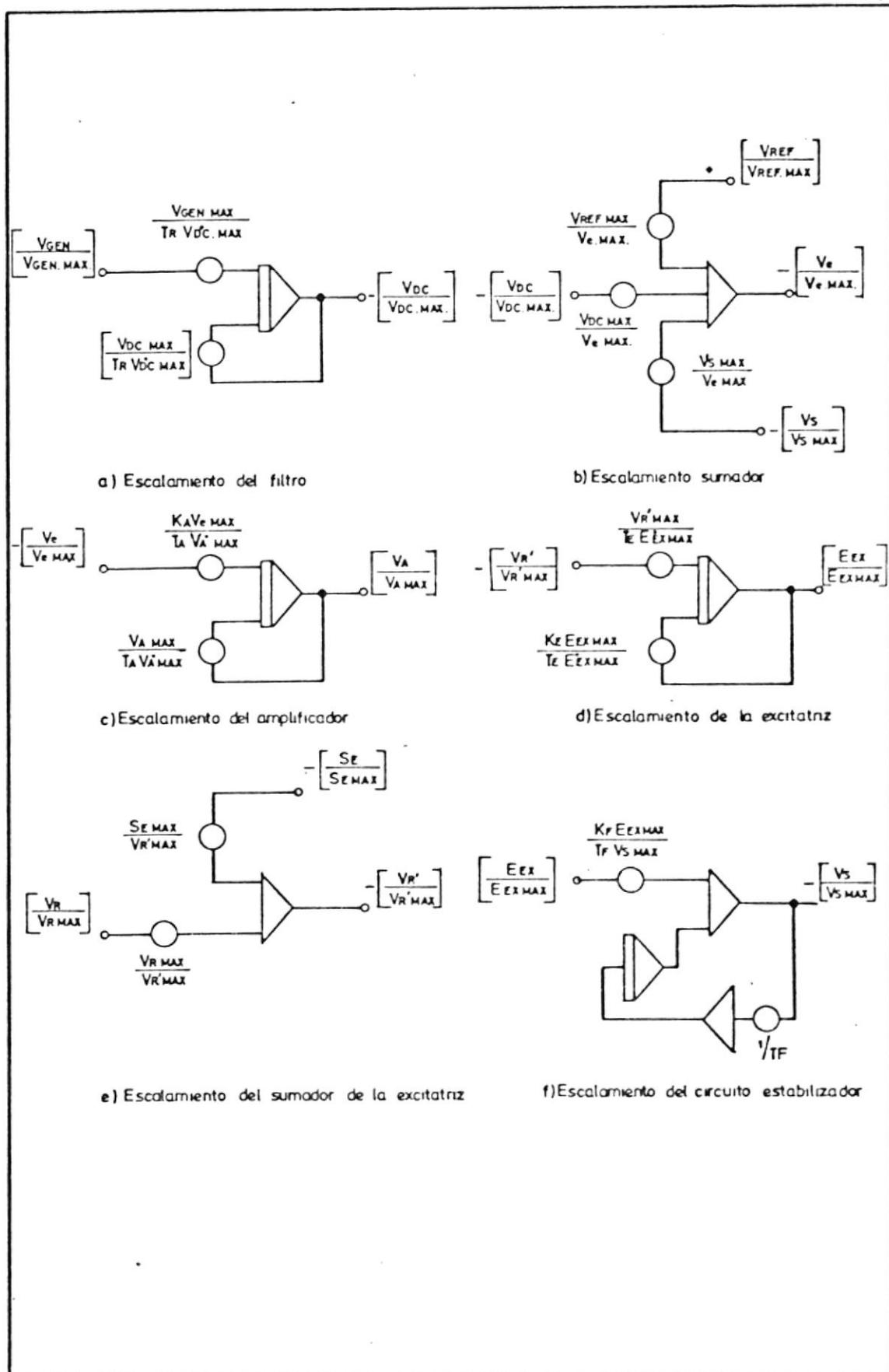
Esta es la representación de la saturación de la excitatriz por medio de una función exponencial. Para introducirla en el programa analógico es necesario efectuar el escalamiento correspondiente y utilizar el generador de funciones de la MINIAC.

En la tabla N° 5-2 se presentan 11 valores tanto para el eje (Y) como el eje (X) del generador de funciones, con su respectivo escalamiento.

$$\left[\frac{S_E}{S_{E \max}} \right] = \delta \left[\frac{E_{EX}}{E_{EX \max}} \right]$$

PUNTOS COMPUTADORA	$\left(\frac{E_{EX}}{E_{EX\max}}\right) p.u. (X)$		$\left[\frac{S_E}{S_{E\max}}\right] = \delta \left[\frac{E_{EX}}{E_{EX\max}}\right] (Y)$	
	$E_{EX} (p.u)$	$[E_{EX}/E_{EX\max}]$		
0	(X ₀) 0	0	0.02108	(Y ₀)
1	(X ₁) 0.6	0.166	0.023262	(Y ₁)
2	(X ₂) 0.9	0.249	0.024437	(Y ₂)
3	(X ₃) 1.2	0.332	0.02567	(Y ₃)
4	(X ₄) 1.5	0.4151	0.026968	(Y ₄)
5	(X ₅) 1.8	0.4981	0.028329	(Y ₅)
6	(X ₆) 2.1	0.5811	0.02976	(Y ₆)
7	(X ₇) 2.4	0.6641	0.031262	(Y ₇)
8	(X ₈) 2.7	0.7471	0.03284	(Y ₈)
9	(X ₉) 3.3	0.9131	0.03624	(Y ₉)
10	(X ₁₀) 3.614	1	0.038158	(Y ₁₀)

TABLA N^o 5-2.- VALORES A UTILIZARSE EN EL GENERADOR DE FUNCIONES PARA REPRESENTAR LA SATURACION DE LA EXCITATRIZ



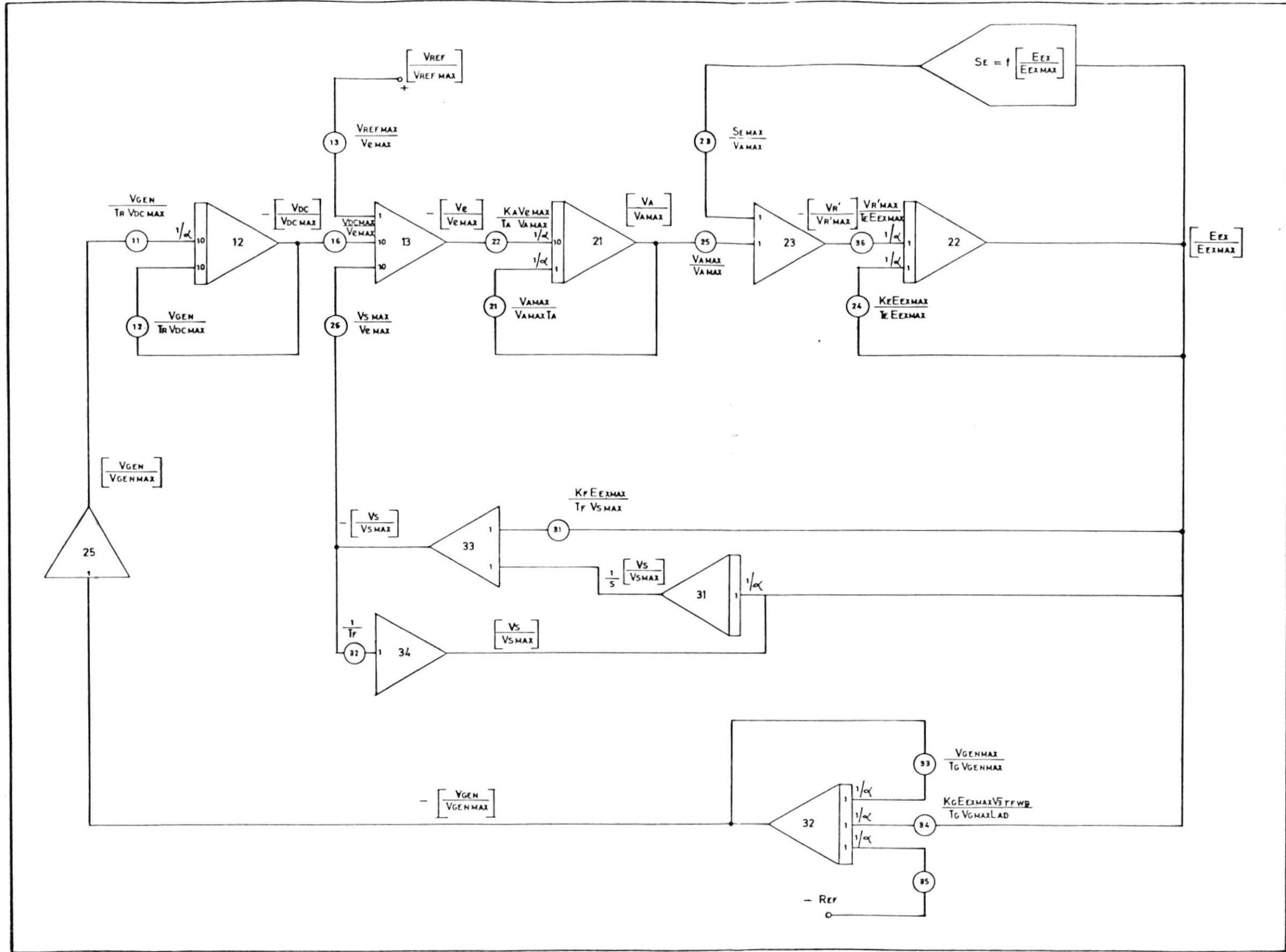


FIG. Nº 5-7 PROGRAMA ESCALADO DEL SISTEMA DE CONTROL DE EXCITACION UTILIZANDO REGULADOR DE VOLTAJE SILVERSTAT

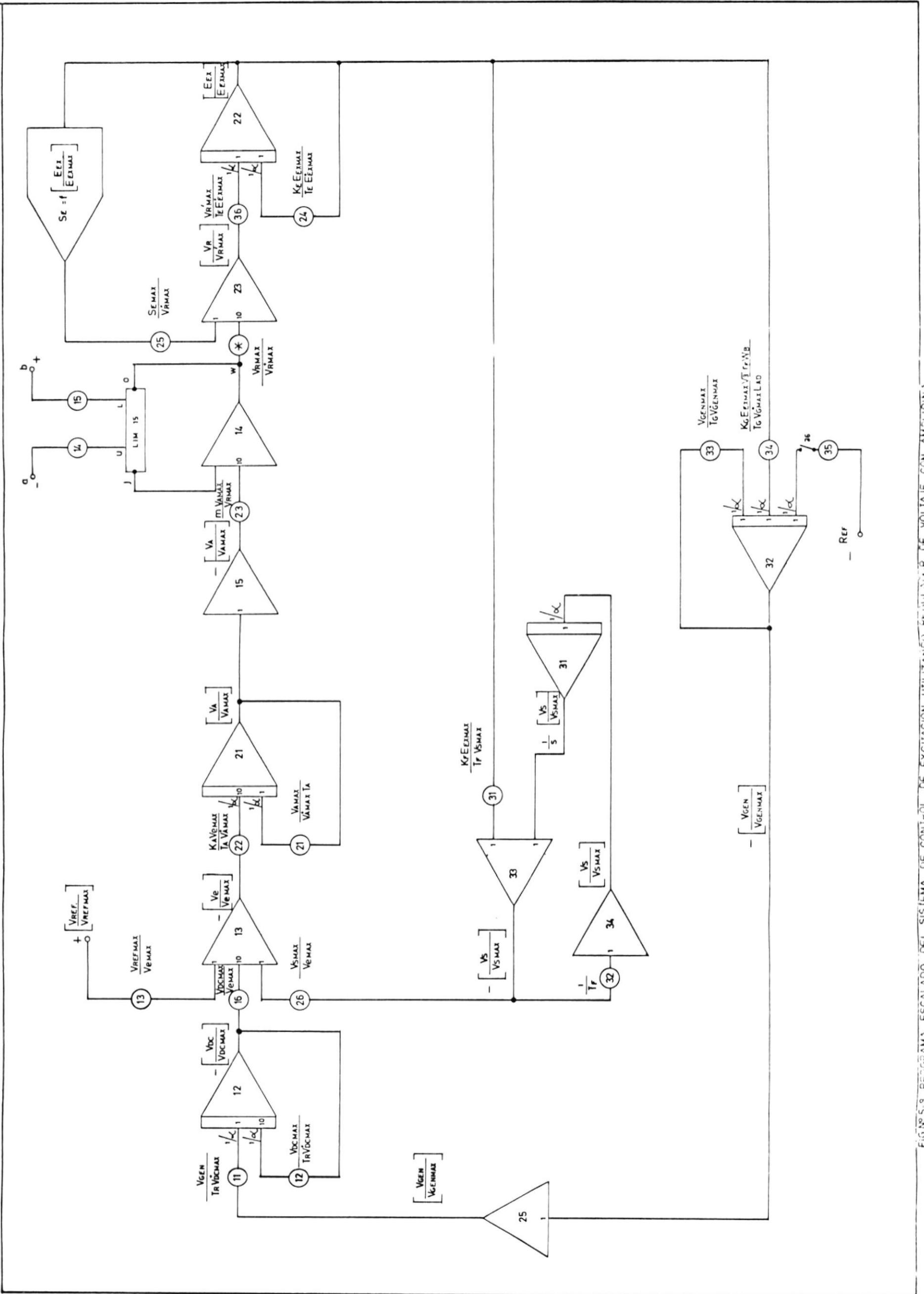


FIGURE 3 PROGRAMA ESCALADO DEL SISTEMA DE CONTROL DE EXCITACION UTILIZANDO REGULADOR DE VOLTAJE CON AMPLIFICADORA

	VALOR DE LA CONSTANTE	POTENCIOMETRO		ELEMENTO		GANANCIA	α
		VALOR	Nº	TIPO	Nº		
1	$\frac{V_{Gen\ max}}{T_R \dot{V}_{Dmax}} = \frac{1.506}{0.06 \times 3} = 8.3667$	0.837	11	Integrador	12	1	$\frac{1}{10}$
2	$\frac{V_{Dmax}}{T_R \dot{V}_{Dmax}} = \frac{2.024}{0.06 \times 3} = 11.2444$	0.112	12	Integrador	12	10	$\frac{1}{10}$
3	$\frac{Ref\ max}{V_e\ max} = \frac{1.8711}{1.8711} = 1$	0.1	13	Sumador	13	1	-
4	$\frac{V_{Dmax}}{V_e\ max} = \frac{2.024}{1.8711} = 1.0817$	0.108	16	Sumador	13	10	-
5	$\frac{V_{Smax}}{V_{emax}} = \frac{1.2048}{1.8711} = 0.6439$	0.644	26	Sumador	13	1	-
6	$\frac{K_{Amax}}{T_A \dot{V}_{Amax}} = \frac{25 \times 1.8711}{0.2 \times 4} = 58.4719$	0.585	22	Integrador	21	10	$\frac{1}{10}$
7	$\frac{V_{Amax}}{V_A\ max\ T_A} = \frac{3.012}{4 \times 0.2} = 3.765$	0.376	21	Integrador	21	10	$\frac{1}{10}$
8	$\frac{m V_{Amax}}{V_R\ max} = \frac{0.039 \times 3.012}{2.2892} = 0.052$	0.052	23	Límitador	14	10	-

TABLA N° 5-3.- CALCULO DE LAS CONSTANTES DEL SISTEMA DE CONTROL DE EXCITACION CON REGULADOR DE VOLTAJE CON AMPLIDINA

	VALOR DE LA CONSTANTE	POTENCIOMETRO VALOR	POTENCIOMETRO N°	ELEMENTO TIPO	ELEMENTO N°	GANANCIA	σ
9	$\frac{S_{E_{max}}}{V_{R_{max}}} = \frac{0.18}{2.2892} = 0.7863$	0.079	25	Sumador	23	1	-
10	$\frac{V_{R_{max}}}{V_{R_{max}}} = \frac{2.2892}{2.2892} = 1$	0.1	*	Sumador	23	10	-
11	$\frac{V_{R'_{max}}}{T_E E E X_{max}} = \frac{2.2892}{0.6544 \times 3} = 1.1661$	0.117	36	Integrador	22	1	$\frac{1}{T_0}$
12	$\frac{K_E E E X_{max}}{T_E E E X_{max}} = \frac{0.0582 \times 3.6145}{0.6544 \times 3} = 0.1072$	0.011	24	"	22	1	$\frac{1}{T_0}$
13	$\frac{K_E E E X_{max}}{T_F V_{S_{max}}} = \frac{0.105 \times 3.6145}{0.35 \times 1.2148} = 0.9$	0.9	31	Sumador	33	1	-
14	$\frac{1}{T_F} = \frac{1}{0.35} = 2.857$	0.286	32	Inversor	34	1	-
15	$\frac{V_{Gen_{max}}}{T_G V_{Gen_{max}}} = \frac{1.0869}{7.01 \times 1} = 0.155$	0.016	33	Integrador	32	1	$\frac{1}{T_0}$
16	$\frac{K_G E E X_{max}}{T_G V_{Gen_{max}} LAD} = \frac{\sqrt{3} F_{\omega B} \times 0.3072 \times 3.1645 \times \sqrt{3} \times 0.9 \times 10^{-5} \times 372}{7.01 \times 0.39193} = 0.018$	0.002	34	Integrador	32	1	$\frac{1}{T_0}$
17	$\frac{V_{L_{max}}}{V_{R_{max}}} = 0.265$	0.265	14	Límitador	15	1	-
18	$\frac{V_{L_{min}}}{V_{R_{max}}} = \frac{0}{V_{R_{max}}} = 0$	0.0	15	Límitador	15	1	-

TABLA N° 5-3.- CALCULO DE LAS CONSTANTES DEL SISTEMA DE CONTROL DE EXCITACION CON REGULADOR DE VOLTAJE CON AMPLIDINA (Continuación).

	VALOR DE LA CONSTANTE	POTENCIOMETRO		ELEMENTO		GANANCIA	α
		VALOR	Nº	TIPO	Nº		
1	$\frac{V_{Gen\ max}}{TR\ V_{DC\ max}} = \frac{1.506}{0.015 \times 3} = 33.47$	0.335	11	Integrador	12	10	$\frac{1}{10}$
2	$\frac{V_{DC\ max}}{TR\ V_{DC\ max}} = \frac{2.024}{0.015 \times 3} = 44.98$	0.45	12	"	12	10	$\frac{1}{10}$
3	$\frac{R_{ef\ max}}{V_e\ max} = \frac{1.8711}{0.9} = 2.079$	0.208	13	Sumador	13	1	-
4	$\frac{V_{DC\ max}}{V_e\ max} = \frac{2.024}{0.9} = 2.25$	0.225	16	Sumador	13	10	-
5	$\frac{V_S\ max}{V_e\ max} = \frac{1.2048}{0.9} = 1.3386$	0.134	26	"	13	10	-
6	$\frac{K_A\ V_{e\ max}}{T_A\ V_{A\ max}} = \frac{200 \times 0.9}{0.2 \times 12} = 75$	0.75	22	Integrador	21	10	$\frac{1}{10}$
7	$\frac{V_A\ max}{V_A\ max\ T_A} = \frac{1.2}{12 \times 0.2} = 0.5$	0.05	21	Integrador	21	1	$\frac{1}{10}$
8	$\frac{S_E\ max}{V_R\ max} = \frac{0.18}{12} = 0.015$	0.02	23	Sumador	23	1	-

TABLA N° 5-4.- CALCULO DE LAS CONSTANTES DEL SISTEMA DE CONTROL DE EXCITACION SON SILVERSTAT

	VALOR DE LA CONSTANTE	POTENCIOMETRO		ELEMENTO		GANANCIA	α
		VALOR	Nº	TIPO	Nº		
9	$\frac{V_A \max}{V_A \max} = \frac{1.2}{12} = 0.1$	0.1	25	Sumador	23	1	-
10	$\frac{V_{R'} \max}{T_E \dot{E}X_{\max}} = \frac{1.2}{0.5 \times 3} = 0.8$	0.08	36	Integrador	22	1	$\frac{1}{10}$
11	$\frac{K_E \dot{E}X_{\max}}{T_E \dot{E}E X_{\max}} = \frac{0.17 \times 3.6145}{0.5 \times 3} = 0.41$	0.041	24	"	22	1	$\frac{1}{10}$
12	$\frac{K_F \dot{E}E X_{\max}}{T_F V_{S_{\max}}} = \frac{0.028 \times 3.6145}{0.5 \times 1.2048} = 0.168$	0.168	31	Sumador	33	1	-
13	$\frac{1}{T_F} = \frac{1}{0.5} = 2$	0.2	32	Inversor	34	1	-
14	$\frac{V_{Gen \max}}{T_E \dot{V}G_{en \max}} = 0.155$	0.016	33	Integrador	32	1	$\frac{1}{10}$
15	$\frac{K_G \dot{E}E X_{\max} \sqrt{3} t_F \omega_B}{T_G \dot{V}G_{en \max} LAD} = 0.015624$	0.002	34	"	32	1	$\frac{1}{10}$

TABLA Nº 5-4.- CALCULO DE LAS CONSTANTES DEL SISTEMA DE CONTROL DE EXCITACION CON SILVERSTAT (Continuación).

