

TUES
1504
A284
1993
EJ22

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA



"DETERMINACION PRACTICA DE LOS PARAMETROS DE LOS CONTROLES DE
EXCITACION DE LOS GENERADORES SINCRONOS DE CENTRALES
GENERADORAS REPRESENTATIVAS DEL SISTEMA DE POTENCIA DE LA
COMISION EJECUTIVA HIDROELECTRICA DEL RIO LEMPA (C.E.L.)"

TRABAJO DE GRADUACION PRESENTADO POR:

LAURA IRIS AGUIRRE SILIEZAR
JAIME PASTOR BAIRES PEREZ



PARA OPTAR AL TITULO DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

15101085

AGOSTO DE 1993.

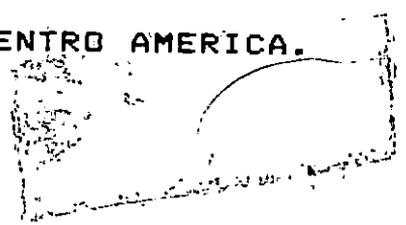
15101085

SAN SALVADOR

EL SALVADOR

CENTRO AMERICA.

Recibida: 17/09/93



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR



AUTORIDADES UNIVERSITARIAS:

RECTOR: DR. FABIO CASTILLO FIGUEROA.

SECRETARIA GENERAL: LIC. MIRNA ANTONIETA PERLA DE ANAYA.

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA:

DECANO: ING. JUAN JESUS SANCHEZ SALAZAR.

SECRETARIO: ING. JOSE RIGOBERTO MURILLO CAMPOS.

ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA.

DIRECTOR: ING. RICARDO ERNESTO CORTEZ.



ACTA DE CONSTANCIA DE NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha, 20 de Agosto de 1993, en el local de Sala de Lectura de la Escuela de Ingeniería Eléctrica a las 10:00 horas, con la presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

- 1- Ing. Ricardo E. Cortez
Director de la E.I.E.
- 2- Ing. Jorge A. Galdámez
Secretario de la E.I.E.
- 3- _____

[Handwritten signature]
[Handwritten signature]



Y con el Honorable Jurado de evaluación integrado por las personas siguientes:

- 1- Ing. Pedro Salvador Alfaro Contreras *[Signature]*
- 2- Ing. Carlos Sandoval *[Signature]*
- 3- Ing. Sergio Adrián Martín *[Signature]*
- 4- Ing. Luis Enrique González *[Signature]*
- 5- Ing. William Alguera *[Signature]*
- 6- Ing. Mauricio Palacios *[Signature]*

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de

Graduación: "DETERMINACION PRACTICA DE LOS PARAMETROS DE LOS CONTROLES DE EXCITACION DE LOS GENERADORES SINCRONOS DE CENTRALES GENERADORAS REPRESENTATIVAS DEL SISTEMA DE POTENCIA DE LA COMISION EJECUTIVA HIDROELECTRICA DEL RIO LEMPA (C.E.L.)"

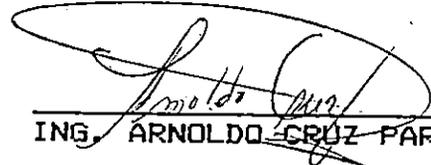
a cargo del (los) Br(es): Laura Iris Aguirre Siliézar y Jaime Pastor Baires Pérez

Habiendo obtenido el presente trabajo una nota final, global de 8.0 (OCHO PUNTO CERÓ, _____)

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

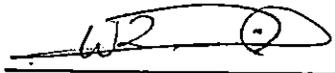
TRABAJO DE GRADUACION

COORDINADOR:



ING. ARNOLDO CRUZ PARADA

ASESORES:



ING. WILLIAN ALGUERA



ING. LUIS ENRIQUE GONZALEZ



ING. MAURICIO PALACIOS

ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA
FACULTAD DE INGENIERIA
Y ARQUITECTURA
Universidad de El Salvador

TRABAJO DEDICADO A:

DIOS TODOPODEROSO:

POR LA LUZ QUE ME BRINDO EN MIS MOMENTOS
DE VACILACION.

MIS PADRES:

LIC.SALVADOR ANTONIO AGUIRRE MARROQUIN

LIC.BERTHA S. SILIEZAR DE AGUIRRE

MIS HERMANAS:

LIC. BERTHA MARITZA AGUIRRE SILIEZAR

ING. JULIA YANIRA AGUIRRE GUTIERREZ

MI ABUELA:

LUCIA SILIEZAR BERNAL

MI NOVIO:

ING. JORGE ANTONIO RAJO RAMIREZ

A TODOS MIS AMIGOS:

QUE SIEMPRE ME APOYARON

TRABAJO DEDICADO A:

YAVE DIOS:

POR PERMITIRME CONOCER PARTE DE SU MARAVILLOSA
CREACION.

MIS PADRES:

PASTOR BAIRES HERNANDEZ Y ROSA AMINTA PEREZ DE
BAIRES, POR SU CONTINUO APOYO EN MI SUPERACION.

MI HERMANA:

ROSA DEL CARMEN BAIRES PEREZ, POR SER LA ALEGRIA
DE MI VIDA.

MI HERMANO:

ING. AGR. CARLOS ROBERTO BAIRES PEREZ (Q.D.D.G),
POR HABER SIDO EL EJEMPLO DIGNO DE UN VERDADERO
PROFESIONAL DEDICADO AL SERVICIO DE SU PUEBLO.

AL PUEBLO SALVADOREÑO.

AGRADECIMIENTOS

AL PERSONAL DEL COS:

ING. WILLIAN ALGUERA, ING. LUIS ENRIQUE GONZALES Y AL
ING. MAURICIO PALACIOS, POR SUS VALIOSAS OBSERVACIONES Y
RECOMENDACIONES QUE CONTRIBUYERON A MEJORAR NUESTRO TRABAJO.

AL PERSONAL DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA 15 DE SEPTIEMBRE:

POR SU VALIOSA AYUDA Y CONTRIBUCION QUE APORTARON PARA
LA REALIZACION DE NUESTRO TRABAJO, EN ESPECIAL AL ING.
FRANCISCO EQUILEO GUILLEN

A NUESTROS COMPAÑEROS Y AMIGOS:

RICARDO ERNESTO CIENFUEGOS Y MORRIS DIAZ SARAVIA POR SU
AYUDA EN LA EDICION DEL PRESENTE DOCUMENTO.

A TODAS LAS PERSONAS:

QUE DE UNA U OTRA MANERA HAN CONTRIBUIDO CON SU
INVALUABLE APOORTE A QUE ESTE TRABAJO LLEGASE A SU
CULMINACION.

PREFACIO

Debido a las severas condiciones de operación a las que ha estado sometido el sistema eléctrico de potencia de El Salvador, en los últimos años, así como el deterioro que han sufrido las centrales generadoras de energía eléctrica, ha traído como consecuencia la variación de los valores de los parámetros de los sistemas de control de excitación, que inicialmente fueron proporcionados por el fabricante, los cuales no han sido actualizados en su totalidad.

Es por ello, que el presente documento presenta criterios, definiciones y métodos de prueba que permitan desarrollar los procedimientos y recomendaciones pertinentes para la determinación experimental de los parámetros que representan los modelos matemáticos de los sistemas de control de excitación de una central generadora de energía eléctrica, los cuales podrán ser utilizados en estudios de estabilidad del sistema de potencia, además de su utilidad como material didáctico dirigido a aquellas personas que deseen familiarizarse con los sistemas de control de excitación.

Siendo el objetivo de este trabajo el realizar un estudio detallado del sistema de excitación de la C. H. 15 de Septiembre, en donde se determinó el tipo de modelo de control de excitación al cual pertenece, y se desarrollaron los procedimientos de prueba que permiten la obtención de los parámetros del mismo, identificando los puntos de medición adecuados para obtener datos más confiables. La realización de estas pruebas así como el cálculo de los parámetros, no fueron posibles debido a problemas referentes a las políticas de la generación de energía de la CEL.

RESUMEN DE TRABAJO

La necesidad de obtener modelos matemáticos que simulen exactamente la operación de un sistema de control de excitación durante disturbios que se puedan presentar en el sistema de potencia, demanda métodos de prueba efectivos, los cuales permitan determinar los valores de los parámetros que representan a los diferentes componentes que constituyen dicho sistema.

Siendo el propósito del presente documento presentar los conceptos de funcionamiento, criterios de modelado y métodos de prueba que permitan realizar un análisis adecuado que proporcionen resultados confiables para la determinación experimental de los parámetros de los sistemas de excitación, para ello se realizó una investigación bibliográfica y de campo.

En el capítulo I, trata definiciones y aspectos de funcionamiento de los sistemas de control de excitación.

En el capítulo II, se presentan los criterios generales de modelado, el procedimiento para la obtención del modelo matemático y especificaciones de los modelos propuestos por la IEEE.

En el capítulo III, se detallan los métodos de pruebas utilizados para determinar los parámetros de los sistemas de control de excitación.

Finalmente en el capítulo IV, se realiza un análisis detallado de la C.H. 15 de Septiembre, basado en la información obtenida de los capítulos anteriores.

En los anexos se presentan información adicional sobre datos típicos, diagramas, y formularios que ayuden a recolectar adecuadamente los datos durante las pruebas.

Los métodos de pruebas definidos, son tentativos ya que su debida realización dependerá del sistema estudiado y del equipo con que se cuente para la realización de las pruebas.

TABLA DE CONTENIDO

CAPITULO	Pág.
I. Conceptos fundamentales de los sistemas de excitación.....	1
1.1. Principios básicos.....	1
1.2. Descripción funcional del regulador de voltaje.....	4
1.3. Clasificación del comportamiento dinámico.....	4
1.3.1. Comportamiento de gran señal.....	4
1.3.2. Comportamiento de pequeña señal.....	5
1.4. Comportamiento de gran señal.....	5
1.4.1. Generalidades.....	5
1.4.2. Techo de corriente.....	6
1.4.3. Techo de voltaje.....	6
1.4.4. Respuesta en el tiempo del voltaje del sistema de excitación.....	7
1.4.5. Tiempo de respuesta del voltaje del sistema de excitación.....	7
1.4.6. Alta respuesta inicial.....	7
1.4.7. Respuesta nominal del sistema de excitación.....	8
1.4.8. Respuesta transitoria.....	9
1.5. Criterios de comportamiento de pequeña señal.....	10
1.5.1. Respuesta transitoria.....	10
1.5.2. Características de respuesta a la frecuencia.....	10
1.5.3. Indices de comportamiento de pequeña señal.....	13
1.6. Componentes básicos de los reguladores de voltaje.....	15
1.7. Evolución de los reguladores de voltaje....	18
1.8. Conclusiones.....	19
Referencias bibliográficas.....	19
II. Modelado de los sistemas de excitación.....	20
2.1. Conceptos generales de modelado.....	20
2.1.1. Transductores.....	21
2.1.2. Circuitos detectores.....	22
2.1.3. Amplificadores.....	23
2.1.4. Sistema de estabilización.....	24
2.1.5. Sistema de referencia.....	25
2.1.6. Excitadores.....	25
2.1.6.1. Generadores cc.....	26
2.1.6.2. Generadores ca.....	27
2.1.6.3. Excitador estático.....	28
2.2. Obtención del modelo matemático.....	29
2.3. Especificación de los modelos.....	29

CAPITULO

Pág.

2.3.1. IEEET1, IEEEX1, IEET1A.....	29
2.3.2. IEEET2, IEEEX2, IEEX2A.....	29
2.3.3. IEEET3, IEEEX3.....	30
2.3.4. IEEET4, IEEEX4, IEEETS, IEET5A.....	30
2.3.5. SEXS.....	30
2.3.6. SCRX.....	31
2.3.7. EXDC2.....	31
2.3.8. EXAC1.....	32
2.3.9. EXAC2.....	32
2.3.10 EXAC3.....	32
2.3.11 EXAC4.....	33
2.3.12 EXST1.....	33
2.3.13 EXST2, EXST2A.....	33
2.3.14 EXST3.....	34
2.3.15 IEETS.....	34
2.3.16 MNEXL1, MNEXL2, MNEXL4.....	34
2.4. Constantes de los sistemas de excitación...	35
2.5. Conclusiones.....	46
Referencias bibliográficas.....	46
III. Pruebas para la determinación de los parámetros de los sistemas de control de excitación.....	47
3.1. Pruebas de gran señal.....	47
3.1.1. Generalidades.....	47
3.1.2. Pruebas de fábrica.....	48
3.1.3. Pruebas de campo.....	48
3.1.4. Respuesta en el tiempo.....	49
3.1.5. Consideraciones de limitadores y protecciones.....	52
3.1.6. Techo de voltaje.....	52
3.1.7. Tiempo de respuesta de voltaje.....	53
3.1.8. Respuesta nominal.....	53
3.1.9. Techo de corriente.....	53
3.1.10 Pruebas de falla.....	54
3.1.11 Disturbios del sistema de potencia..	54
3.2. Pruebas de comportamiento de pequeña señal.....	54
3.2.1. Respuesta transitoria.....	55
3.2.2. Respuesta a la frecuencia.....	56
3.2.3. Pruebas de campo.....	58
3.2.4. Pruebas de campo para el estabilizador del sistema de potencia.....	60
3.3. Conclusiones.....	63
Referencias bibliográficas.....	63
IV. Análisis del sistema de excitación de la C.H. 15 de Septiembre, Unidad 1.....	64
4.1. Descripción general del sistema.....	64
4.1.1. Características del equipo.....	65

CAPITULO

Pág.

4.2.	Descripción de las unidades del sistema de excitación de la C.H. 15 de Septiembre.....	66
4.2.1.	Unidad transductora de señales (ST).....	66
4.2.2.	Detector de desviación de voltaje y circuito sumador (VD, ADD).....	70
4.2.3.	Circuito de control manual (MC).....	73
4.2.4.	Circuito de control de arranque y y paro (SSC).....	75
4.2.5.	Circuito detector y compensador de señal (RCC, XDC y RDC).....	78
4.2.6.	Circuito del control seguidor automático (FLUC).....	80
4.2.7.	Circuito detector de potencia activa y reactiva (P-Q).....	83
4.2.8.	Circuito limitador de subexcitación (UEL).....	85
4.2.9.	Circuito limitador de sobre excitación (OEL).....	86
4.2.10	Circuito protector de sobrecorriente en los tiristores (TOC).....	89
4.2.11	Circuito detector de corriente de campo cc.....	91
	4.2.11.1. Amplificador flotante.....	92
4.2.12	Referencia de voltaje (90R) y (70R).....	93
4.2.13	Defasador de pulsos automático (APPS).....	94
4.2.14	Unidad de control de estabilidad de excitación del sistema de alimentación (PSS).....	95
4.3.	Pruebas para la determinación de los parámetros del sistema de excitación de la C.H. 15 de Septiembre.....	99
4.3.1.	Métodos de prueba utilizados.....	99
	4.3.1.1. Procedimiento de la prueba de respuesta al escalón.....	99
	4.3.1.2. Procedimiento de la prueba de respuesta a la frecuencia....	100
	4.3.1.3. Procedimiento de la prueba de regulación de potencia reactiva.....	100
4.3.2.	Determinación de los circuitos a probar del sistema de excitación de la C. H. 15 de Septiembre, unidad 1.	100
4.3.3.	Circuitos de prueba.....	101
	4.3.3.1. Detector de desviación de voltaje (VD).....	102
	4.3.3.2. Circuito sumador (ADD).....	103
	4.3.3.3. Circuito compensador de corriente (RCC).....	103

CAPITULO

Pág.

4.3.3.4. Estabilizador del sistema de potencia (PSS).....	104
4.3.4. Prueba de comportamiento del AVR....	105
4.4. Equipo necesario para realizar las pruebas.....	105
4.5. Conclusiones.....	106
Referencias bibliográficas.....	107
Conclusiones y recomendaciones generales.....	108
Anexos.....	109

LISTA DE FIGURAS

Figura	pág.
1.1. Elementos básicos de la máquina síncrona.....	2
1.2. Diagrama de bloques de un sistema de control de excitación.....	2
1.3. Sistemas de excitación a) rotativo cc; b) rotativo ac; c) estático.....	3
1.4. Respuesta nominal del sistema de excitación.....	8
1.5. Respuesta transitoria típica de un sistema de control con realimentación a una entrada escalón.....	10
1.6. Respuesta típica a la frecuencia de un sistema de control de excitación en lazo abierto con la máquina síncrona en circuito abierto.....	11
1.7. Respuesta típica a la frecuencia de un sistema de control de excitación con realimentación con la máquina síncrona en circuito abierto.....	12
1.8. Componentes básicos del AVR.....	15
1.9. Curva de capacidad.....	16
1.10. Diagrama de bloques del control manual.....	17
2.1. Transductor de voltaje.....	22
2.2. Detectores de error.....	23
2.3. Amplificadores a) amplidina; b) magnético; c) electrónico.....	24
2.4. Estabilizador, circuito electrónico.....	24
2.5. a) Excitador cc; b) excitador ac; c) estático...	25
2.6. Curva de carga del generador de cc.....	27
2.7. Representación de la máquina cc, en diagrama de bloques.....	27
2.8. Representación de la máquina ac, en diagrama de bloques.....	28
2.9. Modelos a) IEEET1; b) IEEEX1; c) IEET1A.....	36
2.10 Modelos a) IEEET2; b) IEEEX2; c) IEX2A.....	37
2.11 Modelos a) IEEET3; b) IEEEX3.....	38
2.12 Modelos a) IEEET4; b) IEEEX4.....	39
2.13 Modelos a) IEEET5; b) IEET5A.....	40
2.14 Modelos a) SEXS; b) EXDC2; c) EXAC2.....	41
2.15 Modelos a) EXAC2; b) EXAC3.....	42
2.16 Modelos a) EXAC4; b) EXST1.....	43
2.17 Modelos a) EXST2; b) EXST2A.....	44
2.18 Modelos a) EXST3; b) IEET1S.....	45
3.1. Pruebas de campo de gran señal (10% de voltaje de error) de un sistema de excitación con respuesta inicial alta.....	51
3.2. Datos de pruebas de respuestas a la frecuencia de un sistema de control de excitación (con excitador cc) con y sin PSS.....	61
3.3. Datos de prueba de campo asignadas al PSS.....	62

Figura	pág.
4.1. Diagrama unifilar del sistema de excitación de la C. H. 15 de Septiembre.....	66
4.2. Diagrama de bloques general del sistema de excitación de la C. H. 15 de Septiembre.....	67
4.3. Diagrama de bloques de la unidad ST.....	68
4.4. Diagrama eléctrico de la unidad ST.....	69
4.5. Diagrama de bloques de la unidad VD.....	70
4.6. Diagramas eléctricos a) VD; b) ADD.....	72
4.7. Diagrama de bloques de la unidad MC.....	73
4.8. Esquema eléctrico de la unidad MC.....	75
4.9. Diagrama de bloques de la unidad SSC.....	76
4.10 Esquema eléctrico de la unidad SSC.....	77
4.11 Diagrama de bloques de la unidad RCC.....	78
4.12 Esquema eléctrico de la unidad RCC.....	79
4.13 Composición vectorial.....	80
4.14 Diagrama de bloques del FLUC.....	82
4.15 Esquema eléctrico del FLUC.....	82
4.16 Diagrama de bloques de la unidad P-Q.....	83
4.17 Esquema eléctrico de la unidad P-Q.....	84
4.18 Esquema eléctrico de la unidad UEL.....	85
4.19 Características de límite de la unidad OEL....	87
4.20 Esquema eléctrico de la unidad OEL.....	88
4.21 Esquema circuital de la unidad TOC.....	89
4.22 Esquema del circuito detector de corriente de campo.....	92
4.23 Diagrama de bloques del amplificador flotante.	93
4.24 Diagrama de bloques de la unidad APPS.....	95
4.25 Diagrama de bloques de la unidad PSS.....	97
4.26 Panel de control de la unidad PSS.....	97
4.27 Diagrama de alambrado.....	104
4.28 Conexión del equipo para la realización de la prueba de comportamiento del AVR.....	106

LISTA DE TABLAS

Tabla	pág.
1.1. Valores generales aceptables de índices característicos para un buen comportamiento del sistema de control con realimentación.....	14
1.2. Rangos de índices de comportamiento dinámico de pequeña señal para sistemas de control de excitación.....	14
2.1. Modelos desarrollados por la compañía Consolidated Edison de New York.....	34
2.2. Nomenclatura de las constantes típicas.....	35
4.1. Valores típicos de voltaje en los terminales de la unidad ST.....	69
4.2. Valores típicos de voltaje de VD y ADD.....	72
4.3. Valores típicos de voltaje de la unidad MC.....	74
4.4. Valores típicos de voltaje de la unidad SSC.....	77
4.5. Valores típicos de ajustes de compensación.....	80
4.6. Valores típicos del FLUC.....	82
4.7. Valores típicos del circuito P-Q.....	84
4.8. Valores típicos del circuito UEL.....	86
4.9. Valores típicos del circuito OEL.....	88
4.10. Valores típicos de voltaje de referencia VR1 y SW1.....	90
4.11. Valores típicos del TOC.....	91
4.12. Valores de voltaje del circuito detector de corriente de campo.....	91
4.13. Especificaciones de la unidad APPS.....	96
4.14. Datos de especificación de la unidad PSS.....	98
4.15. Identificación de los circuitos de prueba del AVR.....	102
4.16. Puntos de prueba del circuito VD.....	102
4.17. Puntos de prueba del circuito ADD.....	103

CAPITULO I

CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE LOS SISTEMAS DE EXCITACION

INTRODUCCIÓN.

Los sistemas de excitación tienen la función de generar el voltaje en c.c. necesario para excitar el devanado de campo del generador, el cual depende de la señal de control (automático o manual).

Comúnmente los equipos que se utilizan para generar la potencia de c.c. han sido máquinas de c.c y c.a.; recientemente la potencia de c.c se obtiene de los terminales del generador por medio de un puente rectificador de tiristores, denominado sistema estático.

En el presente capítulo se mencionan los conceptos fundamentales de construcción y funcionamiento de los sistemas de excitación.

1.1. PRINCIPIOS BASICOS.

En la fig. 1.1, se muestran los elementos básicos de un generador síncrono. Constructivamente el generador consta de dos conjuntos de devanados principales, uno en el rotor llamado devanado de campo y otro en el estator llamado devanado de armadura. El devanado de campo debe ser excitado con corriente directa para que al ser girado por el primotor, induzca voltajes alternos en los terminales del estator.

En la figura 1.2, se muestra el diagrama de bloques de un sistema de control de excitación. Los tipos de excitadores fundamentales encargados de generar la corriente directa se esquematizan en la figura 1.3, como son: excitador rotativo c.c., excitador rotativo c.a., y el excitador estático en el cual la potencia de excitación es tomada de los terminales del generador.

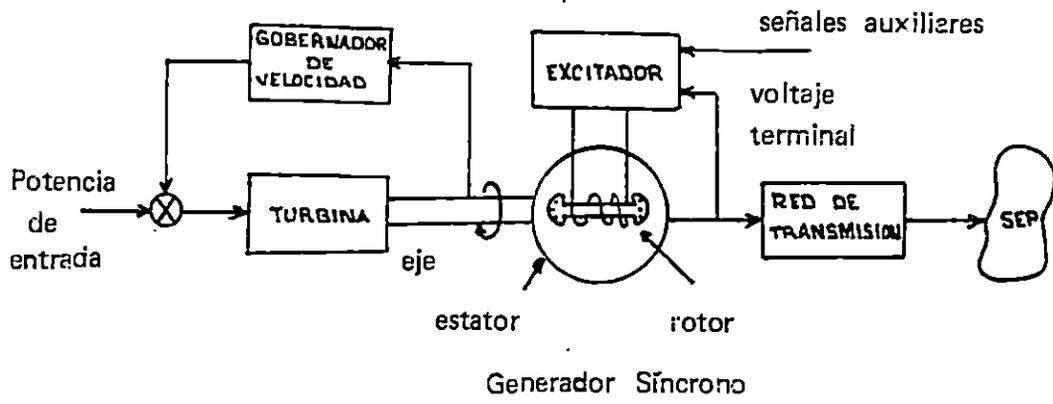


Figura 1.1. Elementos básicos de la máquina síncrona.

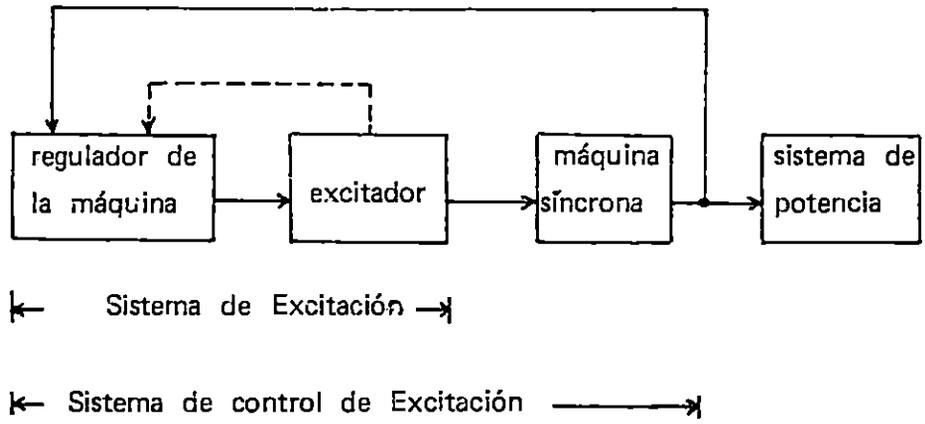


Figura 1.2. Diagrama de bloques de un sistema de control de excitación,

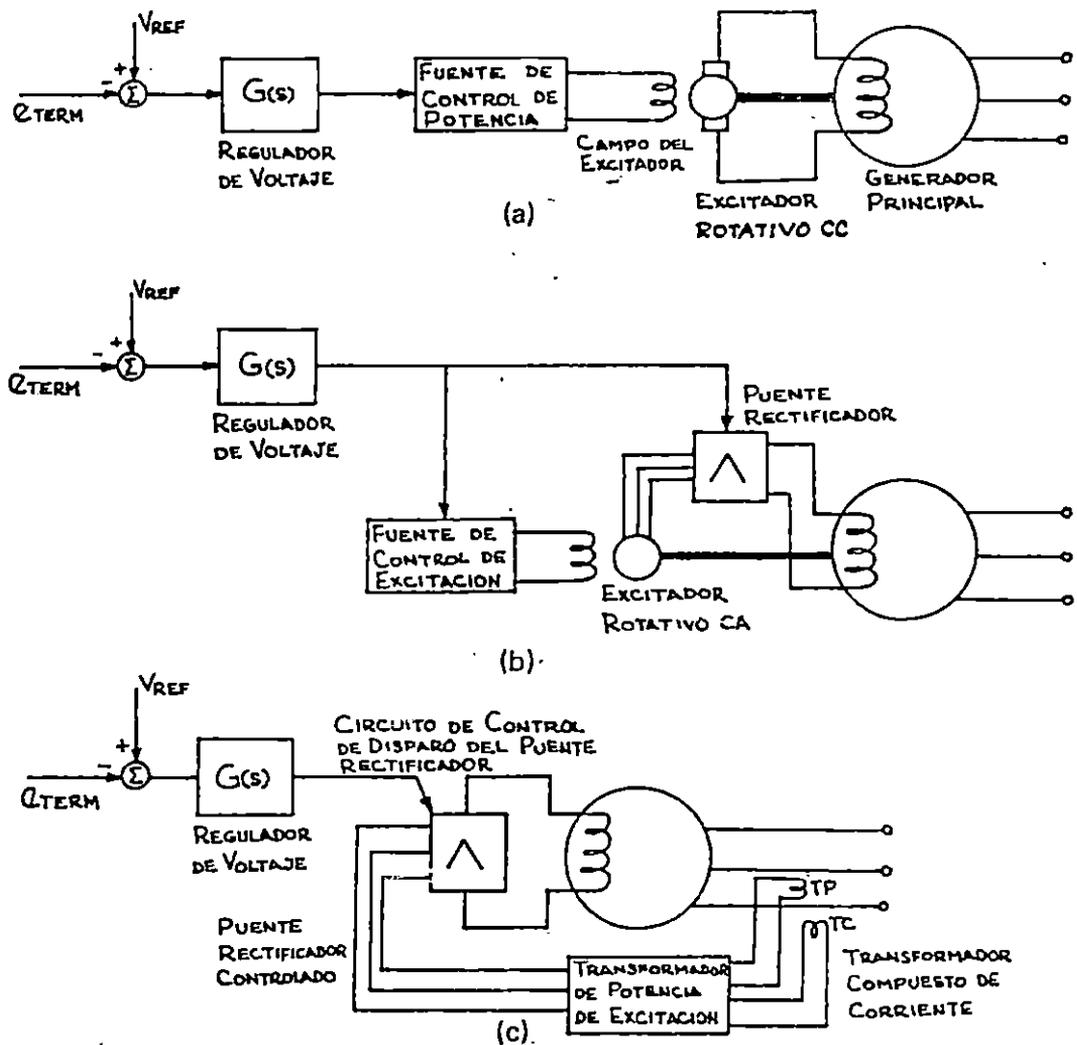


Figura 1.3. Sistemas de excitación a) rotativo cc; b) rotativo ac; c) estático.

La representación propia de los sistemas de excitación, requieren una consideración cuidadosa de las ganancias y constantes de tiempo asignadas a los reguladores de voltaje y de las características de los componentes de los sistemas de excitación.

El sistema de excitación en todos los casos, consiste de una fuente de potencia de corriente directa, de un circuito de control y de un regulador de voltaje, el cuál determina el manejo de la excitación.

1.2. DESCRIPCION FUNCIONAL DEL REGULADOR DE VOLTAJE.

El regulador de voltaje (AVR) se diseña para controlar en forma automática, el voltaje en los terminales del generador ante diversas condiciones de operación similares a: variaciones de carga, perturbaciones fuertes en el sistema, operación aislada o paralelo; debiendo tener una respuesta lo más rápida posible para así, evitar una caída excesiva del voltaje en los terminales de los generadores, después de alguna perturbación en él (fallas), o variaciones de voltaje que puedan producir entre otros problemas, oscilaciones de potencia reactiva dentro de la red de transmisión.

La función principal de un regulador de voltaje es ajustar continuamente el nivel de excitación del devanado de campo del generador, de modo que el voltaje en los terminales de la máquina, se mantenga en un nivel preestablecido.

Dentro de los requerimientos del comportamiento de un regulador de voltaje en un sistema eléctrico pueden mencionarse:

- a) Regular y mantener estable la tensión del generador en régimen permanente.
- b) En caso de contingencia recuperar rápidamente el nivel del voltaje.
- c) Evitar que las magnitudes eléctricas en la máquina sobrepasen los límites de operación (sub y sobre excitación).
- d) Coordinar la distribución de potencia reactiva entre las máquinas conectadas a la red.
- e) Aumentar el nivel de amortiguamiento de las oscilaciones en el sistema.

1.3. CLASIFICACION DEL COMPORTAMIENTO DINAMICO.

1.3.1. COMPORTAMIENTO DE GRAN SEÑAL.

El comportamiento de gran señal es la respuesta a señales en donde las no linealidades son lo suficientemente grandes para considerarse significativas.

Los propósitos del criterio del comportamiento de gran señal son los de proveer una medida de evaluación del comportamiento del sistema de excitación para cuando ocurran varios transitorios que pueden incluir grandes variaciones en los voltajes y corrientes del estator de la máquina síncrona, y de las corrientes de campo inducidas; que son, los

transitorios que afectan la estabilidad transitoria del sistema. También para fijar la capacidad del sistema de excitación y así, poder predecir el comportamiento de la máquina sincrónica, por tanto los criterios deberán reflejar los efectos de operación bajo disturbios reales en el sistema de potencia. Con respecto a las pruebas de comportamiento, es frecuentemente impráctico duplicar adecuadamente estos efectos. En casos donde las pruebas únicamente puedan ser hechas en componentes individuales y solamente con carga parcial o circuito abierto, se pueden usar medidas analíticas para predecir el comportamiento bajo condiciones de operación real.

El criterio que fija el comportamiento de gran señal son valores tales como la respuesta transitoria, techos de voltaje y corriente, tiempos de respuesta de voltaje y respuesta nominal derivada de las respuestas en el tiempo.

1.3.2. COMPORTAMIENTO DE PEQUEÑA SEÑAL.

El comportamiento de pequeña señal es la respuesta a señales en las cuales las no linealidades son lo suficientemente pequeñas para ser consideradas insignificantes.

El comportamiento de pequeña señal de un sistema de control de excitación o de sus componentes puede ser fijado de respuestas en el tiempo, respuesta a la frecuencia, o por análisis de eigenvalores.

El criterio de comportamiento de pequeña señal provee un medio de evaluación de respuestas de los sistemas para incrementar cambios de carga, cambios de voltaje, y cambios de velocidad del rotor de la máquina sincrónica asociados con estados iniciales de inestabilidad dinámica (donde las oscilaciones son lo suficientemente pequeñas tal que las no linealidades pueden considerarse insignificantes). Los datos de comportamiento de pequeña señal proveen medidas para la determinación o verificación de los parámetros del modelo del sistema de excitación para los sistemas estudiados.

1.4. COMPORTAMIENTO DE GRAN SEÑAL.

1.4.1. GENERALIDADES.

Los siguientes criterios de comportamiento de gran señal son relativos a un sistema de control de excitación y, donde sea aplicable, a sus componentes. Para permitir máxima flexibilidad en el diseño, fabricación, y aplicación del

equipo de excitación, algunos criterios son definidos "bajo condiciones específicas". Las condiciones en que se aplican pueden ser especificadas usualmente por el fabricante.

La naturaleza general de las siguientes definiciones, pueden ser usadas para diferentes aplicaciones, teniéndose sumo cuidado en aplicar consistentemente las "condiciones específicas".

1.4.2. TECHO DE CORRIENTE.

Es la máxima corriente directa que el sistema de excitación es capaz de suministrar de sus terminales para un tiempo específico.

Cuando sobrevienen sobrecargas o disturbios prolongados de importancia, los techos de corriente pueden basarse en términos de servicio del sistema de excitación, que identifique la corriente de salida máxima y el tiempo de duración requerido.

Cuando un valor elevado de techo de voltaje es requerido para una acción forzada, los circuitos de control de límites de corriente de excitación pueden determinar el techo de corriente real.

1.4.3. TECHO DE VOLTAJE.

Es el máximo voltaje directo que el sistema de excitación es capaz de suministrar de sus terminales bajo condiciones definidas.

El techo de voltaje puede ser usado para evaluar la capacidad de forzamiento del sistema de excitación para conducir la corriente de campo hacia el valor de techo de corriente. Además provee una indicación del voltaje disponible para forzar a la corriente de campo desde el valor nominal hasta el techo de corriente. A mayor diferencia entre el voltaje de techo y el voltaje nominal de campo, mayor será la capacidad de forzamiento

Elevados techos de voltaje tienden a mejorar la estabilidad transitoria.

El techo de voltaje del sistema de excitación bajo carga, puede ser determinado ya sea por estudios de estabilidad o mediciones transitorias. Puede ser determinado con mediciones de estado estable con el sistema de excitación cargado con una

resistencia tal que el techo de corriente sea obtenido pero no excedido. Es necesario que la carga tenga adecuada inductancia por el efecto de caída de voltaje, y para que las formas de onda de corriente y voltaje sean obtenidas adecuadamente; los circuitos de control de límites de corriente de salida del excitador deben estar inactivos. Si un transitorio determinado es hecho, se requiere de una inductancia adecuada en la carga para que el techo de voltaje sea medible en el techo de corriente antes que cualquier limitador de corriente actúe. Los techos de voltaje sin carga son determinados con el sistema de excitación en circuito abierto.