Conectando los diagramas escalados anteriormente y considerando que el regulador de voltaje Silverstat no tiene limitador, se obtienen los programas escalados del sistema de control de excitación utilizando regulador de voltaje con amplidina [Figura N° 5-7] y regulador de voltaje Silverstat [figura N° 5-8].

Además en las tablas N° 5-3 y 5-4 se calculan todos los valores de las constantes para ambos programas quedando preparados para introducirlos en el computador.

En la tabla N° 5-3 la constante número 10 que equivale al potenciómetro representado por un asterisco, en la conexión física de lo puentea, ya que su valor es de 1 y se lo puede eliminar para utilizar el potenciómetro en otro circuito, debido a la limitada capacidad del computador.

5.4. RESULTADOS DE LA SIMULACION

Una vez efectuados los programas analógicos con sus respectivos escalamientos tanto en tiempo como en magnitud, se utiliza el computador analógico y el graficador a partir de los cuales se obtienen los resultados establecidos en las figuras 5-9 a 5-25 y 6-3 a 6-12. Es preciso indicar que en estos gráficos se han dibujado las escalas en valores de tiempo real (eje X) y en voltios por unidad (eje) y luego de efectuar las traducciones correspondientes a las varia-

bles de computadora, escalas del graficador, escalas del computador y valores de escalamiento. Esto se ha hecho con la finalidad de expresar los resultados en valores reales para analizar las gráficas directamente de las figuras y evitar cálculos redundantes. Sin embargo, es necesario explicar de donde se obtienen los valores reales y la posición de los selectores de barrido y magnitud del computador y del graficador, al efectuar la simulación.

En la tabla N° 5-5 se indican todos los valores de las escalas y posiciones de los selectores.

De acuerdo a esta tabla, para calcular los valores reales se procede de la siguiente manera:

1. TIEMPO (X)

$$a. \text{GRAFICADOR} = 1 \text{ volt/pulg}$$

$$\text{Computador} = 9 \times 0.1$$

"Fast" = Prendido = 500 veces más rápida la señal normal.

$$9 \times 0.1 \times 500 = 450 \text{ seg.}$$

$$\frac{1 \text{ voltio}}{\text{pulgada}} \times \frac{1}{10 \text{ volt.}} = 0.1 \frac{\text{unidades}}{\text{pulgada}}$$

$$T = 450 \text{ seg.} \times 0.1 \frac{\text{unidades}}{\text{pulgada}} = 45 \text{ seg/pulg.}$$

$$T = \alpha t$$

$$t = \frac{T}{\alpha} = \frac{45}{10} \text{ seg/pulg.} = 4.5 \text{ seg/pulg.}$$

b. GRAFICADOR = 0.5 volt/pulg.

$$\text{Computador} = 9 \times 0.1$$

"Fast" = Prendido = 500 veces la señal normal

$$9 \times 0.1 \times 500 = 450 \text{ seg.}$$

$$0.5 \text{ volt/pulg.} \times 1/10 \text{ volt} = 0.05 \text{ unidades/pulgadas}$$

$$T = 450 \times 0.05 = 22.5 \text{ seg/pulg.}$$

$$t = \frac{T}{\alpha} = \frac{22.5}{10} = 2.25 \text{ seg/pulg}$$

2. VOLTIOS (V)

COMPUTADOR = 1 voltio/pulgada

$$1 \text{ voltio/pulgada} \times 1/10 \text{ volt.} = 0.1 \text{ unidades/pulgada}$$

Utilizando la variable de computadora correspondiente

por ejemplo $\left[\frac{V_A}{V_{A \text{ max}}} \right]$:

$$\left[\frac{V_A}{V_{A \text{ max}}} \right] = 0.1 \text{ unidades/pulgadas}$$

$$V_A = 0.1 \text{ unidades/pulgadas} \times V_{A \text{ max}}$$

$$V_A = 0.1 \text{ unidades/pulgadas} \times 3.012 = 0.3012 \text{ volts (p.u.)/pulg.}$$

Tomando la figura N° 5-11 se observa que el pico con respecto al eje horizontal 2.126 pulgadas, por tanto $V_A = 0.3012 \text{ volt (p.u.)/pulg.} \times 2.126 \text{ pulgadas} = 0.64 \text{ (p.u.) de pico.}$

El valor en voltios se lo obtiene multiplicando el valor en por unidad por 83 que es el voltaje base (E_{EXB}).

$$V_A = 0.64 \times 83 = 53.14 \text{ voltios}$$

De la misma manera se calculan todas las demás escalas, señalando en el eje (Y) solamente el voltaje en por unidad.

Los resultados de la simulación están graficados en dos partes. La primera corresponde al sistema de control de excitación utilizando la excitatriz un regulador de voltaje con amplidina; y la segunda el mismo sistema de control de excitación, pero esta vez con regulador de voltaje Silverstat.

En ambas partes hay una sección exclusivamente para indicar el comportamiento de cada uno de los componentes del regulador de voltaje y de la excitatriz tanto en estado transiente y estado estable como al aplicársele un disturbio.

La excitatriz es la encargada de controlar el voltaje de salida del generador de poder y cuando está sincronizado en paralelo con otros generadores se encarga de efectuar una repartición equitativa de la corriente reactiva entregada.

Cuando se produce una falla o se carga el generador, su voltaje terminal tiende a disminuir [Figura N° 5-16 y 5-20]. Por efecto de los transformadores de potencial y el rectificador [Figura N° 5-9] la señal del generador es retroalimentada al regulador de voltaje donde se compara con el voltaje de referencia (V_{ref}) y también con el voltaje de salida del estabilizador (V_s) [figura N° 5-13 y 5-18] dando como resultado el voltaje de error (V_e) [figura N° 5-10]. Este voltaje de error es bastante pequeño por lo cual es necesario utilizar un amplificador. De la salida de este (V_A) [fig. N° 5-11 y 5-17] la señal pasa por el limitador para el caso del regulador con amplidina (V_R) [Figura N° 5-12] y de allí a la excitatriz. Se observa en las figuras 5-16 y 5-20 que al producirse un disturbio, el voltaje del generador cae levemente, pero la excitatriz inmediatamente por medio de su circuito de control eleva su voltaje, manteniendo invariable el voltaje de salida del generador. El proceso inverso se produce al disminuir el voltaje terminal.

Es importante notar que al producirse el disturbio, el voltaje terminal de la excitatriz trabajando tanto con el Silverstat como con la amplidina varía su nivel de voltaje, es decir que es esta la que absorbe el cambio de voltaje, pero dentro del sistema de excitación no todos los elementos del circuito varían su nivel de volta

je sino que una vez producida la contingencia regresan inmediatamente a su valor original de tensión. Estos son: V_{DC} , el cual obviamente es el reflejo exacto del voltaje terminal del generador y vuelve inmediatamente a su valor nominal (figura N° 5-9), el otro es el voltaje de salida del estabilizador (V_s), el cual también retorna instantáneamente a su nivel original (figuras N° 5-13 y 5-18).

Se observa en las figuras N° 5-11 y 5-12 que el sobre-alcance producido a la salida del amplificador es bastante elevado, este sobre-alcance se refleja en el voltaje de salida de la excitatriz. El valor máximo de la onda es cortado por el limitador, es decir por el valor de V_{Lmax} . En el proceso de la simulación para analizar el efecto de la variación de este limitador se procede a variar el potenciómetro número 14 que es el que varía el valor del límite máximo de voltaje.

En la figura N° 5-21 se observa que al disminuir el valor del potenciómetro N° 14, es decir V_{Lmax} , se disminuye el valor máximo que alcanza la onda de voltaje, -cortando los picos y disminuyendo el porcentaje de alcance máximo. Por el contrario, al variar exageradamente este valor del limitador, se produce saturación de los elementos.

Algo similar sucede al variar el potenciómetro N° 23, con la diferencia que el error de estado estable se incrementa, obligando a la excitatriz a trabajar en un nivel de voltaje diferente (Figura N° 5-22).

En la figura N° 5-23 se observa la variación del voltaje de la excitatriz al conectar un limitador de voltaje junto al regulador Silverstat. Se obtienen los mismos resultados además cuando al potenciómetro N° 14 se le da valores como 0.2 y 0.4 se produce saturación.

Cuando se incrementa el voltaje de referencia, aumenta el nivel de voltaje de la excitatriz, es decir que esta trabaja en un valor superior. En la simulación de la excitación con el regulador de voltaje Silverstat al incrementar en un 10% el valor del potenciómetro 13 se observa en la figura N° 5-25 que el nivel del voltaje de la excitatriz aumenta, es decir que el valor del potenciómetro 13 que originalmente es de 0.208 se lo cambia a 0.228.

FIGURA	GRAFICADOR		TIMER	COMPUTADOR	
	Ejex Volt/pulg.	Ejex Volt/pulg.		Prendido	"FAST"
5-9 V_{Dc} (amplid)	1	1	9 x 0.1	x	
5-10 V_e	1	1	9 x 0.1	x	
5-11 V_A	1	1	9 x 0.1	x	
5-12 V_R	1	1	9 x 0.1	x	
5-13 V_S	1	1	9 x 0.1	x	
5-14 $\frac{1}{\delta} V_S$	1	10	9 x 0.1	x	
5-15 E_{EX}	1	10	9 x 0.1	x	
5-16 V_{Gen}	1	1	9 x 0.1	x	
6-3 E_{EX}	0.5	5	9 x 0.1	x	
6-5 E_{EX}	0.5	5	9 x 0.1	x	
6-6 V_{Gen}	1	0.5	9 x 0.1	x	
6-9 E_{EX}	0.5	5	9 x 0.1	x	
6-10 E_{EX}	0.5	5	9 x 0.1	x	
5-22 E_{EX}	0.5	5	9 x 0.1	x	
5-21 E_{EX}	0.5	5	9 x 0.1	x	
5-17 V_A (Silverstat)	1	1	9 x 0.1	x	

TABLA N° 5-5. POSICION DE LOS SELECTORES DEL COMPUTADOR Y GRAFICADOS

FIGURA	GRAFICADOR		TIMER	COMPUTADOR	
	Ejex Volt/pulg.	Ejex Volt/pulg.		Prendido	"FAST" Apagado
5-18 V_S (Silverstat)	1	1	9 x 0.1	x	
5-19 EEX	1	10	9 x 0.1	x	
5-20 V_{Gen}	1	10	9 x 0.1	x	
6-4 EEX	0.5	5	9 x 0.1	x	
6-7 EEX	0.5	5	9 x 0.1	x	
6-8 V_{Gen}	1	0.5	9 x 0.1	x	
6-11 EEX	0.5	5	9 x 0.1	x	
6-12 EEX	0.5	5	9 x 0.1	x	
5-24 EEX	0.5	5	9 x 0.1	x	
5-23 EEX	0.5	5	9 x 0.1	x	
5-25 EXZ	0.5	5	9 x 0.1	x	

TABLA N° 5.5. POSICION DE LOS SELECTORES DEL COMPUTADOR Y GRAFICADOS (Cont.)

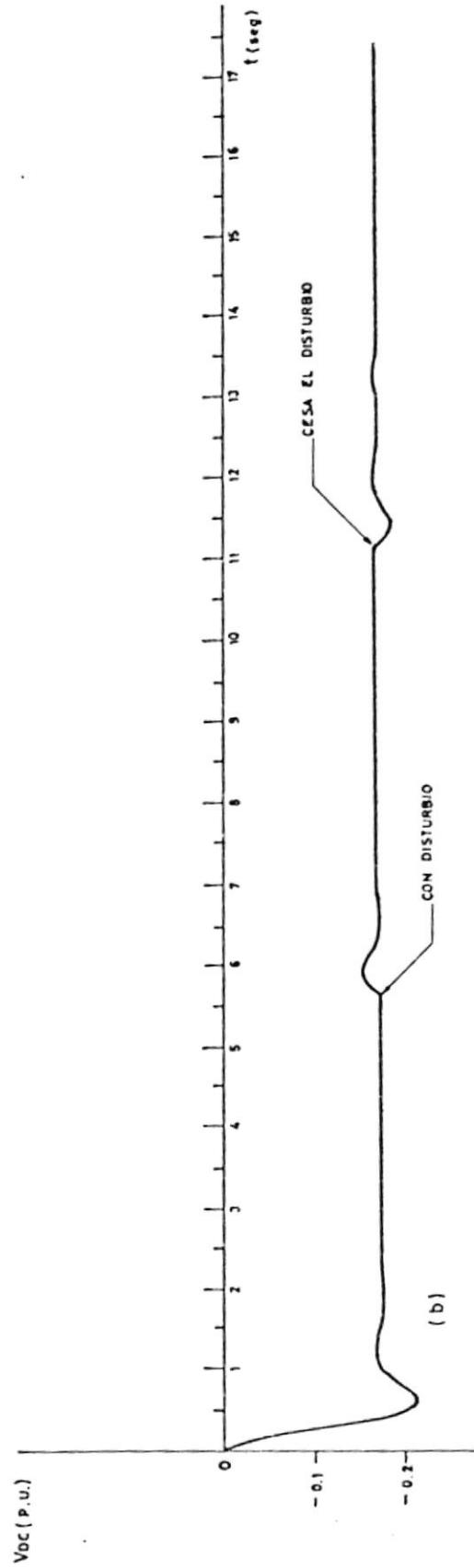
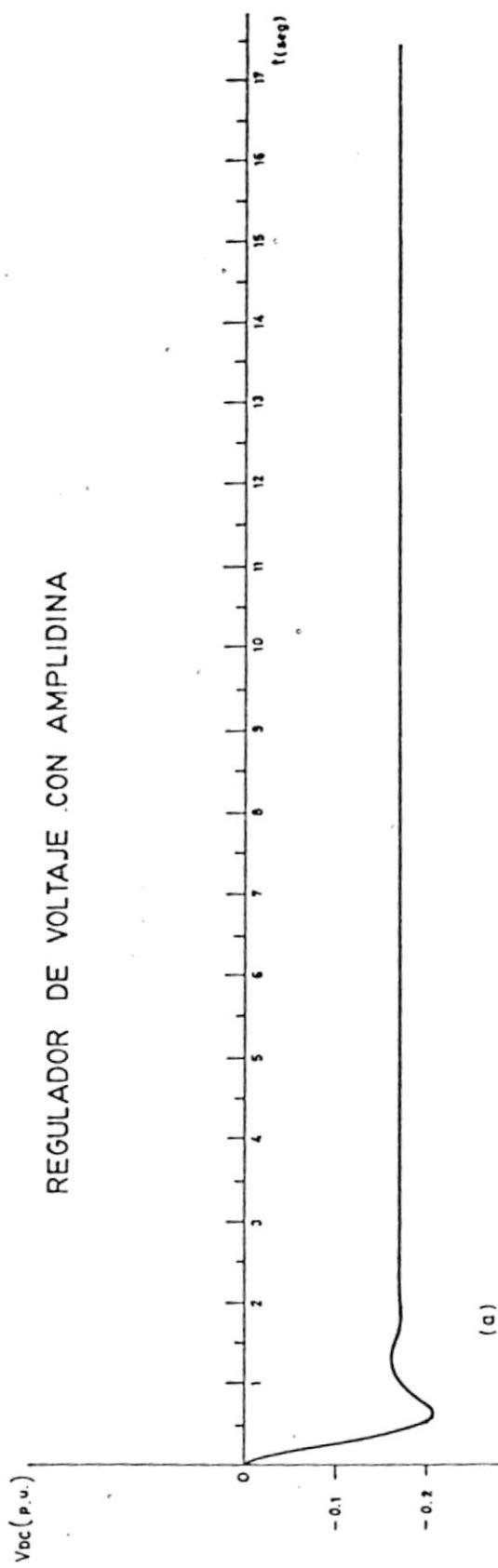


FIG. N.º 5-9 (V_{dc}) Voltaje de salida del rectificador del regulador de voltaje a) sin disturbio, b) con disturbio

REGULADOR DE VOLTAJE CON AMPLIDINA

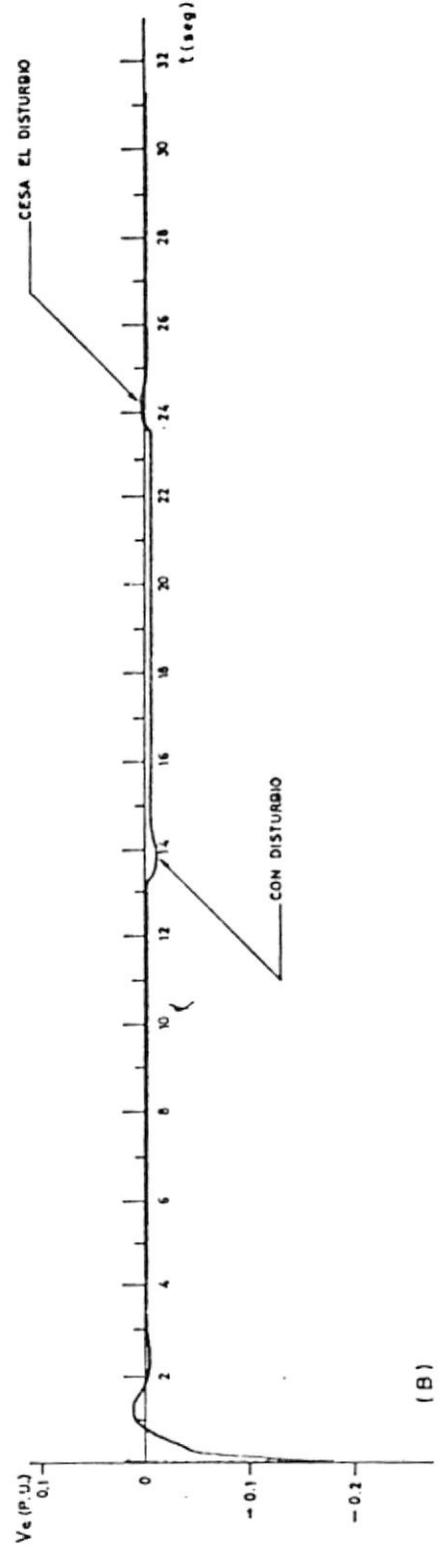
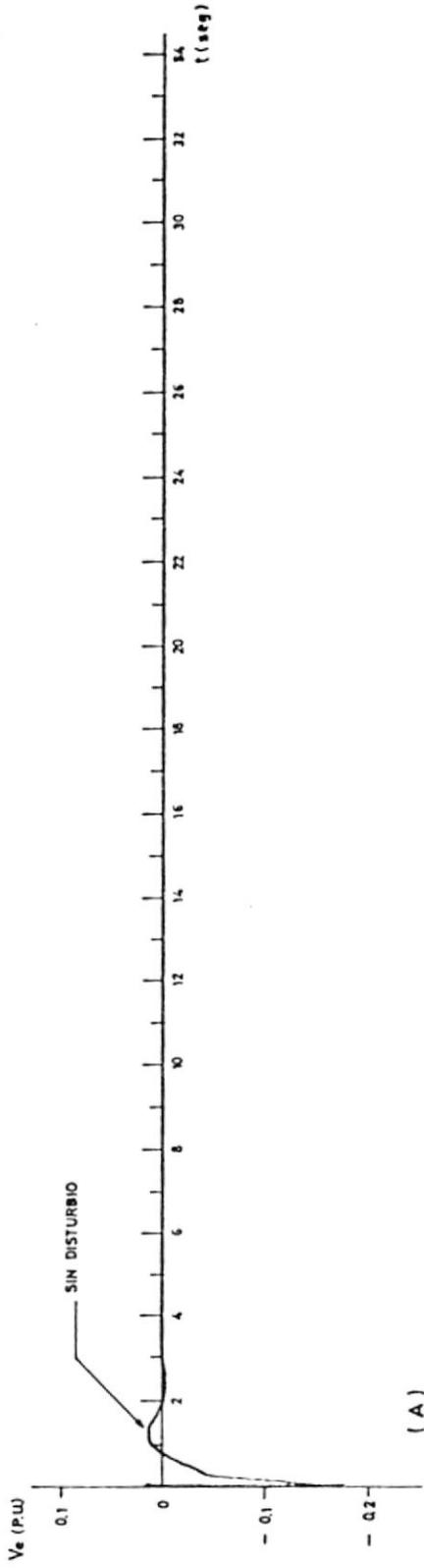
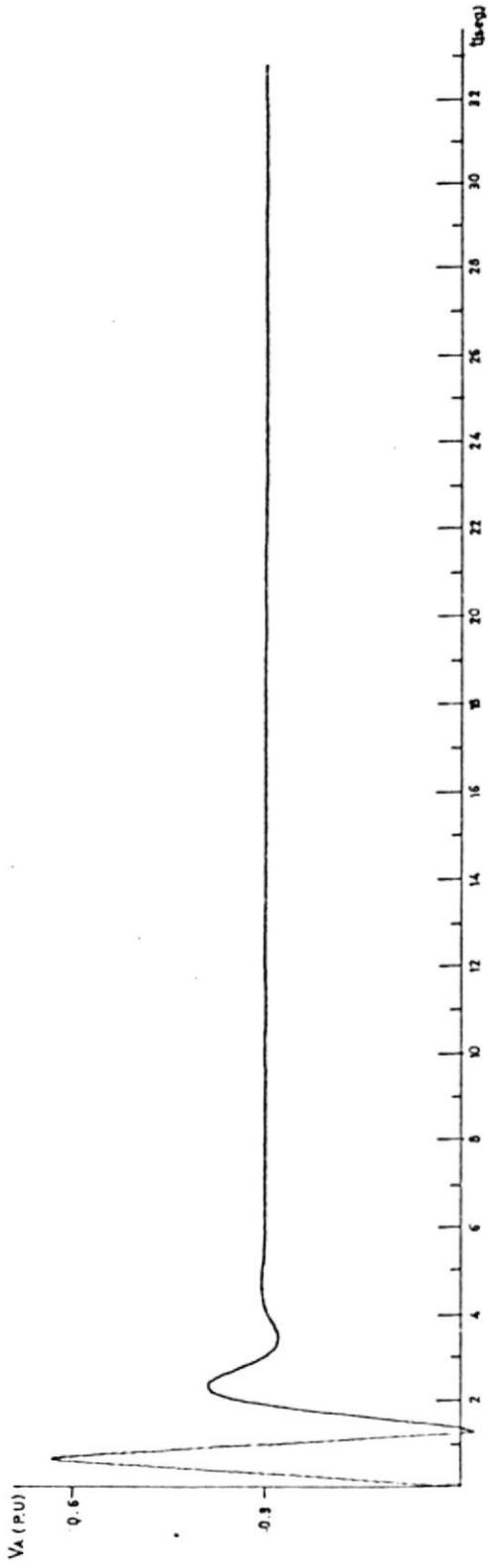
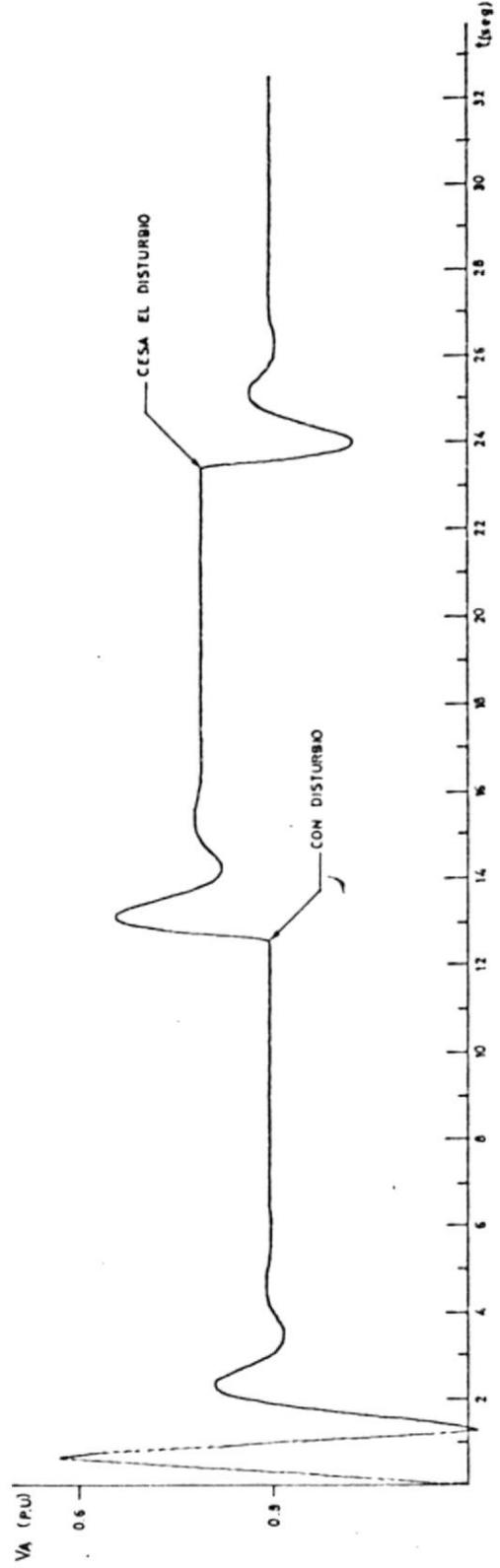


FIG. No 5-10 Voltaje de salida del comparador del regulador de voltaje a) sin disturbio, b) con disturbio

REGULADOR DE VOLTAJE CON AMPLIDINA



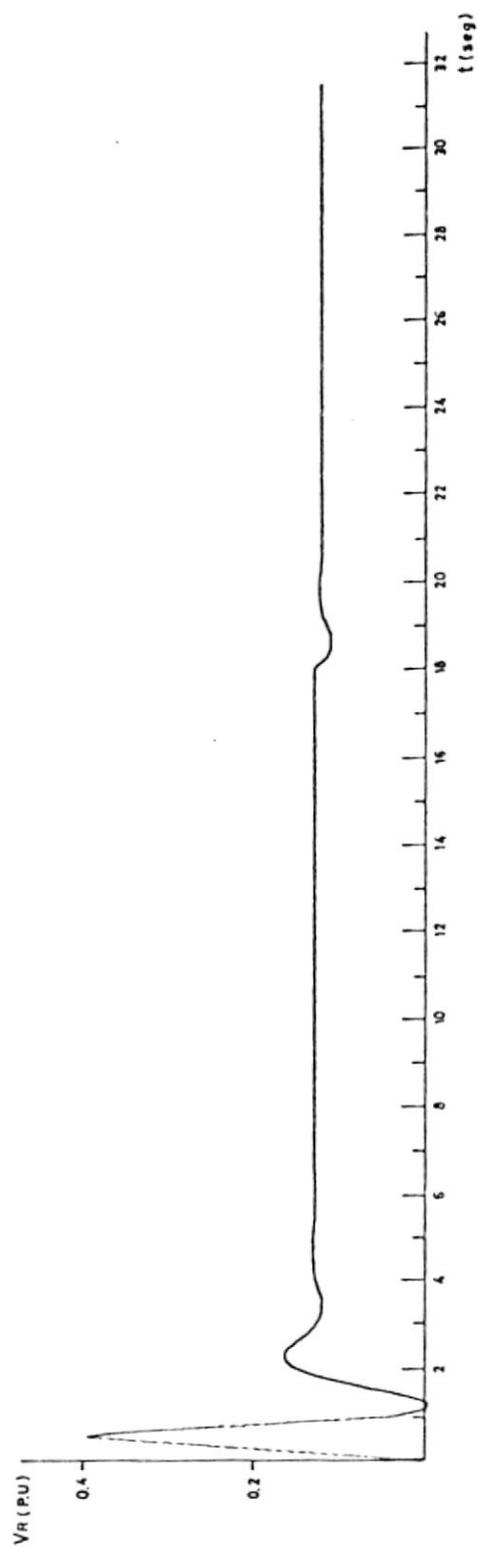
(a)



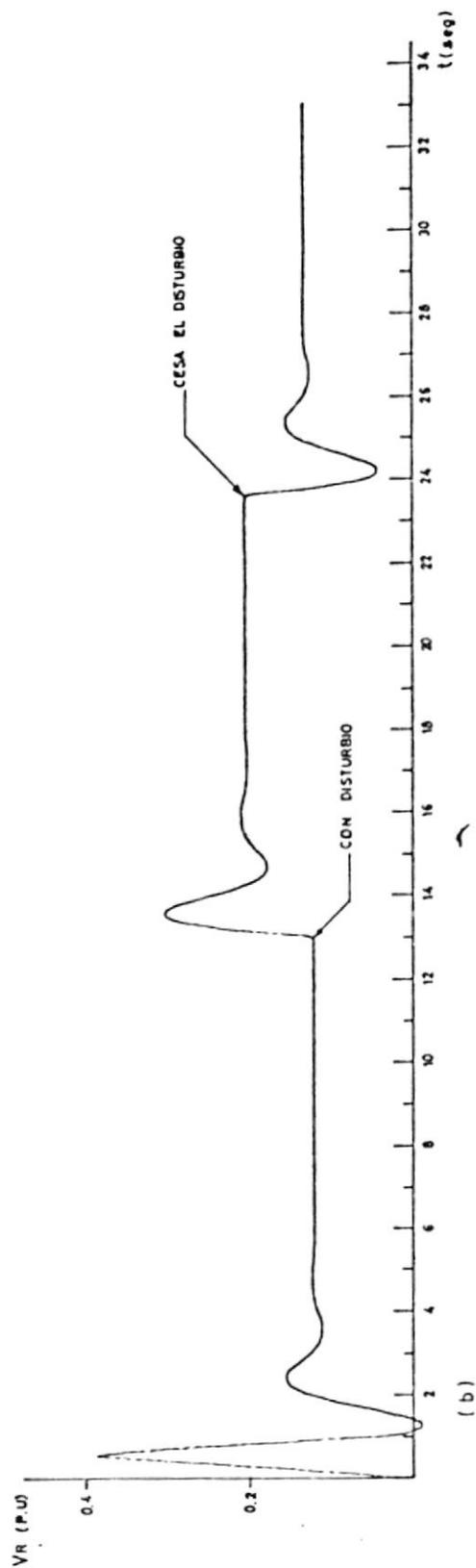
(b)

FIG. N.º 5-11 Voltaje de salida del amplificador del regulador de voltaje al sin disturbio, b) con disturbio

REGULADOR DE VOLTAJE CON AMPLIDINA



(a)



(b)

FIG. Nº5-12 (V_R) Voltaje de salida del regulador de voltaje a) sin disturbio, b) con disturbio

REGULADOR DE VOLTAJE CON AMPLIDINA

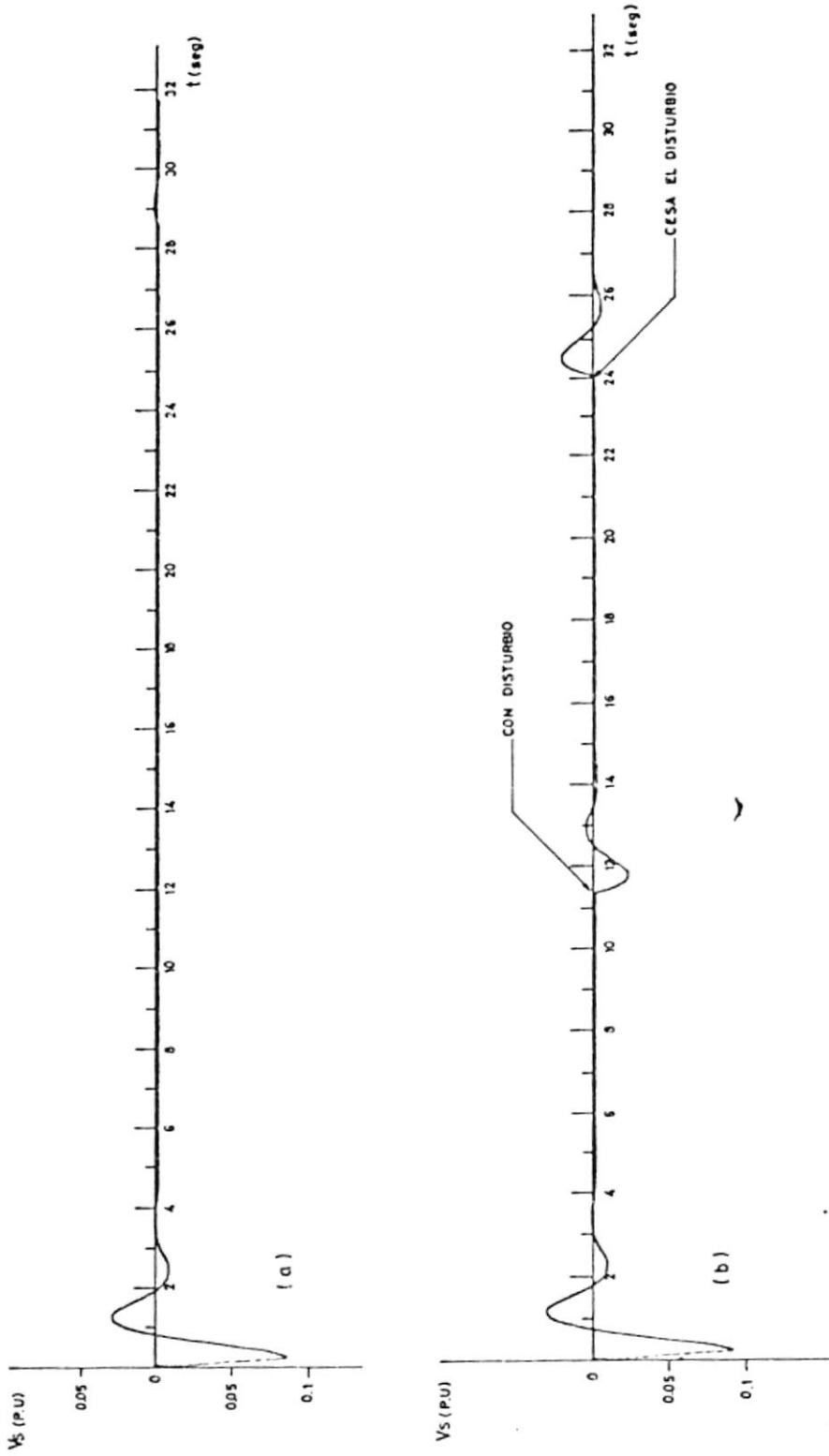


FIG. N.º 5-B (V_S) Voltaje de salida del estabilizador del regulador de voltaje a) sin disturbio, b) con disturbio

REGULADOR DE VOLTAJE CON AMPLIDINA

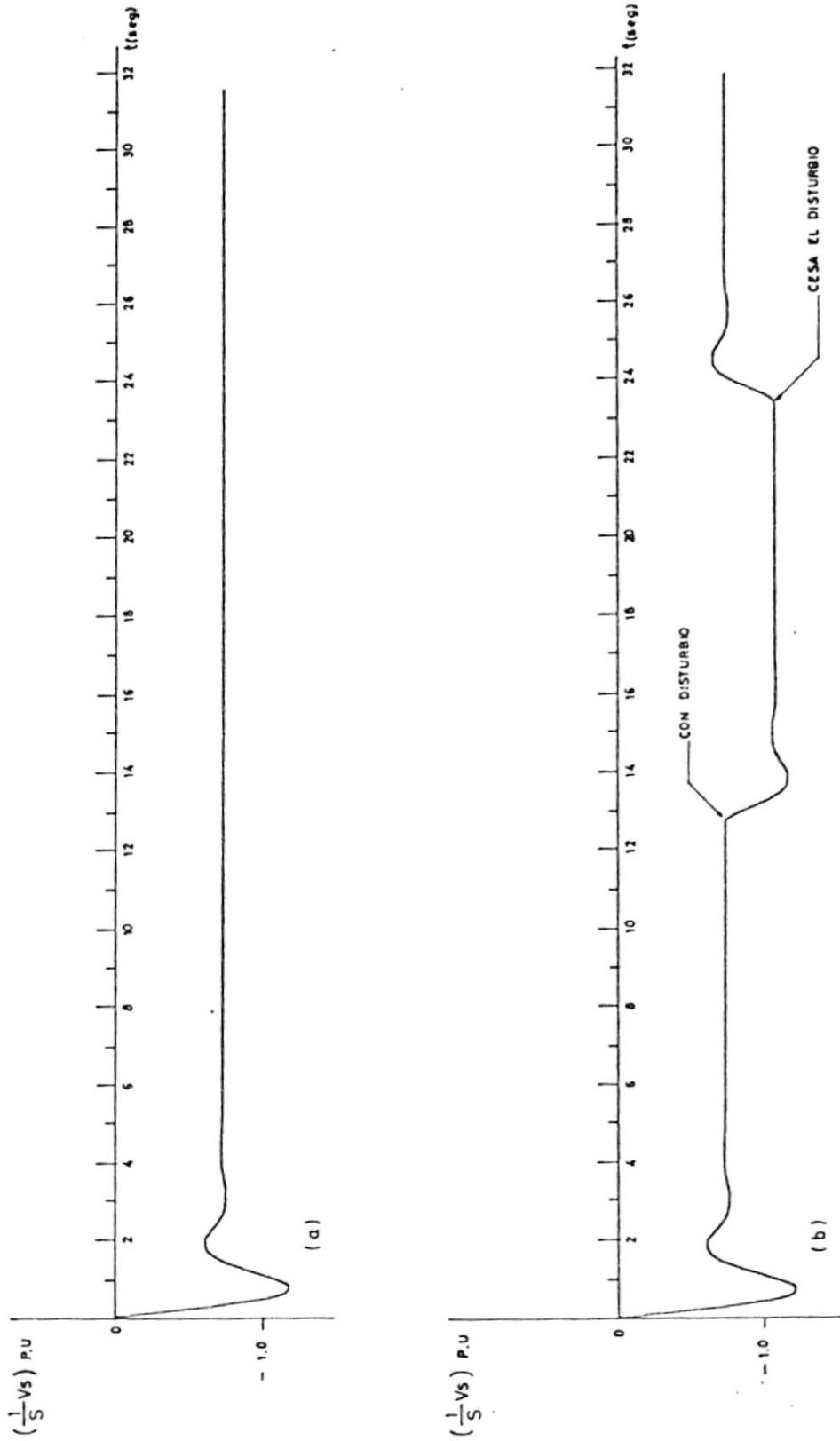


FIG. Nº 5-14 $(\frac{1}{S}) V_s$ Voltaje de salida del integrador #31 a) sin disturbio, b) con disturbio

REGULADOR DE VOLTAJE CON AMPLIDINA

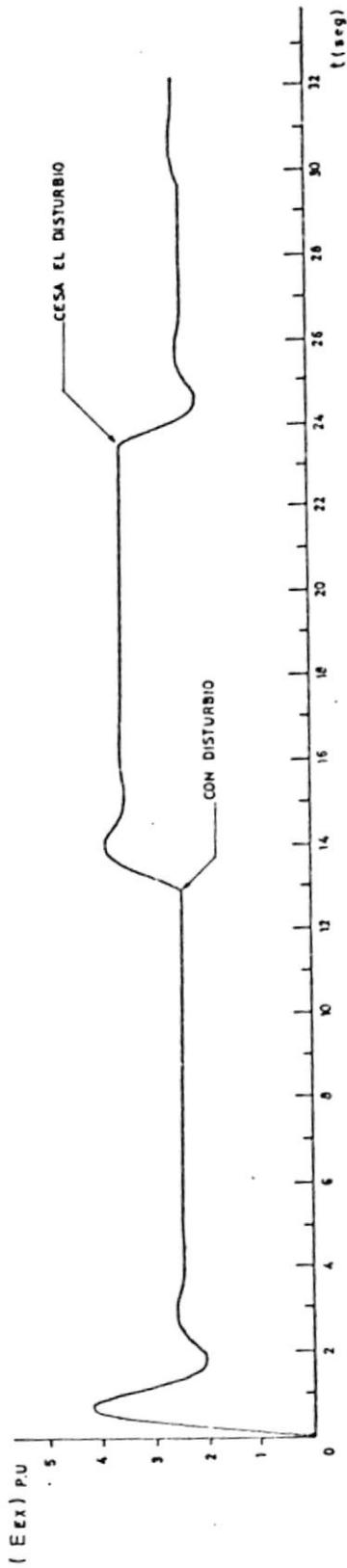
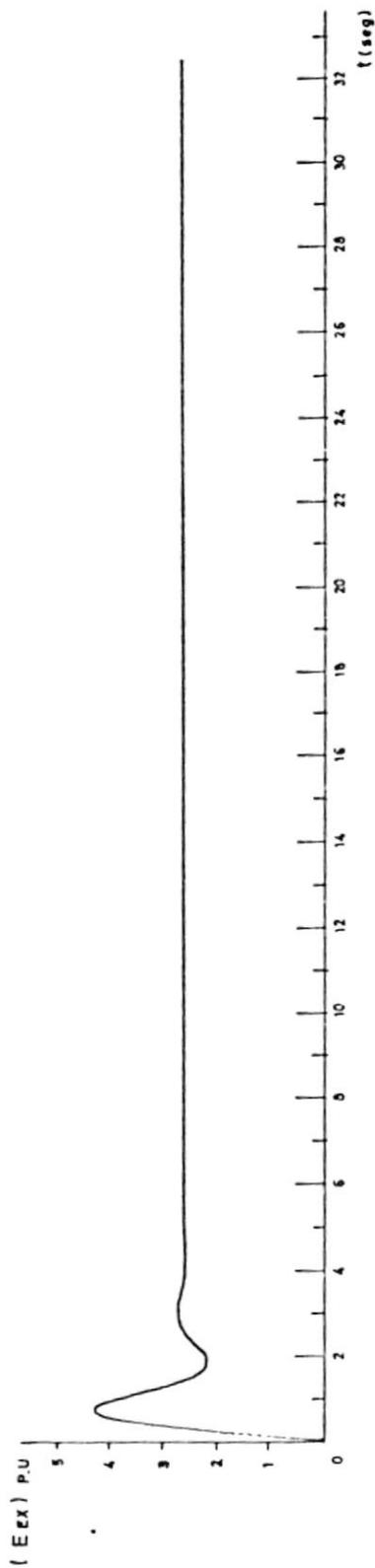
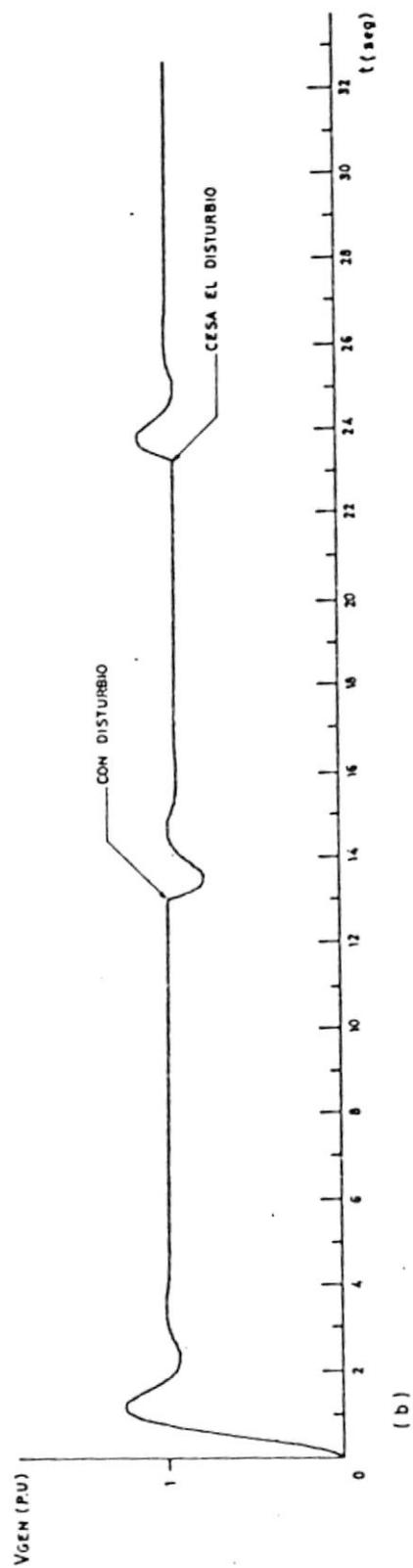
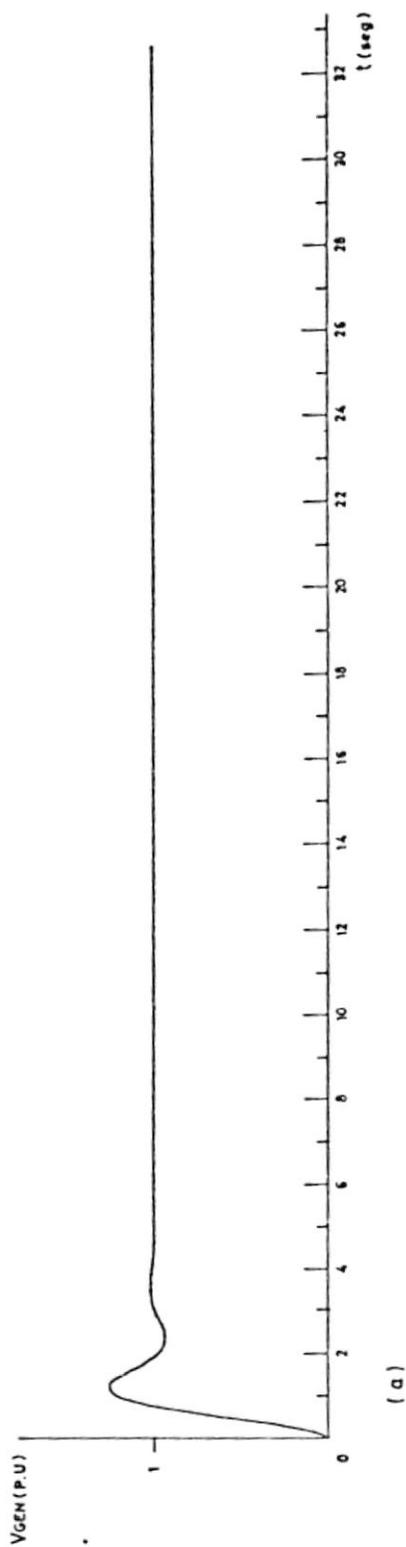