Para los sistemas que emplean excitador rotativo, el techo de voltaje es determinado en relación a la velocidad nominal.

Algunos sistemas tienen valores positivos y negativos de techos de voltaje, ya que en algunas aplicaciones especiales, los sistemas pueden requerir corriente de campo positiva y negativa para la máquina síncrona.

1.4.4. RESPUESTA EN EL TIEMPO DEL VOLTAJE DEL SISTEMA DE EXCITACION.

Es el voltaje de salida del sistema de excitación expresado en función del tiempo bajo condiciones específicas. Ver la figura 1.4.

1.4.5. TIEMPO DE RESPUESTA DEL VOLTAJE DEL SISTEMA DE EXCITACION.

Es el tiempo en segundos para que el voltaje de excitación alcance el 95% de la diferencia entre el techo de voltaje y el voltaje nominal de campo bajo condiciones específicas.

1.4.6. ALTA RESPUESTA INICIAL.

Son los sistemas con muy corto tiempo de respuesta relativamente comparada con la constante de tiempo de campo del generador y las oscilaciones características del sistema de potencia, el ajuste de la respuesta inicial no es importante. Estos sistemas cuyas respuestas de tiempo de voltaje es de 0.1 segundos o menos son llamados "sistemas de excitación con alta respuesta inicial"

1.4.7. RESPUESTA NOMINAL DEL SISTEMA DE EXCITACION.

Es la razón del incremento del voltaje de salida del sistema de excitación determinado por la curva de respuesta de voltaje del sistema, dividido por el voltaje de campo a plena carga. Esta razón, si es mantenida constante, podría desarrollar la misma área voltaje-tiempo como la obtenida de la curva real sobre el intervalo del primer medio segundo (a menos que un diferente intervalo de tiempo sea especificado).

La respuesta nominal es usada como una figura importante para medir la habilidad de un sistema de excitación para responder en el funcionamiento de estabilidad transitoria y permitir la comparación de los sistemas de excitación.

El punto de arranque para determinar la respuesta nominal es el tiempo en que es iniciado el disturbio; esto es, la respuesta nominal del sistema de excitación debe incluir cualquier tiempo de demora que se pueda presentar. En la fig. 1.4, la respuesta nominal del sistema de excitación es ilustrada por la línea ac. Esta línea es determinada al establecer el que el área acd = área abd.

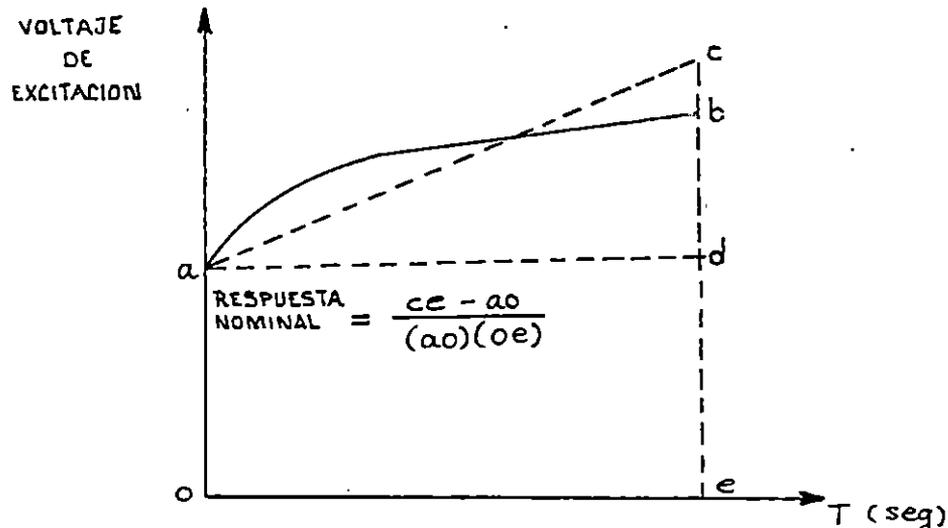


Figura 1.4. Respuesta Nominal del sistema de excitación.

La respuesta nominal es determinada por la operación inicial del sistema de excitación a la corriente nominal de campo de la máquina síncrona y creando repentinamente las condiciones necesarias en la señal de entrada del voltaje terminal trifásico para conducir al techo de voltaje el

voltaje del sistema de excitación. Si la respuesta es usada como una figura de validez para comparar diferentes tipos de sistemas de excitación, pueden obtenerse resultados engañosos si se permiten diferentes tipos de limitadores o diferentes valores de inductancia.

La respuesta nominal determinada de la respuesta de tiempo real obtenida durante disturbios, pueden sufrir variaciones al ser comparadas con pruebas de fabricación, debido a la influencia de corrientes inducidas durante las fallas.

1.4.8. RESPUESTA TRANSITORIA.

Cualquiera de los criterios de comportamiento de gran señal proveen solamente valores numéricos, tales como el techo de voltaje y la respuesta nominal del sistema de excitación por ejemplo. Estos criterios son utilizados para comparar el comportamiento de diferentes sistemas, y son valiosos como criterios de diseño que pueden ser usados para verificar que el fabricante completó los requerimientos especificados. Sin embargo, estos valores no proveen suficiente información en todo instante para la selección o verificación de parámetros del modelo, ya que una respuesta específica puede ser obtenida en diversos modelos con diferentes combinaciones de parámetros. Esta ambigüedad puede ser reducida si se comparan los resultados de los modelos con respuestas de tiempo. La respuesta transitoria es más frecuentemente asociada con análisis de pequeña señal, pero en comportamiento de gran señal se utiliza especialmente en aplicaciones que involucran el refinamiento o validación de modelos por computador.

Cualquier sección del sistema de control de excitación que es comúnmente representada en modelos de estudios (por ejemplo: regulador de la máquina sincrónica, excitador, máquina sincrónica, sistema de excitación y sistema de control de excitación) puede ser evaluada usando el criterio de respuesta transitoria.

Una respuesta transitoria de gran señal es una respuesta en el tiempo de las variables de entrada y salida de los componentes probados registradas como una función del tiempo. La respuesta transitoria generalmente es asociada con un escalón en la variable de entrada, siendo necesario únicamente que el cambio en la variable de entrada sea lo suficientemente largo y rápido para que la respuesta en la salida sea clasificada como una respuesta de gran señal por la respuesta que se obtiene. El cambio de la variable de entrada deberá ser especificado. Una respuesta de tiempo con varias variables registradas simultáneamente tiene considerable valor

en el refinamiento o validación de modelos en computador para gran señal.

1.5. CRITERIOS DE COMPORTAMIENTO DE PEQUEÑA SEÑAL.

Mientras los criterios de gran señal pueden ser aplicados a sistemas de control de excitación, componentes individuales del sistema o al sistema de excitación, los criterios de comportamiento de pequeña señal son comúnmente usados para evaluar el comportamiento en lazo cerrado de los sistemas de control de excitación.

1.5.1. RESPUESTA TRANSITORIA.

Una respuesta transitoria típica de un sistema de control con realimentación es mostrado en la fig. 1.5. Las características de interés principales son: el tiempo de crecimiento, sobreimpulso, y tiempo de establecimiento.

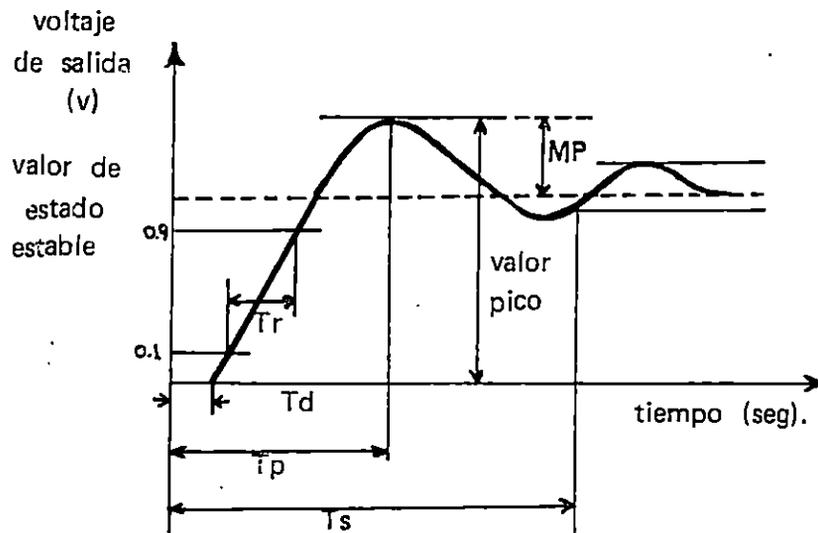


Figura 1. 5. Respuesta transitoria típica de un sistema de control con realimentación a una entrada escalón.

1.5.2. CARACTERÍSTICAS DE RESPUESTA A LA FRECUENCIA.

En un sistema lineal, es la relación de dependencia de la frecuencia en la diferencia de la ganancia y fase, entre una entrada senoidal de estado estable y la salida resultante.

Una respuesta característica típica de frecuencia en lazo abierto de un sistema de control de excitación con la máquina síncrona operando en circuito abierto es mostrada en la fig. 1.6. Las características principales son la ganancia G de baja frecuencia, la frecuencia de corte ω_c , el margen de fase ϕ_m , el margen de ganancia G_m . En la respuesta en frecuencia de lazo cerrado correspondiente a la fig. 1.7, los parámetros de interés son el ancho de banda ω_b , el valor pico M_p de la ganancia característica, y la frecuencia ω_s en la cual ocurre el valor pico.

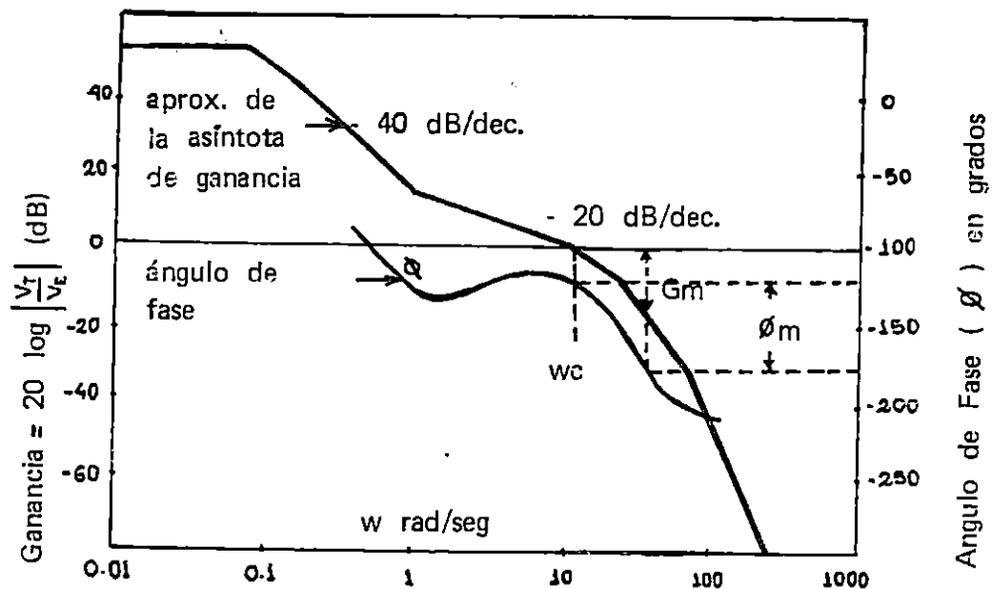


Figura 1. 6. Respuesta típica a la frecuencia de un sistema de control de excitación en lazo abierto con la máquina síncrona en circuito abierto.

Las características de respuesta a la frecuencia en lazo abierto son usadas en la determinación de los márgenes de ganancia y fase, ya que ambos son medidas de estabilidad relativa. La estabilidad relativa de un sistema de control en lazo abierto puede ser determinada de las propiedades del diagrama de Bode de la función de transferencia en lazo abierto. Sin embargo, este método puede ser usado solamente si la función de transferencia en lazo abierto no tiene polos y ceros en la región derecha del plano S (características mínimas de fase).

La estabilidad relativa de un sistema de control realimentado, es medida en términos de los márgenes de la ganancia y fase. Para un sistema de fase mínima, el cual es

estable con el lazo de realimentación abierto, los márgenes de ganancia y fase deberían ser positivos en orden a hacer estable el sistema con el lazo de realimentación cerrado. Los márgenes de ganancia y fase negativos indican que el sistema es inestable con un lazo de realimentación cerrado. En general, un margen de ganancia de 6 dB o más y un margen de fase de 40° o más es recomendable para la mayoría de los sistemas de control realimentados.

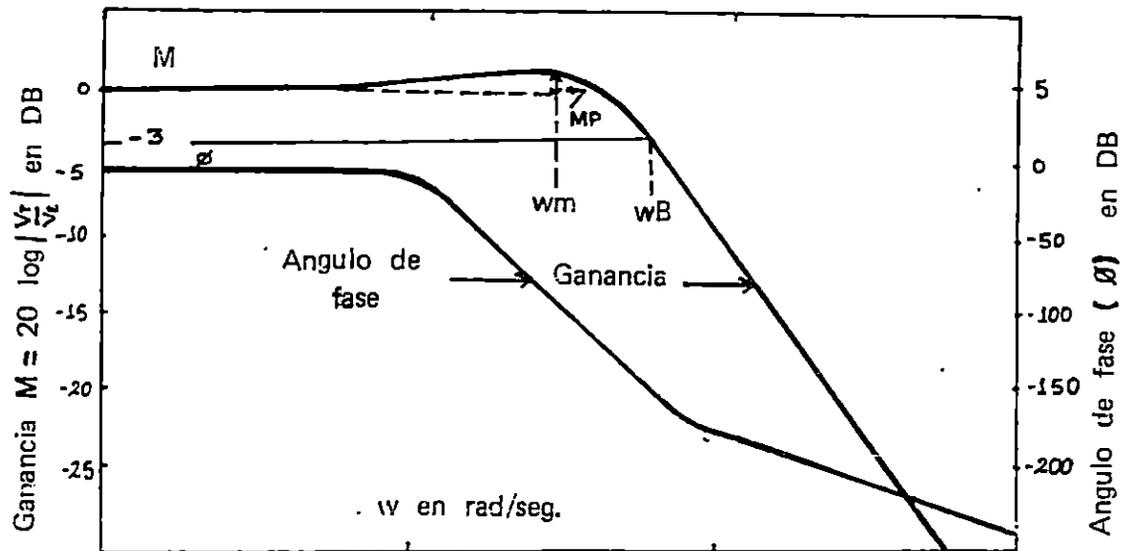


Figura 1.7. Respuesta típica a la frecuencia de un sistema de control de excitación con realimentación con la máquina síncrona en circuito abierto.

Con respecto a las características de la respuesta a la frecuencia en lazo cerrado, el valor pico M_p (en decibelios (dB)) de la amplitud de la respuesta también es una medida de estabilidad relativa. Un valor elevado de M_p (> 1.6 dB) es indicativo de un sistema oscilante, exhibiendo un sobreimpulso grande en su respuesta transitoria. En general, $1.1 \text{ dB} \leq M_p \leq 1.6 \text{ dB}$ es considerado una buena práctica de diseño para la mayoría de los sistemas de control con realimentación.

El ancho de banda w_B es un índice significativo en el comportamiento de respuesta a la frecuencia en lazo cerrado, porque es indicativo del tiempo de crecimiento T_r o sea la velocidad de la respuesta transitoria del sistema; mide, en parte, la capacidad del sistema para reproducir las señales de entrada. En sistemas de control con realimentación exhibiendo una respuesta al escalón menor que 10% del sobreimpulso, el tiempo de crecimiento T_r en segundos es relacionado con el ancho de banda w , en Hz, por la relación aproximada:

$$Trw, = 0.30 \text{ a } 0.45$$

En general, el producto Trw , se incrementa en la medida que el sobreimpulso de la respuesta transitoria del sistema se incrementa; valores en el rango de 0.3 a 0.35 corresponde a sobreimpulsos despreciables; valores en la región de 0.45 corresponden a sistemas con alrededor de 10% de sobreimpulso.

1.5.3. INDICES DE COMPORTAMIENTO DE PEQUEÑA SEÑAL.

Los indices de respuesta de pequeña señal tales como: tiempo de crecimiento, tiempo de establecimiento y ancho de banda; no son posibles de definir de una forma generalizada, ya que son medidas relativas de la velocidad y estabilidad de la acción de control. En la mayoría de los sistemas de control con realimentación, son determinados principalmente por la características dinámicas de los elementos del sistema. En el caso de los sistemas de control de excitación, las características dinámicas de la máquina sincrona (constantes de tiempo del campo, etc.) son los factores determinantes.

La simultánea optimización de todos los indices de respuesta del comportamiento de pequeña señal no es posible. Por ejemplo, bajo M_p , alta relación de amortiguamiento, margen de ganancia elevado, y alto margen de fase no son compatibles con el ancho de banda máximo. Aquellos indices de comportamiento que son de importancia principal dependen de la aplicación individual de cada sistema de control, y no existe un "mejor criterio" de aplicación universal, que pueda ser recomendado como norma.

Los valores que generalmente son aceptables para los indices que describen el comportamiento de sistemas de control realimentados son mostrados en la tabla 1.1.

Los rangos típicos de valores de indices de comportamiento de pequeña señal para un sistema de control de excitación están dados en la tabla 1.2. Estos datos fueron derivados analíticamente utilizando rangos extremos (grandes o pequeños) de las constantes de tiempo del campo de la máquina sincrona y constantes de tiempo del sistema de excitación tales como pueden encontrarse.

Los indices de comportamiento mostrados en la tabla 1.1, son aplicables a cualquier sistema de control realimentado con solamente un lazo de realimentación. Siendo aplicables a un sistema de control con la máquina sincrona en circuito abierto.

Tabla 1.1. Valores generales aceptables de índices característicos para un buen comportamiento del sistema de control con realimentación.

Margen de ganancia	≥ 6 dB
Margen de fase	$\geq 40^\circ$
Sobre impulso	0 a 15%
Mp	1.1 a 1.6 (0.8 dB a 4 dB)
Relación de amortiguamiento	≥ 0.6

Tabla 1.2. Rangos de índices de comportamiento dinámico de pequeña señal para sistemas de control de excitación.

Índice de comportamiento	Rangos de los valores
Ganancia del sistema de excitación	30 p.u. a 800 p.u.
Margen de ganancia	2 dB a 20 dB
Margen de fase	20° a 80°
Mp	1 a 4 (0 a 12 dB)
Ancho de banda	0.3 Hz a 12 Hz
Sobreimpulso	0 a 80%
Tiempo de crecimiento	0.1 s a 2.5 s
Tiempo de establecimiento	0.2 s a 10 s
Relación de amortiguamiento	0 a 1

Para una máquina síncrona cargada conectada a una interconexión multimáquina del sistema de potencia, los índices de comportamiento tales como los mostrados en la tabla 1.1, la mayoría pierden su significado. Una manera de fijar este comportamiento complejo del sistema es usar técnicas de análisis como el modelo de estado-espacio del sistema, y el cálculo de los eigenvalores (las raíces de las ecuaciones características) para los rangos del sistema de excitación de la máquina síncrona, y los parámetros de interés del sistema. El modelo estado-espacio puede ser derivado de gráficas conocidas y de los parámetros del sistema de condiciones de

operación, y de datos de respuestas de frecuencia experimentales que sean válidos.
 Cuando la máquina síncrona es conectada al sistema de potencia, su nivel de operación y parámetros del sistema externo influyen grandemente en el comportamiento.

1.6. COMPONENTES BASICOS DE LOS REGULADORES DE VOLTAJE.

Los reguladores de voltaje, estructuralmente presentan cuatro secciones:

- 1.- Control automático o regulador.
- 2.- Control manual.
- 3.- Excitador.
- 4.- Sistema de límite y protección.

En la fig. 1.8, se muestran los componentes básicos de un AVR.

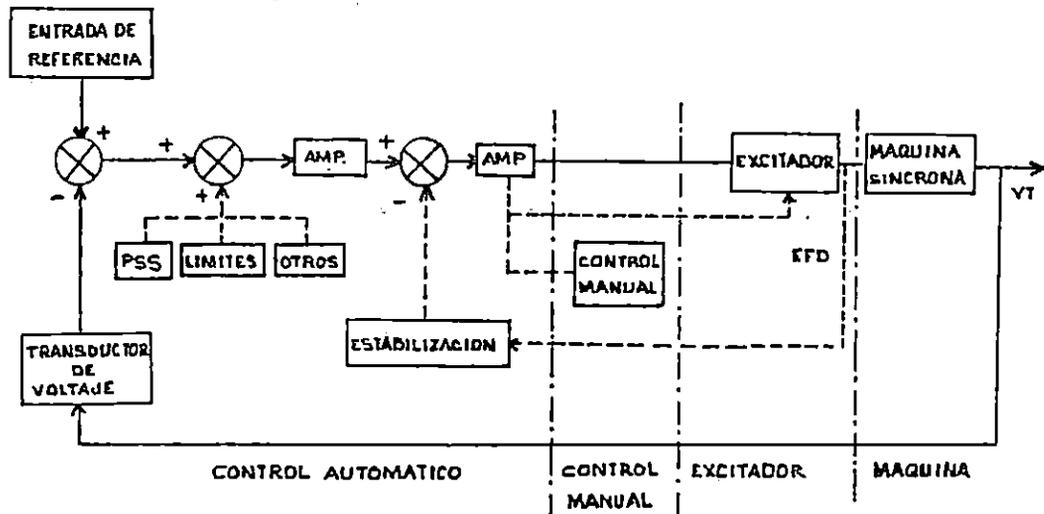


Figura 1.8. Componentes básicos de un AVR.

El lazo de control automático, se considera el cerebro del control de voltaje, este elemento recibe información del comportamiento del voltaje en terminales del generador, procesa esta información y genera la señal para modificar el voltaje de campo y llevar el voltaje del generador al valor deseado. En este bloque, se definen las características de respuesta de control de voltaje, a través de la selección del

ajuste de sus respectivos parámetros (constantes de tiempo y ganancia).

Existen funciones adicionales como son los limitadores, estabilizador del sistema de potencia y compensadores de corriente reactiva. En donde la función de los limitadores es proteger el generador contra sobre o subexcitación, limitando la operación de la máquina dentro de su respectiva curva de capacidad. En la fig. 1.9, se representan ambos límites, de sobre excitación (OEL) y el de baja excitación (UEL).

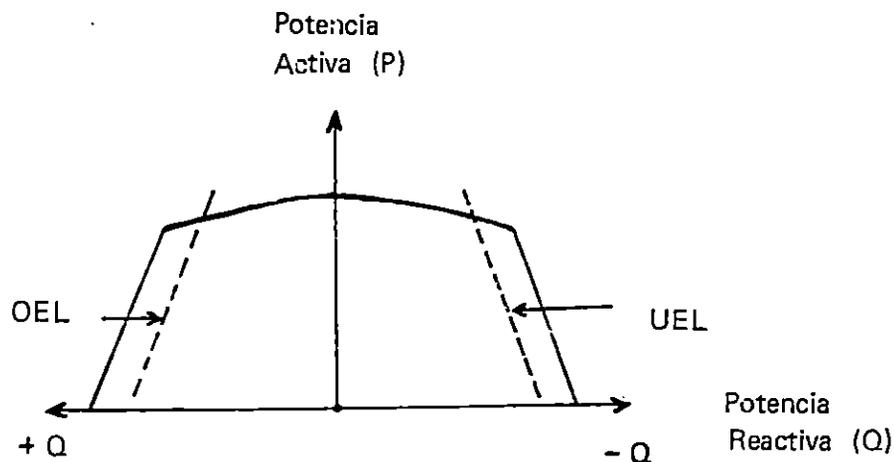


Figura 1.9. Curva de capacidad.

El propósito de incluir el estabilizador de sistema de potencia (PSS), es para mejorar la característica de comportamiento del control de voltaje, aumentando la rapidez y amortiguamiento de la respuesta.

El compensador de corriente reactiva, es utilizado como una unidad opcional, con el propósito de realizar un reparto equitativo de la potencia reactiva requerida en el sistema, entre las unidades en operación. Esta característica es denominada como la regulación de voltaje y puede presentarse en dos formas:

- a) Compensador de corriente cruzada RCC: modifica la potencia reactiva en la unidad generadora, para lograr un reparto equitativo entre generadores del sistema.
- b) compensador de línea XDC, RDC: son aplicados para caída de voltaje, en una línea de transmisión (normalmente la línea de salida del generador) en donde XDC compensa la caída por inductancia y RDC por resistencia.

Existe otro elemento de compensación de caída de frecuencia V/F: su función principal es evitar una sobre excitación de la unidad para mantener el voltaje en terminales cuando la velocidad de la turbina disminuye en forma pronunciada.

Los amplificadores y el sistema de estabilización pueden considerarse los elementos de regulación que generan el error o desviación de voltaje en terminales de la máquina y con base en ello, se define la señal de control con la dosificación de amplificación, y retardo, definida por el ajuste de sus respectivos parámetros. De acuerdo a la estructura de estos elementos, se pueden considerar reguladores proporcionales, proporcional-integral y proporcional-integral-derivativo.

La función del transductor de voltaje es convertir el voltaje del generador (KV) en niveles de voltaje de acuerdo a los circuitos de control (V), luego este voltaje es comparado con la señal de referencia generada por el equipo de entrada de referencia denominado comúnmente 90R, para obtener una señal de error representativa de la desviación del voltaje en terminales del generador.

La función del control manual es permitir controlar el voltaje del generador de forma manual.

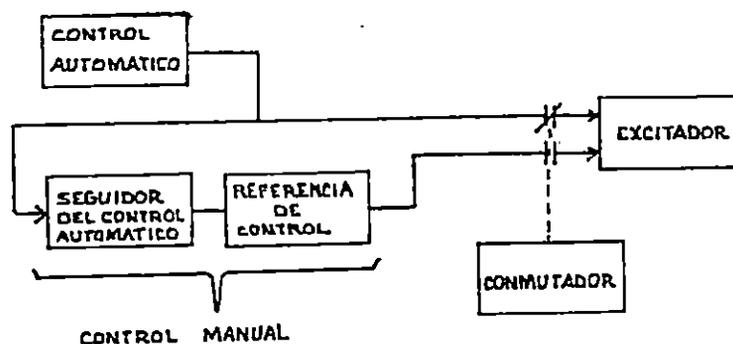


Figura 1.10. Diagrama de bloques del Control Manual.

Estructuralmente está compuesto por un sistema seguidor de lazo automático y una referencia, con base en estas dos señales, se genera un nivel de voltaje para realizar la corrección del voltaje en terminales del generador al nivel deseado. El diagrama de bloques del lazo del control manual se muestra en la fig. 1.10.

El lazo de seguimiento del lazo de control automático, es importante para evitar un cambio brusco en el voltaje en terminales del generador, en el instante de la conmutación del control automático al manual. Este elemento sigue continuamente el comportamiento del lazo automático y con base

en este, modifica continuamente el nivel de la señal de referencia de la corriente de campo 70E, de esta forma la señal de referencia del control manual siempre presenta una magnitud idéntica a la señal generada por el lazo automático.

1.7. EVOLUCION DE LOS REGULADORES DE VOLTAJE.

La evolución de los reguladores de voltaje puede dividirse en cuatro generaciones.

En la primera generación de los reguladores de voltaje, estos eran construidos utilizando equipos electromecánicos, mientras que en la segunda generación se utilizó el amplificador magnético en el lazo de control automático para aumentar la magnitud de la señal de error y forzar la corrección del voltaje de campo, lográndose mayor rapidez.

La tercera generación puede ser dividida en dos etapas:

- a) Primera etapa, el control automático se ejercía a través del campo de excitación del generador c.a., modificando el ángulo de encendido del puente rectificador de tiristores, luego la señal de c.a. del generador es rectificadora por un puente de diodos y alimentada al devanado de campo de la máquina.
- b) Segunda etapa, en esta existen dos estructuras de control, una para el generador de c.a., y otra en donde el control automático es aplicado al puente de rectificación de tiristores, para generar el nivel de voltaje c.c., deseado.

La cuarta generación elimina el excitador c.a. y en su lugar, toma la potencia para excitar al campo de los terminales del generador a través de un transformador denominado transformador de excitación.

Los reguladores actuales han realizado el desarrollo a través de la aplicación de nuevos componentes electrónicos para mejorar las diferentes funciones del regulador.

Recientemente, han aparecido reguladores de voltaje, en los cuales muchas de las funciones de control han sido digitalizadas, aumentando así su exactitud, como ejemplo se puede mencionar los circuitos de referencia 90R y 70E.

1.8. CONCLUSIONES.

-Los sistemas de excitación son los encargados de generar el voltaje de corriente continua necesario para excitar el devanado de campo del generador. Estos están constituidos por una fuente de potencia de c.c. o excitador, de un circuito de control y de un regulador de voltaje.

-Existen ciertos criterios para determinar que tipo de prueba conviene efectuar, según sea la naturaleza de los datos que interesan recabarse.

-Los criterios de gran señal están relacionados con la aplicación al sistema de excitación, al control del sistema de excitación o a componentes individuales, es decir, a verificar el funcionamiento y límites del sistema.

-Los criterios de pequeña señal se relacionan comúnmente con la evaluación del funcionamiento del control del sistema de excitación en lazo cerrado, es decir, para estudios de estabilidad.

-Los tipos de excitadores que se han utilizado han sido máquinas rotativas de c.c., c.a. con puente rectificador y recientemente se ha utilizado los excitadores estáticos en donde la potencia de excitación se toma de los terminales del generador.

-El regulador de voltaje es el encargado de ajustar continuamente el voltaje de campo con el fin de mantener el nivel preestablecido de voltaje terminal del generador.

-Las diferencias básicas que existen entre los diferentes sistemas de excitación, se deben a los tipos de componentes que utilizan para su construcción, como son componentes electromagnéticos o electrónicos.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

[1] IEEE "GUIDE FOR IDENTIFICATION, TESTING AND EVALUATION OF THE DYNAMIC PERFORMANCE OF EXCITATION CONTROL SYSTEMS"; IEEE STD 421.2 -1990; IEEE 1990 New York.

[2] S.J. CHAPMAN; "MAQUINAS ELECTRICAS"; McGRAW-HILL, MEXICO, 1987.p.p.

[3] QUEZADA T., R.A. : "Seminario/taller sobre determinación de parámetros de reguladores de voltaje y velocidad"; PARSEICA, CEPAL, 1990.

CAPITULO II

MODELADO DE LOS SISTEMAS DE EXCITACION.

INTRODUCCION.

Los sistemas de excitación pueden ser representados por modelos matemáticos, el cual representa una similitud del funcionamiento de un sistema físico, expresado de forma matemática por ecuaciones, las cuales representan a los diferentes circuitos o partes del sistema real.

Los modelos matemáticos son representados por diagramas de bloques, que describe la función de transferencia de los diferentes circuitos que componen el sistema de excitación. En el presente capítulo se darán consideraciones generales para obtener el modelo matemático que represente a los sistemas de excitación.

2.1. CONCEPTOS GENERALES DE MODELADO.

Para obtener el modelo matemático de un sistema de excitación, debe realizarse un análisis de todos y cada uno de sus componentes, definir cuales de estos deben ser incluidos y formular posteriormente el diagrama de bloques genérico del regulador.

Tomando en cuenta que el modelo será aplicable en el análisis de estabilidad, a continuación se detallan las consideraciones que se deben tener presentes para obtener el modelo matemático.

Todos los elementos de protección y medición no son considerados para los modelos matemáticos usados en los estudios de estabilidad de sistemas, ya que estos no realizan ninguna función de regulación del voltaje.

Las fuentes de alimentación de c.a. y c.c., quedan fuera del modelo por no intervenir en la regulación.

El circuito de excitación inicial tampoco es considerado por funcionar sólomente durante el arranque.

El sistema de enfriamiento por no ser su función la de regular el voltaje del generador queda fuera del modelo matemático.

Los circuitos limitadores no son considerados, ya que estos intervienen sólomente cuando el generador rebasa los límites de operación, fijando los límites mínimo y máximo en los cuales no permite la acción de regulación automática del voltaje, por lo tanto quedan fuera del modelo.

El sistema de control manual y seguidor automático no son representados en los modelos matemáticos ya que no intervienen en la regulación automática.

Resumiendo: los circuitos y elementos involucrados en la acción de regulación automática de voltaje son los que se utilizan para representar el comportamiento del sistema de excitación de forma matemática, dentro de los cuales se pueden mencionar:

- 1.- Transductores de voltaje y corriente.
- 2.- Detector de voltaje.
- 3.- Amplificadores y sumadores.
- 4.- Sistema de estabilización.
- 5.- Sistema de referencia.
- 6.- Excitadores.
- 7.- Convertidores de c.a./c.c.

La disposición y características de estos elementos dependen del tipo de regulador. Ya que en reguladores antiguos, muchos de los elementos son electromagnéticos, en donde se utilizan máquinas rotativas como amplificadores, similares a los de corriente continua en sus diferentes conexiones, amplidinas, generador c.a., etc. En los reguladores recientes, los elementos están contruidos por componentes electrónicos.

2.1.1. TRANSDUCTORES.

Los transductores de voltaje se refieren a los transformadores que reducen el nivel de voltaje en terminales de la máquina o en otros puntos, a niveles manejables por el sistema de control, adicionalmente se incluye también, la

función de conversión de c.a./c.c.; un arreglo muy utilizado se muestra en la figura 2.1.

El modelo de un transformador, en unidades relativas, presenta una ganancia unitaria, con un tiempo de respuesta sumamente pequeño; el puente de rectificación igualmente responde rápidamente. La representación usual de estos elementos es:

$$G(S) = 1 / (1 + STR) \quad (2.1)$$

Donde la constante de tiempo TR es muy pequeña y muchas veces es despreciable. En forma similar sucede con los transductores de corriente.

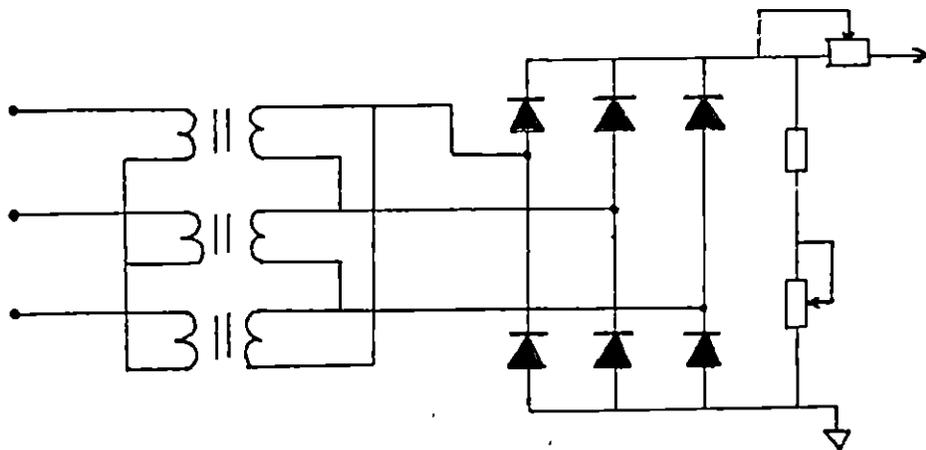
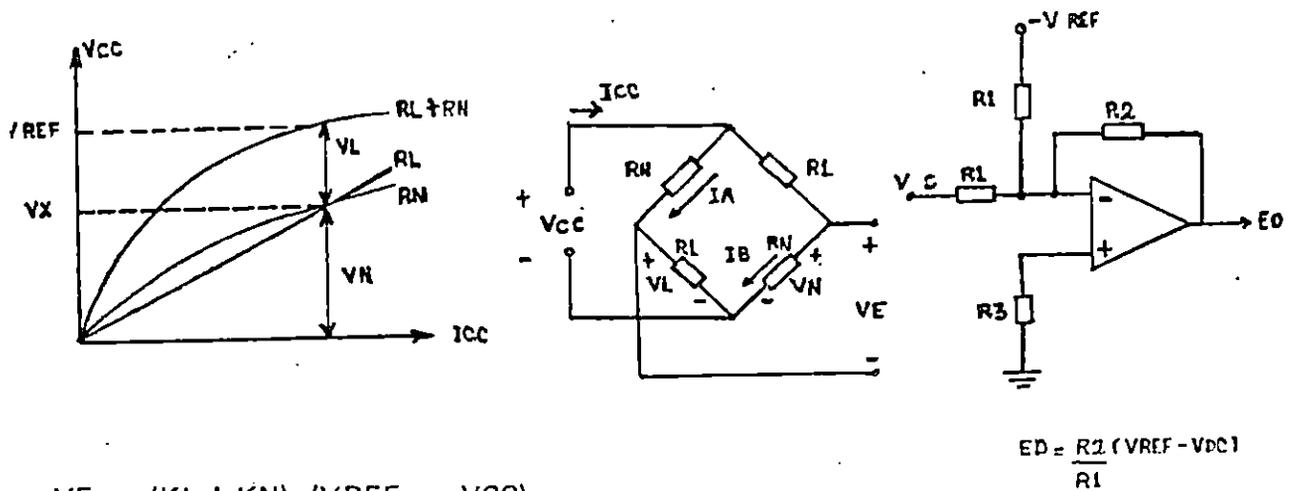


Figura 2.1. Transductor de voltaje.