FIG. Nº5-15 (Eex) Voltaje de salida de la excitatriz al sin disturbio , blcon disturbio

REGULADOR DE VOLTAJE CON AMPLIDINA

FIG. N.º 5-16 (V_{GEN}) Voltaje de salida del generador al sin disturbio , b) con disturbio

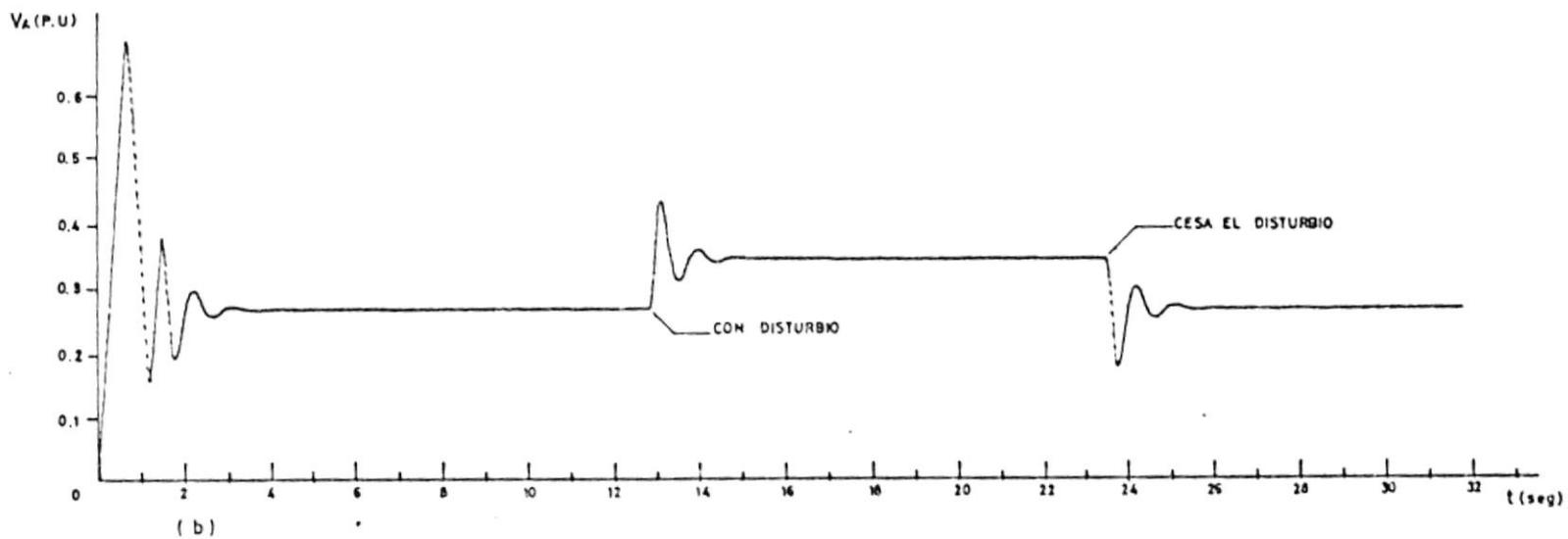
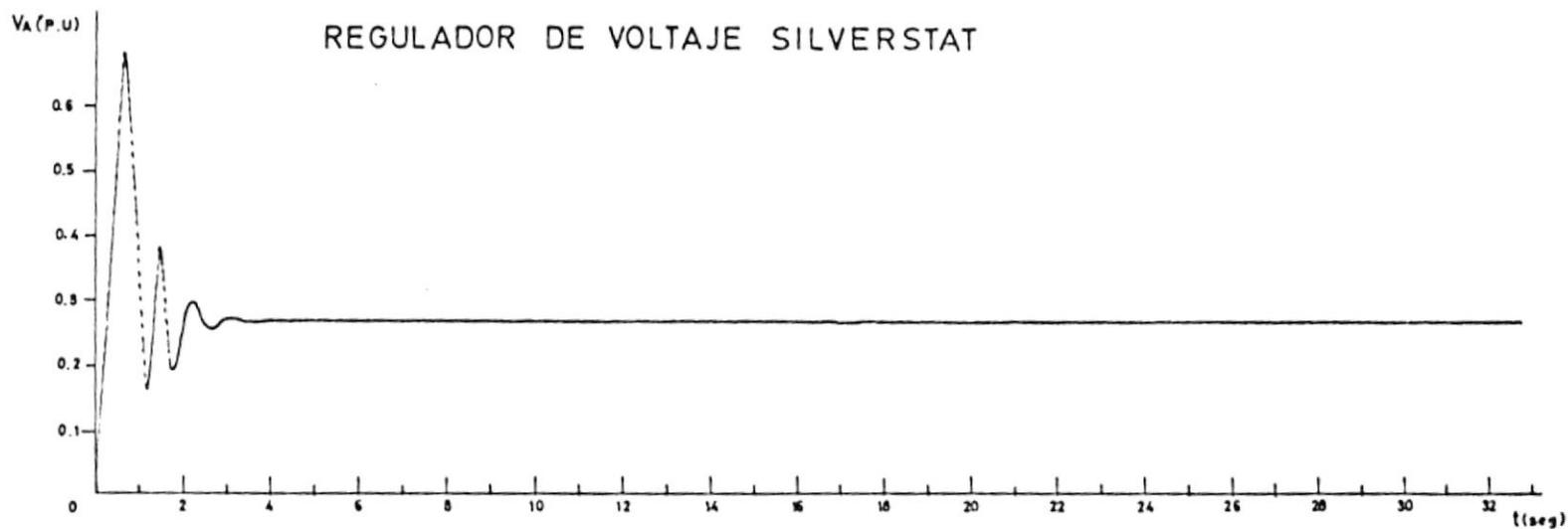


FIG. Nº 5-17 Voltaje de salida del amplificador del regulador de voltaje a) sin disturbio b) con disturbio

REGULADOR DE VOLTAJE SILVERSTAT

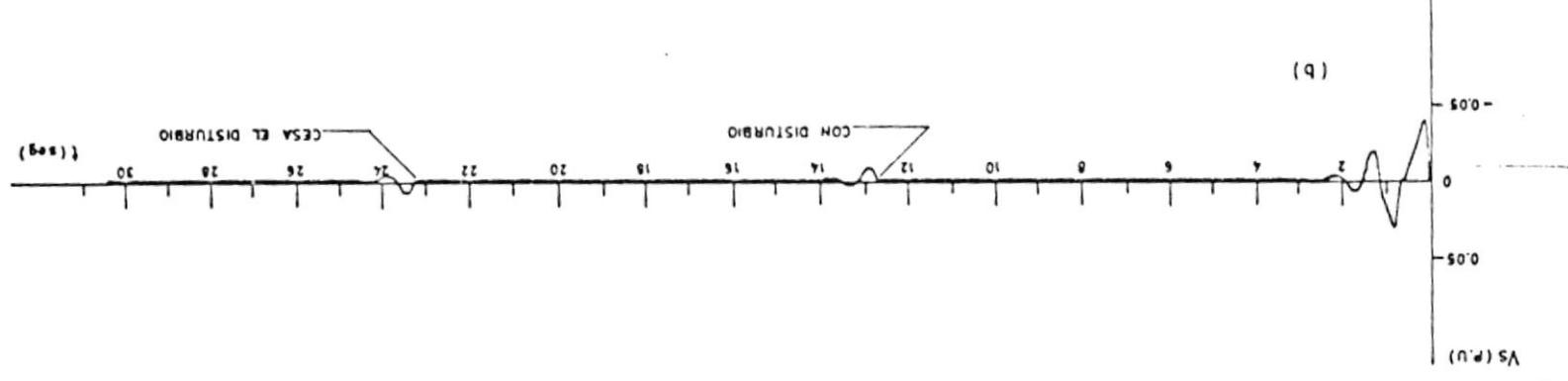
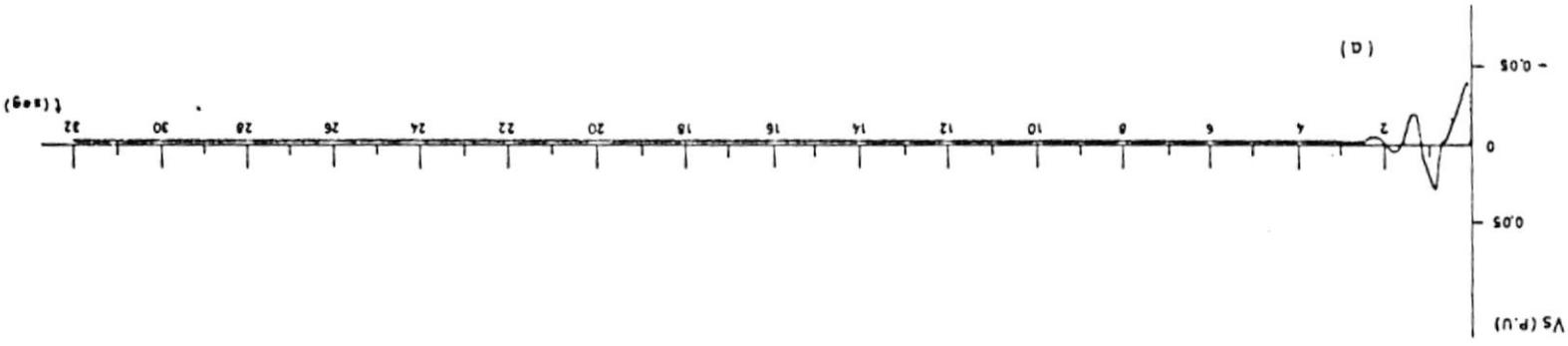


FIG. Nº. 5-18 Voltaje de salida del estabilizador del regulador de voltaje a) sin disturbio b) con disturbio

REGULADOR DE VOLTAJE SILVERSTAT

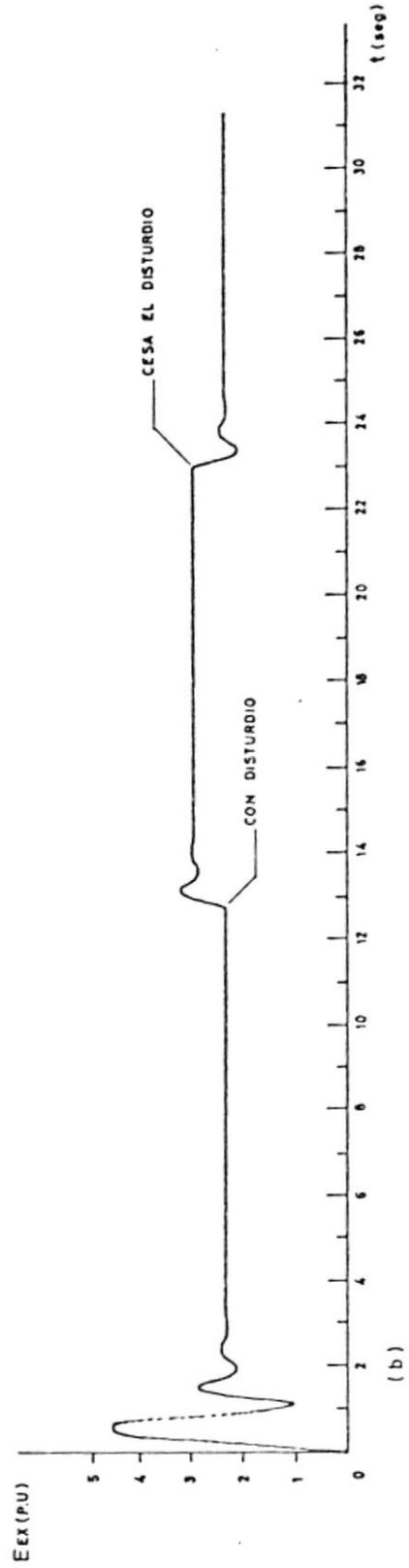
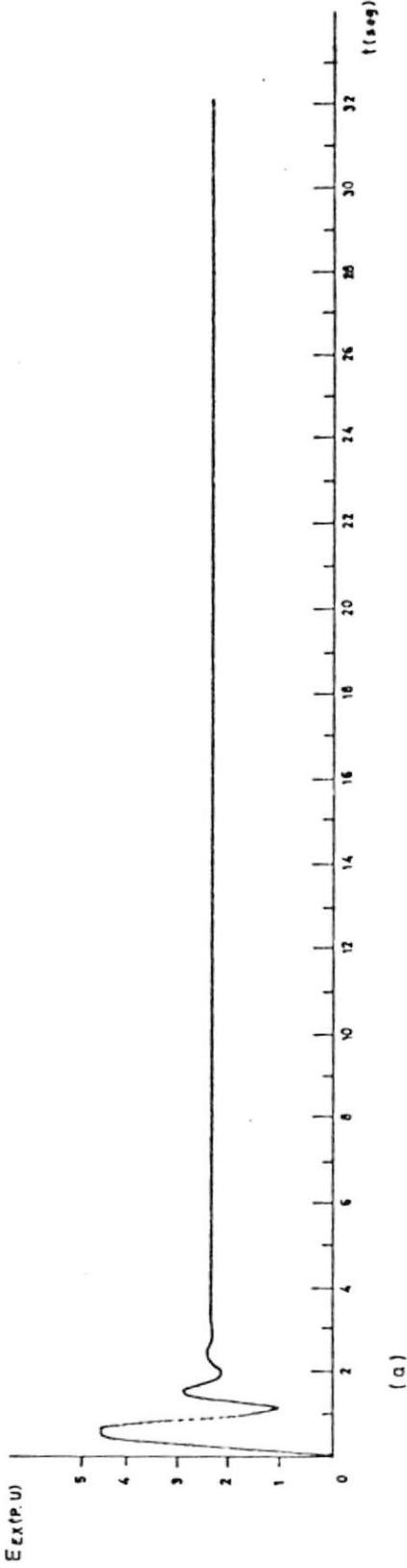


FIG. N.º 5-19 Eexc (voltage de salida de la excitatriz a) sin disturbio b) con disturbio

REGULADOR DE VOLTAJE SILVERSTAT

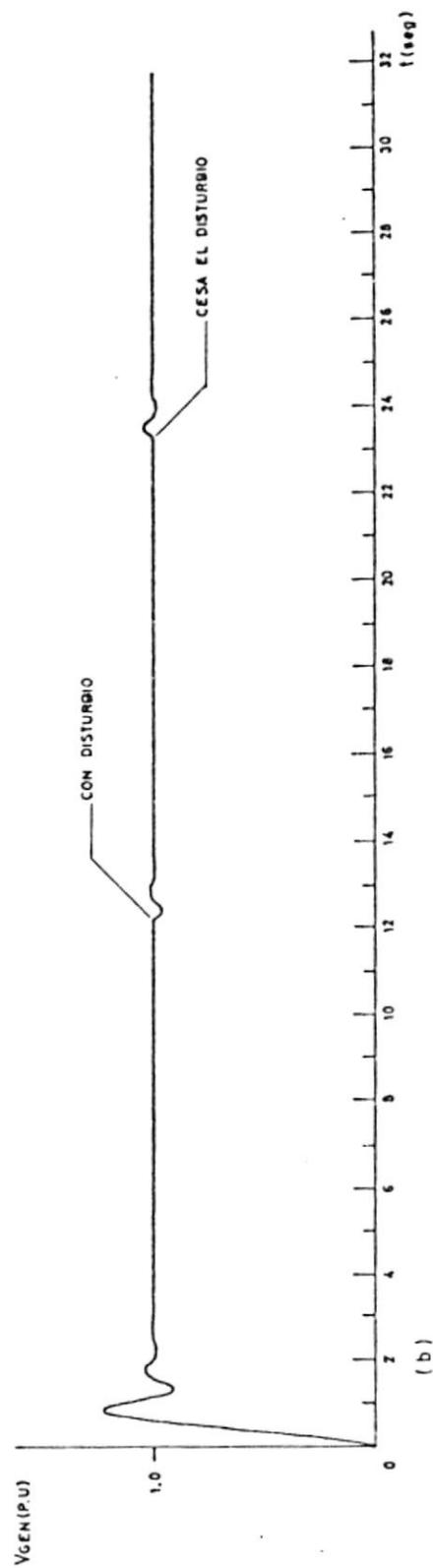
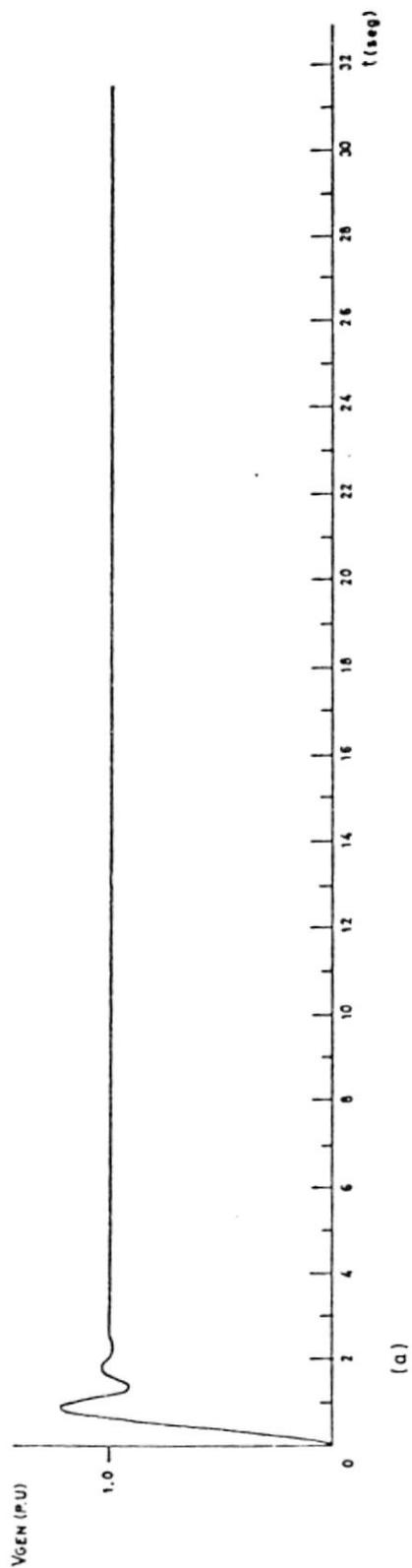


FIG. Nº 5-20 (V_{GEN}) Voltaje de salida del generador a) sin disturbio, b) con disturbio

REGULADOR DE VOLTAJE CON AMPLIDINA

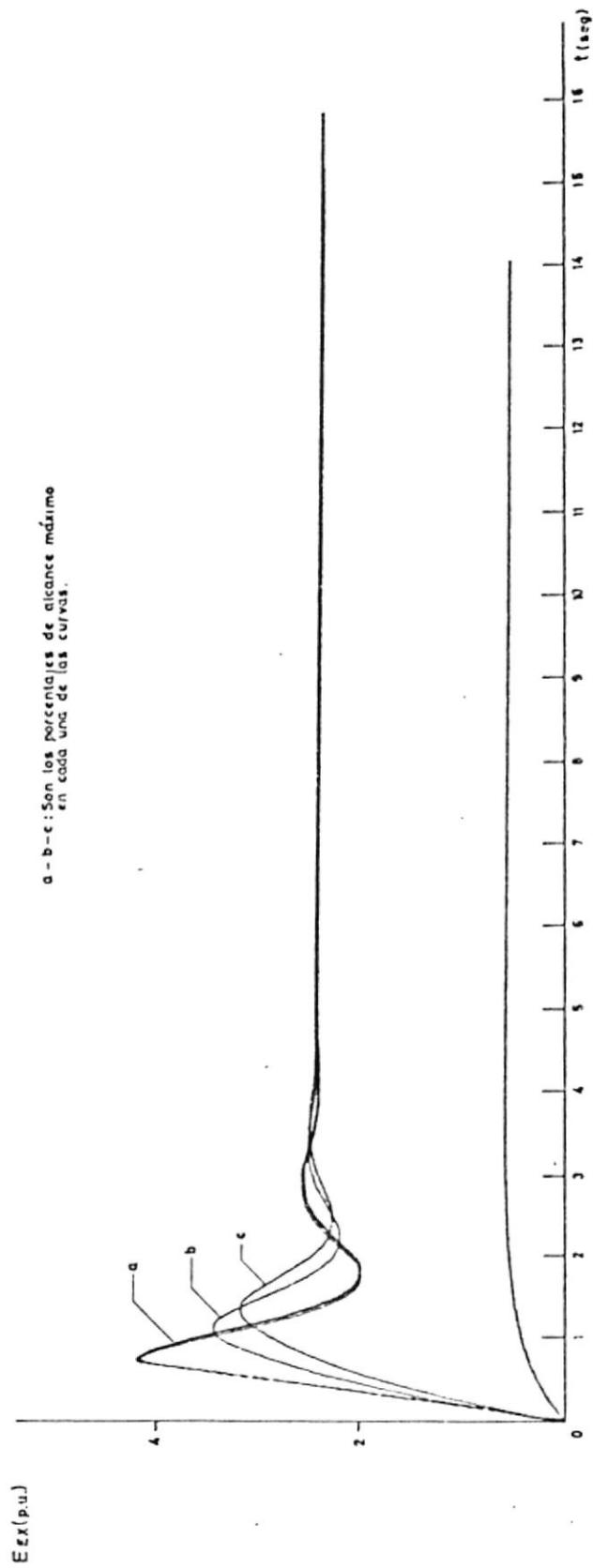


FIG. N.º 5-21 Efecto producido por la variación de V_{Lmax} en el circuito limitador (potenciómetro 14)

REGULADOR DE VOLTAJE CON AMPLIDINA

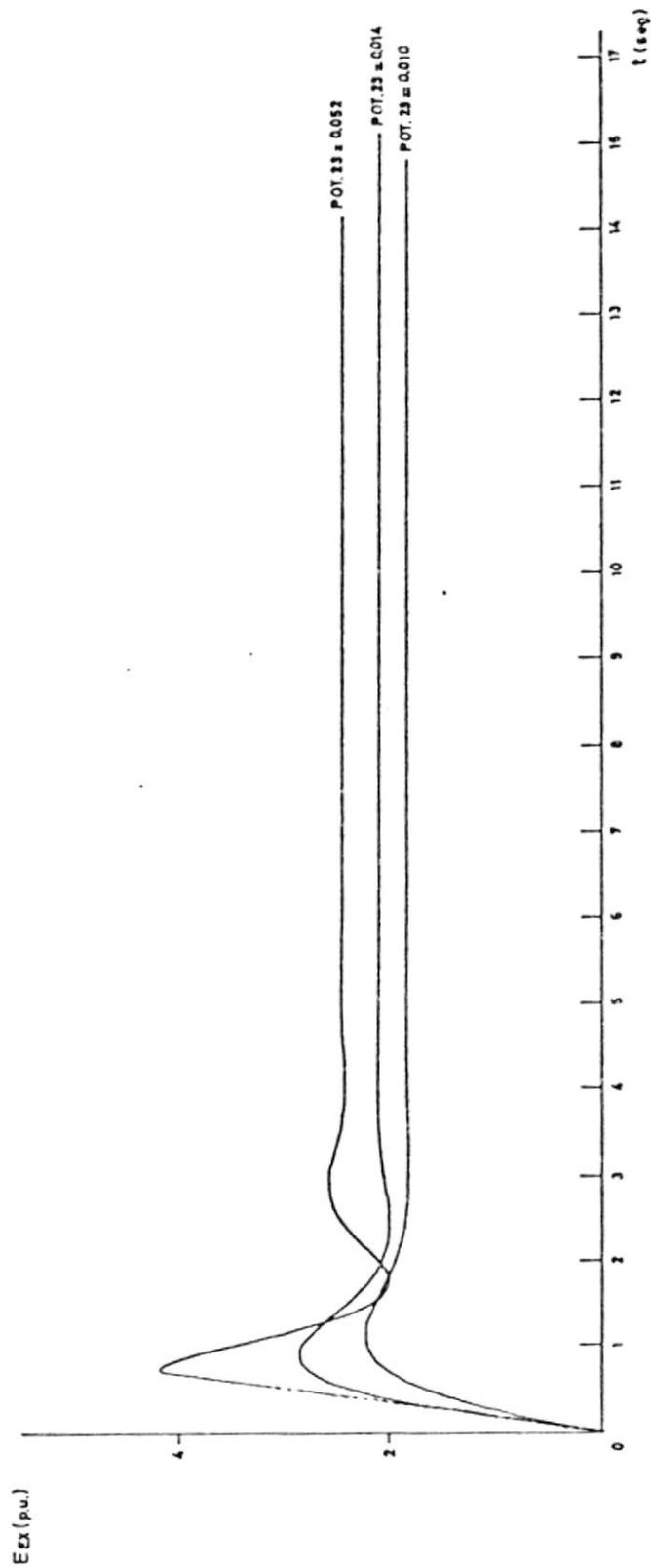


FIG. N.º 5-22 Efecto producido por la variación de la ganancia en el circuito limitador (potenciómetro 23)

REGULADOR DE VOLTAJE SILVERSTAT

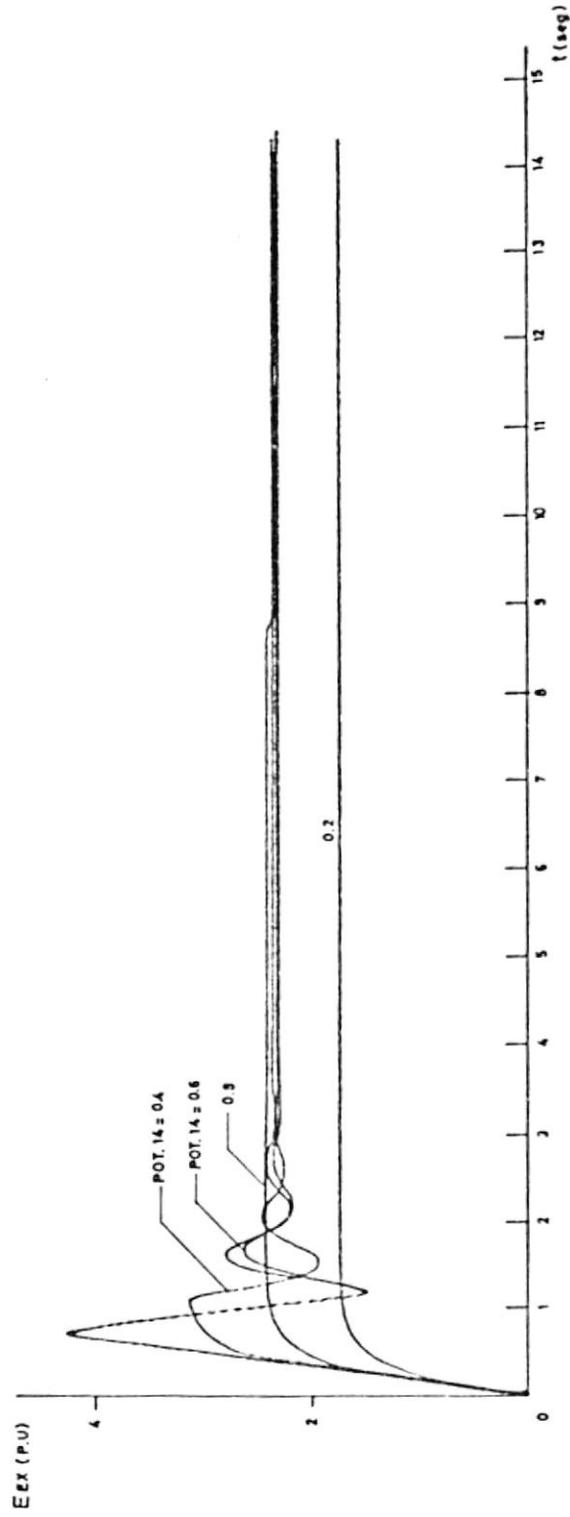


FIG. N.º 5-23 Efecto producido por la variación de V_{LMAX} en el circuito limitador (potenciometro 14)

REGULADOR DE VOLTAJE SILVERSTAT

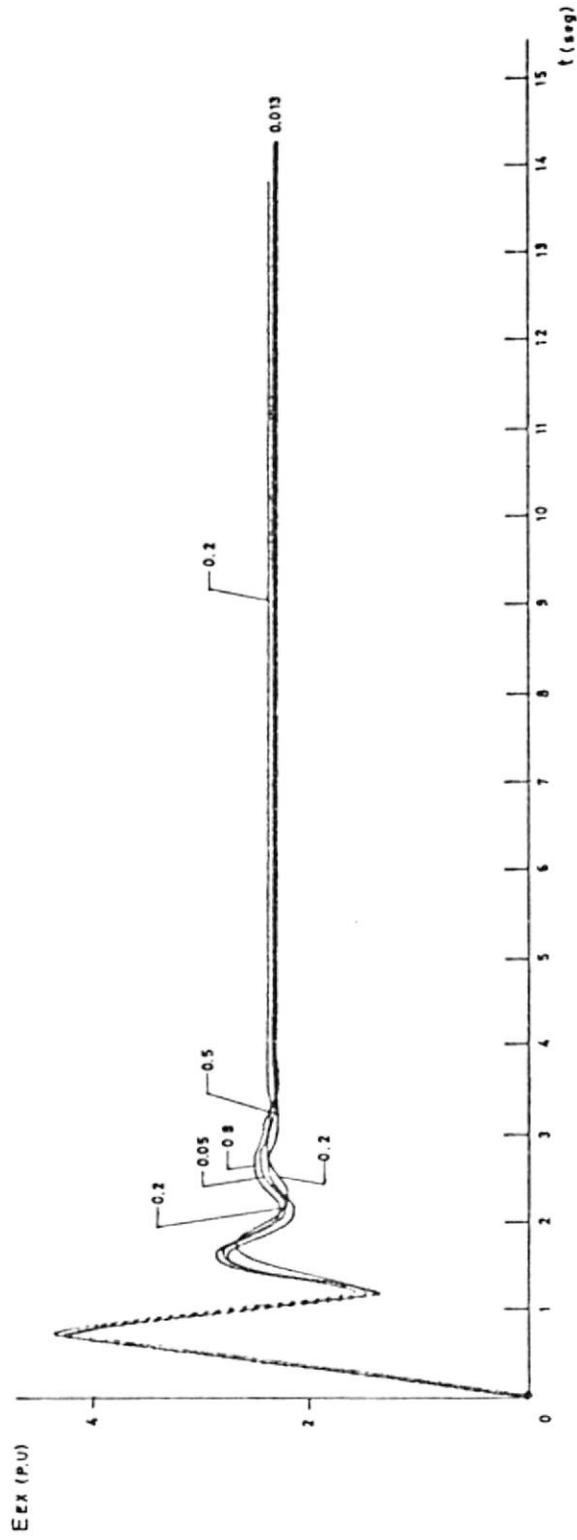


FIG. No 5-24. Efecto producido por la variación de la ganancia en el circuito limitador (potenciometro 23)

REGULADOR DE VOLTAJE SILVERSTAT

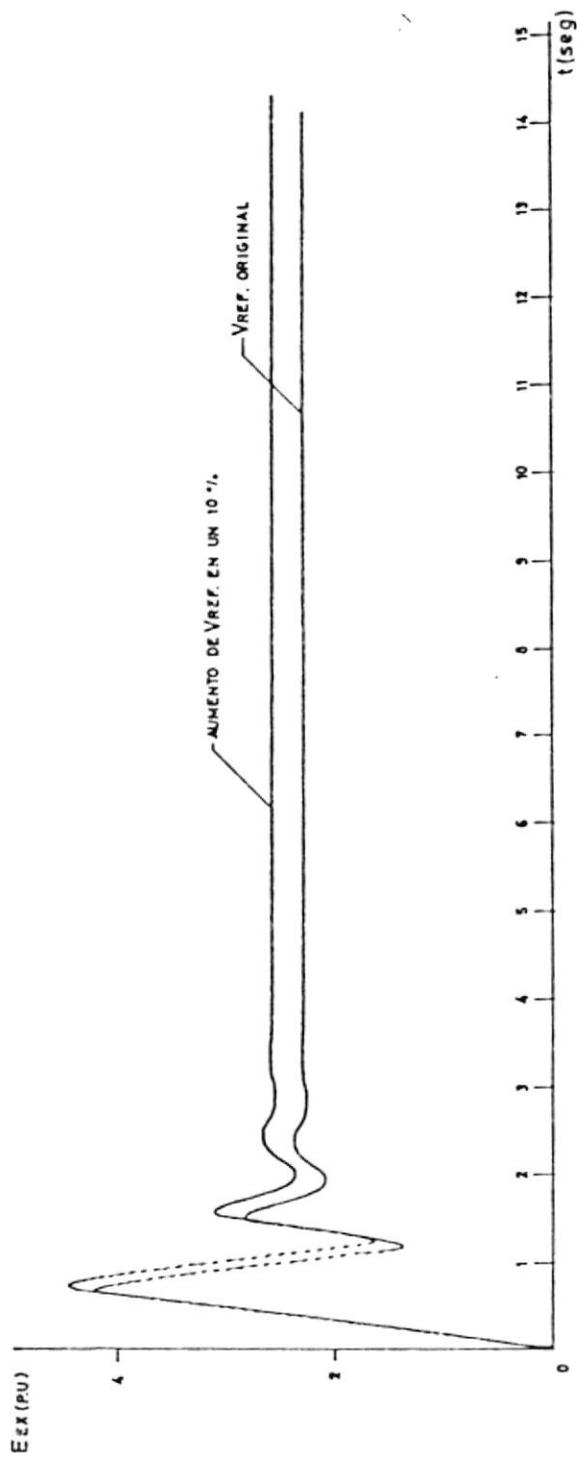


FIG. N.º 5-25 Efecto producido en E_{exc} por un incremento del 10% en el voltaje de referencia (variación del pot. is)

CAPITULO 6

ANALISIS DE LOS RESULTADOS

El comportamiento dinámico de un sistema se lo puede analizar ya sea bajo la acción de señales grandes o señales pequeñas.

a. CRITERIOS DE COMPORTAMIENTO BAJO LA ACCION DE SEÑALES GRANDES

El comportamiento bajo la acción de señales grandes involucra apreciables cambios en las variables del sistema de control. La magnitud de estos cambios es tan grande que no pueden despreciarse las no linealidades para poder obtener resultados correctos.

El propósito del criterio de comportamiento de señales grandes es proporcionar un medio para evaluar el comportamiento en los sistemas de excitación sometidos a cambios bruscos que incluyen altos y bajos voltajes del estator del generador y elevadas corrientes inducidas del campo del generador, así como transientes que involucran alteraciones en la estabilidad del sistema.

Para comprobar la utilidad del sistema de excitación para mejorar el comportamiento del generador, el criterio debe reflejar los efectos de operación bajo disturbios -

de sistemas de potencia que sean realistas. Los efectos más importantes son carga y regulación.

Los criterios que reflejan con gran exactitud el comportamiento de los sistemas de excitación bajo la acción de señales grandes son los de respuesta de tiempo.

b. COMPORTAMIENTO BAJO LA ACCION DE SEÑALES PEQUEÑAS

El comportamiento de un sistema de excitación, sistema de control de excitación o ya sea un elemento de un sistema de excitación bajo la acción de señales pequeñas es la respuesta a señales que son tan pequeñas que las no-linealidades pueden ser despreciadas y la operación del sistema se la asume.

Este comportamiento puede ser descrito en términos de los parámetros de tiempo real (respuesta transiente) o en términos de respuesta de frecuencia (ganancia, ángulos de fase y frecuencia).

Estos criterios de disturbios de señales pequeñas son útiles para evaluar la respuesta de los sistemas de excitación para cambios incrementados de voltaje, carga y velocidad del rotor del generador asociados con los pasos iniciales de la inestabilidad dinámica (donde las oscilaciones son tan pequeñas que no se alcanzan los límites de saturación). Al asumir la linealidad del sistema se limita la utilidad de es

te criterio.

La medida de mayor interés es la característica tiempo-vol-
taje de la excitatriz, es decir la respuesta transiente en
tiempo real de como responde el sistema a un disturbio.

En la figura N° 6-1 se observa una curva típica que es la
respuesta a un escalón en el voltaje terminal de la excita-
triz con una ecuación de segundo orden y en la figura N° 6-2
la respuesta de voltaje transiente de un generador.

Las medidas típicas para análisis del comportamiento de una
función en el dominio del tiempo son:

ALCANCE MAXIMO (A.M.).- Es la magnitud que la respuesta ex-
cede el valor de estado estable. Normalmente este valor se
da en porcentaje (A.M. en la figura N° 6-1).

TIEMPO DE ALZADO (t.a.).- Es el tiempo requerido para que el
voltaje de la excitatriz suba del 10% al 90% del valor de
estado estable.

TIEMPO DE REPOSO (t.r.).- Es el tiempo requerido para que -
la respuesta [EX] a un voltaje escalon permanezca dentro
de un cierto porcentaje de su valor final.

En el presente análisis consideramos el tiempo de reposo has-
ta que el voltaje de la excitatriz este completamente estable.

TIEMPO DE PICO (t.p.).- Es el tiempo requerido para que la excitatriz alcance su valor máximo de voltaje; y

ERROR DE ESTADO ESTABLE.- Es la diferencia que existe entre el valor nominal y el de la transiente una vez que se ha estabilizado la señal. Cabe anotar que en este trabajo las respuestas coinciden con el valor nominal una vez que se establezca la señal, siendo por lo tanto el error de estable despreciable.

De las figuras N° 6-3 y 6-4 se obtienen los valores definidos anteriormente y que se tabulan a continuación (Tabla N° 6-1).

	REGULADOR DE VOLTAJE	
	Regulador con Amplidina	Silverstat
Porcentaje de alcance Máximo (% A.M.)	69 %	79 %
Tiempo de alzado (t.a.)	0.6 seg.	0.63 seg.
Tiempo de pico (t.p.)	1.40 seg.	1.45 seg.
Tiempo de reposo (t.r.)	7.1 seg.	8.0 seg.