2.1.2. CIRCUITOS DETECTORES.

Los detectores de error de voltaje comparan el voltaje del generador con una referencia y generan la señal de desviación de voltaje, proporcionando el índice de respuesta del regulador. Usualmente son elementos sin inercia y poseen una ganancia determinada que bien puede ser modificada por el usuario. Algunos ejemplos de detectores de error se muestran en la fig. 2.2.



$$VE = (KL + KN) (VREF - VCC)$$

KL : KN pendientes de la curva de RL y RN

RL : Resistencia lineal

RN : Resistencia no lineal

Figura 2.2. Detectores de error.

2.1.3. AMPLIFICADORES.

Los amplificadores han sido construidos de diversas formas, entre los más usuales existen rotativos, magnéticos y electrónicos; su función principal, es aumentar el nivel de alguna señal a valores tales que puedan manejar funciones de gran potencia o bien aumentar la rapidez de reacción del control.

Los amplificadores rotativos se refieren al tipo amplidina, los magnéticos utilizan reactores saturables y un bloque de rectificación, y los electrónicos utilizan circuitos integrados. En la fig. 2.3., se muestran algunos ejemplos de amplificadores.

El comportamiento de estos elementos puede ser representado como una ganancia y un retardo de tiempo, de la siguiente manera:

$$G(S) = K / (1 + ST) \quad (2.2)$$

En donde la constante de tiempo en los amplificadores electrónicos es despreciable.

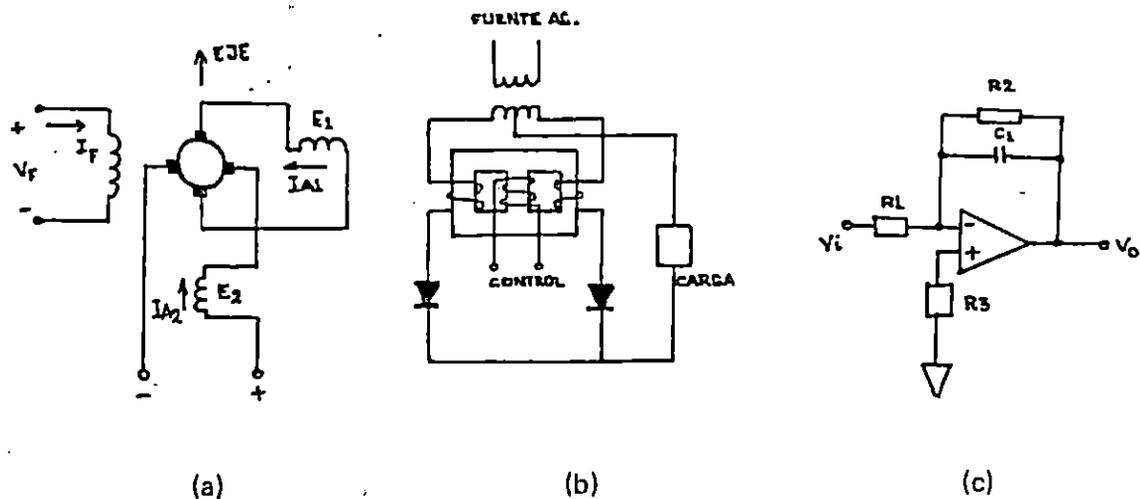


Figura 2.3. Amplificadores a) amplidina ; b) magnético; c) electrónico.

2.1.4. SISTEMA DE ESTABILIZACION.

Los sistemas de estabilización por lo general realimentan la señal del voltaje de campo al regulador, con el propósito de permitir un aumento en la ganancia de los amplificadores, de esta forma, se logra un control con alta velocidad de respuesta y en forma estable. La operación de este elemento se manifiesta durante un transitorio realizando la función de realimentación, en estado estable se bloquea, esto es, su salida es cero.

Dos ejemplos de estos elementos son el transformador de amortiguamiento y un circuito electrónico con un capacitor en la entrada. En la fig. 2.4, se esquematiza un circuito electrónico. La representación matemática esta dada por:

$$G(S) = STKd / (1 + STd) \quad (2.3)$$

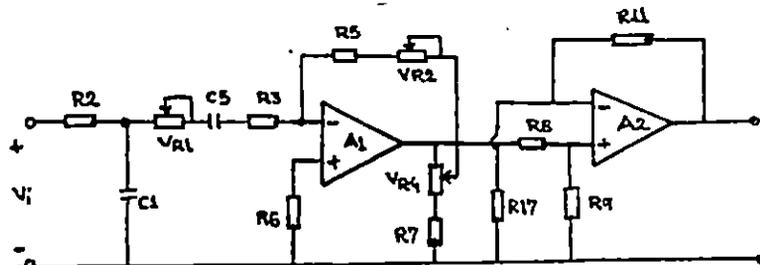


Figura 2.4. Estabilizador, circuito electrónico.

Existe una unidad adicional de estabilización denominada sistema de estabilización de potencia (PSS por sus siglas en inglés). Esta unidad es incorporada al sistema para llevar a cabo la estabilidad dinámica de los sistemas de potencia, proporcionando amortiguamiento positivo a las oscilaciones del sistema-máquina, y por lo tanto amortiguan las oscilaciones de líneas de enlace.

Este sistema cuenta con filtros de entrada para permitir el modelado del efecto de frecuencia de las oscilaciones del sistema, así como también cuenta con redes de adelanto-atraso de fase y un circuito en el cual se ajusta la ganancia del estabilizador y la frecuencia de corte en donde actúa; la señal de salida es adicionada a la señal de error del V_t como se representa en los diagramas de los modelos como una entrada adicional V_s .

2.1.5. SISTEMA DE REFERENCIA.

Los sistemas de referencia son básicamente resistencias variables dentro de alguna fuente de voltaje o corriente, a través de una división de tensión o corriente. Existen también algunos elementos de referencia que generan una señal de c.a., usando estructuras electromagnéticas (transformadores) con devanados variables. En diseños recientes, estos elementos están siendo modificados e integrando la electrónica digital para generar la señal de referencia. En general, estos elementos son operados por un motor de c.c., para facilitar su operación a distancia. En el modelo se representan por una entrada de voltaje V_{ref} .

2.1.6. EXCITADORES.

En la fig. 2.5, se muestran los tipos de excitadores más utilizados en los reguladores de voltaje.

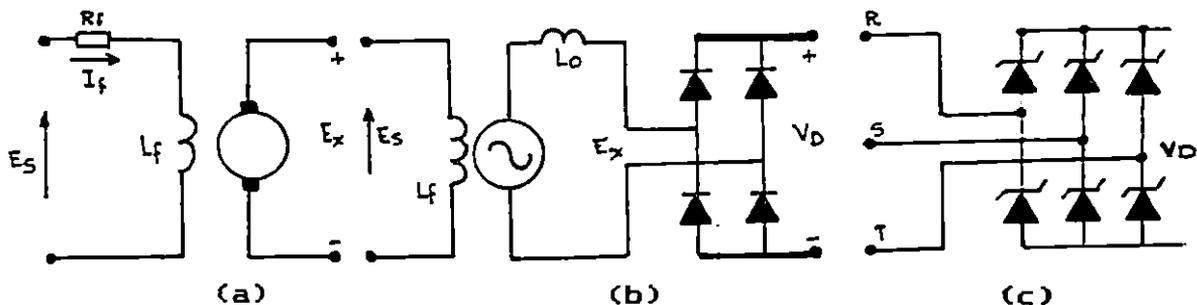


Figura 2.5. Tipos de excitadores. a) generador c.c.; b) generador c.a.; c) excitador estático.

2.1.6.1. Generadores c.c.

El modelo del generador de corriente directa puede ser obtenido siguiendo un procedimiento similar al descrito a continuación. Analizando el circuito de entrada se puede obtener:

$$E_s = I_f R_f + L I_f \quad (2.4)$$

El voltaje de salida se relaciona con la corriente de excitación I_f utilizando la curva de carga y característica de saturación.

$$I_f = (E_x/R_g) + I_f \quad (2.5)$$

$$I_f = S_e E_x \quad (2.6)$$

$$I_f = (E_x/R_g) + S_e E_x \quad (2.7)$$

$$I_{fbo} = E_{xb}/R_{gb} ; SE = R_{gb} S_e \quad (2.8)$$

donde:

S_e = es la función de saturación del generador c.c., que se muestra en la fig. 2.6.

E_{xb} = es el voltaje nominal en el entrehierro para circuito abierto.

R_{gb} = es la pendiente de la línea de entrehierro.

R_g = R_{gb} .

I_{fbo} = corriente base.

SE = función de saturación.

De la ecuaciones anteriores:

$$E_s = (R_f/R_{fb})(E_x + SE.E_x) + (L_f/R_{gb})(dI_f/dE_x)(dE_x/dt); \quad (2.9)$$

considerando:

$$L_{fu} = I_f(dI_f/dE_x)/E_x = E_{xo} \quad (2.10)$$

$$E_s = (R_f/R_{gb})(E_x)(1 + SE) + (L_{fu}/R_{gb})E_x \quad (2.11)$$

La ecuación anterior puede ser representada en un diagrama de bloques como se muestra en la figura 2.7.

Si el generador c.c. es excitado por sí mismo (excitación propia) la representación puede ser similar a la de la fig. 2.7, con la siguiente modificación.

$$K_E = R_f$$

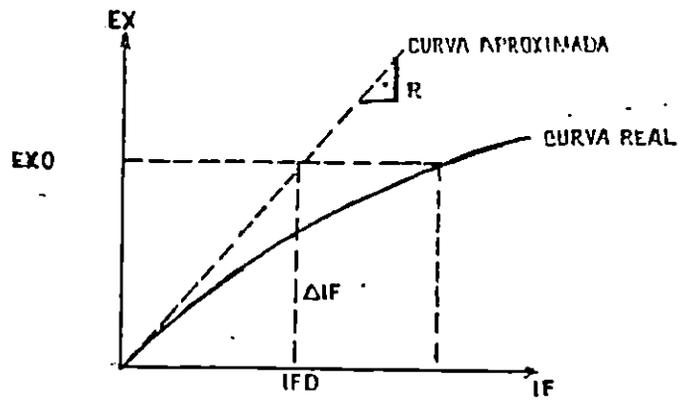
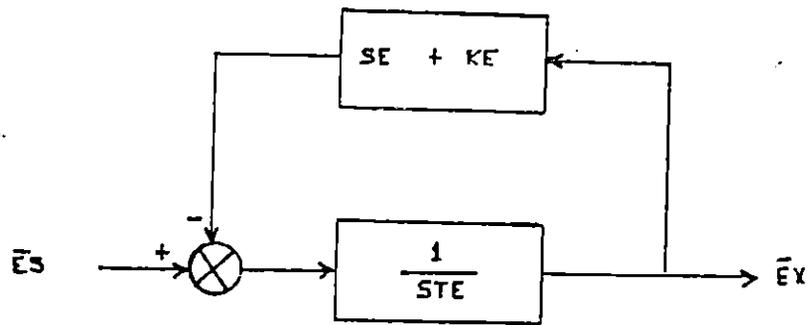


Figura 2.6. Curva de carga del generador de CC.



$$SE = R_f / R_{GB}$$

$$TE = L_{FU} / R_{GB}$$

$$KE = R_f / R_{GB}$$

Figura 2.7. Representación de la máquina cc, en diagrama de bloques.

2.1.6.2. Generador c.a.

El comportamiento de los generadores a.c. puede ser representado con una exactitud aceptable por el mismo diagrama de bloque y curva característica del generador c.c. El valor de K_e y T_e pueden normalmente ser tomado como constantes, independientemente de la condición de operación, cuando se modelan excitadores c.a.

Las nuevas recomendaciones de la IEEE presentadas en 1980, hacen el reconocimiento del efecto de reacción de armadura que presentan los generadores c.a., la cuál se representa con un bloque adicional tal como se muestra en la fig. 2.8, donde el parámetro KD relaciona la reactancia síncrona del excitador.

El sistema de rectificación, por lo general se considera como un sistema de primer orden, donde la ganancia en unidades relativas es unitaria y su constante de tiempo es muy pequeña (despreciable en la mayoría de los casos).

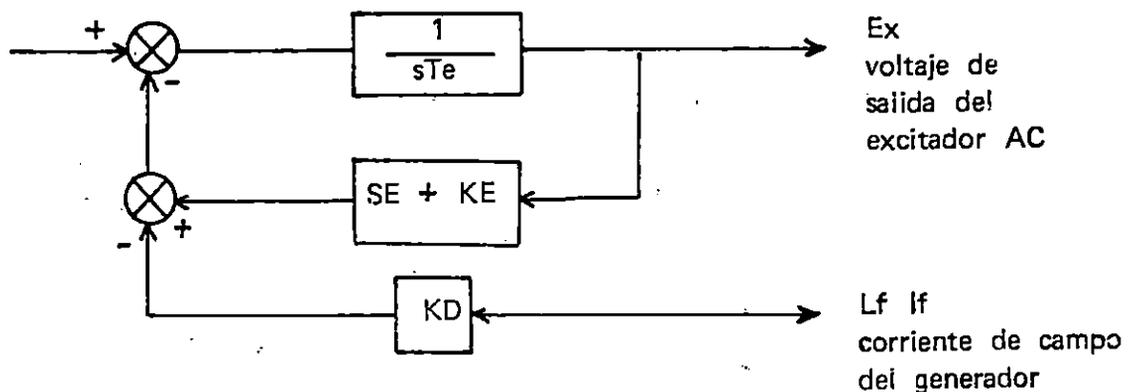


Figura 2.8. Representación de la máquina AC, en diagrama de bloques.

Los tipos de reguladores donde el control se ejerce en el sistema de rectificación y además, el generador c.a., tiene su propio control, el modelo del regulador no incluye la dinámica del generador c.a. debido a que no se encuentra en el lazo de control sino que se considera como la fuente de potencia para la excitación del devanado de campo del generador.

2.1.6.3. Excitador estático.

En el caso de los excitadores estáticos, donde la fuente de potencia se obtiene del servicio propio de la planta y el control del voltaje de campo se realiza directamente en el puente de rectificación, el modelo considera únicamente la dinámica del puente de rectificación de tiristores, el cuál puede modelarse como un sistema de primer orden con ganancia unitaria en unidades relativas y una constante de tiempo despreciable.

2.2. OBTENCION DEL MODELO MATEMATICO.

La obtención del modelo matemático se efectúa de la siguiente manera:

A partir del diagrama de bloques general del sistema, y de las consideraciones mencionas en la sección 2.1. se siguen los pasos descritos a continuación:

- 1.- Se determinan los circuitos que se tomarán en cuenta para la formulación del modelo.
- 2.- Se interconectan los circuitos definidos en el paso 1, siguiendo el diagrama de bloques general, para obtener el modelo global del sistema.
- 3.- Si es conveniente se traslada el modelo a uno típico propuesto por la IEEE, que cumpla con las características del sistema.

2.3. ESPECIFICACION DE LOS MODELOS.

La IEEE ha propuesto modelos típicos empleados para la representación de los diferentes sistemas de excitación, los cuales se describen a continuación.

2.3.1. IEEEET1, IEEEEX1, IEET1A.

Estos modelos son ampliamente utilizados para representar los sistemas de excitación con excitadores c.c., así como c.a., con sistemas de rectificación. Estos en su mayoría incluyen sistemas que actúan continuamente con excitadores rotativos.

2.3.2. IEEEET2, IEEEEX2, IEEX2A.

Estos modelos difieren de IEEEET1, etc., únicamente en la fuente utilizada para la realimentación de estabilización del sistema de excitación. Los modelos IEEEET2 e IEEEEX2 toman esta señal como proporcional a la salida de el elemento de control, mientras que el modelo IEEX2A toma esta señal como proporcional a la corriente de campo del excitador.

(Comparando los modelos, IEEEET1, etc., toman la señal de estabilización como proporcional al voltaje de salida del

excitador EFD).

Estos modelos son aplicables para los sistemas de excitación c.a., con sistema de rectificación. Un ejemplo es el "Brushless" de Westinghouse, puesto en servicio en 1966.

2.3.3. IEEET3, IEEEX3.

Estos dos modelos difieren únicamente en la colocación de el límite $V_{B\max}$. Ambos modelos pueden representar el sistema de excitación SCPT, fabricado por General Electric, el cual obtiene la potencia de excitación de un transformador.

2.3.4. IEEET4, IEEEX4, IEEET5, IEET5A.

Estos modelos representan sistemas de excitación antiguos en donde el excitador es una máquina c.c., por ejemplo:

General Electric	GFA4 Regulator
Westinghouse	BJ30 Regulator

La respuesta de estos sistemas es básicamente de dos diferentes velocidades, dependiendo de la magnitud del voltaje de error. Para errores pequeños, el ajuste se realiza por medio de un reóstato, grandes errores provocan que las resistencias sean rápidamente cortadas o insertadas.

La representación del excitador es la misma para los cuatro modelos.

Dependiendo de la magnitud del voltaje de error, se especifican diferentes modos del regulador.

2.3.5. SEXS.

Este modelo se utiliza para representar sistemas de excitación no específicos, pero representa las características generales de una extensa variedad de sistemas de excitación cuando son debidamente sintonizados. Es particularmente útil en casos en donde se desea representar un sistema de excitación en el cual el diseño detallado no es conocido.

La ganancia K , y la constante de tiempo TE , los límites E_{\max} , E_{\min} representan básicamente la fuente de potencia de excitación. Las constantes de tiempo TA y TB . proveen la

reducción de ganancia transitoria necesaria para permitir un comportamiento dinámico satisfactorio con elevada ganancia de estado estable.

Los parámetros típicos para el modelo SEXS, para representar un sistema desconocido asumiendo que se encuentra bien sintonizado son:

TA = 1 seg.
TB = 10 seg.
K = 200 a 400
TE = 0.05 seg.
E_{min} = 0
E_{máx} = 2.5 a 6 (dependiendo de la relación del equipo).

2.3.6. SCRX.

El SCRX, como el SEXS es un modelo de características generales, pero no puede representar cualquier modelo específico de sistema de excitación.

Estos sistemas son frecuentemente construidos con puentes rectificadores cuya corriente esta relacionada con su voltaje aplicado.

El SCRX puede representar un sistema de puente de rectificador alimentando ya sea de una planta auxiliar de suministro externo o de un transformador conectado directamente a los terminales del generador.

Este modelo distingue entre los sistemas de rectificación que tienen capacidad de corriente bidireccional, y aquellos que pueden portar corriente en la dirección positiva solamente.

2.3.7. EXDC2.

Este modelo es de acción continua, en los cuales existe un excitador rotario. El EXDC2 difiere de los modelos IEEET1, etc., solamente en que el regulador de voltaje tiene su fuente de suministro del generador o de un bus de voltaje auxiliar. Es por ello que los límites de salida del regulador son proporcionales a V_t .

2.3.8. EXAC1.

Este modela un sistema de excitación que utiliza un generador alterno con sistema de rectificación.

Este modelo es aplicable para simular el comportamiento del sistema de excitación Brushless de Westinghouse.

El efecto de desmagnetización de la corriente de carga, $L_{df}.I_{fd}$, es tomado en cuenta por el camino de realimentación el cual incluye KD. Esta constante es función del excitador alterno síncrono y de las reactancias transitorias.

La caída de voltaje de salida del excitador debida a la regulación del rectificador es simulada incluyendo la constante K_c y la aproximación a la curva de regulación del rectificador FEX.

En el modelo, una señal VFE, proporcional a la corriente de campo del excitador es derivada de la sumatoria de señales del voltaje de salida del excitador VE (multiplicada por el término $KE + SE$) y $L_{ad}.I_{df}$ (multiplicada por el término de desmagnetización KD). La señal de corriente de campo del excitador VFE es usada como la entrada para la realimentación del sistema de excitación.

2.3.9. EXAC2.

Este modelo es similar al EXAC1, excepto por la inclusión de dos lazos de realimentación de la corriente de campo del excitador, simulando la compensación de la constante de tiempo del excitador y los elementos limitadores de la corriente de campo del excitador. Este modelo es aplicable al sistema de excitación de Westinghouse Brushless de respuesta inicial elevada.

2.3.10. EXAC3.

En este modelo, el excitador emplea excitación propia y la potencia del regulador de voltaje es derivada del voltaje de salida del excitador. Por tanto, este sistema tiene una no linealidad adicional, simulada por el uso de un multiplicador, cuyas entradas son la señal comando del regulador de voltaje, VA, y el voltaje de salida del excitador EFD por KR. Este modelo es aplicable a sistemas tales como el ALTERREX de General Electric, que es un sistema de excitación que emplea un regulador de voltaje estático.

2.3.11. EXAC4.

Este modelo es aplicable en sistemas de excitación que utilizan un puente de tiristores en el circuito de salida del excitador, y el regulador de voltaje opera directamente en estos elementos.

El excitador alterno utiliza un regulador de voltaje independiente, para el control de su voltaje de salida en un valor constante.

La realimentación del sistema es frecuentemente realizada en el sistema de tiristores. Las constantes de tiempo TB y TC se utilizan para simular esta función de control. La ganancia equivalente y la constante de tiempo asociada con el regulador y/o el encendido de los tiristores pueden ser simuladas por KA y TA respectivamente.

Este modelo es aplicable al sistema de excitación ALTHYREX de General Electric y a los sistemas de excitación rotativos con tiristores.

2.3.12. EXST1.

Este modelo es aplicable a los sistemas de excitación en los cuales la potencia de excitación es suministrada a través de un transformador de los terminales del generador y alimentar el puente de rectificación, el cual es controlado por el sistema automático de regulación. El máximo voltaje de excitación disponible de estos sistemas esta directamente relacionado con el voltaje terminal del generador.

En este tipo de sistema, las constantes de tiempo inherentes del excitador son muy pequeñas y es por ello que normalmente no requieren de estabilización del excitador.

2.3.13. EXST2, EXST2A.

Algunos sistemas estáticos utilizan fuentes de corriente y voltaje derivadas de los terminales del generador, como componentes de la fuente de potencia. Estos sistemas de excitación son modelados por EXST2. Un ejemplo de tal sistema es el sistema de excitación estático de General Electric, frecuentemente referido como el sistema SCT-PPT o SCPT.

El EXST2A es idéntico al EXST2 excepto que en el EXST2A la salida del regulador es multiplicada y luego sumada a la salida del transformador. Esta modificación fue hecha para obtener mayor exactitud en los resultados.

2.3.14. EXST3.

Algunos sistemas estáticos utilizan cantidades internas dentro del generador (las cuales pueden ser representadas con un fasor que combine el voltaje y corriente de los terminales del generador), para formar la fuente de excitación. Tales sistemas emplean rectificadores controlados en el circuito de salida del excitador y son representados por este modelo.

2.3.15. IEETS.

Este modelo representa sistemas que responden rápidamente, particularmente sistemas estáticos. Debido a las constantes de tiempo pequeñas creadas en los lazos cerrados, PTI recomienda el uso de los modelos SCRX y SEXS siempre que sea posible. El modelo IEET1S tiene un swich que puede colocarse para indicar cuando es alimentado por el voltaje terminal.

2.3.16. MNEXL1, MNEXL2, MNEXL4.

Los límites mínimos de excitación son provistos en los sistemas de excitación para incrementos de EFD, durante voltajes elevados para mantener el estudio de estabilidad. Los modelos enlistados en la tabla 2.1, fueron desarrollados bajo contrato por la compañía Consolidated Edison de New York.

Tabla 2.1. Modelos desarrollados por la compañía Consolidated Edison de New York.

Modelo	Unidades desarrolladas por	Fabricante
MNEXL1	Ravenswood 3	Allis Chalmers
MNEXL2	Poletti	Westinghouse
MNEXL4	Ravenswood 1 y 2 Arthur Kill	General Electric

2.4. CONSTANTES DE LOS SISTEMAS DE EXCITACION.

En la tabla 2.2, se muestra la nomenclatura típica utilizada para representar las diferentes constantes de los modelos de los sistemas de excitación.

Tabla 2.2. Nomenclatura de las constantes típicas.

Nomenclatura	Constante
EFD	voltaje de campo
IFD	corriente de campo
IT	corriente terminal del generador
KA	ganancia del regulador
KE	constante del excitador
KF	ganancia del circuito estabilizador
KI	ganancia de corriente
KP	ganancia de potencia
KV	razón de ajuste aumento/reducción
SE	función de saturación del excitador
TA	constante de tiempo del regulador
TE	constante de tiempo del excitador
TF	constante de tiempo del estabilizador
TF1, TF2	constantes de tiempo del estabilizador
TR	constante de tiempo de la entrada del regulador
TRH	constante de tiempo del reostato
VR	voltaje de salida del regulador
VR _{máx}	máximo valor de VR
VR _{mín}	mínimo valor de VR
Vref	voltaje de referencia
VRH	voltaje de ajuste del reostato
VS	voltaje del estabilizador
VTH	voltaje obtenido por la suma vectorial de la señal de potencia y corriente
VT	voltaje de error de los terminales del generador

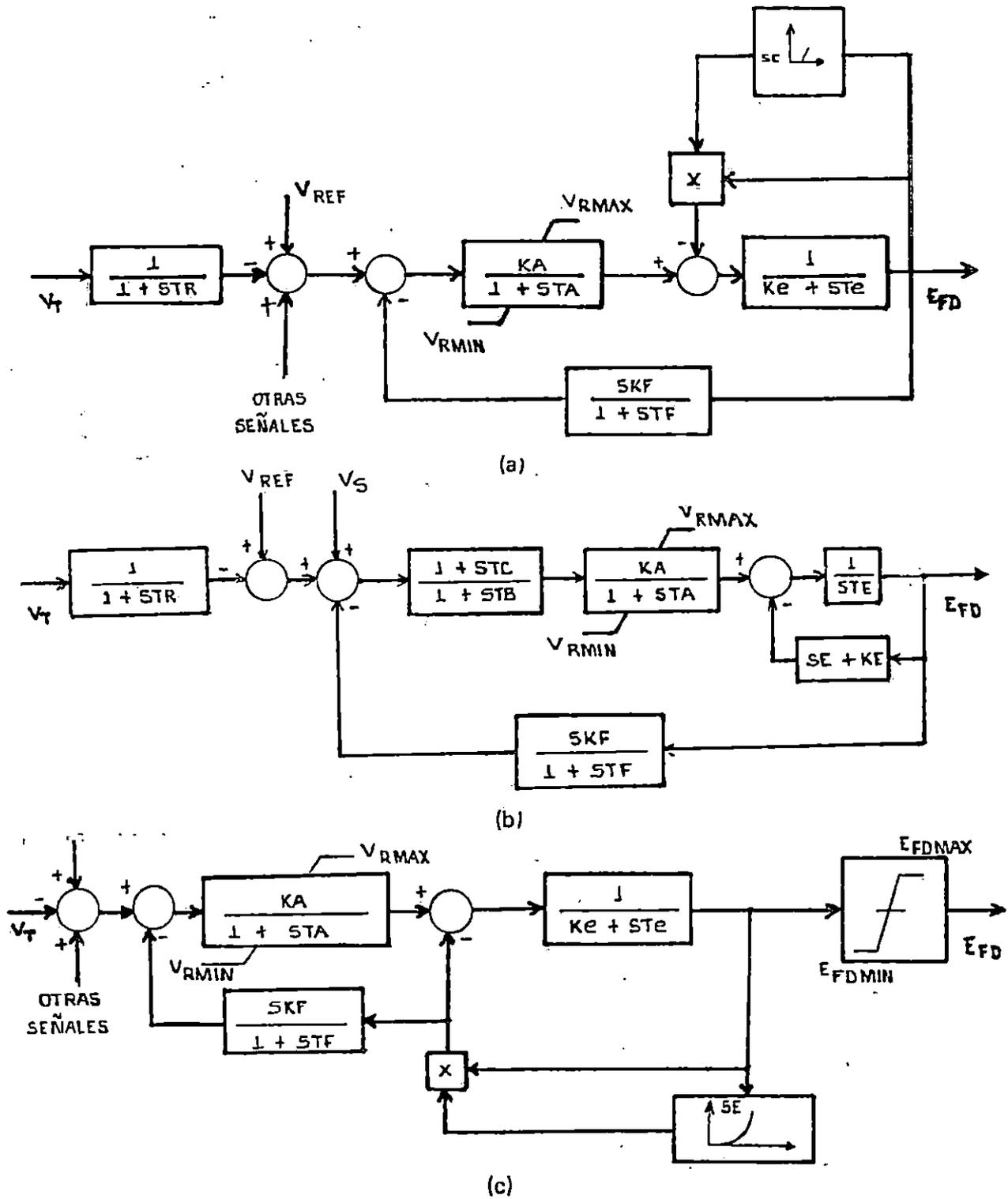


Figura 2.9. Modelos a) IEEET1; b) IEEEX1 ; c) IEEET1A.

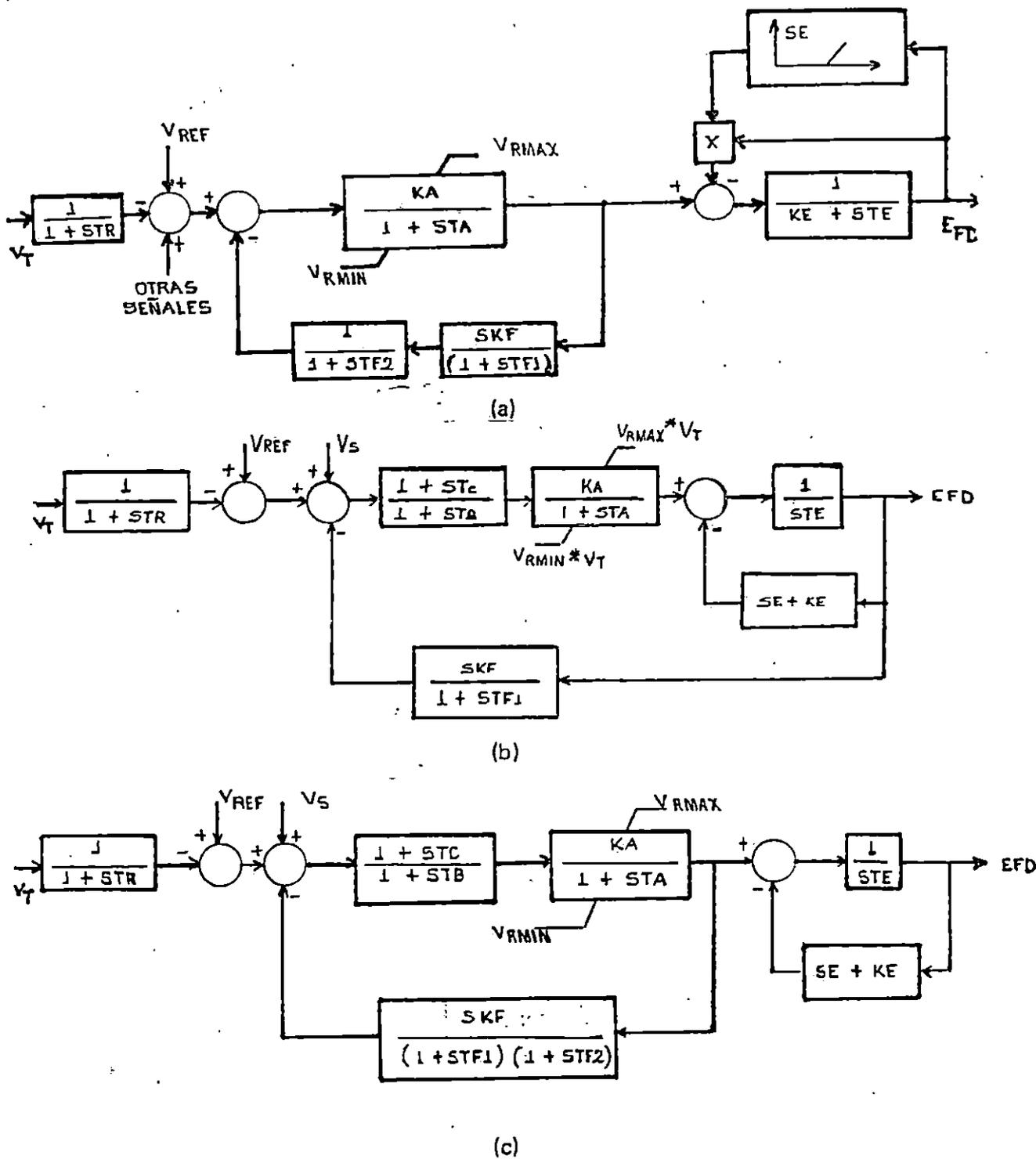
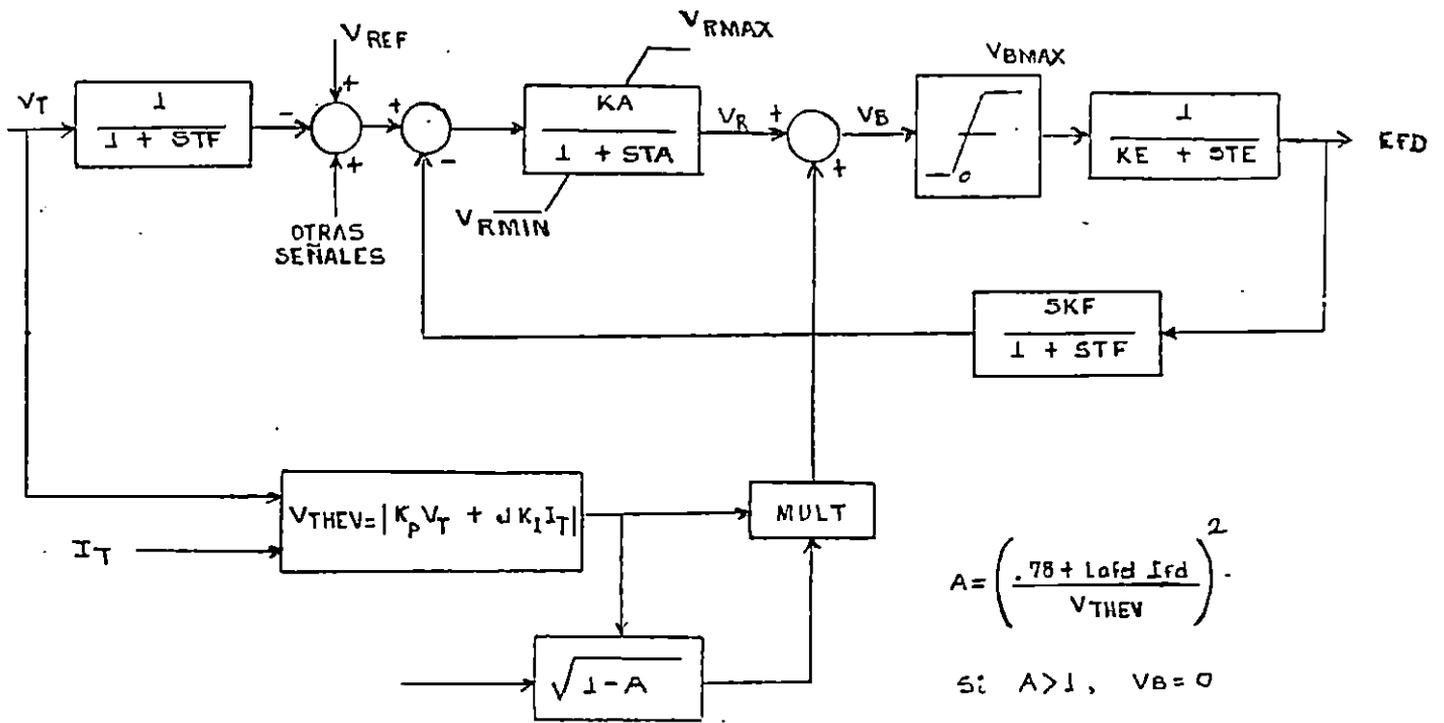


Figura 2.10. Modelos a) IEEET2 ; b) IEEEX2 ; c) IEEX2A.



$$A = \left(\frac{.78 + LaId Ifd}{V_{THEV}} \right)^2$$

si: $A > 1$, $V_B = 0$

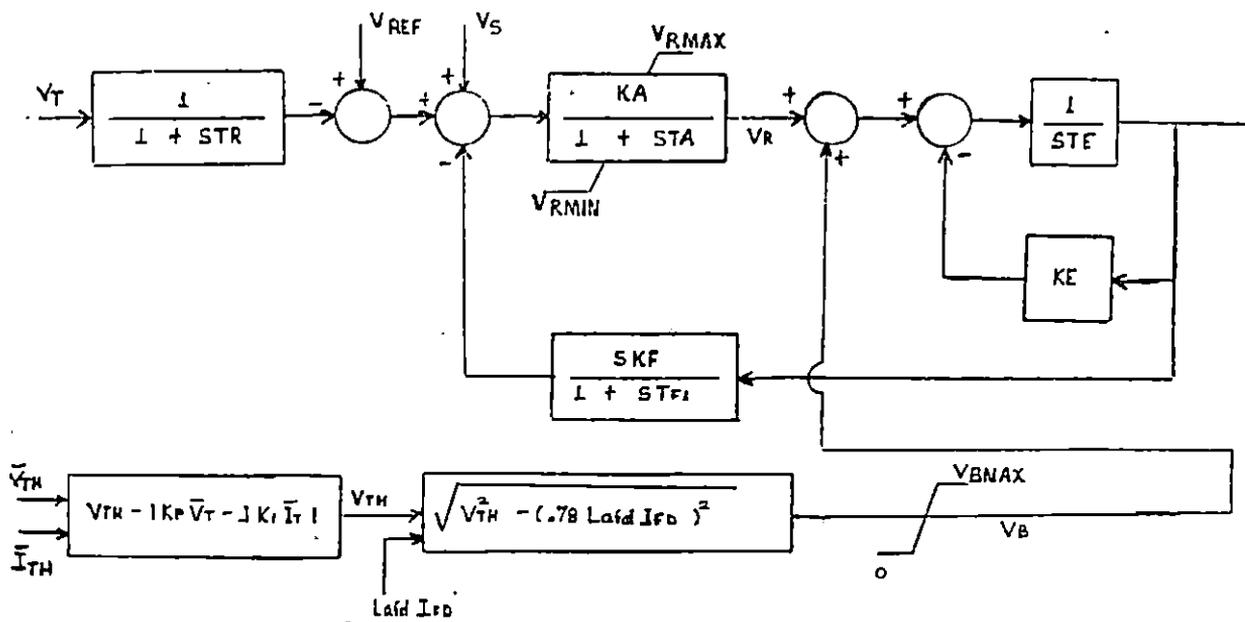
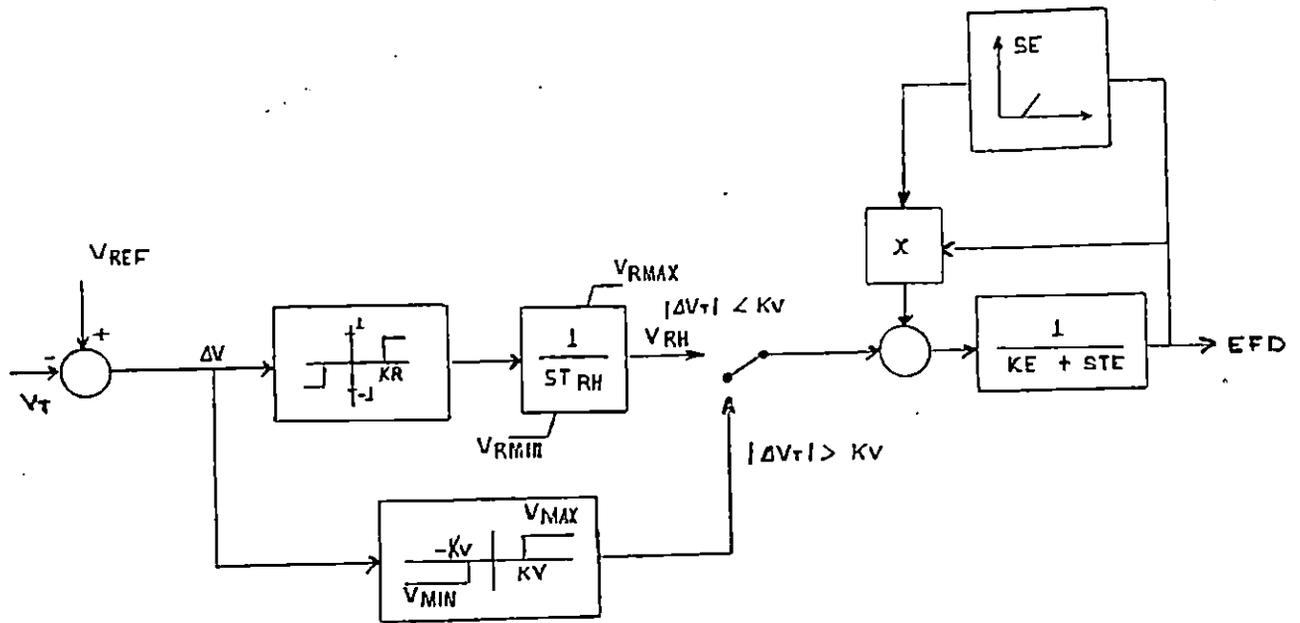
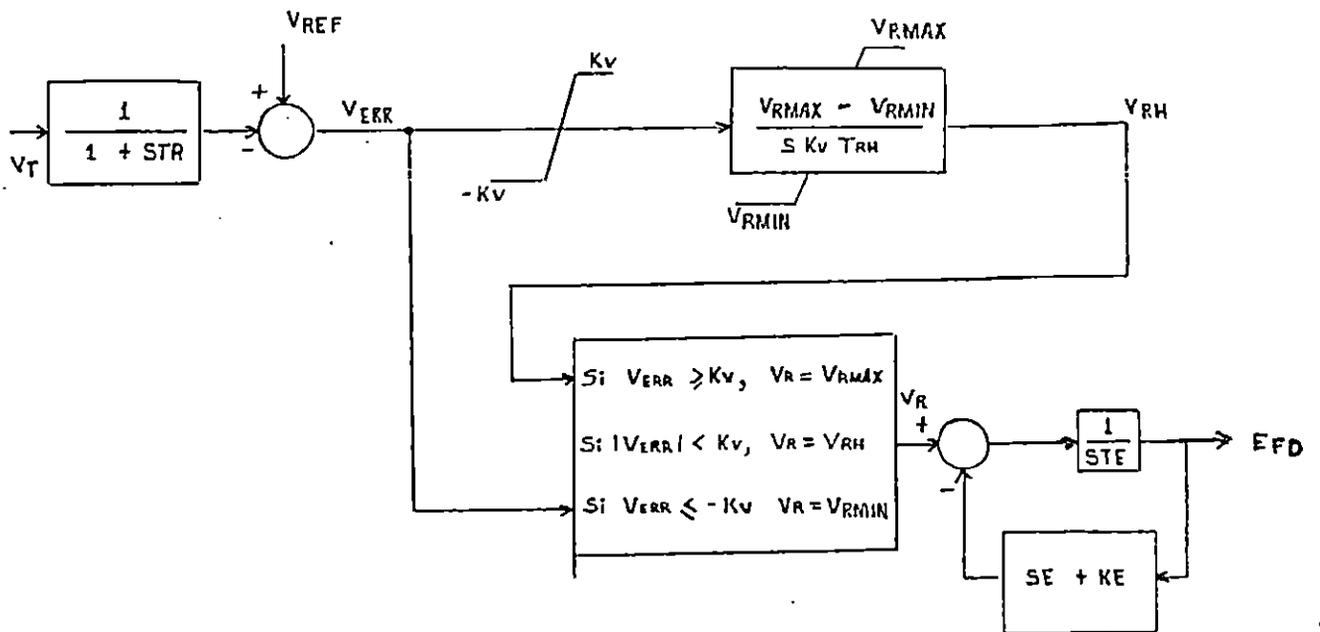


Figura 2.11. Modelos a) IEEET3 ; b) IEEEX3.



(a)



(b)

Figura 2.12. Modelos a) IEEET4 ; b) IEEEX4.

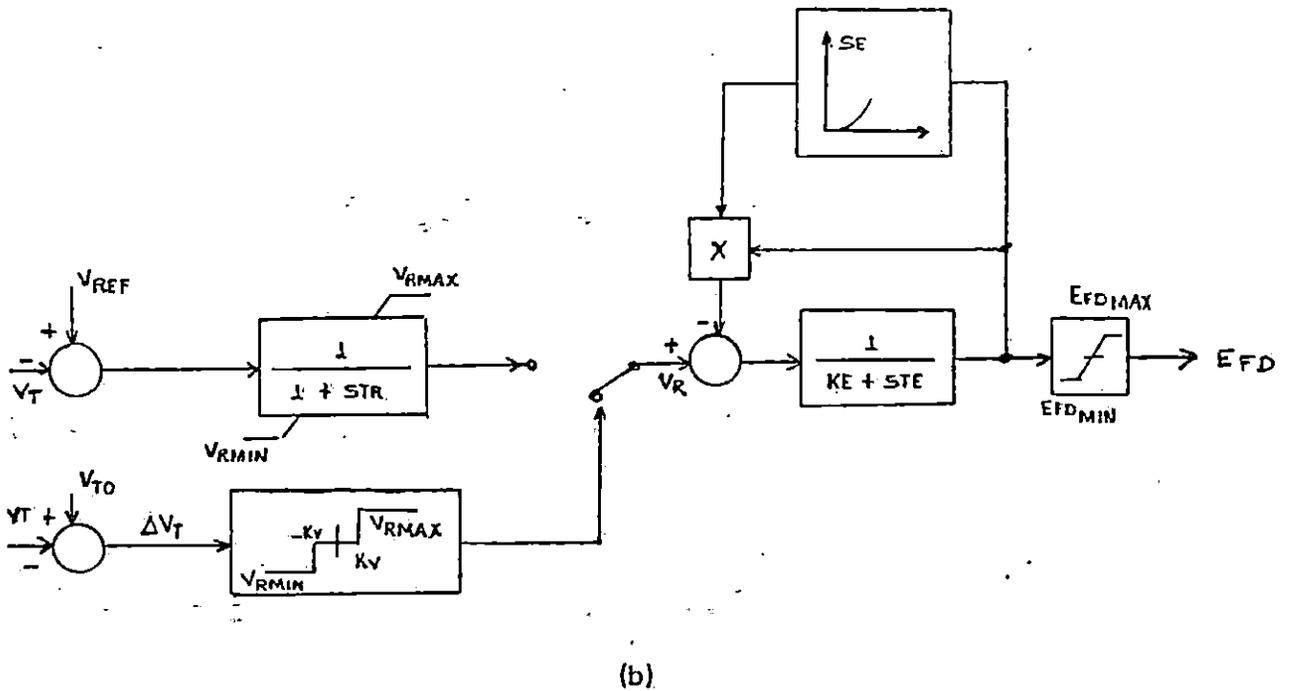
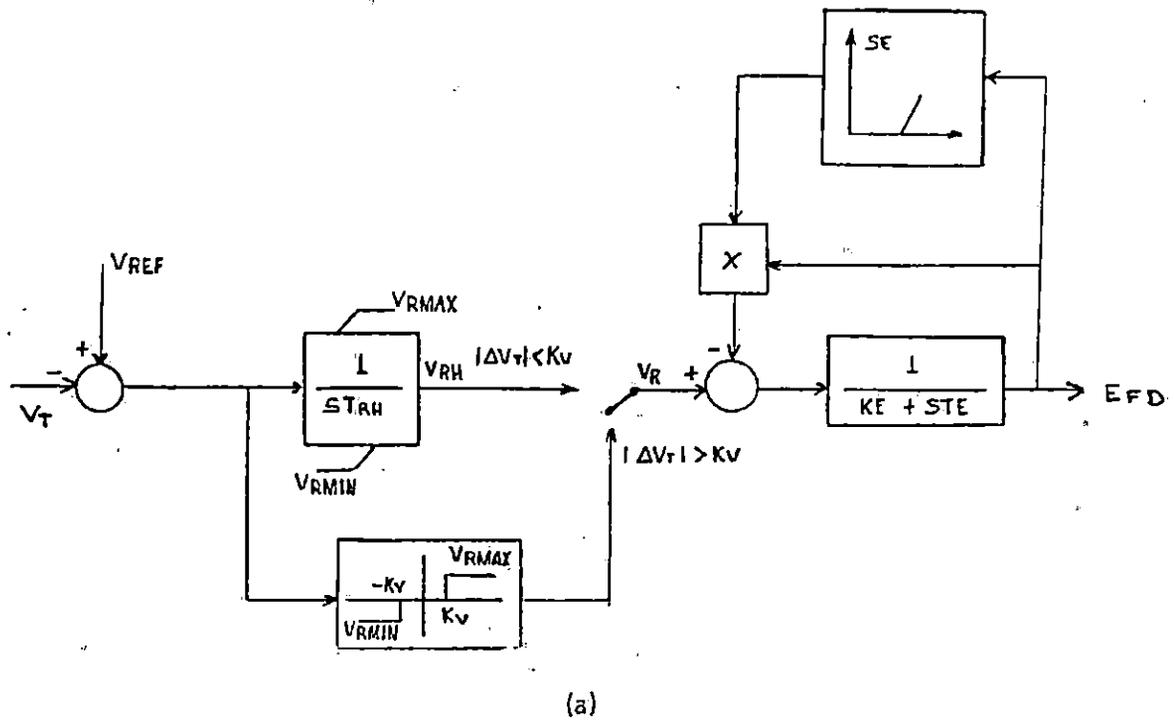


Figura 2.13. Modelos a) IEET5 ; b) IEET5A.

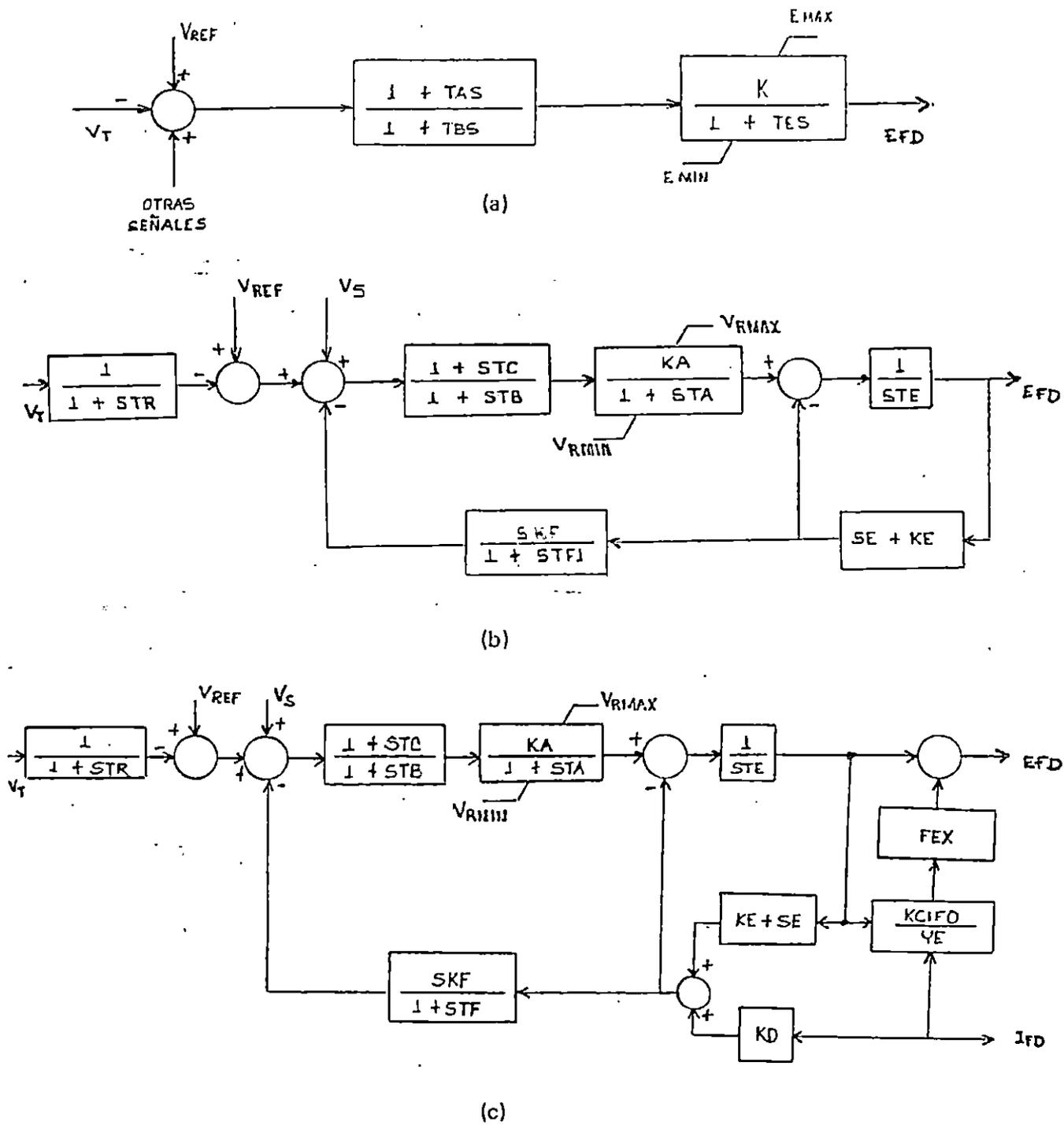
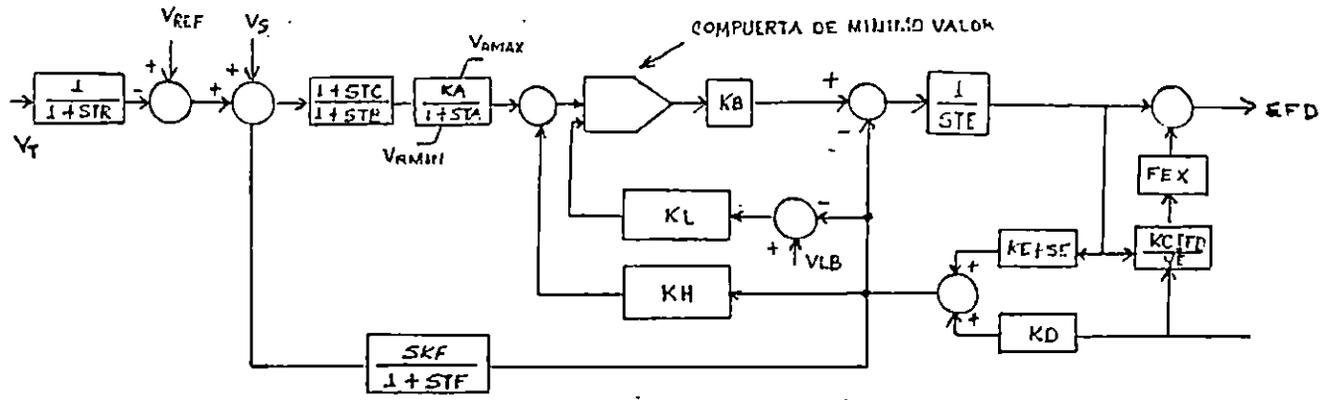
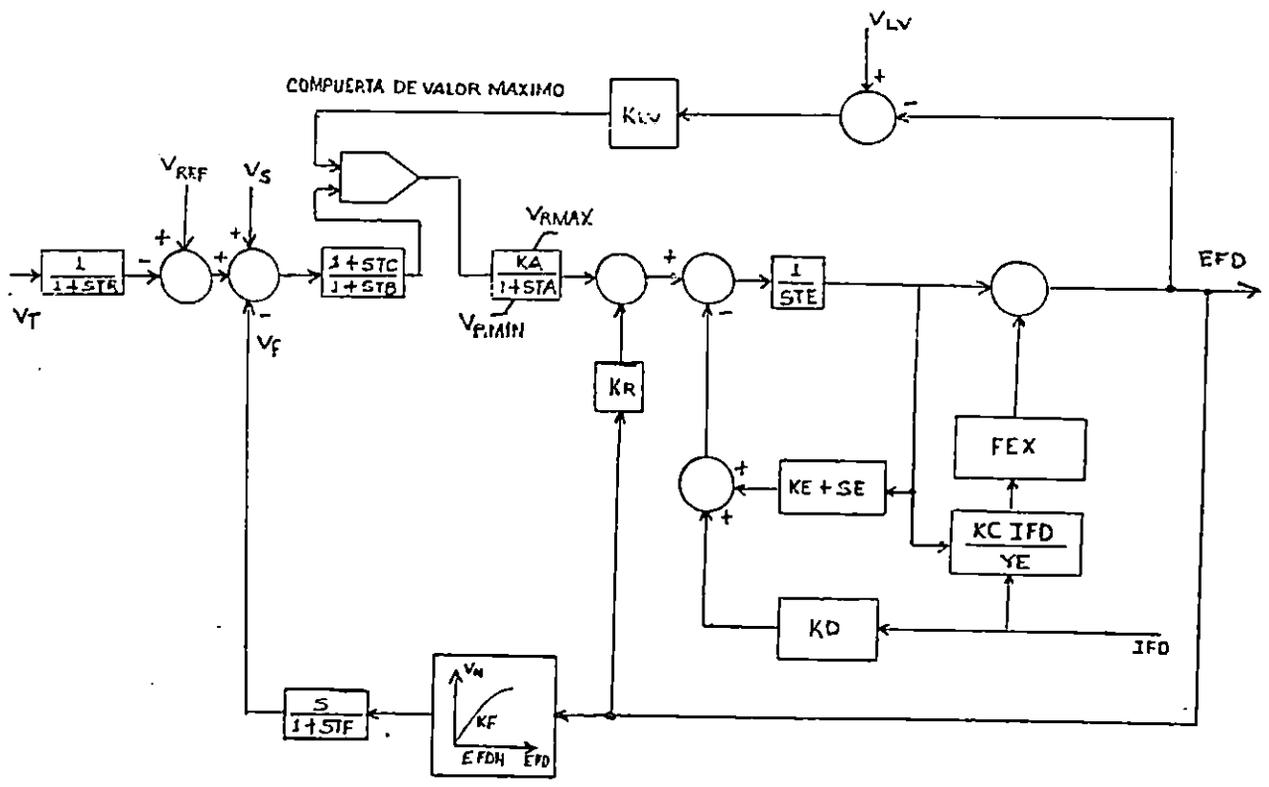


Figura 2.14. Modelos a) SEXS ; b) EXDC2 ; c) EXAC2.

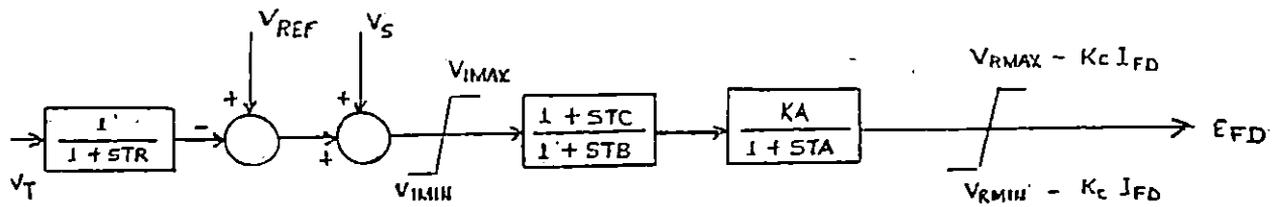


(a)

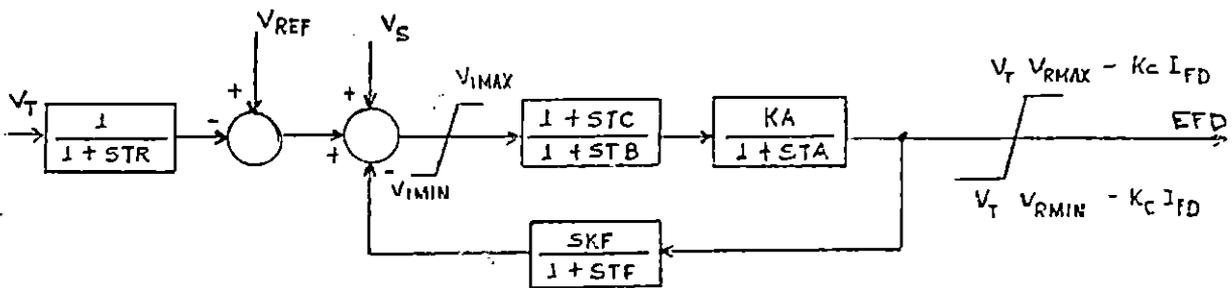


(b)

Figura 2.15. Modelos a) EXAC2 ; b) EXAC3.

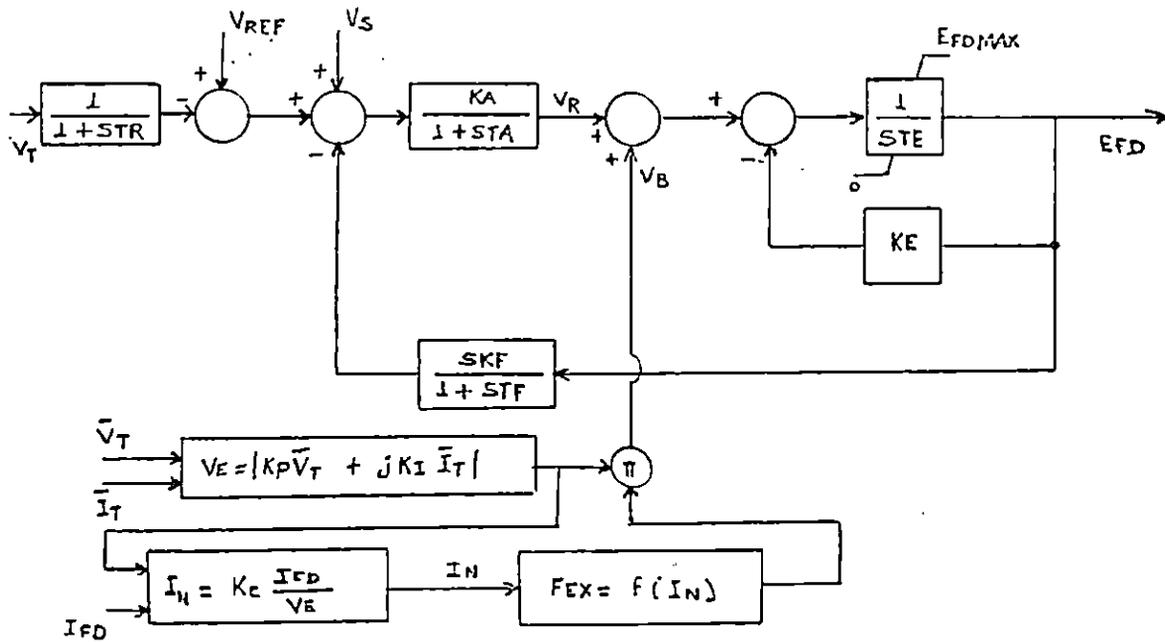


(a)

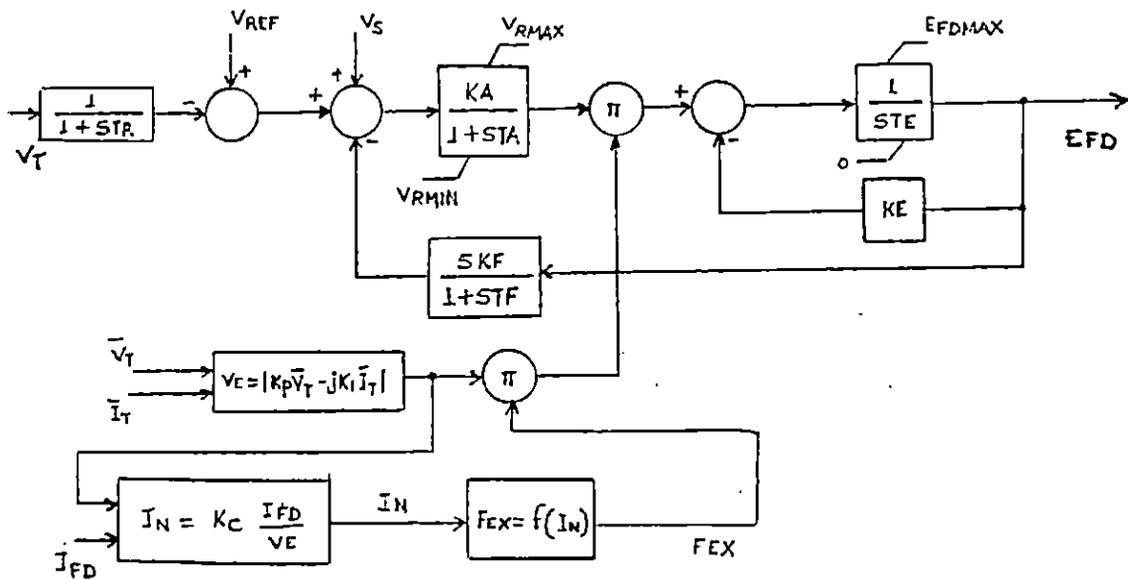


(b)

Figura 2.16. Modelos a) EXAC4 ; b) EXST1.

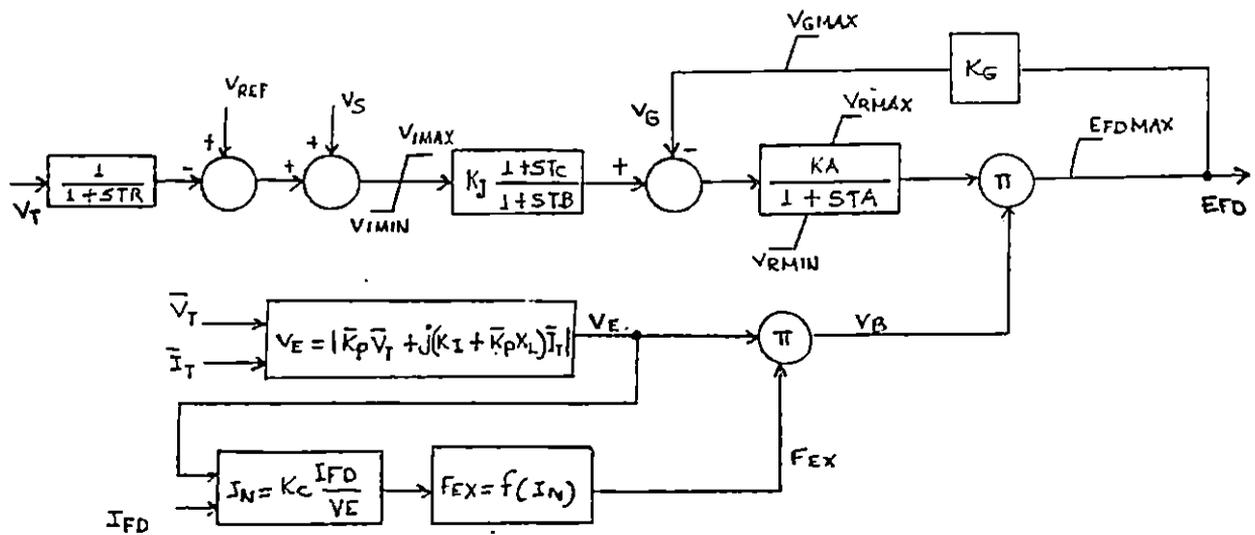


(a)

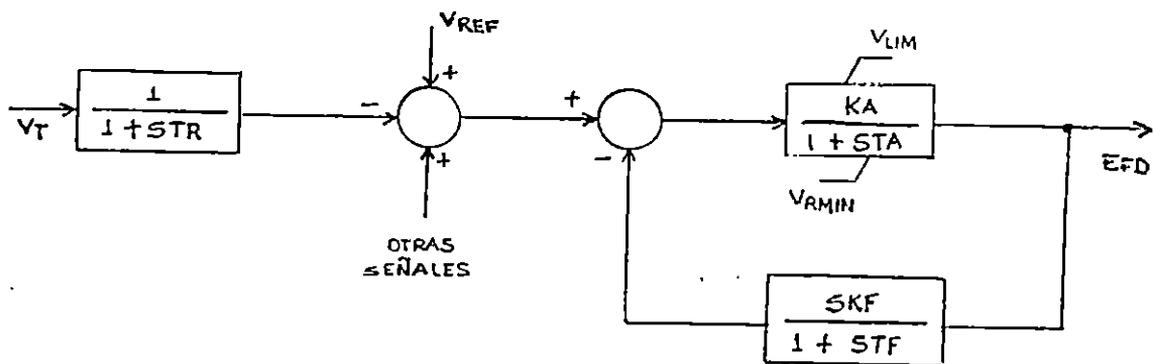


(b)

Figura 2.17. Modelos a) EXST2 ; b) EXST2A.



(a)



(b)

Figura 2. 18. Modelos a) EXST3 ; b) iEET1S.

2.5. CONCLUSIONES.

-Los sistemas de excitación pueden ser representados por modelos matemáticos, utilizando diagramas de bloques que describen la función de transferencia de los diferentes componentes que forman al sistema de excitación.

-Normalmente estos modelos matemáticos no presentan una correspondencia de uno a uno con los componentes del sistema físico, ya que estos presentan características de uso general. Si el modelo utilizado presenta las mismas características de ganancia y fase, como las del equipo real, se puede considerar adecuado para representar su comportamiento.

-Para escoger un modelo adecuado que represente a un sistema de excitación específico, deben tenerse muy en cuenta las consideraciones hechas en la sección 2.1.

-En lo posible, debe escogerse alguno de los modelos propuestos por la IEEE, aunque en algunos casos podrá utilizarse alguno de esos modelos con ligeras modificaciones según sea necesario.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- [1] Byerly, R.T. AND KIMBARK, E.W., EDS., "STABILITY OF LARGE ELECTRIC POWER SYSTEMS", NEW YORK: IEEE PRESS, 1974.
- [2] Quesada T. R.A.: "SEMINARIO/TALLER SOBRE DETERMINACION DE PARAMETROS DE REGULADORES DE VOLTAJE Y VELOCIDAD"; PARSEICA, CEPAL, 1990.
- [3] Power Technologies, Inc., "EXCITATION SYSTEM MODELS AND THEIR SUPPLEMENTARY CONTROLLER MODELS", septiembre, 1987.