TABLA N° 6-1. VALORES DE COMPARACION EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

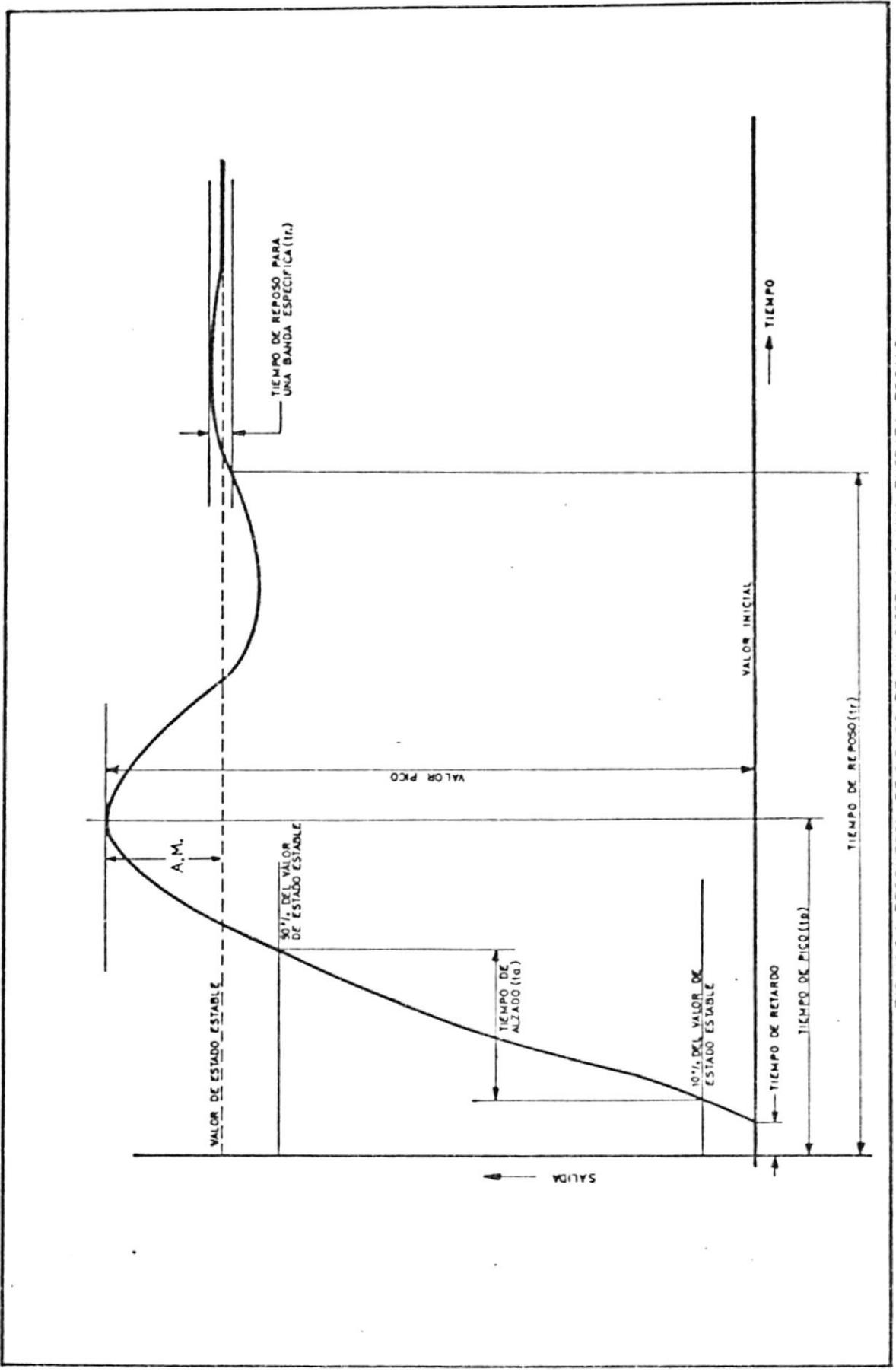
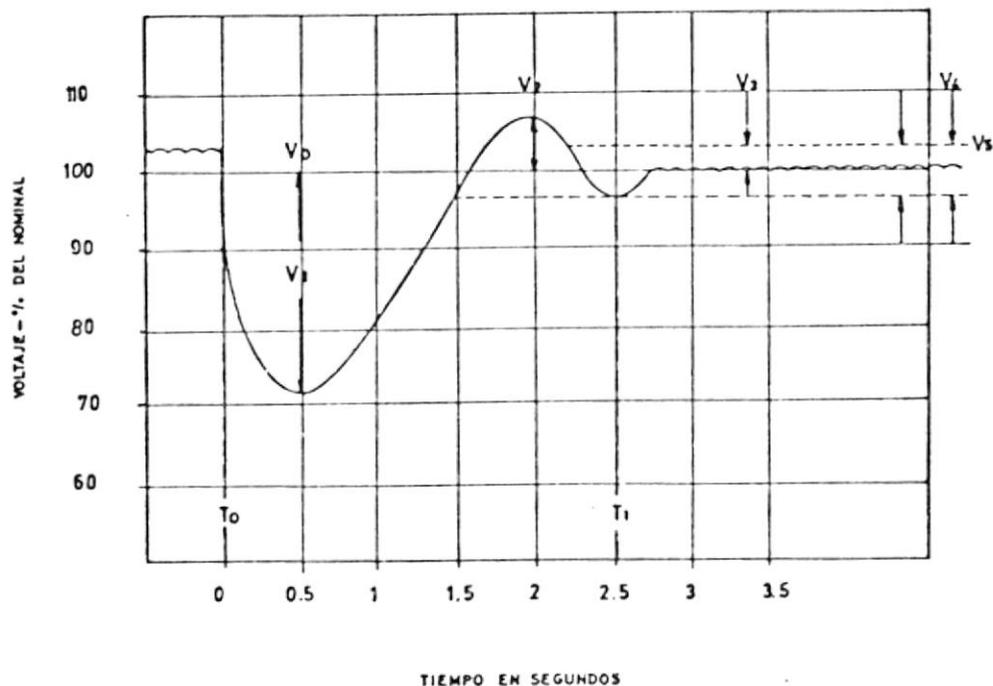


FIG. N.º 6-1 RESPUESTA DE TIEMPO DE UN SISTEMA A UNA ENTRADA ESCALON



V_0 = Voltaje de salida en vacío

V_1 = Transiente de voltaje máxima

V_2 = Porcentaje de alcance máximo de la máxima transiente de voltaje

V_3 = Regulación de estado estado estable (%)

V_4 = Rango de estabilidad de carga constante en estado estado estable

V_5 = Voltaje de salida a plena carga (nominal)

T_0 = Tiempo al cual la carga es aplicada

T_1 = Tiempo de reposición

FIG. N.º 6-2 RESPUESTA DE VOLTAJE TRANSIENTE (salida del generador) VS. TIEMPO AL APLICAR CARGA CON ACCION DE REGULACION

REGULADOR DE VOLTAJE CON AMPLIDINA

tiempo de alzado = t_a
 tiempo de pico = t_p
 tiempo de reposo = t_r

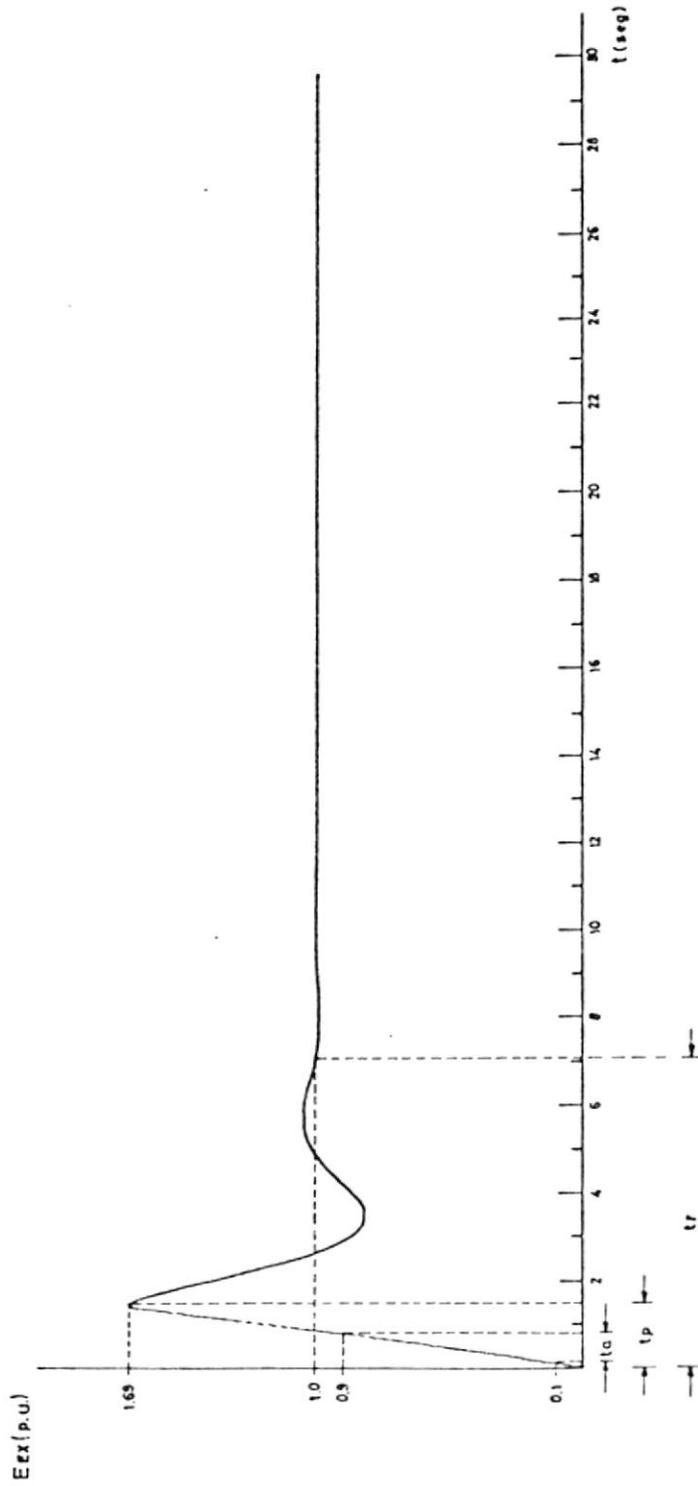


FIG. N.º 6-3 Analisis del comportamiento de la excitatriz en el dominio del tiempo en condiciones normales
 NOTA: solo para efecto del presente analisis se considera 1 pu. al voltaje nominal de la excitatriz

REGULADOR DE VOLTAJE SILVERSTAT

tiempo de alzado = t_a
 tiempo de piso = t_p
 tiempo de reposo = t_r

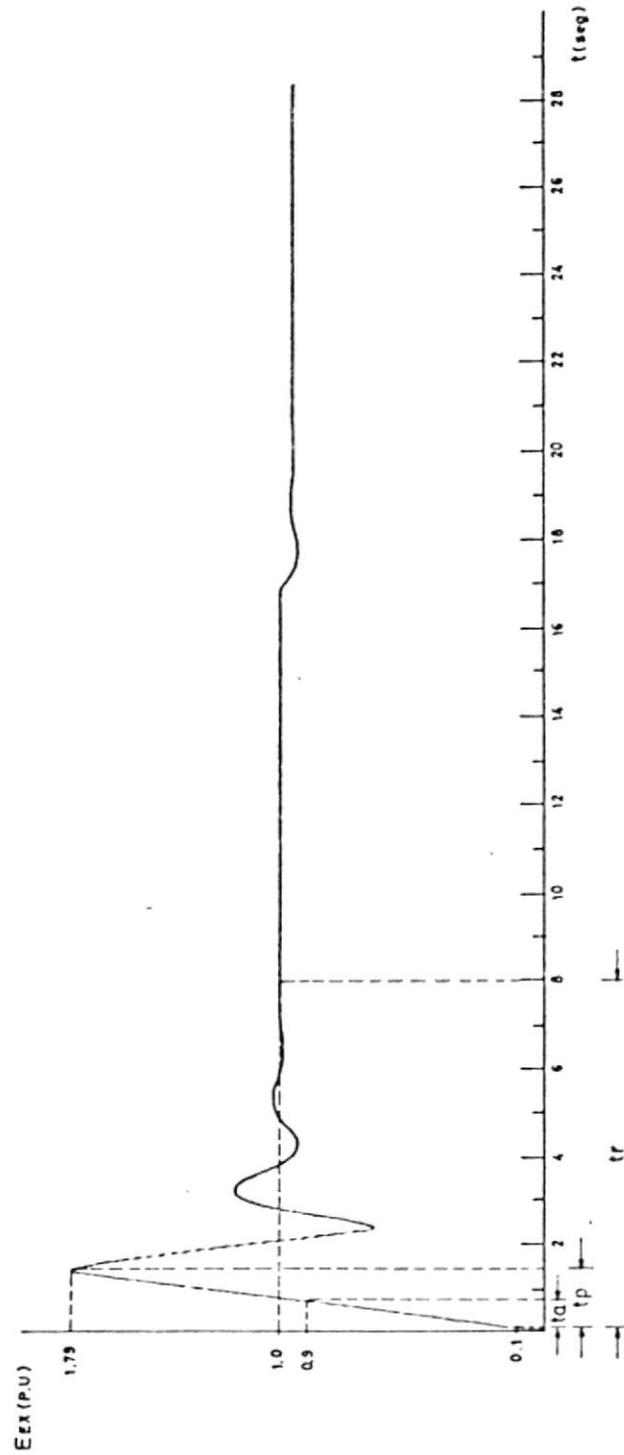


FIG. N.º 6-4. Analisis del comportamiento de la excitatriz en el dominio del tiempo en condiciones normales
 NOTA: solo para efecto del presente analisis se considera 1 p.u. al voltaje nominal de la excitatriz

Al analizar la tabla N° 6-1 se nota que el sistema de excitación utilizando en el campo de la excitatriz la amplidina en el momento transiente tiene un sobrealcance menor que cuando se emplea el regulador de voltaje Silverstat (porcentaje A.M. = 79%), de igual manera la señal se estabiliza en un tiempo menor (7.1 seg.) utilizando la amplidina que el Silverstat (8.0 seg.). El valor de pico del voltaje de salida de la excitatriz puede ser controlado dentro de un cierto rango modificando el ajuste de valor de voltaje máximo (limitador) así como se verá más adelante, escogiendo los valores más convenientes de K_F y T_F los cuales influenciaron también en el tiempo de reposo.

Los sistemas de excitación originales carecían de lazo de compensación (realimentación derivativa) que es el utilizado actualmente en los sistemas de excitación como circuito estabilizador.

Las constantes de tiempo tanto del regulador como del amplificador originan raíces en el plano real, raíces que desaparecen rápidamente y en determinado momento pueden volverse sobreamortiguados cuando no se utiliza el circuito de estabilización. Al utilizarse este último, (compensación), las raíces mejoran su trayectoria a una forma más favorable en las cercanías del eje $j\omega$.

La ausencia o la presencia del lazo de estabilización así como la variación de la constante de tiempo T_F o de la ganancia K_F influyen determinantemente en la respuesta del sistema.

Revisando las figuras N° 6-5 y 6-6 se observa la variación que se produce en el voltaje terminal de la excitatriz (E_{EX}) y en el del generador al eliminar el lazo de estabilización (en el programa analógico se desconecta la entrada al potenciómetro 26). La señal se hace más oscilatoria y aumenta el porcentaje de alcance máximo, pero transcurrido un cierto tiempo vuelve el voltaje a estabilizarse en su valor nominal. Esto es en lo que respecta al sistema de control de excitación con regulador de voltaje con amplidina. Al revisar la respuesta de la excitatriz y del generador utilizando regulador de voltaje Silverstat (Figura N° 6-7 y 6-8), cuando se desconecta el circuito estabilizador la señal se hace completamente oscilatoria sin llegarse a estabilizar en ningún momento, siendo este uno de los efectos más peligrosos que puede producirse en un sistema de excitación.

En el momento que se suprime el lazo estabilizador, se produce el estado más crítico en el comportamiento de la excitatriz y del sistema de control en general.

REGULADOR DE VOLTAJE CON AMPLIDINA

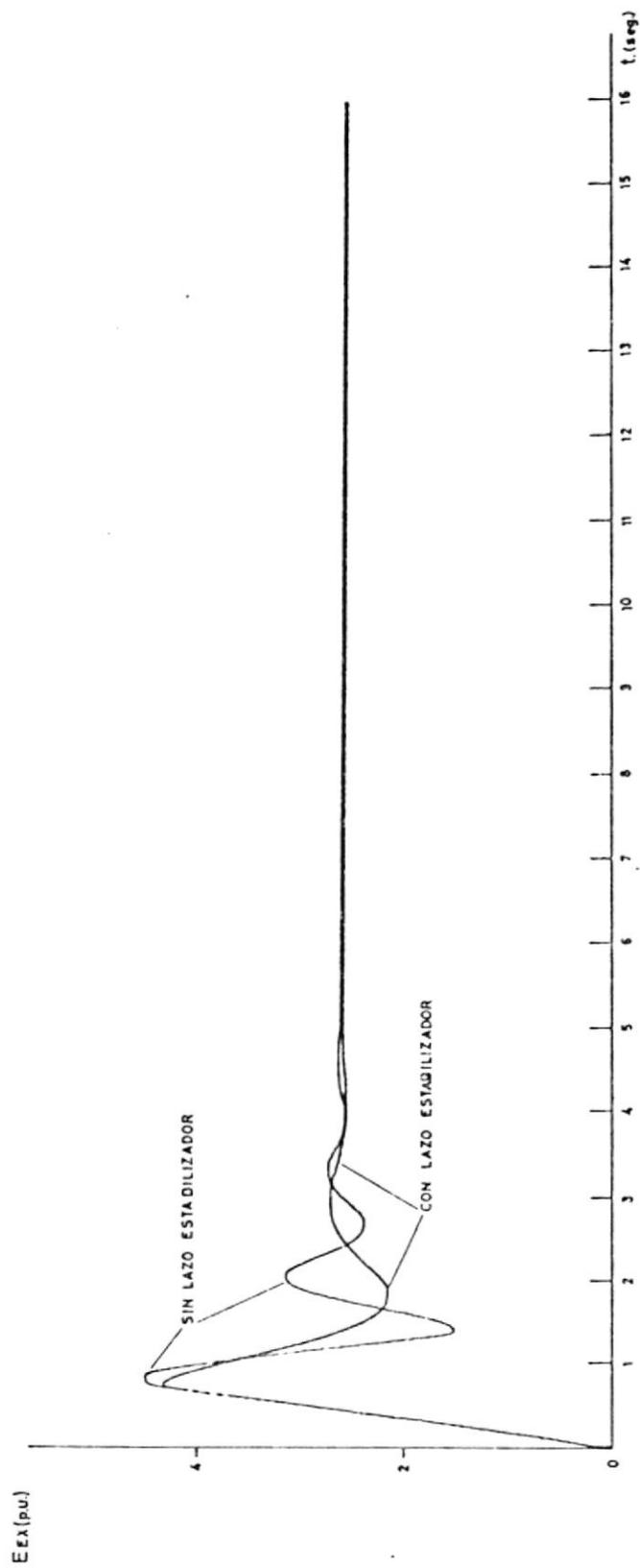


FIG. N.º 6-5 Efecto producido por el circuito de estabilizacion en el voltaje terminal de la excitatriz

REGULADOR DE VOLTAJE CON AMPLIDINA

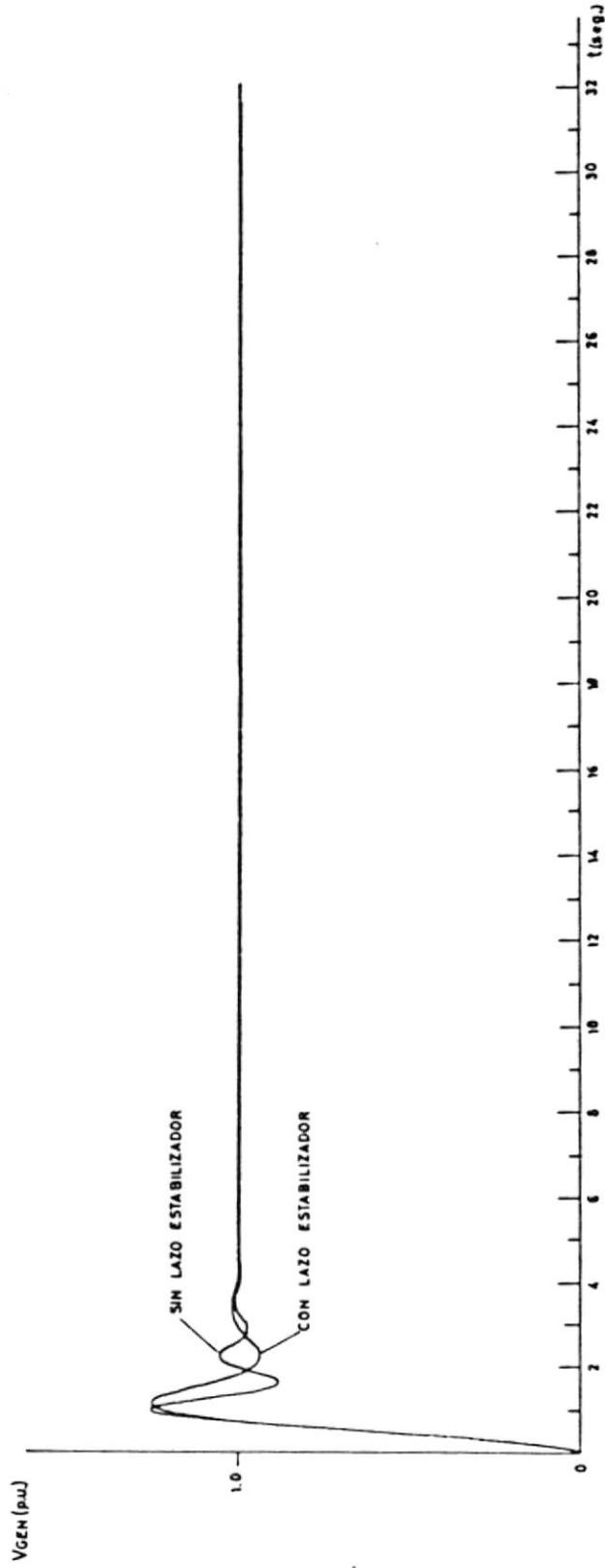


FIG. N.º 6-6 Efecto producido por el circuito de estabilizacion en el voltaje terminal del generador