CAPITULO III.

PRUEBAS PARA LA DETERMINACION DE LOS PARAMETROS DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DE EXCITACION.

INTRODUCCION.

Las pruebas necesarias de gran señal y pequeña señal, que se realizan en el sistema de excitación y que permiten determinar experimentalmente los parámetros más importantes del mismo, los que a su vez determinan el modelo matemático que representa el comportamiento del sistema de excitación, se describen en el presente capítulo.

3.1. PRUEBAS DE GRAN SEÑAL.

3.1.1. GENERALIDADES.

Los procedimientos generales para realizar la pruebas de gran señal no son posibles para todas las aplicaciones, ya que los procedimientos desarrollados en pequeñas unidades hidroeléctricas no sufren el mismo efecto en el sistema de potencia que una unidad de equipo grande. El efecto producido por las pruebas es determinado por la naturaleza del suministro al sistema de potencia.

Estas pruebas no son siempre justificadas, ya que el modelo puede ser utilizado para predecir la operación real en situaciones donde las pruebas no son prácticas.

Estas pruebas son utilizadas para demostrar que el fabricante ha cumplido con los requerimientos especificados por el comprador (pruebas de aceptación), para determinar parámetros para el modelo usado que predecirá el comportamiento ante disturbios, y para asegurarse que el equipo trabaje correctamente (pruebas de mantenimiento).

Las pruebas descritas en este capítulo generalmente son para respuesta positiva; por ejemplo, cuando una señal de error que simula un decremento en el voltaje terminal de la máquina síncrona es inducido, y el sistema de control de excitación responde para incrementarlo.

Las pruebas para determinar la respuesta negativa a una señal de error inducida que simule un incremento del voltaje terminal de la máquina síncrona, también puede ser requerida.

La mayoría de los sistemas tienen respuestas asimétricas debido a las diferentes fuerzas de acción positivas y negativas. Los métodos de prueba y criterios para su desarrollo para respuesta negativa son similares a los de respuesta positiva.

3.1.2. PRUEBAS DE FÁBRICA.

La mayoría de pruebas de gran señal son desarrolladas para permitir determinar que el fabricante completó con los requerimientos especificados por el comprador, por ejemplo: techo de voltaje, techo de corriente, respuesta de voltaje y respuesta nominal.

El criterio de funcionamiento de gran señal es utilizado por el fabricante para determinar que el equipo cumpla las especificaciones del usuario. Generalmente las pruebas de fábrica son frecuentemente desarrolladas solo en prototipos de equipos nuevos.

3.1.3. PRUEBAS DE CAMPO.

El procedimiento que se realiza para cualquier prueba de campo, se determina tomando en consideración el efecto de la prueba sobre el sistema de potencia.

Las pruebas de campo se pueden clasificar en cuatro categorías principales:

1. Pruebas seguidas inmediatamente después de la instalación del equipo nuevo o seguidas a la reparación de equipo averiado.
2. Pruebas para determinar los datos nominales del equipo especificados por el comprador.

3. Pruebas para determinar los parámetros para usar en modelos o validar resultados del modelo estudiado.
4. Pruebas de diagnóstico y mantenimiento.

Las pruebas adecuadas para demostrar la validez de los datos nominales especificados por el fabricante, son desarrolladas en el sitio de instalación y en la fábrica.

Estas pruebas son frecuentemente desarrolladas en solamente una unidad en el caso en que son varias unidades instaladas bajo un mismo contrato. Algunas pruebas no son prácticas para ser realizadas bajo ciertas condiciones, utilizando los resultados del modelo estudiado para obtener la información requerida, prediciendo la operación real de la máquina sincrónica.

Las pruebas de modelado son desarrolladas para determinar los parámetros del modelo estudiado y validar los resultados.

Algunas de las pruebas que se recomienda realizar bajo condiciones normales a plena carga, cuando sea posible es preferible que las pruebas se realicen con la máquina sincrónica en circuito abierto, así se elimina cualquier disturbio que pueda afectar al sistema de potencia.

Las pruebas asociadas a la determinación del modelo tienen diferentes requerimientos, los cuales dependen del tipo de sistema de control de excitación probado.

Ya que la mayoría de los modelos son usados para estudios de estabilidad, es importante que las pruebas cuyo propósito es definir el modelo, sean desarrolladas tan cerca como sea posible a las condiciones de falla. Por tanto estas deberán ser acondicionadas debidamente.

Las pruebas de campo para evaluar el funcionamiento del sistema de excitación y para revisar la operación de las funciones del sistema de excitación, incluyendo dispositivos de límites y protección, deben ser realizadas a intervalos de cinco años o aún más frecuentemente. La coordinación de las funciones de límites y protección del sistema de excitación con el ajuste de los relés de protección deben verificarse durante estas pruebas.

3.1.4. RESPUESTA EN EL TIEMPO.

Los techos de voltaje, tiempo de respuesta del voltaje, respuesta de voltaje, y respuesta nominal deben ser

determinados de la respuesta en el tiempo del voltaje del sistema de excitación. Resulta benéfico registrar los datos de las variables del sistema de control de excitación cuando se producen cambios de corta duración en el regulador de voltaje de error de la máquina síncrona, correspondientes a caídas de voltaje específicas en el voltaje terminal. Para conectar el equipo utilizado para recopilar los datos, por ejemplo un oscilógrafo, es necesario conectar transductores para convertir el voltaje terminal y el voltaje de campo de la máquina en señales bajas de c.c., que sean compatibles con el equipo. El oscilógrafo debe poseer cuatro o más canales suficientes para grabar las señales procedentes del transductor representativo de los puntos de prueba, tales como el voltaje de error, el voltaje y la corriente de campo y el voltaje terminal de la máquina.

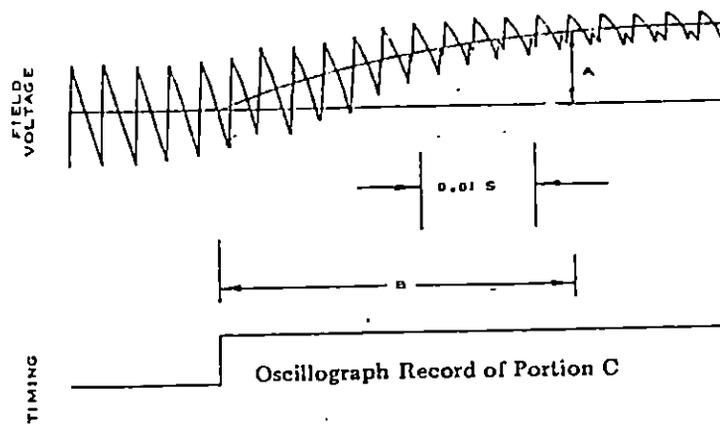
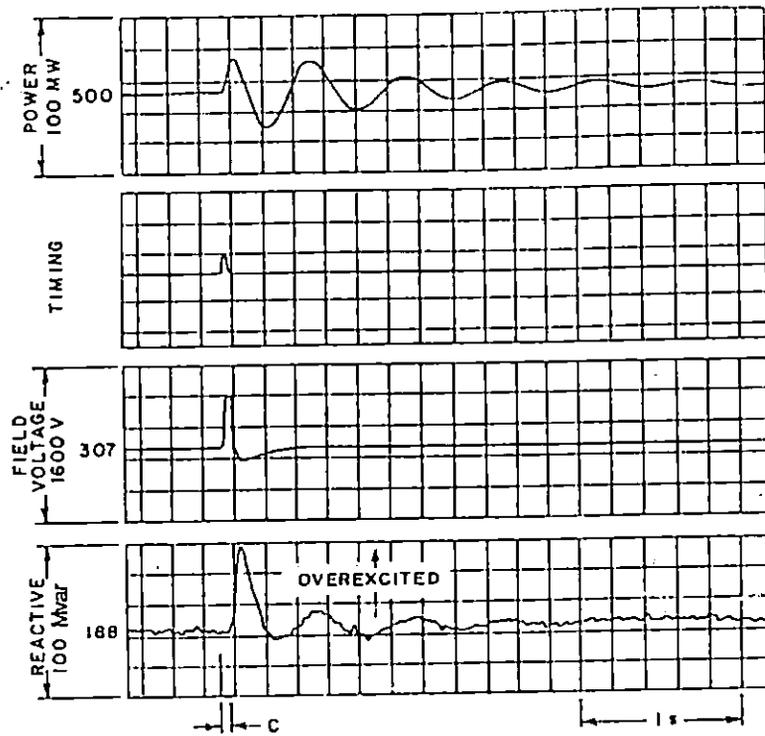
Una respuesta típica en el tiempo es obtenida con el voltaje del excitador inicialmente al voltaje de campo nominal de la máquina síncrona, al cual el excitador es aplicado. Algunos medios son utilizados para provocar cambios de corta duración en el regulador del voltaje de error de la máquina, correspondientes a decrementos específicos en el voltaje terminal. La duración de los cambios debe ser lo suficientemente corta para mantener las cantidades del control del sistema de excitación dentro de los márgenes aceptables.

Para sistemas de excitación con alta respuesta inicial, la señal de error necesita ser aplicada solamente por un tiempo muy corto debido a la velocidad de esos sistemas.

Todos los circuitos del sistema de estabilización del control de excitación, u otros circuitos de realimentación que sean parte del regulador deberán ser ajustados como en una operación real, donde sea posible practicarla. El sistema estabilizador de potencia PSS no deberá estar en operación. En la fig. 3.1, se muestran resultados de pruebas de campo hechas con una elevada respuesta inicial, para determinar los techos de voltaje y la respuesta en el tiempo del sistema de excitación. Los datos obtenidos son representativos del equipo utilizado para la recopilación de los datos, pero no son representativos de todos los sistemas de alta respuesta inicial.

Los datos obtenidos pueden ser usados para obtener :

- a) Los valores máximos y mínimos de los techos de sobre y sub excitación.
- b) El tiempo de estabilización de la tensión de campo.
- c) Comprobación de las ganancias del sistema.



A : 95 % de la diferencia entre el techo de voltaje y la razón de voltaje de campo.

B : Tiempo de respuesta del voltaje del sistema de excitación.

Figura 3.1. Pruebas de campo de gran señal (10 % de voltaje de error) de un sistema de excitación con respuesta inicial alta.

La respuesta en el tiempo es frecuentemente obtenida por dos métodos:

1. Se introduce una señal en el punto de suma donde la señal de error es generada. Este método es algunas veces fácil de implementar, pero se debe contar con un graficador.
2. La señal del voltaje terminal es forzada en el circuito sensor para reflejar una desviación del cambio del voltaje terminal realizándose una regulación de potencia reactiva.

Esta prueba se realiza efectuando dos rechazos de potencia reactiva con el generador conectado al sistema en condiciones de sub y sobre excitación.

3.1.5. CONSIDERACIONES DE LIMITADORES Y PROTECCIONES.

Las pruebas de gran señal con la máquina síncrona conectada al sistema de potencia, requiere consideraciones de los ajustes de los limitadores y dispositivos de protección. Además esta prueba provee una medida de evaluación para revisar la operación y ajustes de estos dispositivos.

3.1.6. TECHO DE VOLTAJE.

La medición de los techos de voltaje con la máquina síncrona en circuito abierto, puede efectuarse directamente, excepto en el caso de que un sistema de excitación utilice las señales de voltaje y corriente de la máquina síncrona como entradas al sistema de control de excitación, como por ejemplo el sistema de excitación Brushless.

La medición de techos de voltaje en una máquina con carga es posible únicamente cuando el voltaje del sistema de excitación puede alcanzar el valor del techo y retornar al valor inicial en una duración suficientemente corta para que las cantidades restantes del sistema de control de excitación permanezca en límites aceptables de operación. Cuando los techos de voltaje no pueden ser alcanzados durante la operación, los datos pueden ser extraídos de respuestas en el tiempo, para condiciones que produzcan condiciones tan cercanas tanto como sea posible al techo.

Los datos obtenidos de esta prueba son utilizados generalmente para verificar parámetros del modelo, para así ser utilizado para determinar el valor del techo de voltaje.

Los techos de voltaje deberán ser determinados antes de que la acción del limitador ocurra.

3.1.7. TIEMPO DE RESPUESTA DE VOLTAJE.

El tiempo de respuesta del sistema de excitación en la dirección positiva puede ser determinada de la respuesta en el tiempo del voltaje del sistema de excitación, donde el tiempo es medido desde el tiempo cuando el disturbio es iniciado hasta que la respuesta en el tiempo alcanza el 95% de la diferencia entre el techo de voltaje y la razón del voltaje de campo.

3.1.8. RESPUESTA NOMINAL.

Esta basada sobre una aproximación lineal de la respuesta en el tiempo del voltaje del sistema de excitación para los primeros 0.5 segundos. Se traza una línea recta de tal manera que el área bajo la línea y el área bajo la respuesta en el tiempo sean las mismas en el intervalo de 0.5 segundos de interés. En la figura 1.4, la línea ac es elegida para hacer que las áreas sombreadas sean iguales. El voltaje del sistema de excitación a 0.5 segundos en esta línea (punto c) es usado para calcular la respuesta nominal. El incremento en el voltaje del sistema de excitación (e_{ac}) se divide entre el voltaje nominal de campo (e_{ao}) y el intervalo de tiempo ($t_{oe} = 0.5$ seg.) para obtener la respuesta nominal en p.u. del voltaje de campo por segundos. La determinación de la respuesta nominal requiere que el voltaje del sistema de excitación inicialmente sea igual al voltaje nominal del campo de la máquina sincrona. Puede que no sea posible operar con este voltaje inicial del campo debido a las restricciones del voltaje y la potencia reactiva del sistema de potencia.

3.1.9. TECHO DE CORRIENTE.

Las pruebas de campo del techo de corriente raramente pueden resultar prácticas porque se requiere de una corriente excesivamente alta, además de que el impacto de este disturbio en el sistema de potencia raramente es aceptable.

Cuando la corriente de campo está limitada a algún valor predeterminado por el uso de un limitador instantáneo de corriente, las pruebas pueden ser ejecutadas para comprobar que el limitador funciona bien. Pueden utilizarse medios analíticos para determinar el ajuste deseado del limitador a partir de los resultados de las pruebas a un menor valor de corriente.

3.1.10. PRUEBAS DE FALLA.

Las pruebas de falla incluyen a fallas trifásicas, fallas línea a línea o fallas línea a tierra, para probar la operación de la protección en la línea de transmisión o la protección de la máquina síncrona. También provee una buena oportunidad para evaluar el comportamiento del sistema de excitación bajo condiciones de falla. La recopilación de los datos de estas pruebas provee un método para obtener valores adecuados para representar el comportamiento de gran señal bajo condiciones aproximadas a las condiciones típicas de falla.

3.1.11. DISTURBIOS DEL SISTEMA DE POTENCIA.

Para la verificación de los parámetros del modelo, el registro de los datos es requerido durante disturbios en el sistema de potencia. El equipo utilizado para recopilar los datos deberá ser instalado en los puntos de interés del sistema de control de excitación cuando se produce un disturbio, tales como el voltaje de campo y el voltaje terminal de la máquina síncrona, el estabilizador del sistema de excitación y los límites mínimos y máximos de operación; utilizando transductores de acuerdo a la señal que se va a monitorear, así como ajustar debidamente el equipo con un ancho de banda apropiado para las señales a monitorear.

3.2. PRUEBAS DE COMPORTAMIENTO DE PEQUEÑA SEÑAL.

La función de transferencia se utiliza para describir el comportamiento dinámico de los componentes de un sistema de excitación, la cual puede ser derivada de los datos de comportamiento de pequeña señal de los componentes.

Estos datos pueden ser obtenidos por pruebas de respuesta transitoria en el dominio del tiempo o pruebas de respuesta a la frecuencia. Uno de los usos importantes de la función de transferencia obtenida de estas pruebas es en el desarrollo de modelos para computadoras digitales o analógicas, para la simulación dinámica del sistema de potencia.

Los métodos de prueba utilizados para las pruebas de pequeña señal, para determinar de una forma experimental los parámetros del sistema de excitación son:

- 1.- Respuesta transitoria.
- 2.- Respuesta a la frecuencia.

3.2.1. RESPUESTA TRANSITORIA.

Determina la función de transferencia del circuito en prueba, al ser sometido a una señal de entrada transitoria (escalón, o rampa). El análisis se basa en el estudio de la gráfica de salida. La salida de respuesta de segundo orden ante una entrada escalón, se muestran en la fig. 1.5, cuyas características son:

- a) Tiempo de retardo (T_d):
es el tiempo que tarda la respuesta en alcanzar por primera vez la mitad del valor final.
- b) Tiempo de crecimiento (T_r):
es el tiempo requerido para que la respuesta crezca del 10 al 95% de su valor final.
- c) Tiempo de pico (T_p):
es el tiempo en el cuál la respuesta alcanza el valor máximo de la primera oscilación.
- d) Tiempo de establecimiento (T_s):
si el sistema se considera de segundo orden, es el tiempo requerido para que la respuesta alcance condiciones estables o entre una banda de $\pm 2.5\%$ del valor final. Para fines de cálculo se puede considerar como 4 veces el valor de la constante de tiempo del regulador.
- e) Constante de tiempo (τ):
si el sistema es de primer orden, se define como el tiempo requerido para que el sistema responda a un cambio súbito de su referencia. Para fines de cálculo se considera el 63.2% del valor final.

- f) Sobreimpulso (M_p):
es el máximo valor alcanzado por la respuesta en su primera oscilación.
- g) Razón de amortiguamiento (ξ):
la razón entre el amortiguamiento real del sistema y el amortiguamiento que produciría un amortiguamiento crítico.

Una desventaja de esta prueba es que la función de transferencia de los elementos bajo prueba es determinada, con datos que pueden reducirse a una forma en que se obtenga la información. Esto involucra métodos de cálculos iterativos extensos y tardados, aparte del problema del ruido en la salida del elemento bajo prueba, ya que si el ruido es apreciable influirá en la exactitud de la respuesta.

3.2.2. RESPUESTA A LA FRECUENCIA.

Este método consiste en aplicar a un sistema o parte de un sistema una señal senoidal de amplitud fija y frecuencia variable, para determinar la función de transferencia de componentes complicados con un mayor grado de exactitud.

La respuesta de una función de transferencia a una entrada senoidal puede representarse por dos diagramas distintos. Uno es el diagrama de logaritmo de la magnitud en función de la frecuencia, siendo el otro el ángulo de fase en función de la frecuencia, cuyas características a especificar se describen a continuación:

- a) Margen de ganancia:
es la cantidad en que puede aumentar la ganancia de un sistema en dB, antes de volver al sistema inestable.
- b) Margen de fase:
se define como el ángulo en grados entre el eje real negativo (-180°) y el vector de magnitud cuando este es igual a 1 (0dB).
- c) Frecuencia natural:
es la frecuencia de oscilación cuando el sistema es críticamente estable.

La prueba de respuesta a la frecuencia puede ser medida usando un equipo convencional de analizador de respuesta a la frecuencia de uso comercial, o bien un moderno analizador

de espectros. El analizador de espectros tiene las ventajas de mostrar directamente las gráficas de la ganancia y fase, además posee técnicas para reducir el ruido y requiere una señal de entrada relativamente pequeña.

Se deberían observar las siguientes precauciones al ejecutar la prueba de respuesta a la frecuencia.

1. Tener cuidado de tomar el nivel de señal adecuado, para que no cause la saturación de los elementos bajo prueba. Se recomienda que la magnitud de la señal utilizada produzca variaciones lineales en la salida cercanas al punto de operación.
2. El rango de las frecuencias de prueba deberá describir completamente las características del comportamiento dinámico de el elemento o elementos bajo prueba. La resolución de frecuencia deberá describir los cambios abruptos en la curva de respuesta, particularmente en la vecindad de los picos resonantes. Generalmente, los analizadores de espectro comerciales poseen una resolución que cubre el rango completo de interés (0 a 60 Hz) en una sola medición.
3. En mediciones de respuesta de excitadores rotativos puede ser necesario insertar un amplificador de potencia entre la señal de la fuente y el excitador de campo. La función de transferencia del amplificador de potencia deberá ser obtenida para ser considerada en el análisis de los resultados.
4. En mediciones de respuesta de componentes de potencia, tales como amplificadores de potencia y excitadores, puede ser necesario insertar transductores entre la salida de los componentes de potencia y el equipo de prueba. También puede ser necesario filtros a la salida de los componentes de potencia para atenuar el nivel de ruido. La función de transferencia de los filtros y transductores utilizados deberá ser obtenida, para ser considerada en el análisis de los resultados.
5. Las pruebas deberán ser realizadas en los rangos de operación de los elementos bajo prueba. Por ejemplo, la respuesta en frecuencia de un amplificador rotativo varía con la carga. Cuando la medición es realizada individualmente en los elementos de un sistema de excitación, deberá tenerse cuidado respecto a las variaciones que se producirían sobre toda la respuesta completa esperada, cuando los elementos son conectados juntos, debido al efecto de carga y de

interacción que se produce. Estos sistemas son los que emplean principalmente circuitos pasivos y rotativos o amplificadores magnéticos. En sistemas de excitación en donde se emplean elementos de control de estado sólido, normalmente están libres de los efectos de carga e interacción. Si estos efectos se presentan, la respuesta en frecuencia total del grupo de elementos interconectados en su configuración normal debe medirse además de la respuesta individual de los elementos.

3.2.3. PRUEBAS DE CAMPO.

Las características de respuesta transitoria y a la frecuencia describen completamente el comportamiento dinámico de pequeña señal de el sistema de control de excitación. Estas características pueden ser determinadas por pruebas de campo tales como las que se describen en esta sección.

La mayoría de los sistemas de control incluye alguna forma de estabilización interna tal como una retroalimentación. La función de esta compensación interna es asegurar la estabilidad del sistema de control de excitación fuera de línea y para proveer una medida de ajuste de la respuesta transitoria del sistema. Durante el arranque de la instalación de una máquina nueva, es normal proceder a revisar la respuesta transitoria de una unidad fuera de línea en orden a ajustar el establecimiento del sistema de estabilización del sistema de excitación, siendo mejor realizado si se insertan pequeños escalones dentro de los circuitos de referencia o en el sensor del regulador de la máquina síncrona y grabar la respuesta del voltaje terminal. Es recomendable que un transductor c.a. a c.c. sea usado para grabar únicamente la desviación en el voltaje terminal.

Para un sistema de excitación que tiene constantes de tiempo pequeñas, una respuesta transitoria aceptable es considerada como una que tenga no más de dos sobreimpulsos con un máximo de variación de 5% a 15%. En algunas aplicaciones, puede ser deseable incrementar el ancho de banda de el sistema de excitación para obtener una respuesta mas rápida. En tales aplicaciones, elevados sobreimpulsos pueden ser esperados.

Las pruebas de campo para obtener las características de la respuesta a la frecuencia de un sistema de control de excitación, brindan datos utilizados ampliamente para la identificación del sistema y para la verificación de modelos,

identificación del sistema y para la verificación de modelos matemáticos para uso en estudios de estabilidad del sistema de potencia. Los datos obtenidos de las pruebas de respuesta a la frecuencia son también usados en la determinación adecuada de los ajustes para los estabilizadores de los sistemas de potencia (PSS) como se describe en la sección 3.2.5. En las mediciones de estas pruebas se requieren señales pequeñas, limitadas para causar menos del 2% de variaciones en el voltaje terminal, insertadas entre la referencia del regulador y el punto de suma del sensor. La respuesta en frecuencia de lazo cerrado de un sistema de control de excitación deberá ser medida con un ancho de banda de 0.1 Hz a 3 Hz. Frecuentemente es preferible grabar las desviaciones en las variables de interés durante estas pruebas. Las respuestas en amplitud y fase pueden ser obtenidas directamente usando un equipo comercial de respuesta de frecuencia o de un analizador de espectros. Para obtener variaciones de 0.25% a 2% del voltaje terminal se deberá requerir de una señal de manejo progresivamente mayor. En caso de utilizar un analizador de espectros, el nivel de potencia, ancho de banda del ruido de la señal de entrada deberá seleccionarse adecuadamente para proveer adecuada potencia para las mediciones, sin permitir transitorios excesivos.

Deberá tenerse el cuidado de asegurarse que los valores del sistema de control de excitación no se encuentren en los límites.

De preferencia las mediciones de esta prueba deberían ser hechas con la unidad fuera de línea y operando a las condiciones cercanas a plena carga con las condiciones del sistema externo como en una operación normal.

Si se usa el método convencional de medición de respuesta a la frecuencia en donde una señal discreta de frecuencia es inyectada en el sistema de excitación, las siguientes precauciones deberán ser tomadas:

1. En pruebas de respuesta a la frecuencia de una unidad en línea, deberá tenerse cuidado cuando la prueba se realiza cercana a la frecuencia de resonancia de la unidad.
2. Para una medición completa del ancho de banda de algunos sistemas de control de excitación, es necesario probarlos a frecuencias mayores de 3 Hz, teniéndose extremo cuidado de no excitar a la frecuencia natural de torsión del eje de la unidad, la cual podría provocar severos daños mecánicos. El fabricante de la

La verificación del comportamiento del estabilizador del sistema de potencia también puede ser hecha por pruebas de respuesta transitoria. Los datos de las pruebas de campo de respuesta transitoria de un sistema de control de excitación equipados con un estabilizador de sistema de

En la fig. 3.2, se muestra una respuesta típica de datos de pruebas de campo de un sistema de control de excitación con y sin el sistema estabilizador de potencia.

La ganancia del estabilizador debe maximizarse dentro de las restricciones impuestas por el margen recomendado de estabilidad de lazo cerrado. La máxima ganancia permisible depende de muchos factores y puede ser determinada por pruebas.

El estabilizador idealmente debería incrementar el componente de amortiguamiento o torque, sin afectar el componente de sincronización. Para bajas frecuencias de oscilación asociadas con modos inter-área, el ajustar las variaciones del voltaje terminal para estar en fase con la desviación de frecuencia llenará los mismos requerimientos.

El establecimiento de las constantes de tiempo de los compensadores de fase con funciones de atraso-adelanto del estabilizador, puede ser determinado por varias técnicas, una de las cuales es la respuesta a la frecuencia del sistema de control de excitación tomándose las consideraciones descritas en la sección 3.2.4.

La prueba de respuesta a la frecuencia es una medida conveniente para revisar experimentalmente rangos de los parámetros, determinar el ajuste de los parámetros, y verificar el comportamiento del estabilizador del sistema de potencia (PSS). La calibración del transductor de señal del control de excitación deberá ser determinada, el cual deberá ser calibrado en V/p.u., donde 1 p.u. esta basado en velocidad nominal, frecuencia, o MVA dependiendo de la señal de entrada de el estabilizador. Dependiendo del diseño y la configuración, el tiempo de respuesta del transductor puede, en algunos casos, ser determinado experimentalmente por técnicas similares de respuesta a la frecuencia.

3.2.5. PRUEBAS DE CAMPO PARA EL ESTABILIZADOR DEL SISTEMA DE POTENCIA.

Unidad debe consultarse para las pruebas de frecuencias arriba a 3 Hz.

potencia para una señal de entrada escalón son mostrados en la fig. 3.3.

Una grabación de la respuesta transitoria tal como se muestra en la fig. 3.3, es también muy útil en un análisis significativo; provee una medida periódicamente verificable de que un estabilizador del sistema de potencia funcione apropiadamente. Las características de la respuesta transitoria de un sistema de control de excitación con y sin el estabilizador de sistema de potencia puede ser obtenido periódicamente y comparado con los datos grabados durante la operación inicial del equipo particular.

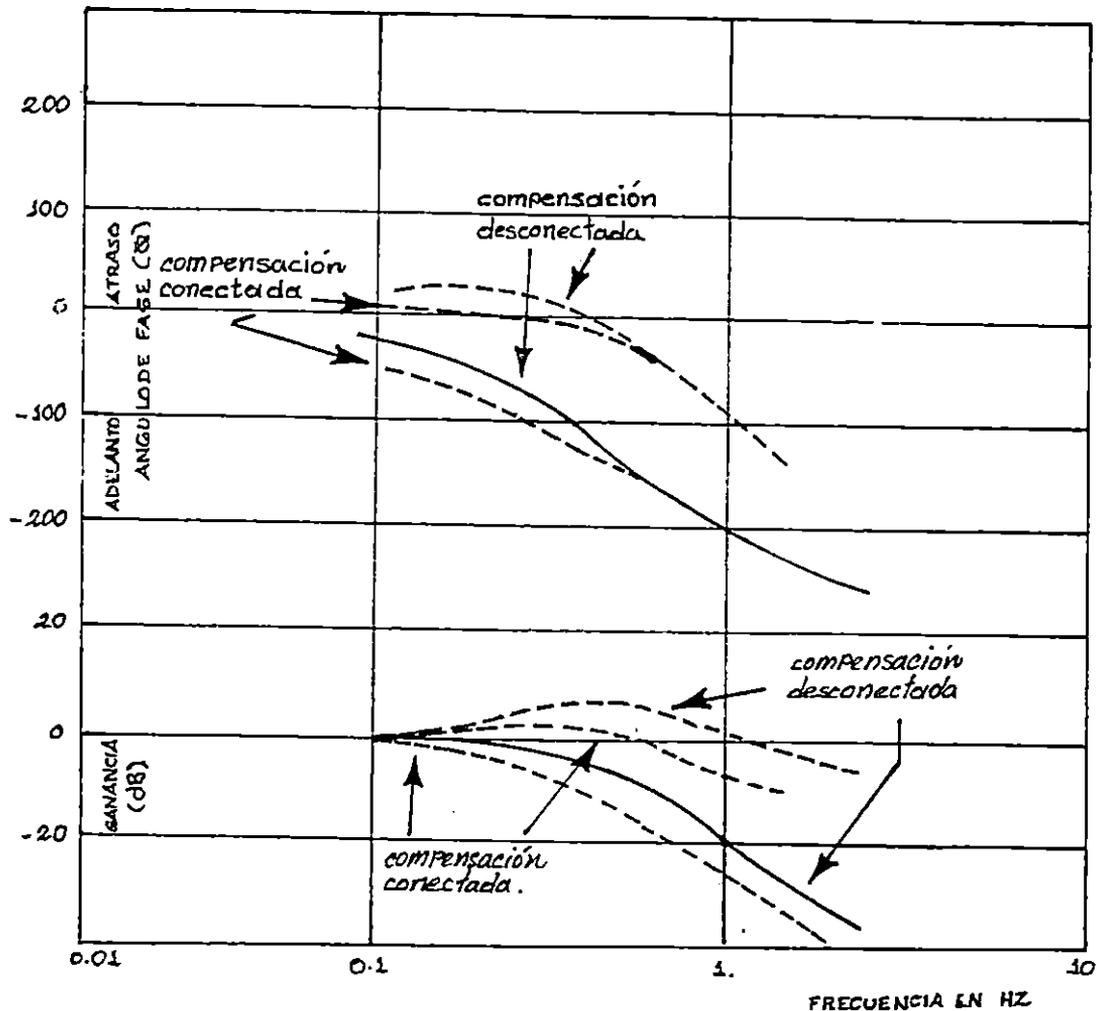


Figura 3.2. Datos de pruebas de respuesta a la frecuencia de un sistema de control de excitación (con excitador CC) con y sin un estabilizador de sistema de potencia.

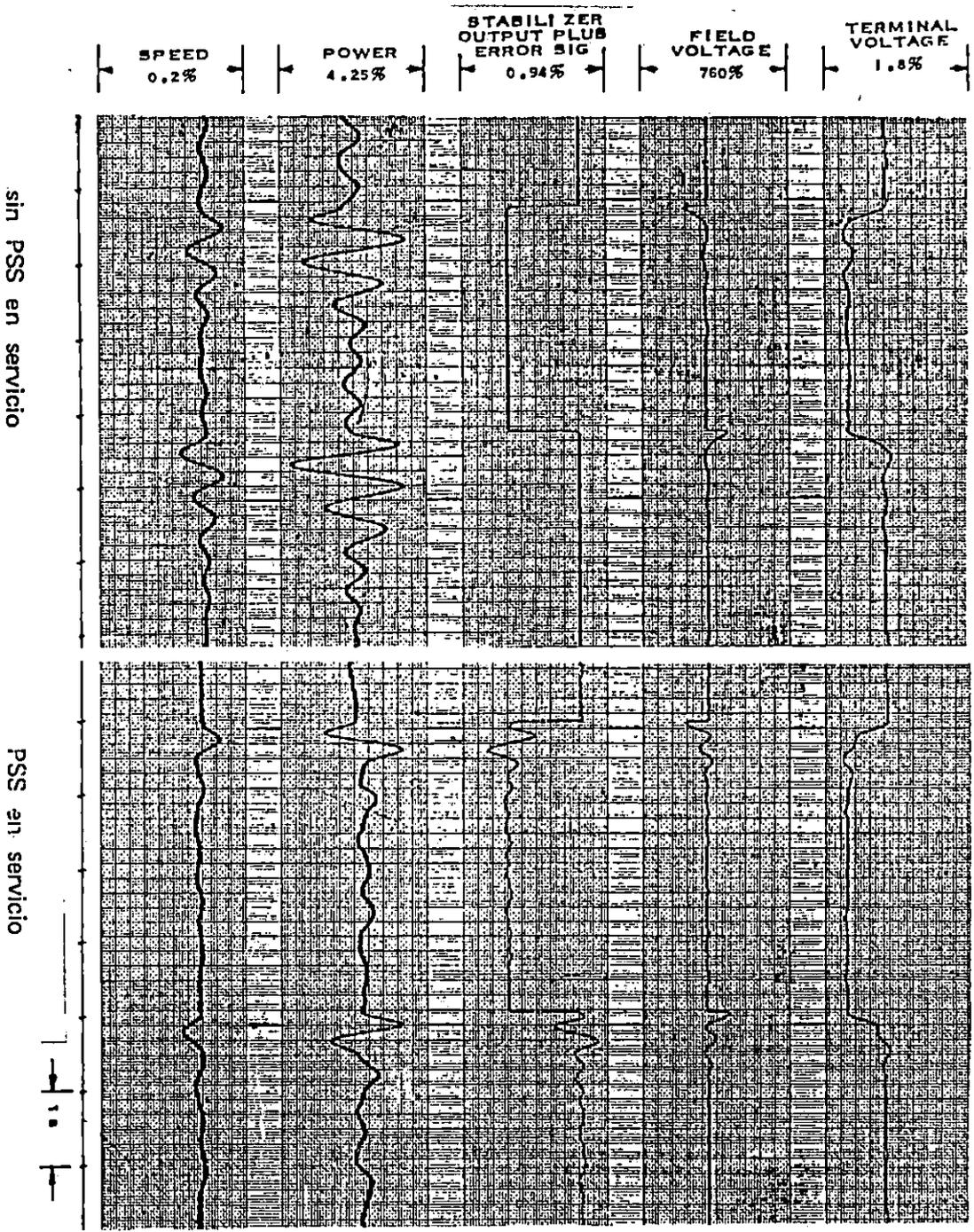


Figura 3.3. Datos de prueba de campo asignadas al estabilizador de sistemas de potencia PSS.

3.3. CONCLUSIONES.

- Las pruebas de gran señal no son siempre recomendables, debido al efecto que producen sobre el sistema, por tanto es preferible utilizar siempre que sea posible el modelo para poder predecir el comportamiento de la máquina síncrona en condiciones determinadas.
- Las pruebas de gran señal que determinan los parámetros del modelo que se utilizan para validarlo son realizadas en la fábrica y en el campo. Estas pruebas requieren una cuidadosa atención, al especificar las condiciones en las cuales las pruebas son desarrolladas.
- Las pruebas de campo para validar modelos, deben desarrollarse lo más cercanamente posible a las condiciones de operación normal para incrementar la credibilidad del resultado.
- La periodicidad con que se realizan las pruebas, ya sea de gran señal o pequeña señal, no debe ser mayor a los cinco años, para llevar un control bastante confiable de todos los parámetros según vaya envejeciendo el equipo.
- Las pruebas de pequeña señal por lo general brindan la información suficiente para obtener los parámetros a utilizar en el modelado para el estudio de estabilidad.
- Cuando existe un sistema estabilizador de potencia, este también puede someterse a las pruebas de pequeña señal ya sea en respuesta transitoria o respuesta a la frecuencia.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- [1] IEEE. " GUIDE FOR IDENTIFICACIÓN, TESTING, AND EVALUATION OF THE DYNAMIC PERFORMANCE OF EXCITATION CONTROL SYSTEMS"; IEEE STD 421.2 -1990; IEEE 1990 NEW YORK.
- [2] Quesada T., R.A.: "SEMINARIO/TALLER SOBRE DETERMINACION DE PARAMETROS DE REGULADORES DE VOLTAJE Y VELOCIDAD"; PARSEICA, CEPAL, 1990.

CAPITULO IV.

ANALISIS DEL SISTEMA DE EXCITACION DE LA C.H.

15 DE SEPTIEMBRE, UNIDAD 1.

INTRODUCCION.

En capítulos anteriores se mencionaron los principios básicos de los sistemas de excitación de los generadores síncronos, siendo el objetivo de este capítulo realizar un estudio del sistema de excitación de la C.H. 15 de septiembre, unidad 1, ubicada entre los departamentos de San Vicente y Usulután, El Salvador, C.A. Se determinará el modelo matemático que mejor lo represente y los parámetros más importantes del mismo.

Para realizar el estudio se deberá contar con la información básica requerida para su debido desarrollo, tal como son el instructivo del regulador de tensión, los diagramas esquemáticos y electrónicos o eléctricos, pruebas de puesta en servicio del regulador, curvas características de los elementos del regulador y datos generales del generador.

4.1. DESCRIPCION GENERAL DEL SISTEMA.

El excitador del tiristor de fuente potencial es estacionario y sin excitador giratorio, tal como se muestra en la fig. 4.1. La alimentación de excitación del mismo se deriva de los terminales de la máquina síncrona a través de un transformador para excitador y el convertidor del tiristor.

La corriente de excitación se puede controlar por medio del ángulo de encendido de los tiristores.

El tiristor es uno de los elementos semiconductores que se han desarrollado rápidamente en los últimos años y es

capaz de ajustar la salida del rectificador con suma precisión, con una pequeña entrada de control. Este equipo es excelente por su rápida respuesta, es del tipo completamente estático (cuarta generación), y resulta muy sencillo su mantenimiento.

4.1.1. CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO.

Las características de este equipo son las siguientes:

- 1.- Respuesta rápida del sistema de excitación porque se controla mediante un dispositivo semiconductor sin retardo alguno.
- 2.- Control de tensión altamente precisa con pequeña inactividad disponible, porque es del sistema de control continuo proporcionado.
- 3.- Se dispone, si fuera necesario, de varias clases de controles aplicados.
- 4.- Altamente confiable y fácilmente mantenible porque se usan componentes semiconductores.
- 5.- El equipo, compuesto de semiconductores, es de tamaño compacto, suficiente como para ahorrar espacio de instalación.

En la fig. 4.2, se muestra el diagrama de bloques general del sistema de excitación, de la cual se puede observar que las unidades que componen el AVR, son las siguientes:

- 1.- Unidad transductora (ST)
- 2.- Detector de voltaje y circuito sumador (VD y ADD).
- 3.- Control manual (MC).
- 4.- Control de arranque y paro (SSC).
- 5.- Compesador reactivo (RCC).
- 6.- Limitador de sub excitación (UEL).
- 7.- Circuito seguidor (FLUC).
- 8.- Limitador de sobre excitación (OEL).
- 9.- Protección de sobrecorriente de tiristores (TOC).
- 10.- Amplificador flotante (F.AMP).
- 11.- Dispositivos de referencia de voltaje y corriente de campo (9OE y 7OE).
- 12.- Desfasador de pulsos automático (APPS).

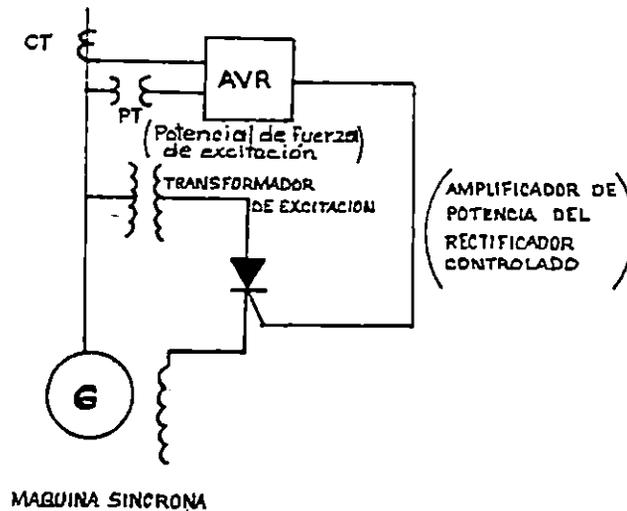


Figura 4.1. Diagrama unifilar del sistema de excitación de la C. H. 15 de septiembre.

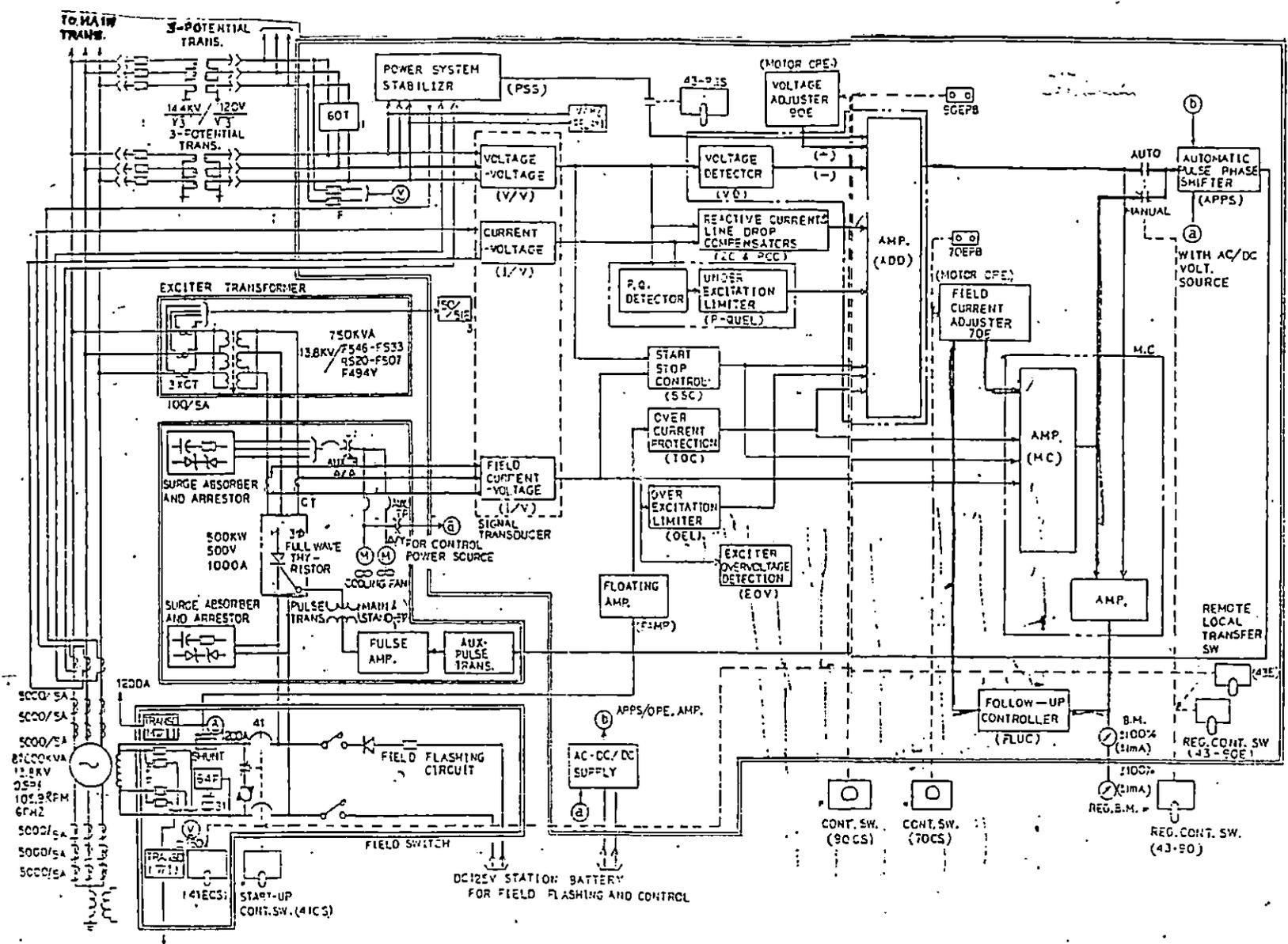
4.2. DESCRIPCIÓN DE LAS UNIDADES DEL SISTEMA DE EXCITACION DE LA C.H. 15 DE SEPTIEMBRE.

4.2.1. UNIDAD TRANSDUCTORA DE SEÑALES (ST):

Esta unidad tiene como señales de entrada el voltaje terminal de la máquina síncrona (V_g), la corriente a través de los terminales del generador (I_g), y la corriente de campo (I_f), siendo la entrada de alimentación al sistema de control de excitación. En la figura 4.3. se muestra el diagrama de bloques de la unidad transductora de señales (ST).

Esta unidad está constituida por transformadores de corriente y potencial, resistencias, bobinas, capacitores y diodos, tal como aparece en el arreglo mostrado en la figura 4.4. Todos estos dispositivos son los encargados de sensar en todo momento el estado de voltaje y corriente terminal de la máquina síncrona, así como también la corriente de campo, reduciendo los niveles de la señal y realizando la rectificación para obtener niveles de voltaje c.c. utilizado para alimentar a las unidades que conforman el sistema de excitación, específicamente el control automático y manual.

Figura 4.2. Diagrama de bloques general del sistema de excitación de la C.H. 15 de septiembre.



Como puede observarse en la fig. 4.3, tanto V_g como I_g e I_f son sensadas por los devanados primarios de los transformadores de corriente y potencial. El voltaje a través de los terminales de la máquina síncrona, es reducido por transformadores de potencial y su voltaje secundario se aplica a través de un transformador trifásico al circuito rectificador de onda completa que genera voltaje c.c., en los terminales A y B. En los terminales C, D y E se tiene la señal V_g , y en el terminal F la señal de V_{R-I} . Estos terminales se dirigen a las unidades que se indican en la fig. 4.3.

La corriente de la fase S a través de los terminales de la máquina síncrona se obtiene en el secundario del transformador de corriente la cual se hace fluir por medio de resistencias y bobinas hacia los terminales asignados. Los voltajes a través de las resistencias son aplicados a G, H e I, y conforman a la señal I_g . Los voltajes a través de los terminales de las bobinas se aplican a J y K, siendo esta señal $+j \pi/2 I_g$, la cual se utiliza para alimentar a los compensadores de corriente reactiva.

Finalmente, la corriente de campo es suministrada por la corriente secundaria en el transformador de corriente asociado a ella, luego es rectificada esta señal y se suministra a los terminales L y M como una señal de voltaje c.c. Cuando la máquina síncrona se encuentra operando bajo condiciones normales de carga, los voltajes típicos de la unidad transductora se enlistan en la tabla 4.1.

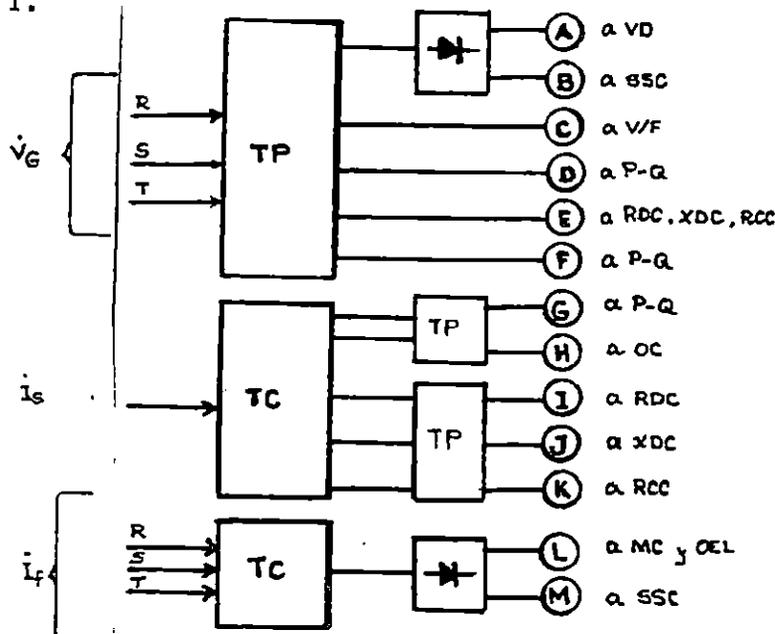


Figura 4.3. Diagrama de bloques de la unidad ST.

Tabla 4.1. Valores típicos de voltaje en los terminales de la unidad ST.

	AJUSTE	VOLTAJE		OBSERVACIONES
A	VR1	36	VCC	PC Y V *
B	VR2	8	VCC	PC Y V
E	VR4	7	VAC	PC Y V
I	VR5	1.2	VAC	PC
J	VR6	1.2	VAC	PC
K	VR7	1.2	VAC	PC
L	VR3	3	VCC	PC
M	VR12	3	VCC	PC

*PC : condiciones de plena carga.
 V : condiciones de vacío.

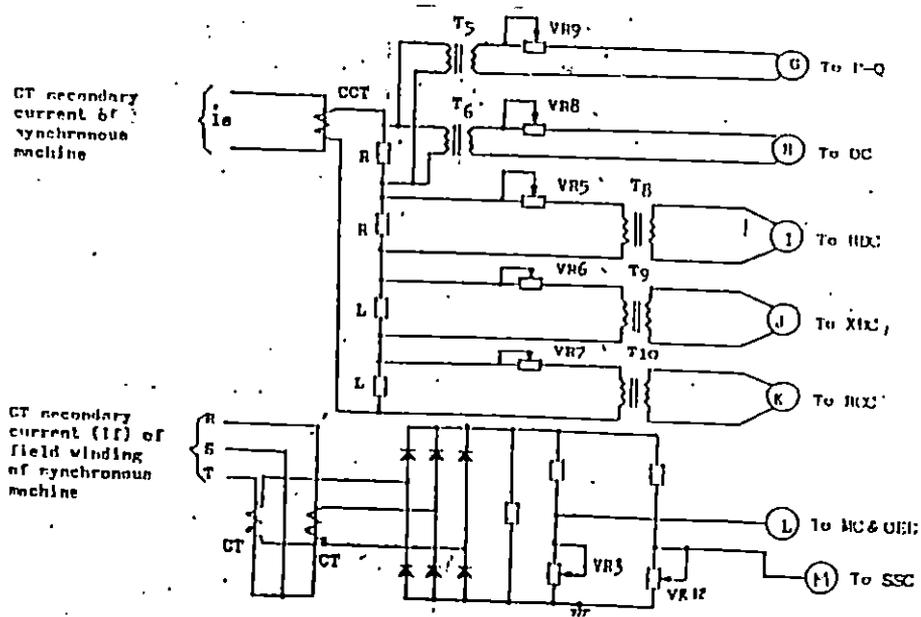
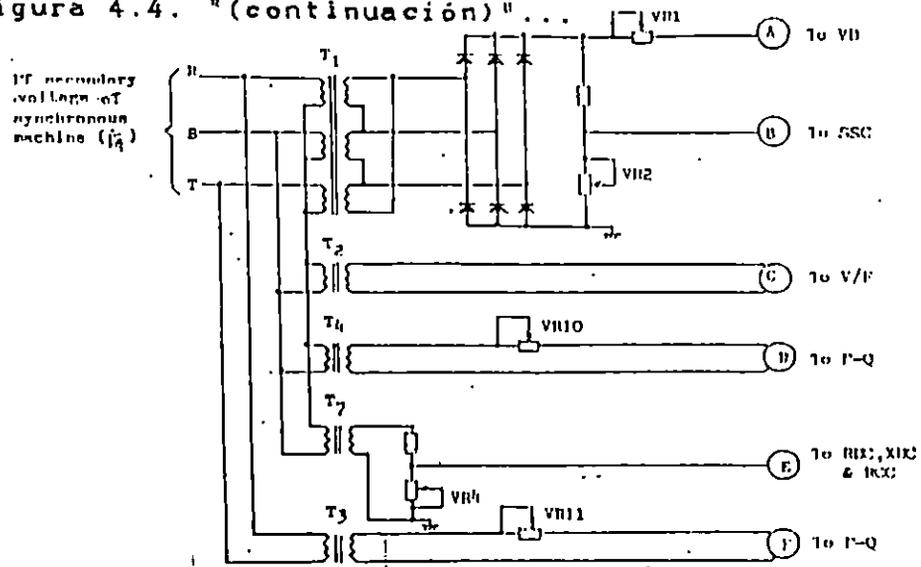


Figura 4.4. Diagrama eléctrico de la unidad ST.

Figura 4.4. "(continuación)" ...



4.2.2. DETECTOR DE DESVIACIÓN DE VOLTAJE Y CIRCUITO SUMADOR (VD, ADD).

El circuito VD recibe una señal de voltaje del voltaje terminal de la máquina síncrona que proviene de la unidad ST; detecta desviaciones de voltaje del valor nominal comparando la señal de entrada con la señal de referencia 90R, siendo su salida el voltaje de error que es la entrada para el circuito sumador ADD, el cuál suma las señales de los circuitos de compensación, límites y protección. La salida del ADD se introduce a la unidad defasadora de pulsos APPS. En la figura 4.5, se muestra el diagrama de bloques de estos circuitos.

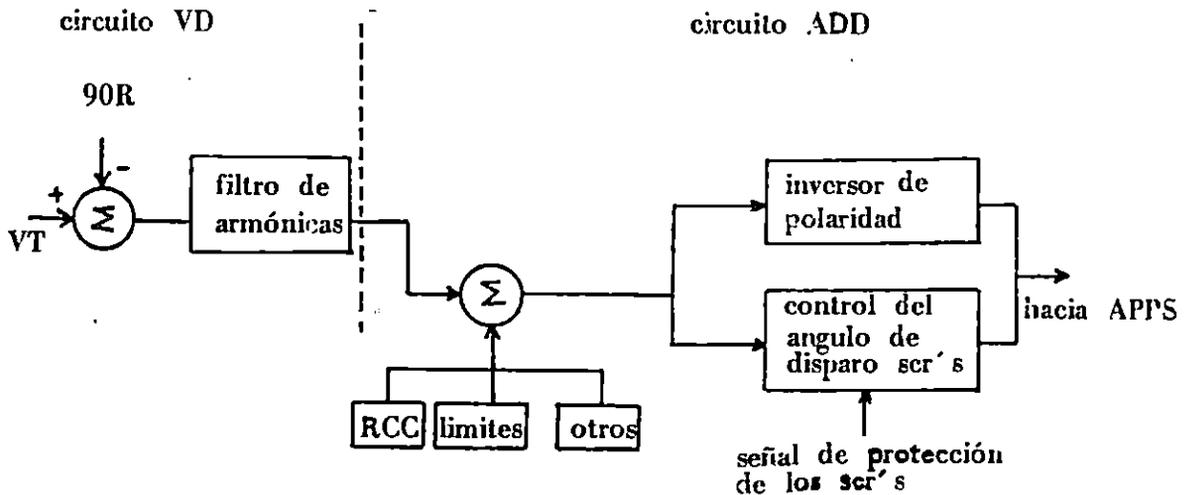


Figura 4.5. Diagrama de bloques de los circuitos VD y ADD.

La señal A de la unidad ST y la señal de referencia 9OR se comparan mediante un circuito basado en amplificadores operacionales, en configuración de sumador, el cual detecta alguna desviación que exista entre el voltaje terminal de la máquina síncrona (V_g) y la referencia de voltaje 9OR. Esta señal de desviación es transferida al ADD después de ser eliminadas las posibles componentes armónicas por medio de un filtro activo, también basado en amplificadores operacionales. En la figura 4.6a, se muestra el esquema circuital del VD, de la cual se observa que el valor de referencia 9OR puede variarse desde un mínimo hasta un máximo, el rango es de aproximadamente 0 Vcc hasta -8 Vcc. Cuando la máquina está apagada, el valor de 9OR es de 0 p.u. para reducir el voltaje terminal de la máquina síncrona.

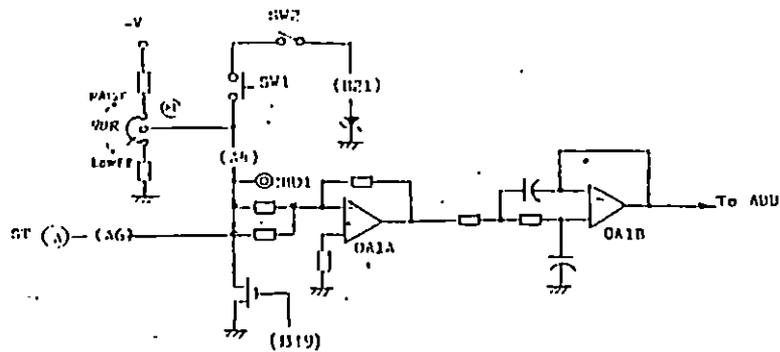
El interruptor SW1 se utiliza para la prueba de la respuesta inicial en vacío, alcanzando el control 9OR el valor requerido cuando SW1 está en ON. El SW1 no debe operarse en condiciones de funcionamiento normal, ya que junto con SW2 son utilizadas solamente para inspección o prueba, el SW2 permanece en OFF en operación normal.

La desviación detectada por VD y las señales de límite y compensación son sumadas por medio de un circuito sumador compuesto por amplificadores operacionales, la polaridad de la señal de salida es luego invertida por medio de una configuración inversora y luego aplicada al APPS.

En la fig. 4.6b, se muestra el esquema del circuito ADD. Los potenciómetros VR2 y VR3 en el lazo de realimentación del amplificador operacional sumador, fijan la ganancia de lazo para el sistema de excitación y para ajustar la ganancia de amortiguamiento en el modo de control automático, respectivamente. Ambos son ajustados mediante un dial en la tarjeta impresa del circuito.

En caso de ocurrir una sobrecarga en algún tiristor, una señal del circuito protector de tiristores (TOC), le indica al APPS que cambie su señal al operacional OASB, controlando el ángulo de disparo de los SCR's para que sea igual a 120° .

En la tabla 4.2, se muestran los valores típicos de ciertos puntos, cuando el generador funciona bajo condiciones nominales.



(a)

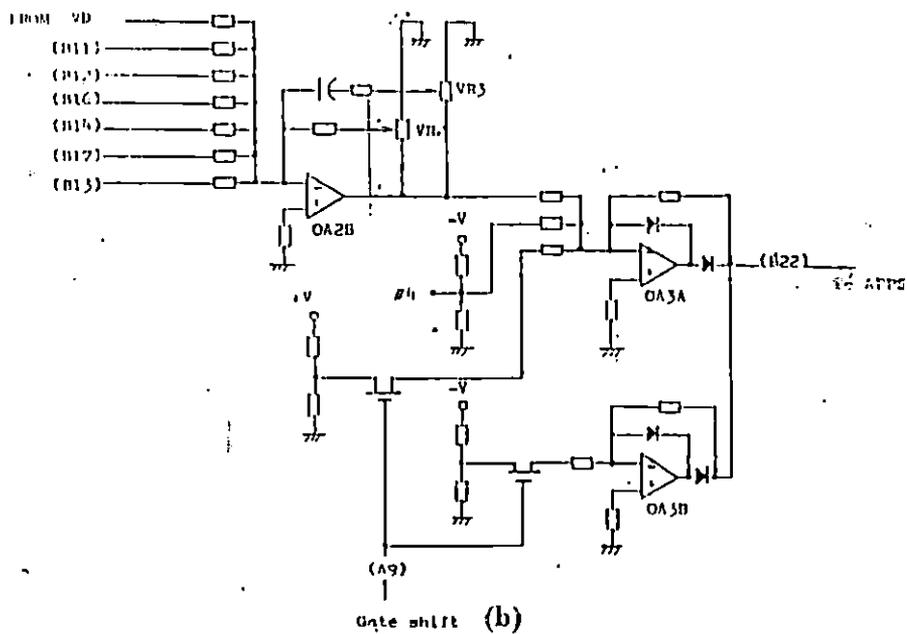


Figura 4.6. Diagramas eléctricos . a) VD; b) ADD.

Tabla 4.2. Valores típicos de voltaje de VD y ADD.

CH01	AJUSTE 90R	VOLTAJE CC-BV
#4	--	6.7 V ± 10 %

4.2.3. CIRCUITO DE CONTROL MANUAL (MC):

Este circuito está diseñado para controlar la I_f de la máquina síncrona en forma temporal, cuando el AVR está fuera de funcionamiento. Este circuito está formado por un circuito detector de corriente de campo, un circuito que proporciona la señal de detección de desviación manual es seleccionado al cambiar el interruptor que controla a esta unidad, el 43AVR, de la posición AUTO a la posición MAN, cuando el AVR falla o debe ser aislado para mantenimiento e inspección. En la figura 4.7, se muestra el diagrama de bloques de esta unidad.

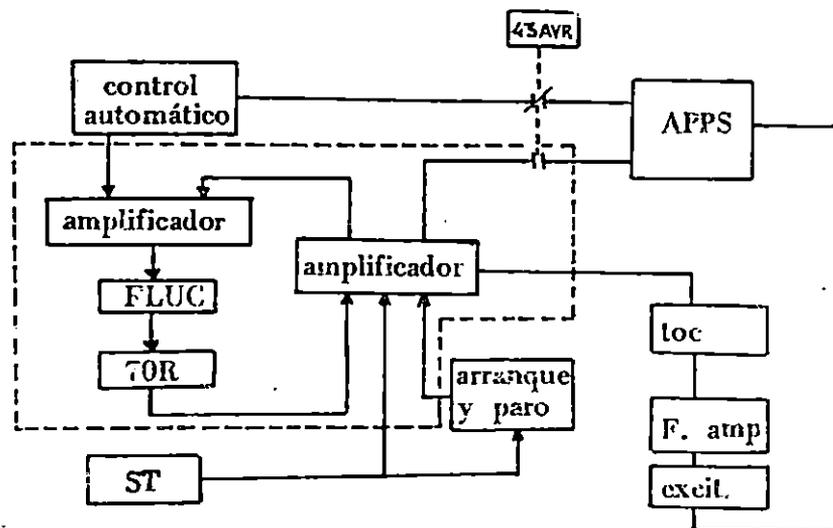


Figura 4.7. Diagrama de bloques de la unidad MC.

Los bloques incluidos en la región definida por la línea punteada son los que conforman el control manual, el diagrama representa la ubicación completa, con respecto a los otros circuitos que se involucran en la operación manual. En la figura 4.8, se muestra el esquema eléctrico de esta unidad.

Para la operación manual por medio del ajuste de la referencia 7OR, el rango de ajuste es desde la I_f correspondiente al voltaje a 90% del generador, hasta el valor correspondiente al 150% de las condiciones nominales de la máquina, aunque el manual de operación indica que este rango puede variar de acuerdo a las especificaciones del usuario.

La señal L que proviene de la unidad ST, proporciona el valor de I_f y es aplicada al amplificador operacional

OA1A (fig. 4.8), el cual está conectado en una configuración sumadora. A la salida del OA1A se obtiene la diferencia o desviación de la I_f con respecto al valor de referencia dado por el control 7OR, esta señal de desviación es aplicada directamente al APPS. VR2 fija la ganancia del lazo manual, por medio del dial del potenciómetro en la tarjeta del circuito impreso. La entrada B7, sirve para controlar la señal de disparo de las compuertas de los tiristores manteniéndola en 120° , funciona igual que en el circuito ADD (sección 4.2.2).

La entrada B11 es suministrada con un nivel bajo en el tope normal para alterar el punto de ajuste de 7OR.

La desviación entre las señales de entrada al APPS en el sistema automático (o la señal de salida del ADD) y aquellas en el sistema manual, es detectada por el operacional OA2A, el cual alimenta con su salida al operacional OA2B, quien se encarga de convertir las señales recibidas, en señales de corriente para deflejar el medidor de balance. En síntesis, la salida de OA1A y la salida de la sección ADD son comparadas para indicar la señal de desviación en el medidor de balance, para reducir el error hasta aproximadamente cero en el momento del intercambio de AUTO a MAN. La salida A16 se dirige al FLUC (sección 4.2.6), esta señal no se aplica durante la operación manual, sirve como indicador del activamiento del control manual. En la tabla 4.3, se muestran algunos valores típicos de ciertos puntos de interés en el control manual, cuando el generador funciona en condiciones nominales.

Tabla 4.3. Valores típicos de voltaje de la unidad MC.

	AJUSTE	V ó A	OBSERVACIONES
A6	VR3 ST *	3 VCC	P.C
#5	--	4 VCC \pm 5%	a un ángulo de disparo de compuerta = 120°
(B25) (B26)	--	-1mA -0 +1mA	

* ver figura 4.3.

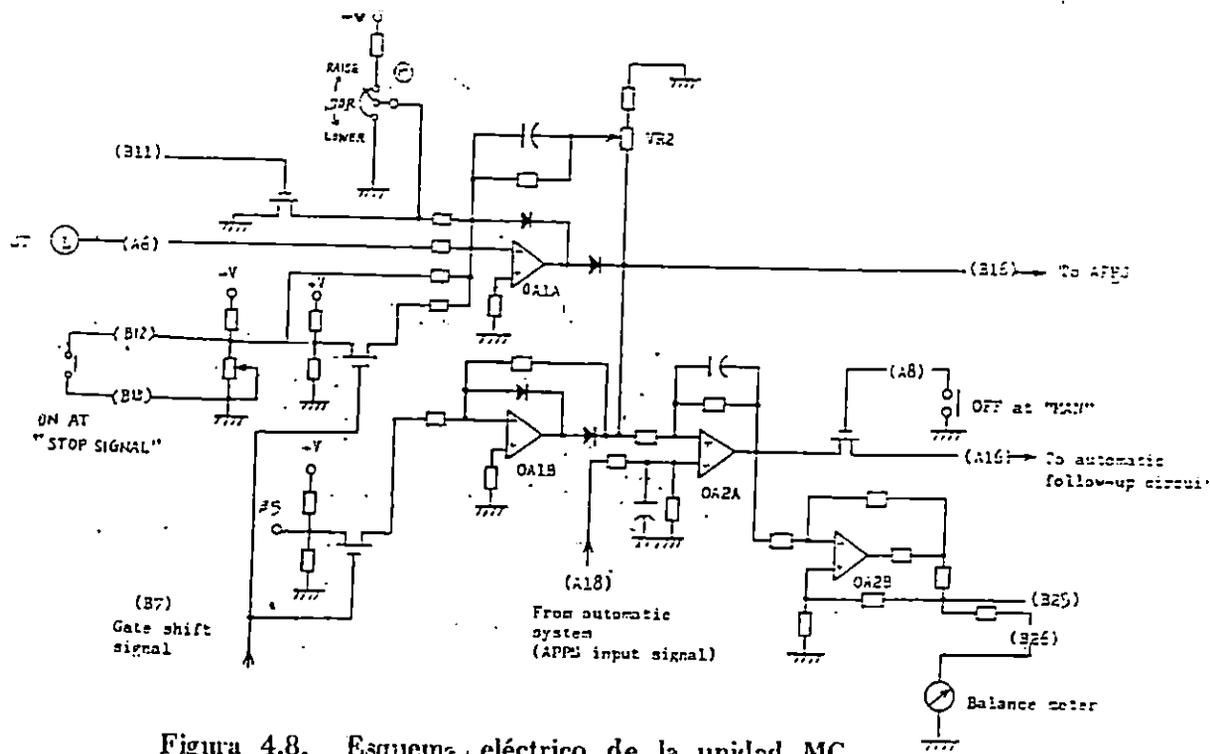


Figura 4.8. Esquema eléctrico de la unidad MC.

4.2.4. CIRCUITO DE CONTROL DE ARRANQUE Y PARO (SSC):

El circuito de control de arranque y paro se encarga de proveer un control de la excitación en el arranque y paro normal de la máquina síncrona. Además, este circuito gobierna dos contactores que son los encargados directos de sensar y corregir el adecuado valor de la I_f según sea el nivel del voltaje terminal del generador. En la figura 4.9, se muestra el diagrama de bloques de esta unidad.

RY2 y RY3 son las bobinas de los contactores que sensan la corriente de campo y el voltaje terminal respectivamente. En la fig. 4.10, se muestra el diagrama circuital de la unidad de control de arranque y paro.

El control de arranque comienza cuando la señal B de la unidad ST suministra el valor del voltaje terminal del generador, el cual es rectificado de sus posibles armónicos mediante el filtro compuesto por el amplificador operacional OA2A. Cuando $V_G \leq 0.7$ p.u., RY3 es energizado y al cerrar sus contactos se activa el circuito protector de campo hasta que el voltaje terminal del generador alcanza un cierto valor dado ($V_G \geq 0.7$ p.u.).

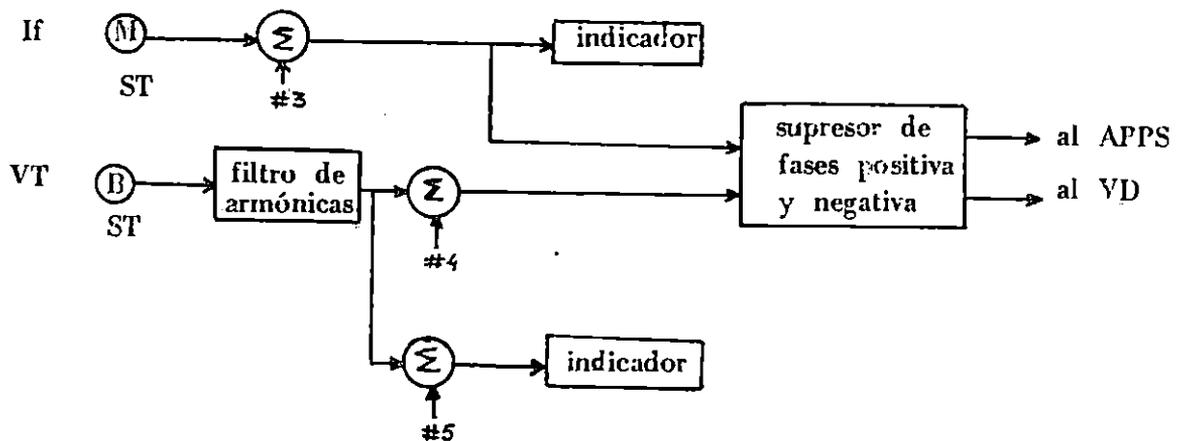


Figura 4.9. Diagrama de bloques de la unidad SSC.

En el paso normal el valor de referencia de 90R (ó 70R) es decrementado por la señal de paro (señal B19 en la fig. 4.6a.), para reducir rápidamente la corriente de campo. dicho control se denomina control de retorno de fase. Así, cuando la señal del voltaje terminal indica un valor por abajo del límite establecido, el comparador compuesto por OA2B activa a Q6, el cual energiza a RY3, cerrando sus contactos y corrigiendo el valor de 90R. El led 3 se enciende para indicar esta operación.