REGULADOR DE VOLTAJE SILVERSTAT

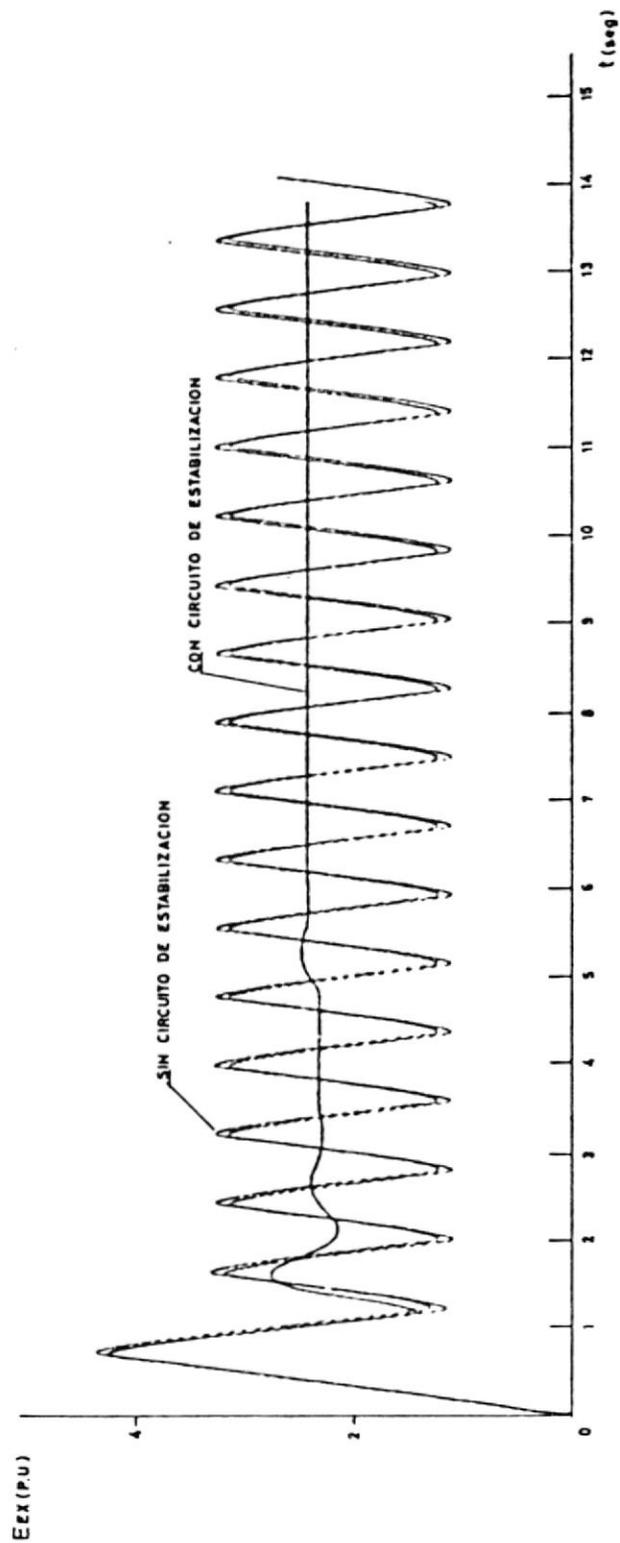


FIG. N.º 6-7 Efecto producido por el circuito de estabilizacion en el voltaje terminal de la excitatriz

REGULADOR DE VOLTAJE SILVERSTAT

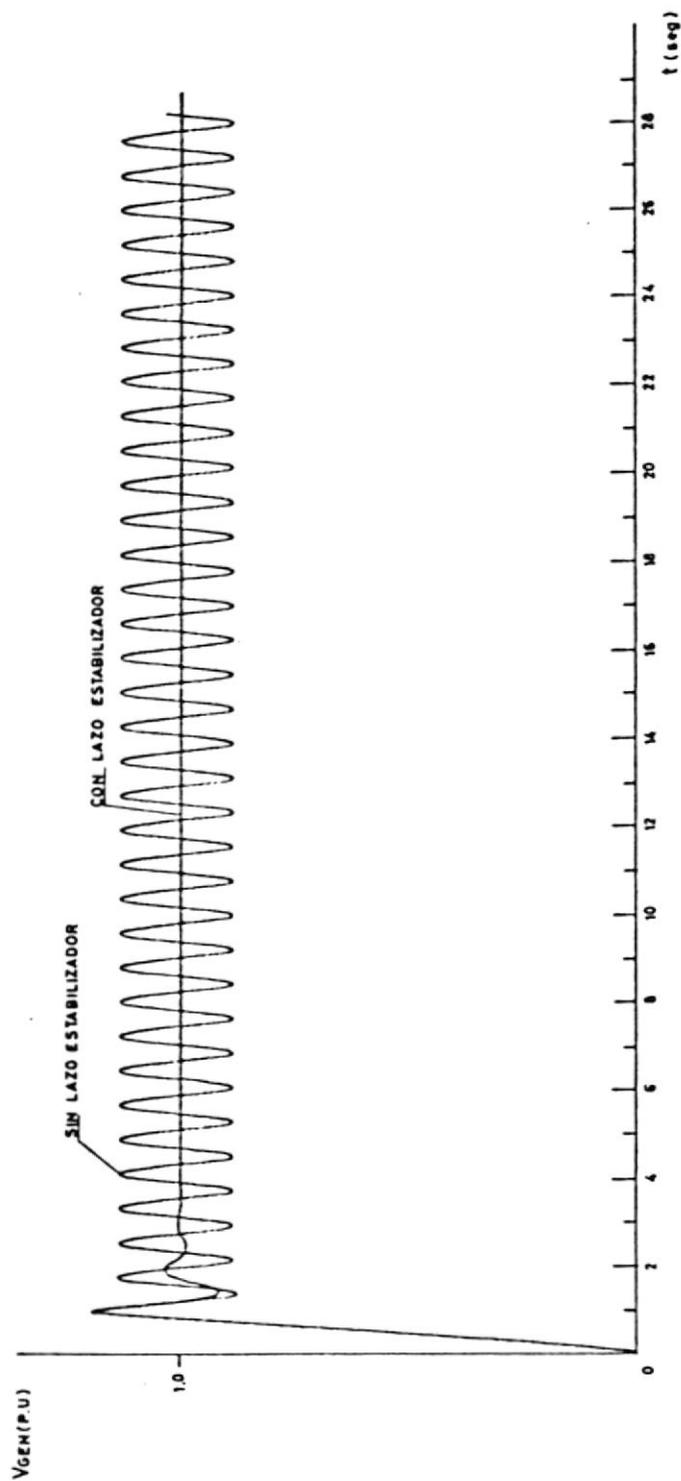


FIG. N° 6-8 Efecto producido por el circuito de estabilizacion en el voltaje terminal del generador

Se procede a continuación a analizar el efecto de la variación de los valores de K_F y T_F en la respuesta de voltaje de la excitatriz. Para el caso, se calculan los potenciómetros 31 y 32 para diferentes valores de K_F y T_F tanto para la amplidina como para el Silverstat. Los valores se encuentran en las tablas N° 6-2 y 6-3 para la amplidina y 6-4 y 6-5 para el Silverstat.

Los resultados del programa analógico para estas variaciones se encuentran en las figuras N° 6-9, 6-10, 6-11 y 6-12. Para todos los casos se utilizaron los valores originales de los potenciómetros, variándose solamente el 31 y 32 que incluyen en su constante los valores de T_F y K_F .

Se observa que hay una gran variedad de parámetros que pueden escogerse, sin embargo para el comportamiento efectivo deben utilizarse los mejores de K_F y T_F en conjunto, es decir que no se los puede escoger aisladamente.

El efecto mas obvio que se obtiene al reducir K_F es el decremento del tiempo de reposo y al incrementar T_F , se reduce el porcentaje de alcance máximo.

Las respuestas en los cuales no se produce la elevación normal de voltaje significa que existe saturación y son valores no válidos para la simulación. Ejemplo $K_F = 0.3$ en la fig. N° 6-9.

T_F		POTENCIOMETRO 32				POTENCIOMETRO 31			
		VALOR	CONSTANTE	GANANCIA	α	VALOR	CONSTANTE	GANANCIA	α
1	0.1	10	0.1	10	$\frac{1}{10}$	3.1242	0.312	10	-
2	0.35	2.8571	0.286	1	$\frac{1}{10}$	0.8926	0.9	1	-
3	0.5	2.0	0.2	1	$\frac{1}{10}$	0.6248	0.6248	1	-
4	0.6	1.66	0.166	1	$\frac{1}{10}$	0.5207	0.521	1	-
5	0.7	1.4286	0.143	1	$\frac{1}{10}$	0.4463	0.446	1	-
6	0.8	1.25	0.125	1	$\frac{1}{10}$	0.39	0.39	1	-
7	0.9	1.11	0.111	1	$\frac{1}{10}$	0.3471	0.347	1	-
8	1.0	1.0	0.1	1	$\frac{1}{10}$	0.3124	0.312	1	-
9	1.4	0.7143	0.071	1	$\frac{1}{10}$	0.2232	0.223	1	-
10	1.8	0.5556	0.056	1	$\frac{1}{10}$	0.1736	0.174	1	-

TABLA N° 6-2.- CALCULO DEL VALOR DE LOS POTENCIOMETROS 31 y 32 PARA DIVERSOS VALORES DE T_F (K_F = Constante) (Amplidina).

K _F		POTENCIOMETRO 31		
		VALOR	CONSTANTE	GANANCIA
1	0.02	0.17	0.17	1
2	0.04	0.34	0.34	1
3	0.06	0.5101	0.5101	1
4	0.08	0.6801	0.6801	1
5	0.1	0.8501	0.8501	1
6	0.105	0.8926	0.8926	1
7	0.3	0.25503	0.2550	10
8	0.5	4.2506	0.425	10
9	0.7	5.9508	0.595	10
10	1.0	8.5011	0.85	10

TABLA N° 6-3.- CALCULO DEL VALOR DEL POTENCIOMETRO 31 PARA DIVERSOS VALORES DE K_F (T_F = Constante) (Amplidina).

REGULADOR DE VOLTAJE CON AMPLIDINA

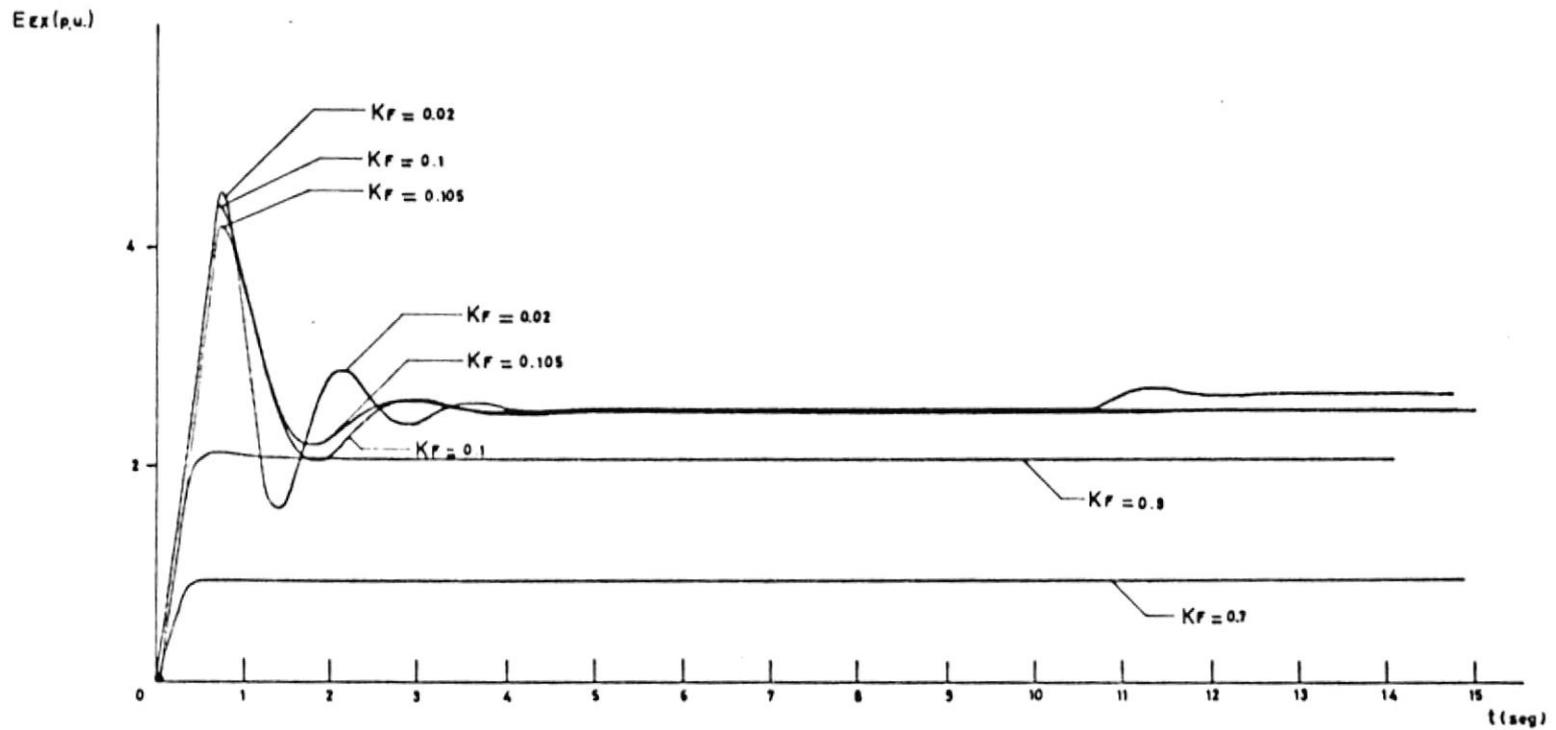


FIG. N.º 6-9 Efecto producido por la variación de K_F en el voltaje terminal ($T_F = \text{constante}$)

REGULADOR DE VOLTAJE CON AMPLIDINA

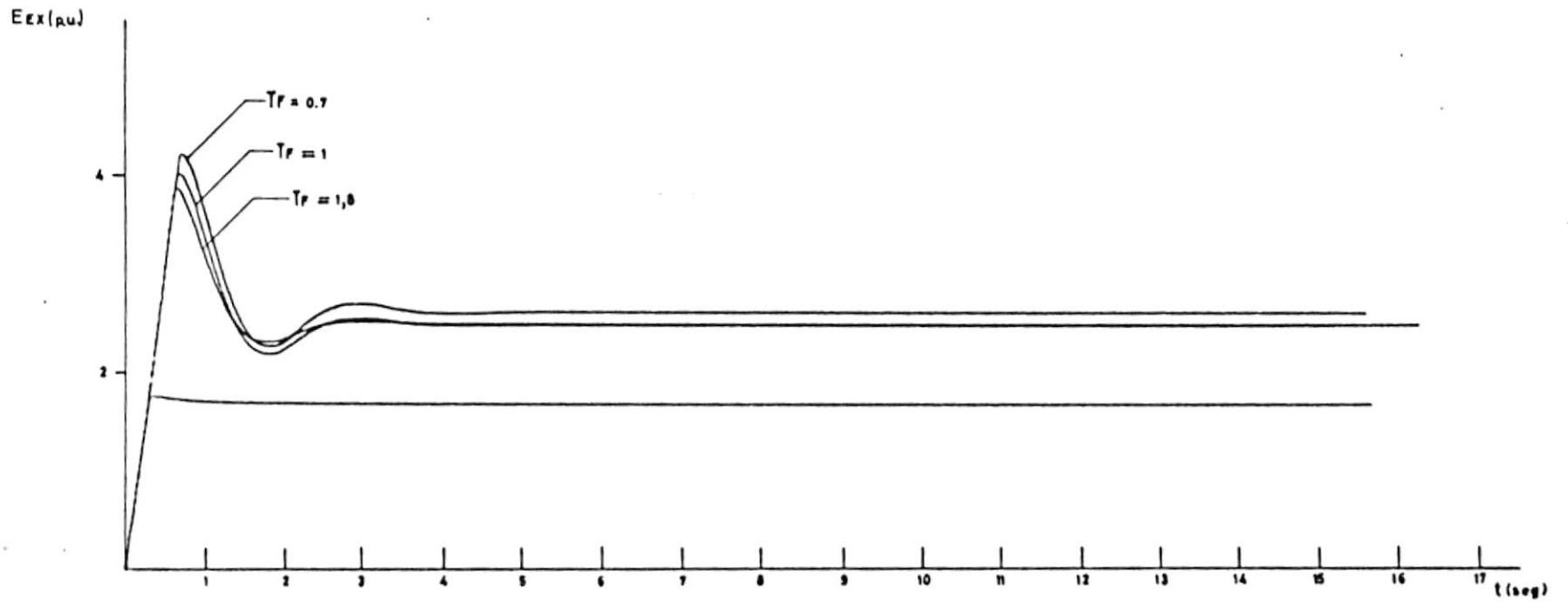


FIG. N°6-10 Efecto producido por la variacion de T_F en el voltaje terminal ($K_F = \text{constante}$)

T_F	POTENCIOMETRO 32				POTENCIOMETRO 31			
	VALOR	CONSTANTE	GANANCIA	α	VALOR	CONSTANTE	GANANCIA	α
1	16.67	-	-	-	3.3735	0.037	10	-
2	10	0.1	10	$\frac{1}{10}$	2.024	0.202	10	-
3	3.33	0.333	1	$\frac{1}{10}$	0.6747	0.675	1	-
4	2.857	0.786	1	$\frac{1}{10}$	0.5783	0.578	1	-
5	2.5	0.25	1	$\frac{1}{10}$	0.503	0.506	1	-
6	1.667	0.167	1	$\frac{1}{10}$	0.3374	0.337	1	-
7	1.25	0.125	1	$\frac{1}{10}$	0.253	0.253	1	-
8	1.0	0.1	1	$\frac{1}{10}$	0.2024	0.202	1	-
9	0.833	0.083	1	$\frac{1}{10}$	0.1687	0.169	1	-
10	0.667	0.067	1	$\frac{1}{10}$	0.1349	0.135	1	-

TABLA N° 6-4.- CALCULO DEL VALOR DE LOS POTENCIOMETROS 32 y 31 PARA DIVERSOS VALORES DE T_F (K_F = Constante) (Silverstat).

POTENCIOMETRO 31			
K _F	VALOR	CONSTANTE	GANANCIA
1	0.12	0.12	1
2	0.24	0.24	1
3	0.36	0.36	1
4	0.48	0.48	1
5	0.6	0.6	1
6	0.63	0.63	1
7	1.8	0.18	10
8	3.0	0.3	10
9	4.2	0.42	10
10	6.0	0.6	10

TABLA N° 6-5.- CALCULO DEL VALOR DEL POTENCIOMETRO 31 PARA DIVERSOS VALORES DE K_F (T_F = Constante) (Silverstat).