Al mismo tiempo, el comparador OA1A activa a Q5 quien pone un 0 lógico en la compuerta NOR, la cual, al activarse el interruptor de la señal de paro, coloca otro 0 lógico en la otra entrada de la compuerta NOR, haciendo que su salida sea alta, la cual es transformada por medio del inversor para poner en corte a Q7, realizando la supresión de la fase positiva de los tiristores del APPS. Cuando $V_T \geq 0.7$ p.u., el circuito protector de campo deja de operar y el funcionamiento normal del generador continúa.

Además, cuando la señal M de la unidad ST da una señal de I_f por abajo de un valor dado (cuando la I_f en el lado de c.a. es cercana a cero, en este caso), el comparador OA1B activa a Q3 quien hace activar a la bobina de RY2, desconectando los tiristores de la fase negativa; como se mencionó con anterioridad, esto forma parte del control de retorno de fase. Al mismo tiempo, se activa Q4, quien coloca un 0 lógico en la compuerta inversora tal como se muestra en la figura 4.10. Esta compuerta NOR coloca un 1 lógico de la salida de la compuerta NAND, el cual al combinarse con el 1 lógico de la salida de la compuerta NOR, apaga a Q8 y suprimiendo así a los tiristores de la fase negativa del APPS. Cualquier otra combinación diferente a

la detallada anteriormente en las compuertas NOR y NAND, no provocarán la supresión de los tiristores del APPS. Así, se desconectan los tiristores del lado de c.a. y la corriente de campo decrementará en forma logarítmica con la constante de tiempo del circuito de campo.

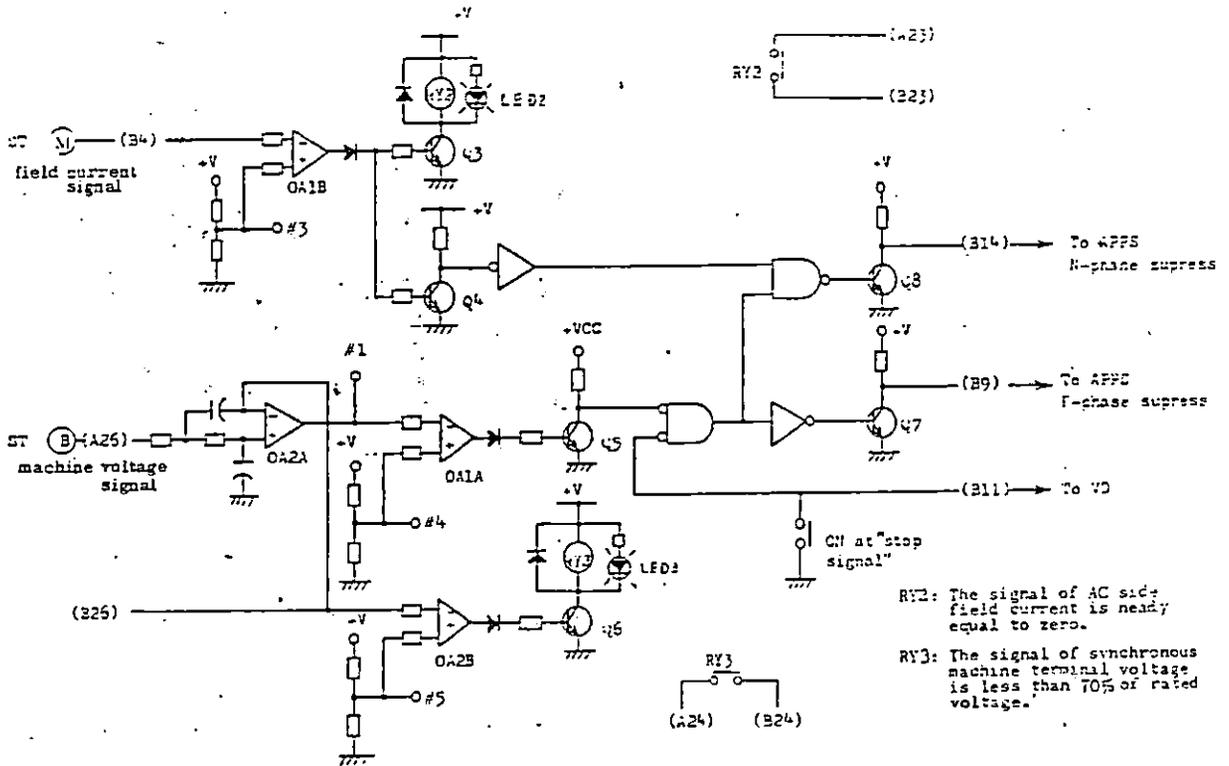


Figura 4.10. Esquema eléctrico de la unidad SSC.

Los niveles típicos de voltaje en algunos puntos importantes, se muestran en la tabla 4.4, cuando el generador funciona bajo condiciones nominales.

Tabla 4.4. Valores típicos de voltaje de la unidad SSC.

	AJUSTE	VOLTAJE
#1	VR2 ST	8 VCC
#3	---	0.03 VCC ± 5%
#4	---	1.96 VCC ± 5%
#5	---	6.0 VCC ± 5%

4.2.5. CIRCUITO DETECTOR Y COMPENSADOR DE SEÑAL (RCC, XDC, RDC).

Este circuito está compuesto por el compensador de corriente reactiva (RCC), el compensador de disminución de línea reactiva (XDC) y el compensador de disminución de línea resistiva (RDC).

El RCC tiene como función reducir el voltaje terminal del generador cuando la carga reactiva se incrementa durante la operación en paralelo del generador, siempre que sus respectivos ajustes 90R difieran en posición. XDC compensa caídas de voltaje ocasionadas por la reactancia entre el generador y los buses de la línea del sistema. RDC compensa la caída de voltaje debido a la resistencia entre el generador y los buses de la línea del sistema.

En la fig. 4.11, se muestra el diagrama de bloques de la unidad, y en la fig. 4.12 el esquema eléctrico de la unidad.

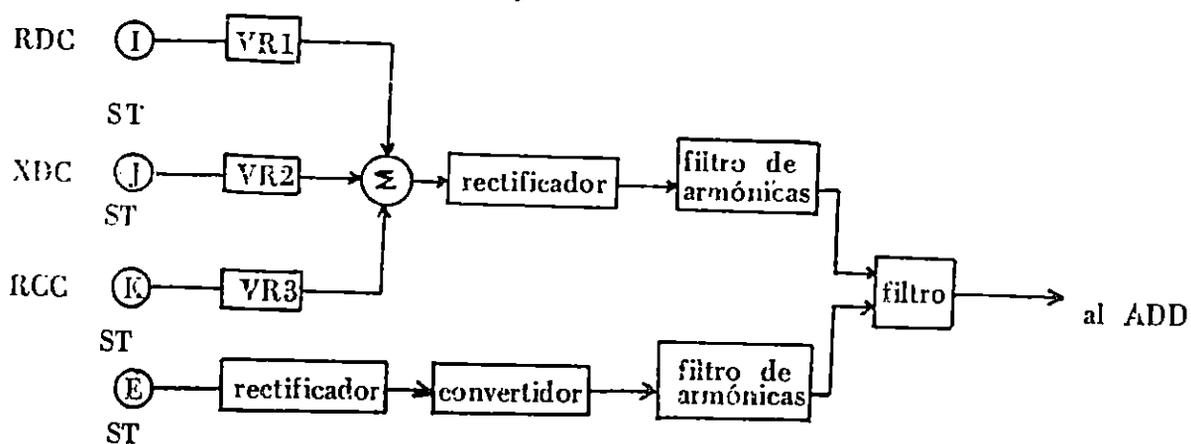


Figura 4.11. Diagrama de bloques de la unidad RCC.

Las señales de RDC, XDC y RCC son suministradas desde los terminales I, J y K de la unidad ST, respectivamente, y la cantidad de la composición es fijada por los diales de VR1, VR2 Y VR3; tal como se muestra en la fig. 4.12. Las señales de entrada son rectificadas en OA1B y luego sumadas en OA2B, haciéndolas pasar por el filtro OA3B hacia el filtro OA4A y luego hacia el ADD. La señal E de ST proporciona el valor de V_s , rectificándose por medio de

OA1A, el amplificador operacional OA2A la convierte a señal de corriente y luego es filtrada por OA3A, para ser enviada al filtro OA4A y después al ADD.

Asumiendo que en la salida de OA3B y OA3A se tiene a V_D y V_S respectivamente (ver fig. 4.12), la salida de OA4A es $V_C = -V_D - V_S$, puesto que OA4A es un sumador. Por tanto, la compensación que se necesite efectuar es el resultado de la diferencia entre V_S y V_D . Este resultado es enviado al ADD. En la fig. 4.13, se muestran varios ejemplos de esta operación para distintos valores de factor de potencia

Una corriente fluyendo en atraso significa un alto voltaje terminal cuando se compara con los voltajes terminales de otras máquinas, desde el punto de vista del RCC, el voltaje terminal entonces debe ser reducido. En el caso de una corriente en adelante, el voltaje debe incrementarse.

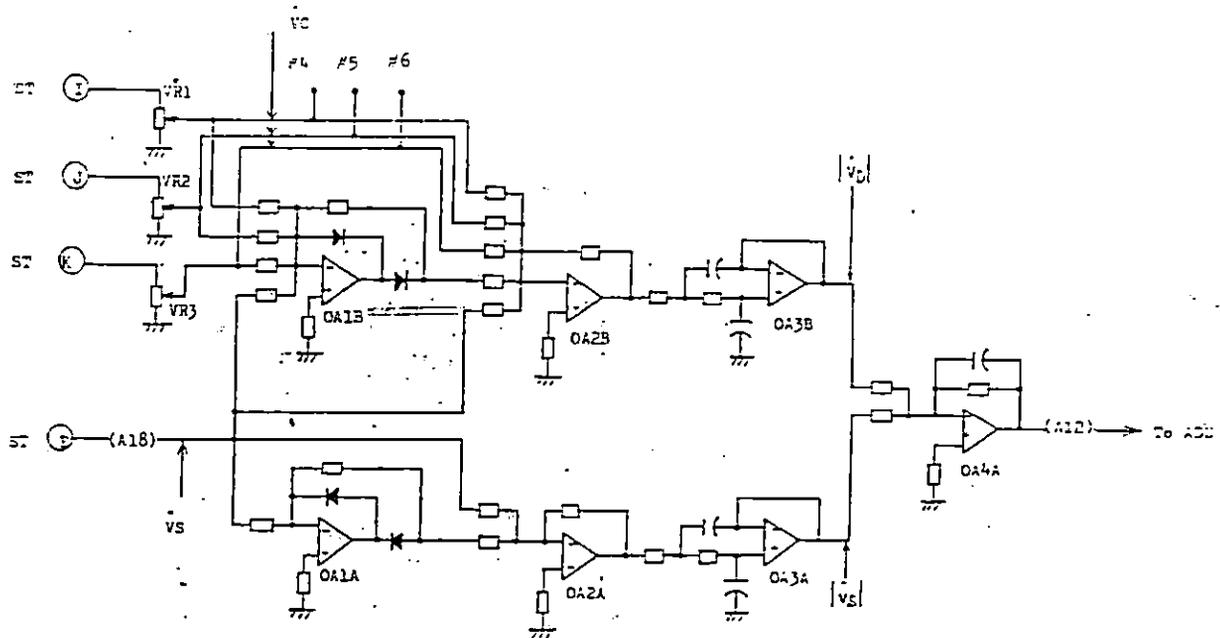


Figura 4.12. Esquema eléctrico de la unidad RCC.

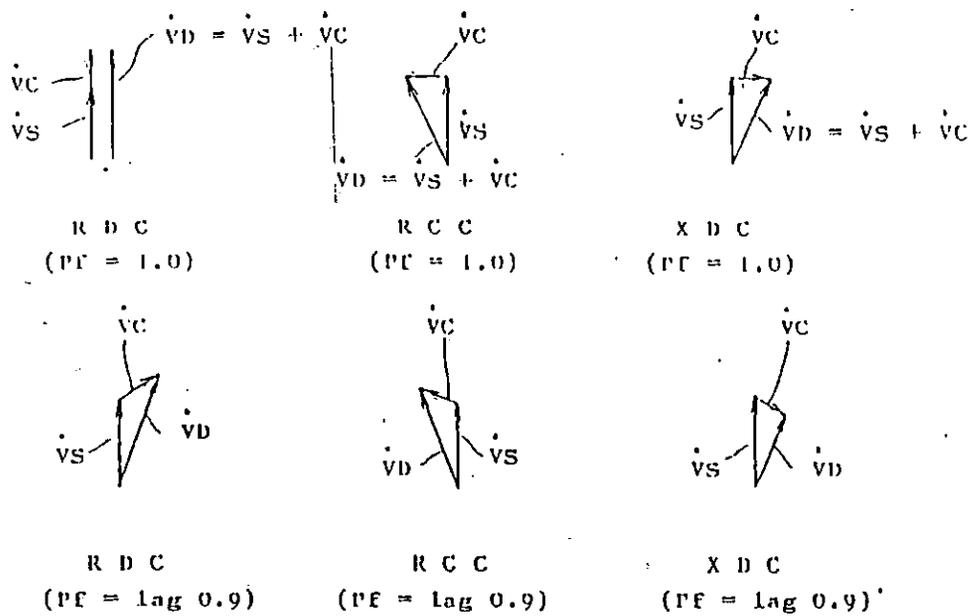


Figura 4.13. Composición vectorial.

Detectado el valor de $V_E - V_S$ y aplicado al sumador, tal como se mencionó, el voltaje terminal del generador varía y el porcentaje de compensación es fijado normalmente en 6% al conectar el generador en paralelo con el sistema u otras máquinas a través del transformador elevador especialmente provisto por el circuito sumador del generador. En la tabla 4.5, se muestran algunos valores típicos de los ajustes de compensación con el generador en condiciones nominales.

Tabla 4.5. Valores típicos de ajustes de compensación.

	AJUSTE	VOLTAJE	COMPENSACION
#4	VR1	0.7 VAC	a 10%
#5	VR2	0.7 VAC	a 10%
#6	VR3	0.7 VAC	a 10%

4.2.6. CIRCUITO DEL CONTROL SEGUIDOR AUTOMÁTICO (FLUC).

Este circuito realiza la función de mantener estable la excitación del generador cuando ocurren cambios del control

automático al control manual, tratando de mantener iguales la salida del sistema manual y del sistema automático para evitar disturbios al sistema.

En la fig. 4.14, se muestra el diagrama de bloques del control seguidor.

La desviación entre la entrada manual y la entrada automática del sistema APPS detectada por el MC, es suministrada a una red de retardo constituida por el amplificador operacional OA1A, tal como se muestra en la fig. 4.15, que representa el esquema eléctrico del FLUC. A la salida de este retardo se tiene el punto #1 el cual presenta un nivel de voltaje correspondiente a un porcentaje de la desviación detectada. Esta señal pasa luego a los comparadores OA2A ó OA2B, dependiendo de su valor es aceptado o discriminado por uno de los comparadores, el cual a su vez, alimenta a los flip-flop tipo one-shot, los cuales producen un pulso que pone en conducción ya sea a Q5 ó Q7. Para desviaciones grandes, se produce un pulso de salida de alta frecuencia; para desviaciones pequeñas, se produce un pulso de salida de baja frecuencia. Si la desviación sensada es tal que la excitación es insuficiente, entonces OA2A produce un pulso que activa a T1 y este a su vez activa a Q5, haciendo que la referencia 7OR decremente el valor de referencia. Al mismo tiempo, los flip-flop mediante su salida negada (Q), alimentan a la compuerta NAND, y esta a una compuerta inversora que maneja al transistor FET que se encarga de proveer un camino de baja impedancia para la señal que viene del MC y así obviar el retardo de entrada. Siempre que cualquiera de los dos flip-flop emitan un pulso, en la compuerta NAND se tendrá un 1 lógico y un 0 lógico en sus entradas y a su salida un 1 lógico, el cual al pasar por la compuerta inversora se convierte en un 0 lógico, apagando al FET y haciendo que la red de retardo funcione. Si no se emite ningún pulso, entonces el FET es activado y provee un camino de baja impedancia para el primer pulso que llegue. Así, 7OR se maneja a base de pulsos incrementando o decrementando su valor. OA2A y OA2B nunca generan pulsos simultáneos.

En la tabla 4.6, se muestran los niveles típicos de ciertas señales bajo condiciones nominales.

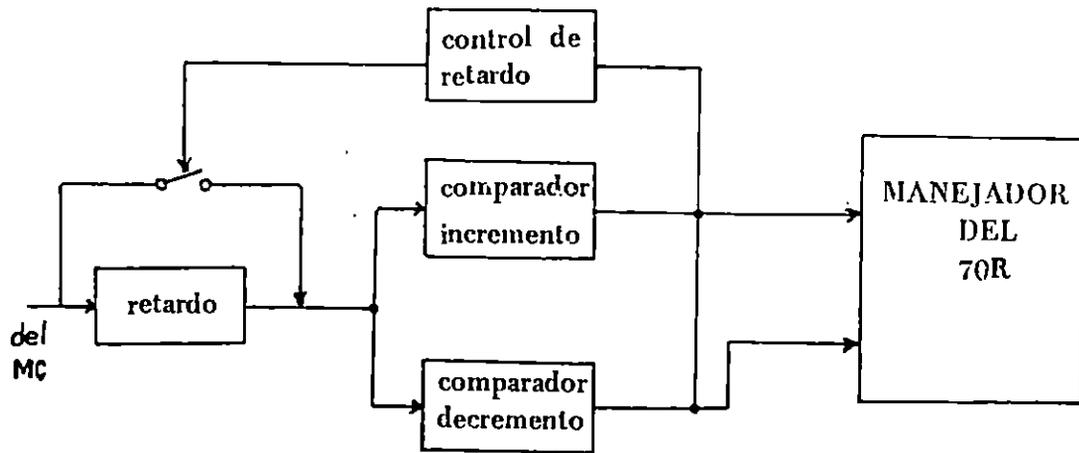


Figura 4.14. Diagrama de bloques del FLUC.

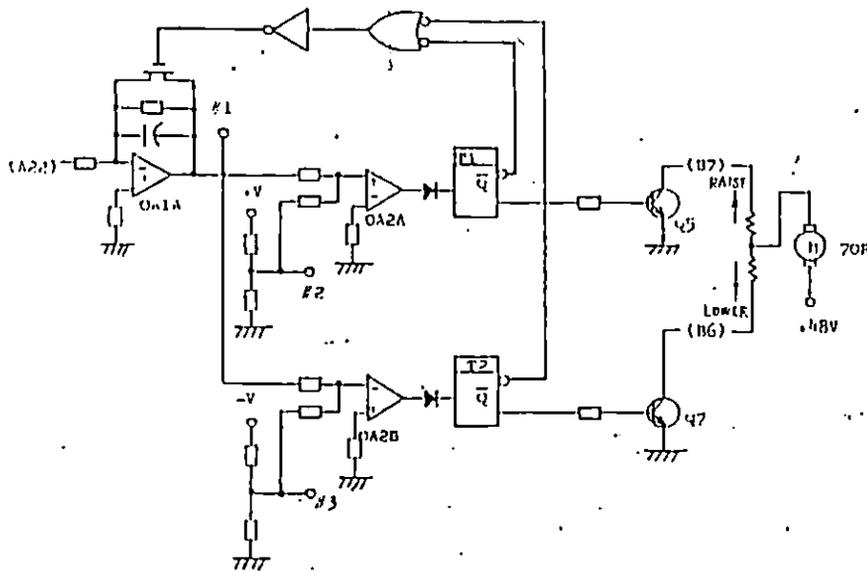


Figura 4.15. Esquema eléctrico del FLUC.

Tabla 4.6. Valores típicos del FLUC.

#2	1.05 VCC ± 10%
#3	-1.05 VCC ± 10%
T1	0.22 seg ± 20%
T2	0.22 seg ± 20%

4.2.7. CIRCUITO DETECTOR DE POTENCIA ACTIVA Y REACTIVA (P - Q).

Este circuito tiene por tarea detectar el valor de las potencias activa y reactiva durante el funcionamiento del generador. En la fig. 4.16, se muestra el diagrama de bloques de esta unidad.

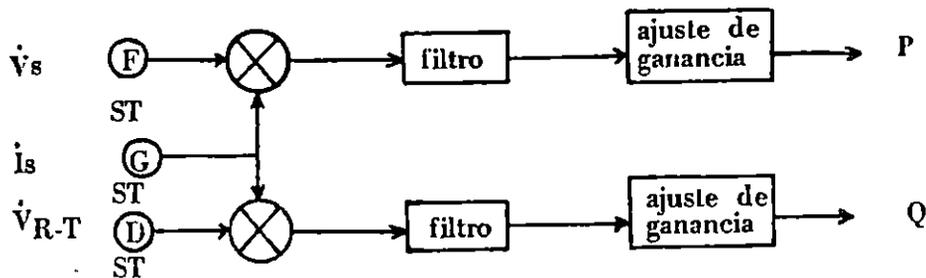


Figura 4.16. Diagrama de bloques de la unidad P-Q.

De la unidad ST se obtienen las señales D, G y F, las cuales proporcionan el valor del voltaje terminal de la fase S del generador (V_s), la corriente terminal de la fase S del generador (I_s), y el voltaje terminal de las fases R-T del generador (V_{R-T}) respectivamente. Estas señales al ser detectadas, son luego multiplicadas y su resultado determina el valor de P y Q. Para obtener a la potencia activa, el voltaje V_s y la corriente I_s son multiplicadas, utilizando la expresión dada en la ecuación (4.1).

$$P = V_s * I_s = |V_s| * |I_s| [\cos\phi - \cos(2t - \phi)] \quad (4.1)$$

En la fig. 4.17, se muestra el esquema eléctrico de esta unidad. El filtro DA1A deja pasar solamente a las componentes de c.c, hacia DA1B, el cual puede ajustar su ganancia por medio de VR2 para obtener una señal de $P = -8$ v /p.u.

La potencia reactiva Q, se obtiene por la multiplicación del voltaje V_{R-T} y la corriente I_s , utilizando la expresión dada en la ecuación (4.2).

$$Q = VR-T * I S = |VR-T| * |I S| [\text{sen } \varnothing - \text{cos } (2t + \pi/2 - \varnothing)]$$

(4.2)

El filtro OA2A deja pasar solamente a las componentes de c.c hacia OA2B, en el cual mediante VR5 se puede ajustar la ganancia para llegar a obtener una señal de $Q = \pm 8$ v/p.u. La señal de salida de la potencia reactiva Q , tiene polaridad inversa para ADELANTO y ATRASO. En la tabla 4.7, se muestran los valores típicos del circuito P-Q, bajo condiciones nominales.

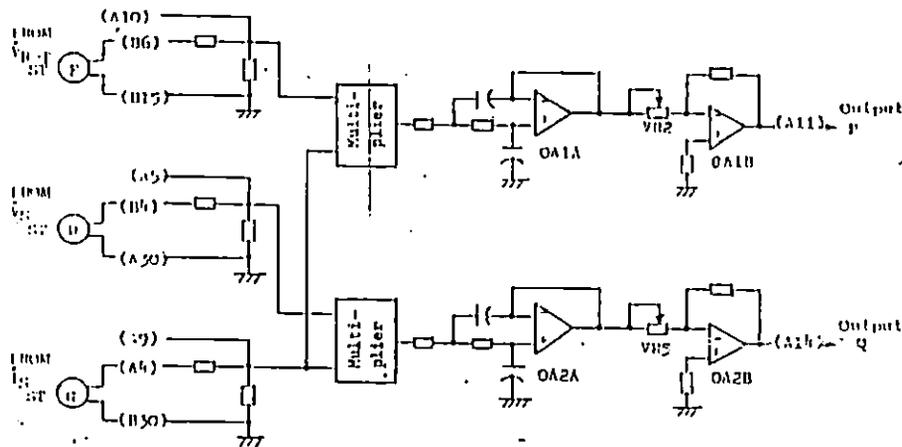


Figura 4.17. Esquema eléctrico de P-Q.

Tabla 4.7. Valores típicos del circuito P-Q.

	AJUSTE	VOLTAJE	OBSERVACIONES
(A10)	VR11st	6.4 VAC	---
(A 5)	VR10st	6.4 VAC	---
(A 9)	VR 9st	7.0 VAC	PC
(A11)	VR2	-8.0 VCC (adelanto)	---
(A14)	VR5	+8.0 VCC (atraso)	FP = 0

4.2.8. CIRCUITO LIMITADOR DE SUBEXCITACIÓN (UEL).

Este circuito tiene como objetivo mantener la potencia reactiva en adelante debajo de un cierto valor prescrito, para mantener estable la operación del generador y prevenir el recalentamiento del núcleo de la armadura, cuando el generador suministra potencia excesiva reactiva en adelante por excitación insuficiente.

En la fig. 4.18, se muestra el esquema eléctrico del UEL. La potencia activa P detectada por el circuito $F-\Omega$ (sección 4.2.7) es aplicada al sumador compuesto por el amplificador operacional O3A, a través del potenciómetro VR11, el cual determina la inclinación de la línea del limitador, tal como puede apreciarse en la fig. 4.19.

La curva característica se muestra en la fig. 1.9.

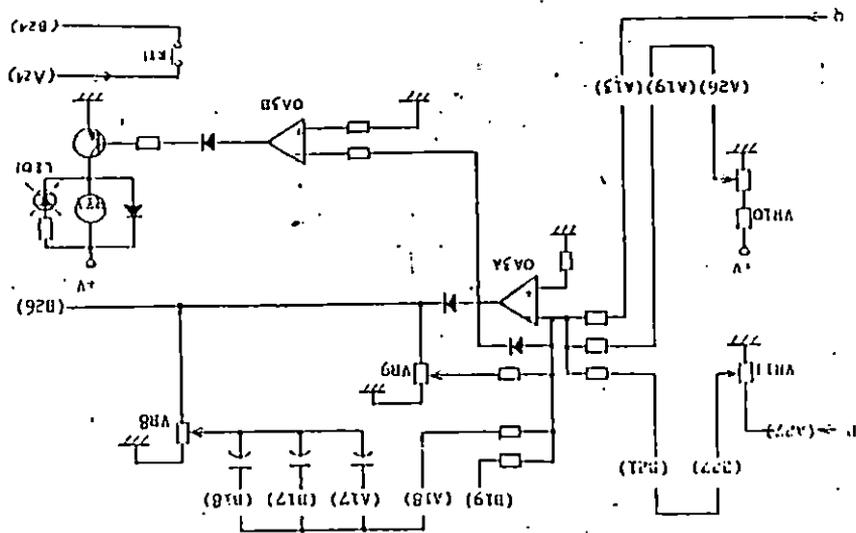


Figura 4.18. Esquema eléctrico de UEL.

Del diagrama presentado en la fig. 4.18, se concluye que a mayor potencia activa cedida por el generador, es menor la cantidad de potencia reactiva Q en adelanto que el generador puede ceder sin sufrir un posible daño en el estator. Esta capacidad de ceder potencia reactiva en adelanto es la que modifica VR11. La potencia reactiva Q detectada por el circuito P-Q, es conducida al amplificador OA3A, en donde es comparada con un valor inicial, previamente definido por medio de VR10, tal como puede observarse en la gráfica de la fig. 4.18; este potenciómetro VR10 determina el intercepto de la línea del limitador UEL, marcando la transición entre la potencia activa generada por el generador y la potencia activa consumida por la misma, a un cierto valor de potencia reactiva Q . Cuando es efectuada la comparación y si la potencia reactiva excede el valor establecido tanto por VR11 como por VR10, indica que el generador está excitado abajo de la línea del limitador UEL, haciendo que la salida del amplificador OA3A vaya hacia el comparador OA3B, el cual activa la bobina RY1, y al cerrar ésta sus contactos opera el incremento de excitación; cuando el generador es excitado por encima de la línea del limitador UEL, no se genera ninguna señal de salida hacia RY1 aunque la señal de salida hacia ADD siempre se mantiene presente.

VR9 es un potenciómetro utilizado para ajustar la ganancia de lazo del UEL, mientras que VR8 es un potenciómetro para ajustar la ganancia de amortiguamiento. Los niveles típicos de voltaje para algunos puntos del circuito UEL, se muestran en la tabla 4.8, con el generador bajo condiciones nominales.

Tabla 4.8. Valores típicos del circuito UEL.

	AJUSTE	VOLTAJE	OBSERVACIONES
(A27)	---	-8 VCC	PC
(A13)	---	± 8 VCC	FP = 0

4.2.9. CIRCUITO LIMITADOR DE SOBRE EXCITACIÓN (OEL).

La función que desarrolla el circuito limitador de sobre excitación es la de prevenir que el devanado de campo de la máquina síncrona se recaliente como resultado de una sobre excitación cuando el generador entrega una excesiva potencia reactiva en atraso. En la fig. 4.21, se muestra el diagrama de bloques del presente circuito.

Las características de límite se muestran en la fig. 4.19 y el esquema circuital en la fig. 4.20.

La señal de entrada L proveniente de la unidad ST proporciona el valor de la corriente de campo, la cual es comparada por OA1A y OA1B con respecto a los límites establecidos por VR1 y VR2 respectivamente, los cuales pueden observarse en la fig. 4.22. VR2 establece un valor mínimo de referencia para la sobre excitación, si esta es mayor que este límite, la salida de OA1B se transmite a OA3B directamente y luego a OA2A el cual le introduce un retardo a la señal, luego de OA2B se pasa a OA3B en donde se hace una comparación de la misma señal y su correspondiente retardo, como una forma de sensar cuanto tiempo dura la sobre excitación. De la salida de OA3B se pasa al sumador compuesto por OA4A, el cual a su salida la transmite hacia el ADD cada vez que existe una sobre excitación, y también hacia el comparador OA4B el cual activa a RY1, suprimiendo la corriente de campo para bajar la sobre excitación.

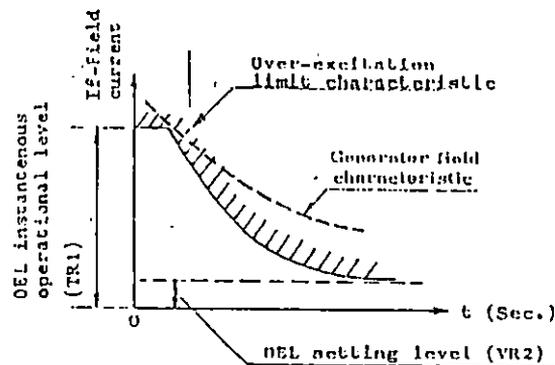


Figura 4.19. Características de límite de la unidad OEL.

Cuando la señal L se compara con VR1 y resulta mayor que este límite, la salida de OA1A se transmite sin retardo hacia OA3A y de este al sumador OA4A, accionando directamente y sin ningún retardo a RY1 para eliminar así la corriente de campo. VR6 se usa para establecer la ganancia de lazo del sistema, mientras que VR5 se utiliza para fijar la amortiguación del circuito OEL. En la tabla 4.9 aparecen valores típicos de este circuito cuando el generador funciona en condiciones nominales.

Tabla 4.9. Valores típicos del circuito OEL.

	AJUSTE	VOLTAJE	RANGO DE VARIACION	OBSEVACIONES
(A11)	VR3 st	3 VCC	---	PC
#5	VR1	valor fijado	4 - 7.4 V	-3 V p.u.
#6	VR2	valor fijado	aproximadamente de 0.6 - 3.3 If p.u.	-3 V p.u.

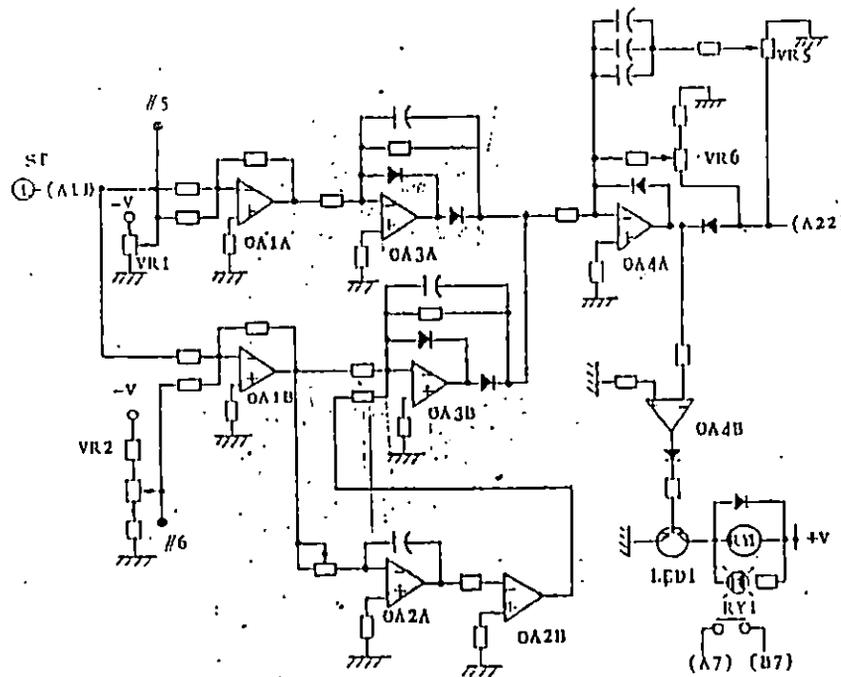


Figura 4.20. Esquema eléctrico de la unidad OEL.

4.2.10. CIRCUITO PROTECTOR DE SOBRECORRIENTE EN LOS TIRISTORES (TOC).

El circuito protector de sobrecorriente en los tiristores (TOC) está diseñado para proteger a los tiristores de sobrecorrientes causadas por un cortocircuito en el devanado de campo. El esquema circuital se muestra en la fig. 4.21.

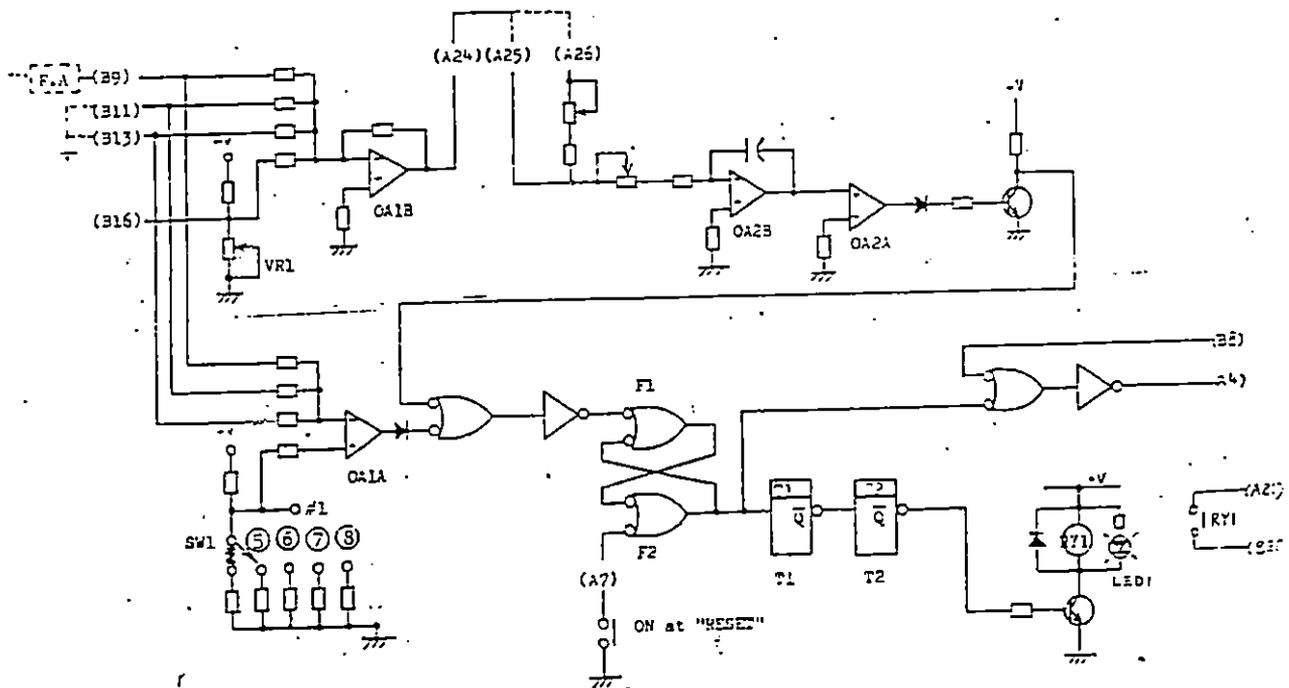


Figura 4.21. Esquema circuital de la unidad TOC.