REGULADOR DE VOLTAJE SILVERSTAT

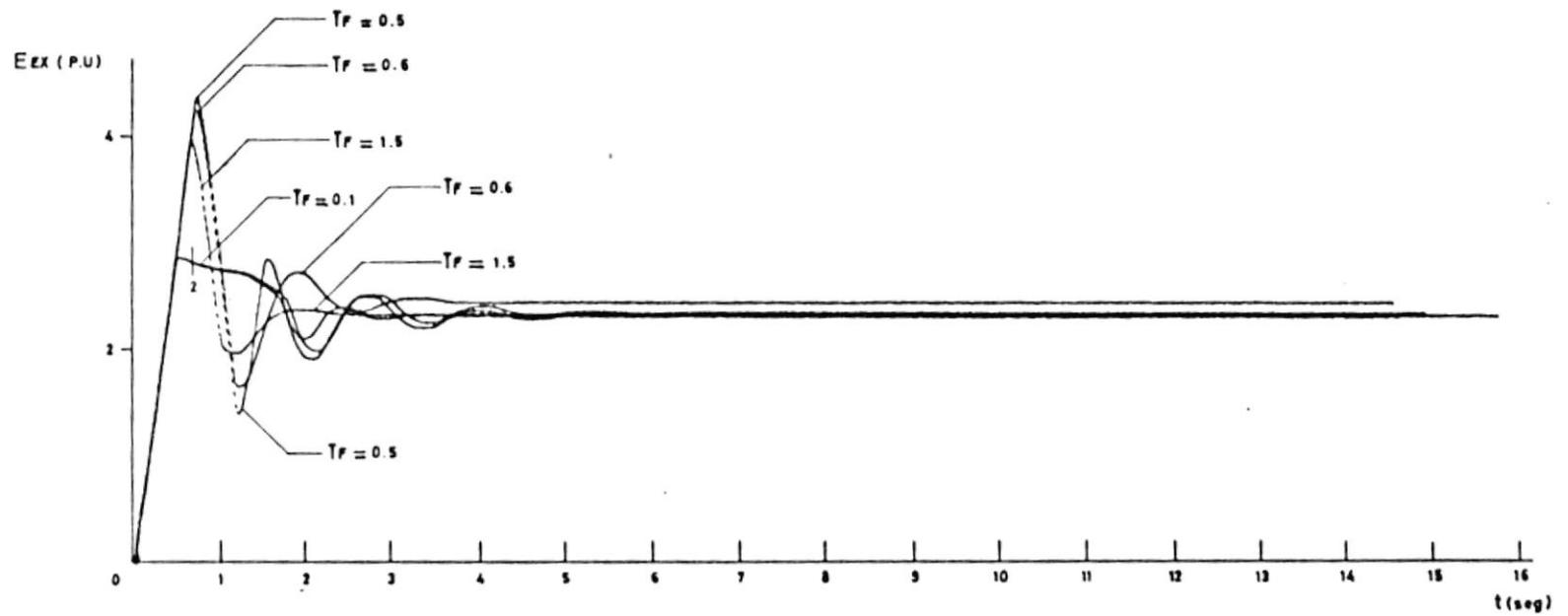


FIG. N° 6-11 Efecto producido por la variacion de TF en el voltaje terminal (KF= constante)

REGULADOR DE VOLTAJE SILVERSTAT

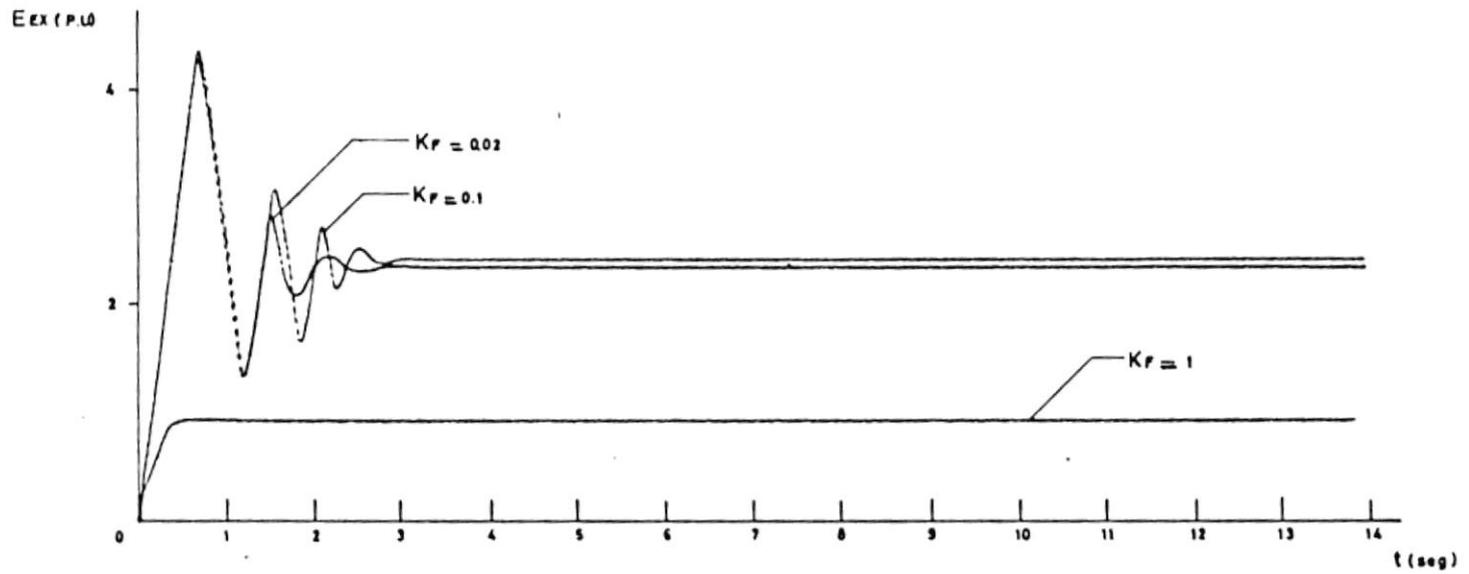


FIG. N° 6-12 Efecto producido por la variación de K_F en el voltaje terminal ($T_F = \text{constante}$)

CAPITULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los reguladores automáticos de voltaje son una parte esencial en la operación de los sistemas de potencia eléctricos y en cualquier sistema de control de excitación constituyen la médula del sistema alrededor de los cuales opera el equipo restante.

Las funciones primordiales del regulador automático de voltaje (R.A.V.) son:

1. Mantener el voltaje generado constante.
2. Compensación para la reactancia de caída del transformador para máquinas operando en paralelo.
3. Elevar el límite de estabilidad transiente del sistema, incrementando potencia de excitación posterior a una falla en el sistema; y
4. Modificación artificial de las características de la máquina bajo condiciones de estado estable, de modo que la operación bajo excitada en la región dinámica sea posible.

Para poder satisfacer todos estos requerimientos, son necesarios los reguladores de voltaje de acción continua, sin banda muerta.

Cuando se utiliza sistema de diodos, el regulador automáti-

co de voltaje actúa sobre el campo de la excitatriz y al utilizar sistema de tiristores, el regulador automático de voltaje actúa sobre el circuito de disparo de los tiristores.

OPERACION DEL REGULADOR AUTOMATICO DE VOLTAJE

Las condiciones del generador, todas las cuales requieren consideración y poseen parámetros muy diferentes son:

1. Sin carga, con el disyuntor principal del generador abierto.
2. Sin carga, con el generador sincronizado
3. Sin carga después de un rechazo de carga.
4. Diversas cargas, sobreexcitado
5. Diversas cargas, bajo excitado
6. Condiciones de falla durante la operación de carga.

Todos los diversos casos deben ser satisfechos con una buena respuesta para control de voltaje y de potencia reactiva bajo condiciones de carga.

Las consideraciones acerca de la estabilidad en estado estable se refieren a la habilidad del generador de permanecer en sincronismo con el sistema.

La estabilidad transiente es la habilidad del sistema de

retornar a una condición estable luego de un disturbio transiente.

Otras funciones efectuadas por el sistema de control de excitación son:

- 1. Control de seguimiento manual, que ocasiona un mínimo cambio en la excitación si se produce disparo del control automático.

- 2. Límite de corriente del campo de la excitatriz el cual elige el máximo valor de corriente permitida en el campo de la excitatriz.

- 3. Límite de voltio-ampereos reactivos en la zona bajo excitada. Se opone al control de voltaje si el generador trabaja de operar en la zona inestable del diagrama P-Q; y

- 4. Estabilización del sistema de potencia, por medio de un elemento que opera en el sistema al cual el generador está conectado actuando en la excitación del generador para variar su ángulo de torque.

Las funciones indicadas aquí no son sino un pequeño grupo de la variedad de circuitos que se adicionan a un sistema de control de excitación de acuerdo a los requerimientos necesarios.

En el presente trabajo es preciso recalcar que el sistema

considerado se adapte a las funciones definidas anteriormente y que el generador se lo analizó en su estado estable y se le adicionó una pequeña carga para observar su comportamiento en el dominio del tiempo.

Es decir, que este mismo sistema puede ser adaptado y tomado como base para analizar el comportamiento del sistema de control de excitación y en especial de los reguladores automáticos de voltaje variando las condiciones del generador. (Rechazo de carga, funcionamiento sobreexcitado, bajo excitado y en condiciones de falla).

Todo este análisis se lo podría efectuar en el dominio de la frecuencia y efectuar comparaciones de su estabilidad relativa.

Cabe añadir que el computador utilizado en la simulación es de muy poca capacidad motivo por el cual un análisis de estabilidad sería conveniente efectuarlo en un computador digital en donde será posible desarrollar estrictamente todas y cada una de las ecuaciones del generador de poder que en el presente trabajo ha sido linealizado para concentrar la atención en el sistema de excitación y el regulador de voltaje.

APENDICE A

NOMENCLATURA UTILIZADA

V_{Gen}	= Voltaje nominal del generador línea a neutro (Voltios, volts).
S_N	= Voltio-amperios de fase normales del estator (V.A.).
ω	= Velocidad nominal del generador (radianes eléctricos/segundo, rad/seg.).
I_N	= Corriente nominal del estator (amperios, amps)
t	= Tiempo (segundos, seg)
L	= Inductancia (henrios, H)
λ	= Enlace de flujo (weber-vueltas)
r	= Resistencia (ohmios)
L_m	= Inductancia de magnetización
l	= Inductancia de dispersión
L_d	= Inductancia en el eje directo (henrios, H)
l_d	= Inductancia de dispersión en el eje directo (henrios, H)
M_F	= Inductancia mutua (henrios, H)
i_F	= Corriente de campo a voltaje nominal, tomada de la curva del entrehierro de la característica - de saturación en vacío del generador (figura N° 4-3) (amperios, amps).
v_a	= Voltaje instantáneo de la fase a (voltios, volts)
I_F	= Corriente de campo (amperios, amps)
$r_F(25^\circ C)$	= Resistencia de campo a $25^\circ C$ (ohmios)

$r_F(125^\circ\text{C})$	= Resistencia de campo normalizada a 125°C [ohmios].
V_B	= Voltaje base del generador línea a neutro [voltios, volts]
ω_B	= Velocidad base del generador [radianes eléctricos/segundos. rad/seg.]
S_B	= Voltio-amperios base del estator (V.A.)
I_B	= Corriente base del generador (amperios, amps)
t_B	= tiempo base [seg.]
I_{FB}	= Corriente de campo base (amperios, amps)
V_{FB}	= Voltaje de campo base (voltios, volts)
R_{FB}	= Resistencia de campo base (ohmios)
E_{EX}	= Voltaje de salida de la excitatriz (aplicado al campo del generador) (Voltios, volts)
K_A	= Ganancia del regulador de voltaje
T_A	= Constante de tiempo del regulador de voltaje [segundos, seg.]
K_F	= Ganancia del circuito estabilizador del regulador de voltaje.
T_F	= Constante de tiempo del circuito estabilizador del regulador de voltaje [segundos, seg.]
S_E	= Función saturación de la excitatriz (Función de E_{EX}).
K_E	= Ganancia de la excitatriz
T_E	= Constante de tiempo de la excitatriz [segundos, seg.]
K_R	= Ganancia del sistema de filtrado

- T_R = Constante de tiempo del sistema de filtrado [segundos, seg.]
 V_R = Voltaje de salida del regulador de voltaje [voltios, volts]
 V_{Lmax} = Voltaje máximo del limitador [voltios, volts]
 $V_{Lmín}$ = Voltaje mínimo del limitador [voltios, volts]
 V_{REF} = Voltaje de referencia del regulador de voltaje [voltios, volts]
 V_{DC} = Voltaje de corriente directa a la salida del filtro [voltios, volts]
 V_e = Voltaje de error a la salida del comparador - [voltios, volts]
 V_A = Voltaje de salida del amplificador [voltios, volts]
 V_S = Voltaje de salida del circuito estabilizador del regulador de voltaje [voltios, volts]
 K_G = Ganancia del generador
 T_G = Constante de tiempo del generador [segundos, seg.]
 V_{DCmax} = Valor máximo de V_{DC} [voltios, volts]
 $V_{emáx}$ = Valor máximo de V_e [voltios, volts]
 V_{Amax} = Valor máximo de V_A [voltios, volts]
 V_{Smax} = Valor máximo de V_S [voltios, volts]
 V_{Genmax} = Valor máximo de V_{Gen} [voltios, volts]
 E_{EXmax} = Valor máximo de E_{EX} [voltios, volts]
 V_{Rmax} = Valor máximo de V_R [voltios, volts]
 $V_{R' max}$ = Valor máximo de $V_{R'}$ [voltios, volts]

V_{Rmin}	=	Valor mínimo de V_R (voltios, volts)
E_{EXB}	=	Voltaje base de la excitatriz (voltios, volts)
C.D.	=	Corriente directa
C.A.	=	Corriente alterna
F.P.	=	Factor de potencia
p.u.	=	por unidad
\dot{V}_{Gen}	=	Primera derivada de V_{Gen}
\dot{V}_{DC}	=	Primera derivada de V_{DC}
\dot{V}_A	=	Primera derivada de V_A
\dot{V}_R	=	Primera derivada de V_R
\dot{E}_{EX}	=	Primera derivada de E_{EX}
T.P.	=	Transformador de potencial
T.C.	=	Transformador de corriente

APENDICE B

Los circuitos acoplados electromagnéticamente como en los generadores de poder (rotor y estator), necesitan normalizar sus valores de voltios, amperios y tiempo, utilizando la misma base.

En los generadores síncronos, el valor de los voltios-amperios base se escoge de acuerdo al valor nominal del estator y la base de tiempo se fija de acuerdo a la frecuencia nominal.

Estos valores base deben ser los mismos para el rotor, sin embargo, es claro notar que los voltio-amperios base del campo del generador (rotor) serán mucho menores que los del estator. Así si para un mismo generador tomamos como valores base los del estator, lógicamente los valores en por unidad del rotor serán numéricamente muy pequeños. Este apéndice se lo aprovecha únicamente como formulario a partir del cual se obtendrán los valores de las constantes y parámetros a utilizarse en la simulación, exclusivamente en el potenciómetro 34.

$$1. \quad V_B = \frac{V_{Gen}}{\sqrt{3}}$$

$$2. \quad S_B = \frac{Mva \text{ nominales}}{3}$$

$$3. \tau_B = \frac{1}{\omega_B} = \frac{1}{\omega_R}$$

$$4. L_B = \frac{V_B}{\omega_B I_B}$$

$$5. I_{FB} = \frac{I_B}{K_F}$$

$$6. V_{FB} = \frac{S_B}{I_{FB}}$$

$$7. R_{FB} = \frac{V_{FB}}{I_{FB}}$$

$$8. L_{md} = L_d - \ell_d$$

$$9. v = i_F \omega_R M_F \sin \phi$$

$$10. \frac{K_{MF}}{L_{md}} = K_F$$

$$11. \alpha_F(125^\circ\text{C}) = \alpha_F(25^\circ\text{C}) \times \frac{(234.5 + 125)}{(234.5 + 25)}$$

APENDICE C

OPERACIONES DEL COMPUTADOR ANALOGICO

El elemento básico del computador analógico es el amplificador operacional cuyo funcionamiento equivale al de un amplificador de corriente continua de impedancia muy alta a la entrada y muy pequeña a la salida.



$$V_s = - A V_{en}$$

V_{en} = tensión de entrada

V_s = tensión de salida

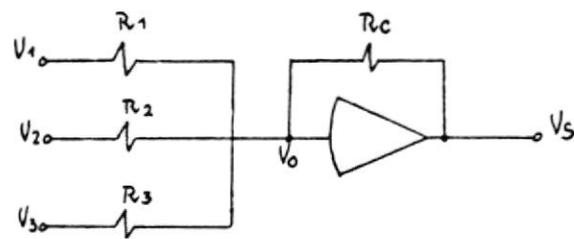
A = constante de amplificación

El amplificador operacional puede ser utilizado como sumador, inversor o integrador. La operación matemática depende exclusivamente del circuito utilizado con ayuda de resistencias y capacitores.

El amplificador operacional se caracteriza por invertir la señal de entrada y además tiene una ganancia muy alta de aproximadamente 10^7 .

SUMADOR

Se lo obtiene conectando en paralelo todos los valores que se desean sumar.



$$\frac{V_1 - V_0}{R_1} + \frac{V_2 - V_0}{R_2} + \frac{V_3 - V_0}{R_3} + \frac{V_s - V_0}{R_c} = 0$$

Como la impedancia de entrada es muy alta. $V_0 \approx 0$

$$\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} = - \frac{V_s}{R_c}$$

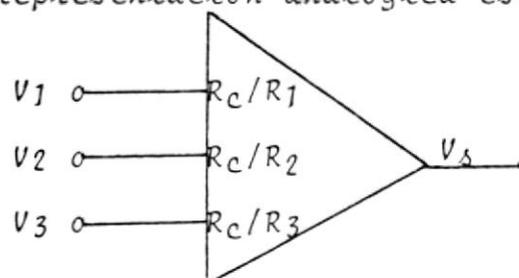
$$V_s = - \left[\frac{R_c}{R_1} (V_1) + \frac{R_c}{R_2} (V_2) + \frac{R_c}{R_3} (V_3) \right]$$

Si el valor de todas las resistencias es el mismo

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_c$$

$$V_s = - (V_1 + V_2 + V_3)$$

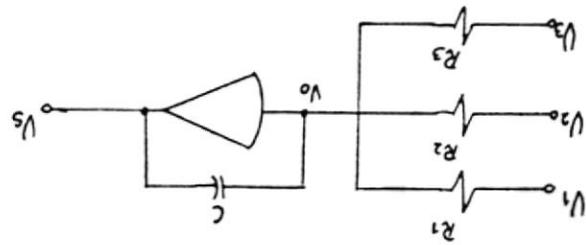
La representación analógica es:



MULTIPLICADOR.- Este es un caso particular del sumador, que se caracteriza por tener una sola entrada.

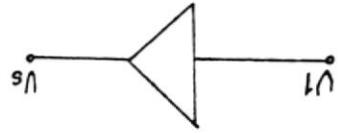
$$V_0 \approx 0$$

$$V_1 - V_0 \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_2}{V_2 - V_0} + \frac{R_3}{V_3 - V_0} + C \frac{d}{dt} (V_s - V_0) = 0$$



nal para amplificar.

INTEGRADOR. - Se reemplaza la resistencia \$R_c\$ por un capacitor y se obtiene el circuito del amplificador operacío



$$V_s = - V_1$$

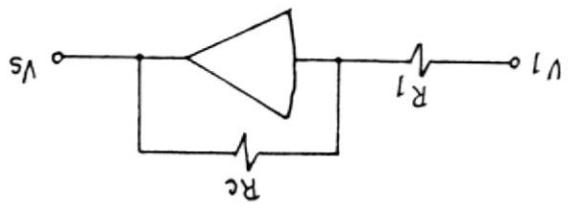
$$R_c = R_1$$

iguales

INVERSOR. - Es el mismo multiplicador con resistencias

$$V_s = - \left(\frac{R_c}{R_1} \right) V_1$$

$$\frac{V_1}{V_s} = - \frac{R_c}{R_1}$$



$$\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} + \frac{dV_s}{dt} = 0$$

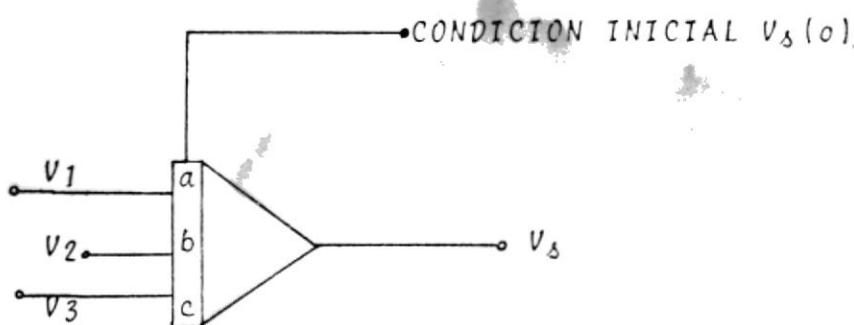
$$\frac{dV_s}{dt} = - \left(\frac{1}{R_1 C} V_1 + \frac{1}{R_2 C} V_2 + \frac{1}{R_3 C} V_3 \right)$$

$$\int_{V_s(0)}^{V_s(t)} dV_s = - \int_0^t \left(\frac{1}{R_1 C} V_1 + \frac{1}{R_2 C} V_2 + \frac{1}{R_3 C} V_3 \right) dt$$

$$V_s(t) = - \int_0^t \left(\frac{1}{R_1 C} V_1 + \frac{1}{R_2 C} V_2 + \frac{1}{R_3 C} V_3 \right) dt + V_s(0)$$

Es decir que el integrador que es el único elemento dinámico de la computadora también invierte la entrada.

La representación analógica es la siguiente:



donde:

$$a = \frac{1}{R_1 C}$$

$$b = \frac{1}{R_2 C}$$

$$c = \frac{1}{R_3 C}$$

BIBLIOGRAFIA

1. ANDERSON AND FOUAD. *Power system control and stability*, The Iowa State University Press, 1973.
2. BARKLE, J. *Excitation Systems. Electrical Transmission distribution*, Westinghouse Electric Corporation, 1964.
3. BROWN, BOVERI and COMPANY. *Instructions for erection and operation. Type AB voltage regulators A4861*.
4. BYERLY, R. KIMBARK, E. *Stability of large electric power systems. Paper 31 TP 67-424/1967 ("Power Generation Committee" - I.E.E.E)*
5. EBASCO INTERNATIONAL CORPORATION. *Project summary. Empresa Eléctrica del Ecuador. Estero Salado Steam electric Station 1968*.
6. ELECTRICAL MACHINERY. *Instruction manual 2500-INS-224 A. Brushless exciter for 2 pole generator*.
7. GENERAL ELECTRIC INSTRUCTIONS. *CR 7931-NA101 Voltage regulator equipment. GEI-31260C*.
8. GENERAL ELECTRIC INSTRUCTIONS. *Diactor voltaje regulators. Type GDA*.
9. GRIFFITH, M. *Modern A.C. Generator control systems: Some plain and Painless facts*, 1978.

10. IEE COMMITTEE REPORT. *Excitation system dynamic characteristic*. Paper T72 - 590-8, 1972.
11. KIMBARK, E. *Power system stability, Volume III, synchronous machines*, John Wiley & Sons, Inc. 1950.
12. RAVEN, F. *Ingeniería del control automático*, H.A.S.A., 1971.
13. SISKIND, CH. *Electrical control systems in industry*, McGraw Hill, Inc. 1963.
14. THE GENERAL ELECTRIC COMPANY UNITED. Vol 44 N° 1. London 1977.
15. WESTINGHOUSE. *Silverstat voltage regulators. Type SRA-1 to SRA-5*.



A.F. 142442