La acción del TOC consiste en operaciones paralelas del relé de protección con los elementos limitadores de tiempo comprendidos por OA1B, OA2B y OA2A, y el circuito protector de operación instantánea comprendido por OA1A. El nivel de cambio de OA1A es mayor que el de OA1B, debido a la variabilidad de las referencias como puede observarse en la fig. 4.21. La señal de la corriente de campo I_f (c.c), es

suministrada a través del amplificador flotante F.A. (sección 4.2.11), a OA1A y OA1B.

Esta señal es comparada con el punto de referencia variable por OA1A, establecido por la posición de SW1. En la tabla 4.10, se muestran los valores de voltaje de las referencias VR1 y SW1 del TOC.

Tabla 4.10. Valores de voltaje de referencia VR1 y SW1.

	AJUSTE	VOLTAJE	OBSERVACIONES	
(816)	VR1	valor fijado		
#1	SW1	voltaje de la posición del switch	posición del SW1	voltaje (c.c)
			OFF	-12.3 V
			⑤	-11.2 V
			⑥	-10.1 V
			⑤ ⑥	- 9.39V
			⑦	- 9.1 V
			⑤ ⑦	- 8.49V
			⑧	- 8.11V
			⑥ ⑦	- 7.86V
			⑤ ⑧	- 7.63V
			⑤ ⑥ ⑦	- 7.4 V
			⑥ ⑧	- 7.11V
			⑤ ⑥ ⑧	- 6.74V
			⑦ ⑧	- 6.59V
			⑤ ⑦ ⑧	- 6.26V
			⑥ ⑦ ⑧	- 5.91V
			⑤ ⑥ ⑦ ⑧	- 5.65V

Cuando se excede a la referencia el circuito de memoria compuesto por las compuertas F1 y F2 memorizan el cambio y se produce una señal en las compuertas de disparo en (A4) instantáneamente, provocando un corte en el disparo de las compuertas y desenergizando abruptamente así a los tiristores. Después de un tiempo dado por T1, RY1 se activa y acciona al interruptor de campo. Las compuertas F1 y F2 se limpian cuando la operación del dispositivo protector de sobrecorriente en los tiristores ha finalizado, OA2A y OA2B componen un circuito limitador de tiempo, el cual opera igual que el circuito limitador instantáneo. En la tabla 4.11, se muestran los valores típicos de (B9).

Tabla 4.11. Valores típicos del TOC en la entrada (B9).

TERMINAL DE ENTRADA	RANGO DE VALORES	VOLTAJE
(B9)	0 - 50 mv	1V/p.u.-1.5 v/ p.u. cc.
	0 - 100 mv	
	0 - 300 mv	

4.2.11. CIRCUITO DETECTOR DE CORRIENTE DE CAMPO C.C.

Este circuito está diseñado para detectar la corriente c.c. del circuito de campo del generador. En la fig. 4.22, se muestra el circuito detector de corriente de campo.

La corriente de campo es convertida a una señal de voltaje por medio de la resistencia shunt y amplificada a un cierto nivel de voltaje a través del amplificador flotante. La señal de salida del amplificador flotante es aplicada al TOC. En la tabla 4.12, se muestran los niveles de voltaje de este circuito, con el generador bajo condiciones nominales.

Tabla 4.12. Valores de voltaje del circuito detector de corriente de campo.

VSH	VIN	VFA
50 mv / p.u.	10 mv / p.u.	1 v /p.u.
300 mv / p.u.	15 mv / p.u.	1.5 v /p.u.

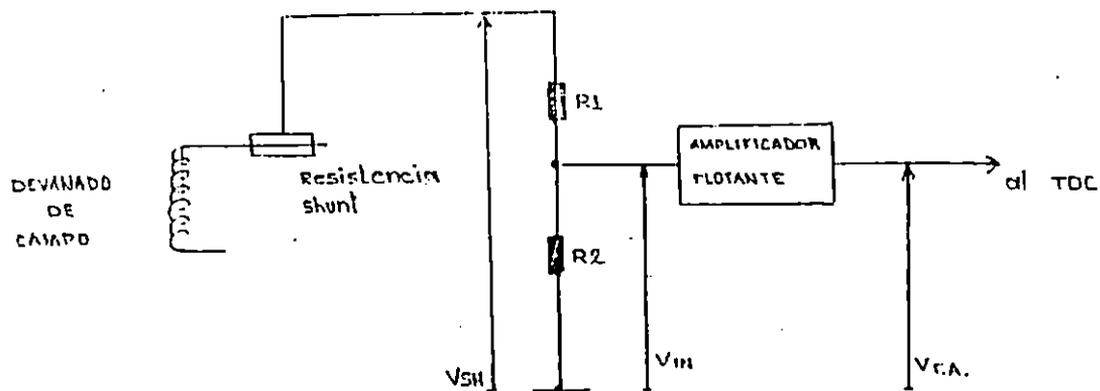


Figura 4.22. Esquema del circuito detector de corriente de campo.

4.2.11.1. AMPLIFICADOR FLOTANTE (F. AMP).

El amplificador flotante está diseñado para aislar el circuito de campo principal y el circuito de control. En la fig. 4.23, se muestra el diagrama de bloques de este circuito.

La ganancia de este amplificador puede cambiarse en dos rangos:

- a. $\pm 100 \text{ mv} / 0 - 10\text{v}$
- b. $\pm 10 \text{ mv} / 0 - 10\text{v}$

La señal de entrada c.c., es convertida a señal c.a. por el chopper como se muestra en la fig. 4.27, y amplificada por el amplificador c.a. Después que la señal c.a., es aislada por el transformador, es convertida nuevamente a c.c., por un circuito rectificador, y amplificada por un amplificador c.c. El rango activo de salida es de 0 - 10v, desde las siguientes entradas:

- a. entrada I1 - IE.....0 - $\pm 10\text{v}$
- b. entrada I2 - IE.....0 - $\pm 100 \text{ mv}$
- c. suministro de energía
 - c.a. V1-U.....220 VAC 50/60 Hz común.
- d. suministro de energía
 - c.a. V2-U.....200 VAC 50/60 Hz común.

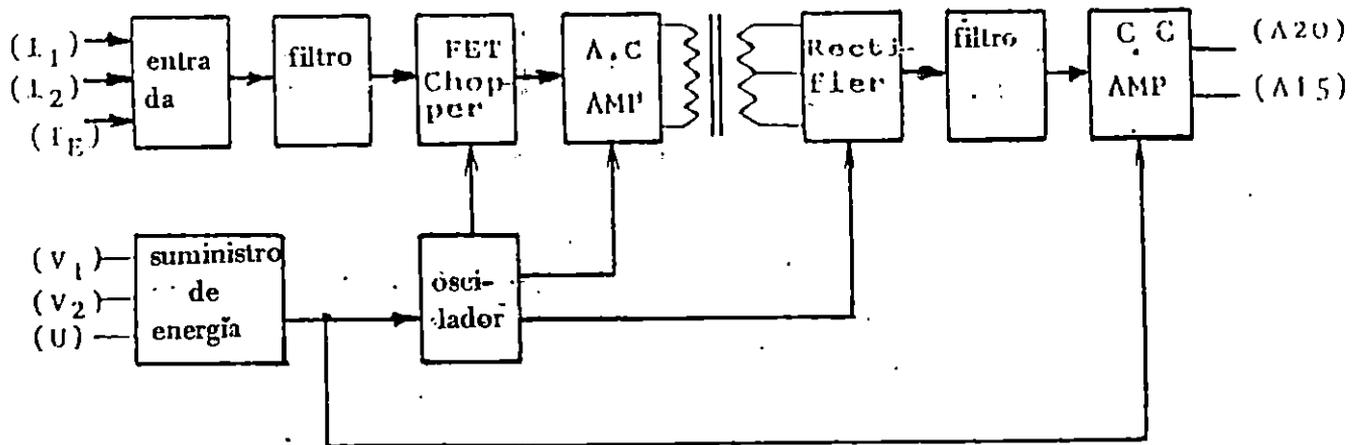


Figura 4.23. Diagrama de bloques del amplificador flotante.

4.2.12. REFERENCIA DE VOLTAJE (90R) Y REFERENCIA DE CORRIENTE DE CAMPO (70R).

El dispositivo de referencia de voltaje es una resistencia variable manejada por un motor, provista en el circuito detector de voltaje (sección 4.2.2). Esta resistencia variable da el voltaje de referencia correspondiente al voltaje terminal de la máquina síncrona. Esta resistencia variable es denominada resistencia de ajuste de voltaje 90R.

El rango de referencias de voltaje está dentro del +10% ~ -20% del voltaje nominal del generador y puede ser fijado en cualquier valor deseado dentro de ese rango.

La resistencia variable es dual, manejada por un motor C.C. a través de engranajes. El motor gira arbitrariamente en forma normal e inversa mediante la operación del interruptor 7 - 90R en el panel remoto de interruptores o por el interruptor montado en el dispositivo fijador de voltaje.

La resistencia variable y el motor, están contenidos en una sola cabina y poseen indicadores de posición. Se proveen

interruptores mecánicos de límite, para indicar los límites superior e inferior de la resistencia variable, los cuales abren al interruptor operativo para proteger al motor cuando las escobillas han alcanzado esos límites.

Además, algunos interruptores de giro contenidos en el mismo compartimiento, son fijados de acuerdo a un control secuencial.

El dispositivo de referencia de corriente de campo 70R, también tiene una construcción y funcionamiento similar al 90R, con la diferencia de que provee los valores de referencia de la corriente de campo del generador, y se ubica en el control manual (sección 4.2.3).

4.2.13. DEFASADOR DE PULSOS AUTOMÁTICO (APPS).

El desplazador automático de pulso de fase, es el encargado de proporcionar el disparo a la compuerta de los tiristores, controlando la potencia cedida al devanado de campo y en consecuencia, la excitación del generador, en base a todos los datos obtenidos por los controles y limitadores recolectados en el circuito ADD y parte de los controles y limitadores que van al control manual.

Esta unidad está constituida por circuitos integrados lineales, tiene una capacidad de disparo de hasta 250 A del tipo 158P6A, especialmente adaptable como APPS para excitadores con tiristores grandes sometidos a considerables fluctuaciones de voltaje y frecuencia en la fuente de energía. El diagrama de bloques del APPS se muestra en la fig. 4.24 y en la tabla 4.13, se muestran las especificaciones del mismo.

Como se puede observar en el diagrama de bloques, la sección de fase muestra solamente una fase, ya que por simplificación no se incluyen las fases restantes puesto que difieren solamente en fase siendo circuitalmente iguales. El transformador de la fuente de potencia, en un transformador trifásico en conexión $-Y$, en el devanado secundario se obtienen voltajes de ± 24 V y de +48 V. El voltaje de ± 24 V es utilizado para alimentar a los siguientes circuitos: formación de pulsos, supresor de pulsos y el detector de falla de fase del pulso.

La fuente de potencia de ± 48 V se obtiene también a partir de un rectificador de onda completa.

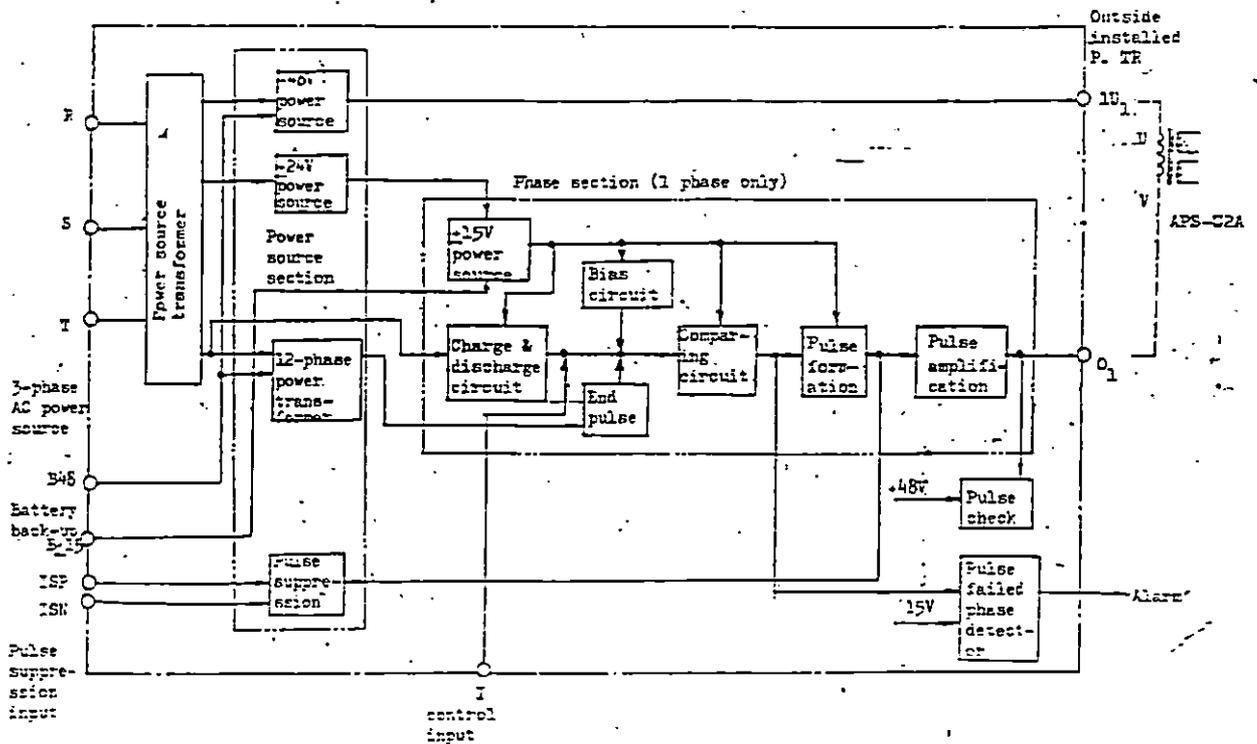


Figura 4.24. Diagrama de bloques de la unidad APPS.

4.2.14. UNIDAD DE CONTROL DE ESTABILIDAD DE EXCITACIÓN DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN (PSS).

Esta unidad, detecta variaciones en la salida del generador debidas a cambios súbitos de carga en el sistema de alimentación del generador sincrónico; también ajusta la excitación del generador a través del regulador de tensión automático, aumentando el efecto de control del generador sincrónico y aumenta la estabilidad dinámica. En la fig. 4.25, se muestra el diagrama de bloques de la unidad PSS, y en la fig. 4.26, se muestra el tablero del control.

Tabla 4.13. Especificaciones de la unidad APPS.

Item	ESPECIFICACION	ESPECIFICACION
	relación entre el main de la fuente del circuito de tiristores y la fuente de potencia del APPS	en fase.
fuente de potencia	AC	200/220V 50/60Hz 3 ϕ 50VA
	CC	± 15v 0.2 A ± 48v 0.3 A
voltaje de entrada de control Ei	rango	0 ~ 14VCC
	máx.	16 vcc
angulo de fase del eje (Ei = 0 ~ 12 v)		α máx) (α mín) 150 ± 5° ~ 15 ± 5°
pulso de salida	tipo	doble pulso
	valor pico Vp	10 v ± 25% (sin carga)
	Tw	más que 150 μ s (en 0.5 - 0.5vp)
	riso	menos que 2 μ s (en 0.1 - 0.9vp)
TR.P instalado afuera		APS - C2A
No. de TR.P la conexión por una fase		Máx. 4pcs
interfase	a α = 90 ~ 60°	menos que 3°
	a α = 150 ~ 15°	menos que 6°
fluctuación del voltaje de fuente a.c. en 80 ~ 110%		menos que 11° (el pulso de salida no se suprime en 10%)
frecuencia de las fluctuaciones de la fuente de potencia	70 ~ 150%	α máx ≤ 150° (a 150%) α máx ≥ 100° (a 70%) α mín ≥ 5° (a 70%, entrada 13 vcc)
	95 ~ 105%	$\Delta\theta$ máx ≤ 15°
supresión de entrada	pulso extinguido	nivel "1" (más de 10 v)
	pulso presente	nivel "0" (menos de 3v)
detección de falla de fase de pulso de salida	No. de fases	6 fases (pueden detectarse todas las fases falladas)
	capacidad del contacto del punto de salida	80 v 0.15 A

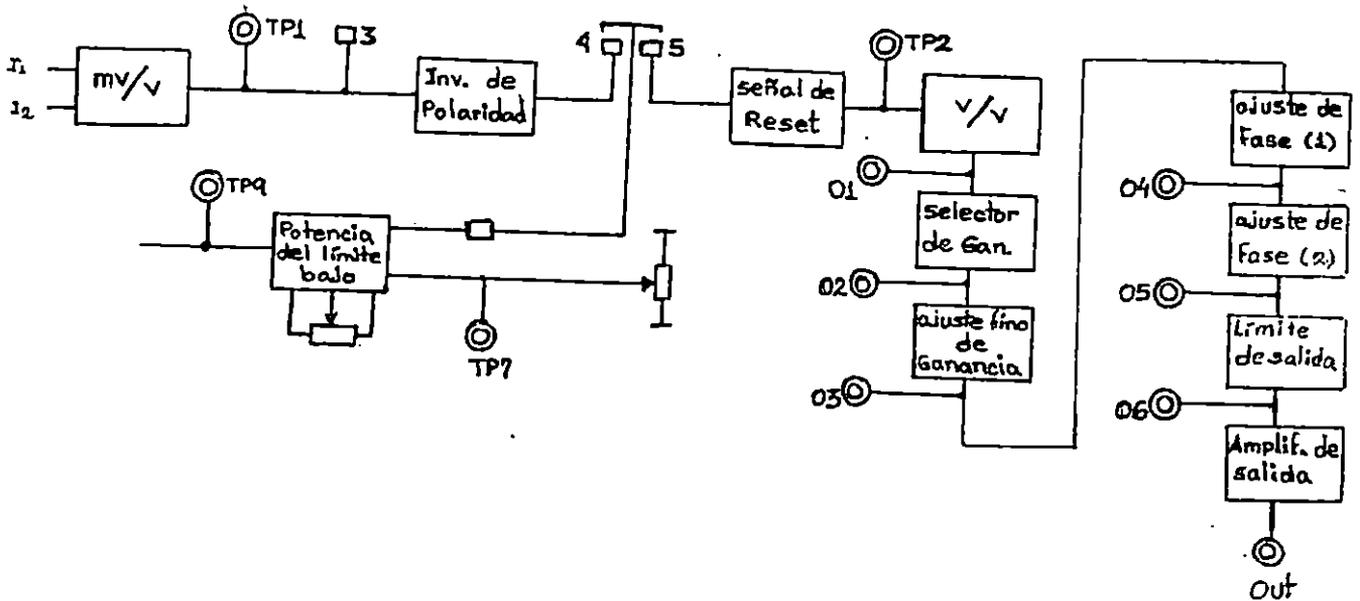


Figura 4.25. Diagrama de bloques de la unidad PSS.

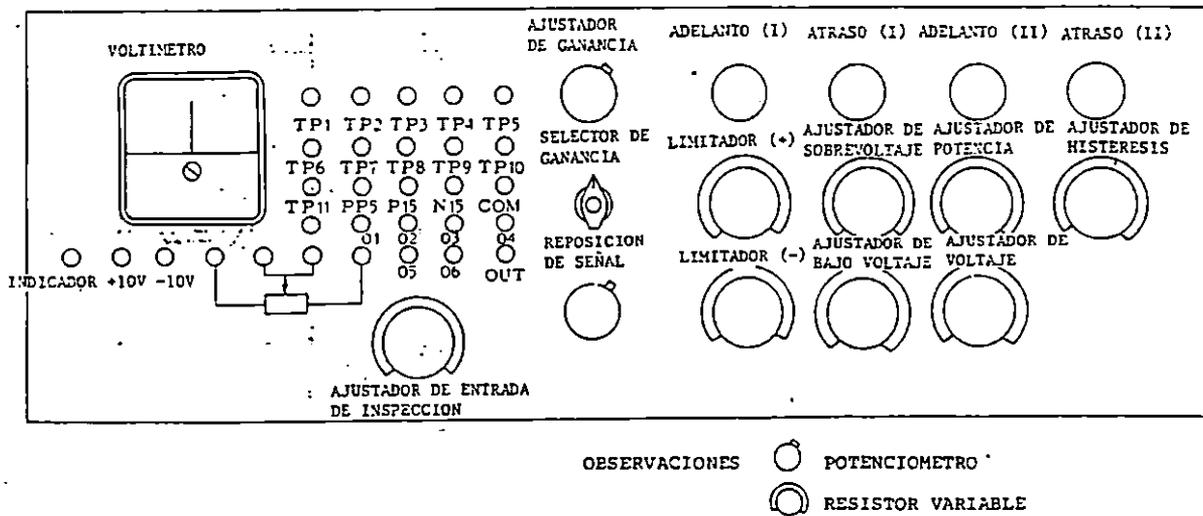


Figura 4.26. Panel de control de la unidad PSS.

La unidad de control de estabilidad de excitación del sistema de alimentación es una unidad que comprende cuatro partes interconectables y un panel de control. Los ajustes externos necesarios pueden efectuarse todos regulando un resistor variable o seleccionando el interruptor del panel de control. En la tabla 4.14, se muestran los datos de especificación de esta unidad.

Tabla 4.14. Datos de especificación de la unidad PSS.

Tensión y consumo de alimentación	+24 V cc 25 mA máx. -24 V cc 200 mA máx.
Tensión de entrada	0 a 10 V
Impedancia de entrada	100 k Ω
Tensión de salida.	12 Vpp máx. Variable entre 1,5 Vpp - 12 Vpp por medio del limitador de circuito
Impedancia de carga	más de 200 Ω
Rango de ajuste de ganancia	100 -1.000, 300 - 3.000, 1.000 - 10.000 cambio en 3 etapas por medio del interruptor rotatorio con circuito de ajuste mediante resistor variable.
Ajuste de fase.	Interruptor "LEAD" -20 A + 65 grad. ($\omega = 7$ rad/s) Rango de cambio de fase "LAG" -10 a 90 grad. ($\omega = 7$ rad/s) (con ajuste fino mediante potenciómetro).
Tensión del limitador de salida.	$\pm 0,7$ a ± 80 V. Pueden ajustarse independientemente el lado (+) o el (-) mediante resistor variable.
Rango de ajuste del límite inferior de alimentación.	conversión de salida de transductor según ángulo del rotor 0,5 a 4 V.
Rango de ajuste del factor de tensión.	conversión de tensión/salida PT 60 a 120 V.
Rango de ajuste del límite superior de tensión.	conversión de tensión/salida PT 60 a 120 V
Rango de ajuste del límite superior de tensión.	conversión de tensión de salida PT 110 a 123 V.
Rango de ajuste del límite inferior de tensión.	conversión de tensión de salida de PT 99 a 109V.
Circuito detector de tensión.	tensión de entrada 25 Vrms (tensión de línea 3 ϕ) corriente de entrada 5 mA.
Rango de temperatura de servicio.	0 a +55°

4.3. PRUEBAS PARA LA DETERMINACION DE LOS PARAMETROS DEL SISTEMA DE EXCITACION DE LA C. H. 15 DE SEPTIEMBRE.

4.3.1. METODOS DE PRUEBA UTILIZADOS.

Los métodos de prueba que se utilizarán para determinar de una forma experimental los parámetros del sistema de excitación (ver capítulo 3), son los siguientes:

En pequeña señal.

- 1.- Respuesta al escalón.
- 2.- Respuesta a la frecuencia.

En gran señal.

- 1.- Regulación de potencia reactiva.

4.3.1.1. PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA DE RESPUESTA AL ESCALÓN:

- 1.- Obtener previamente toda la información sobre el AVR, específicamente los diagramas electrónicos.
- 2.- Estudiar detenidamente los diagramas electrónicos del AVR, determinando los puntos de prueba de los circuitos seleccionados.
- 3.- Obtener el equipo necesario para realizar las pruebas.
- 4.- Efectuar las conexiones de los diferentes puntos de prueba de los circuitos y el equipo de medición utilizado.
- 5.- Desconectar del sistema la unidad a probar y mantener la alimentación del AVR.
- 6.- Fijar en base al numeral 2, el nivel de la señal escalón, la cuál proviene de un generador de señales o de una fuente de alimentación c.c.
- 7.- Calibrar las señales a graficar; señal escalón (entrada) y la señal de salida (respuesta), y seleccionar la velocidad del graficador.
- 8.- Con los datos obtenidos, se calculan los parámetros de interés de cada bloque y se procede a la simulación, según el modelo de excitador seleccionado.

4.3.1.2. PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA DE RESPUESTA A LA FRECUENCIA:

- 1.- Realizar los pasos de 1 a 5 correspondientes al método de respuesta al escalón.
- 2.- Fijar la amplitud y frecuencia de la señal senoidal del generador de señales.
- 3.- Efectuar los pasos 7 y 8 del método anterior.

4.3.1.3. PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA DE REGULACIÓN DE POTENCIA REACTIVA:

- 1.- Repetir los pasos 1 a 3 del método de respuesta al escalón.
- 2.- Utilizando el equipo adecuado (PC, sistema de adquisición de datos o un oscilógrafo de 6 canales), se miden las señales siguientes: voltaje del generador (V_g), corriente del generador (I_g), voltaje de campo (V_f), corriente de campo (I_f), potencia real (P_e), y la potencia reactiva (Q_e).
- 3.- Con el generador conectado al sistema, llevar al campo a condiciones de sub y sobre excitación. (De preferencia se debe realizar esta prueba en la madrugada o en horas en que no se afecte mucho al sistema de potencia).
- 4.- Con las señales calibradas adecuadamente, absorber y rechazar reactivos del sistema (en pasos del 10% del valor nominal), verificando que todas las señales indiquen los valores mínimos y máximos de la variación y los valores en estado estable antes y después de la prueba. (Esta prueba se realiza en coordinación con el COS).
- 5.- Determinar de los datos obtenidos, los valores de máxima y mínima excitación, el tiempo de permanencia en dichos valores, el tiempo de respuesta del AVR, y el tiempo de estabilización.

4.3.2. DETERMINACIÓN DE LOS CIRCUITOS A PROBAR DEL SISTEMA DE EXCITACIÓN DE LA C.H. 15 DE SEPTIEMBRE, UNIDAD 1.

Los circuitos que constituyen el sistema de excitación en su totalidad y que efectúan la regulación de voltaje del

generador bajo cualquier condición son mostrados en la figura 4.2.

De acuerdo a los criterios especificados en el capítulo 2, sección 2.1, de los circuitos que constituyen el AVR de la C.H. 15 de Septiembre en su totalidad, y que efectúan de manera directa en operación automática la regulación del voltaje, son los siguientes:

- 1.- Unidad transductora (ST).
- 2.- Detector de desviación (VD).
- 3.- Circuito compensador de señal (RCC).
- 4.- Unidad estabilizadora (PSS).
- 5.- Circuito sumador (ADD).
- 6.- Defasador automático de pulso (APPS).

De acuerdo al capítulo 2, sección 2.2, al interconectar estas unidades utilizando el diagrama de bloques general, el sistema mostrado en la fig. 4.2, el modelo que resulta de su interconexión corresponde al modelo propuesto por la IEEE denominado SEXS mostrado en la fig. 2.14a, en donde:

V_t : corresponde al voltaje terminal del generador.

V_{ref} : es el voltaje de referencia 90R.

Otras señales : representa la unidad PSS, y RCC.

T_A , T_B : son constantes de tiempo que proveen la reducción de ganancia transitoria necesaria para permitir un comportamiento dinámico satisfactorio con elevada ganancia de estado estable.

K : es la ganancia del regulador de voltaje.

T_E : es la constante de tiempo del excitador.

E_{min} : es el límite de mínimo de tensión de excitación.

E_{max} : es el límite máximo de tensión de excitación.

4.3.3. CIRCUITOS DE PRUEBA.

En la tabla 4.15, se muestran la identificación respectiva de los circuitos de prueba.

Tabla 4.15. Identificación de los circuitos de prueba del AVR.

CIRCUITO	IDENTIFICACION	TARJETA
Detector de desviación	VD	ASE000B
Circuito sumador	ADD	ASE000B
Circuito compensador de corriente	RCC	ASE030A
circuito estabilizador	PSS	APU042A

4.3.3.1. DETECTOR DE DESVIACIÓN DE VOLTAJE (VD):

- a) Los puntos de prueba de esta tarjeta se muestran en la tabla 4.16 (ver fig. 4.5).

Tabla 4.16. Puntos de prueba del circuito VD.

ENTRADA		SALIDA	
POSITIVO	NEGATIVO	ENTRADA	SALIDA
A6 (-)	tierra	A18	tierra

- b) Prueba a realizar: respuesta al escalón.
- c) Niveles de tensión: de 1 a 5 v. con variaciones de 1 v.
- d) Para realizar la prueba se debe separar del circuito sumador.
- e) Diagrama de alambrado: se muestra en la fig. 4.27.
- g) Lecturas que se realizarán: se tomaran datos de entrada y salida con el multímetro.

La prueba de esta tarjeta proporcionará el índice de respuesta del AVR.

4.3.3.2. CIRCUITO SUMADOR (ADD).

- a) Los puntos de prueba de esta tarjeta son mostrados en la tabla 4.17. (ver fig.4.5).

Tabla 4.17. Puntos de prueba del circuito ADD .

ENTRADA		SALIDA	
POSITIVO	NEGATIVO	ENTRADA	SALIDA
B11, B12, B13, B14 (se utilizará B11)	tierra	B22	tierra

- b) Prueba a realizar: respuesta al escalón.
- c) Niveles de tensión utilizados: 1 a 5 v. con variaciones de 1 v.
- d) Diagrama de alambrado: se muestra en la fig. 4.27.
- e) Para realizar la prueba se deberán separar los circuitos VD, FLUC, TOC, UEL, DEL.
- f) Lecturas que se realizarán: se tomarán gráficas de entrada y salida utilizando un oscilógrafo, y lecturas de voltaje con un multímetro.

La prueba de este circuito proporcionará las constantes de tiempo TA, TB, y la ganancia de regulación K.

4.3.3.3. CIRCUITO COMPENSADOR DE CORRIENTE (RCC).

- a) Prueba a realizar: prueba de regulación de potencia reactiva.
- b) El diagrama de alambrado se muestra en la fig.4.28.
- c) Lecturas que se realizarán: se tomarán gráficas utilizando un oscilógrafo, y se tomarán lecturas con un multímetro del voltaje del generador Vg, corriente del generador Ig, voltaje de campo Vf, corriente de campo If, potencia activa Pe, potencia reactiva Qe.

La prueba de este circuito definirá sus características de operación los techos de máxima y mínima excitación del AVR, así como la comprobación del tiempo de establecimiento y ganancia del regulador.

4.3.3.4. ESTABILIZADOR DEL SISTEMA DE POTENCIA (PSS).

- a) Los puntos de prueba se muestran en el diagrama de bloques mostrado en la fig. 4.25, de los cuales se utilizará como entrada: positivo TP1 y negativo a tierra, y como salida se tomara positivo el punto B13 de la tarjeta ADD, y negativo a tierra.
- b) Prueba a realizar: respuesta al escalón.
- c) Niveles de tensión utilizados: de 1 a 5v. con variaciones de 1 v.
- d) Diagrama de alambrado: se muestra en la fig. 4.27.
- e) Lecturas a realizar: se tomarán gráficas utilizando el oscilógrafo, y lecturas de voltaje con un multímetro de la entrada y salida.

La prueba de este circuito proporcionará la ganancia y retardo de esta unidad.

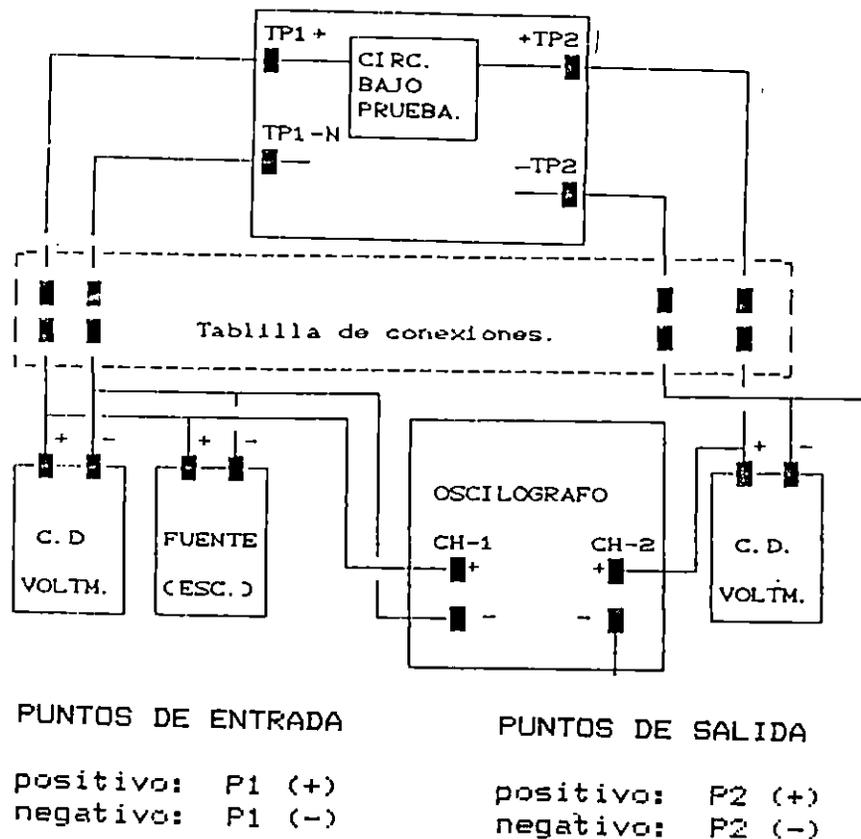


Figura 4.27. Diagrama de alambrado.

4.3.4. PRUEBA DE COMPORTAMIENTO DEL AVR.

Procedimiento:

1. Los puntos que se utilizarán para esta prueba se muestran en la fig.4.28.
2. Prueba a realizar: respuesta al escalón.
3. La prueba se realizará con la máquina operando en vacío, y se ajusta a 13.8 Kv del generador con el 70E.
4. La fuente de voltaje variable se conecta a la entrada del circuito VD. Ajustada a 0V.
5. Se cambia de manual a automático.
6. Se ajusta 13.8 Kv con el 90R.
7. Se ajusta con la fuente de voltaje 12.4 Kv en la salida del generador.
8. Se apaga la fuente de voltaje para someter al AVR al escalón de voltaje.
9. Lecturas a realizar: se tomarán las gráficas correspondientes de los puntos mostrados en la fig.4.28, utilizando un oscilógrafo ajustado a una velocidad de 1m/s, además se tomarán lecturas respectivas con el multímetro.

La realización de esta prueba proporcionara datos de comprobación de las pruebas realizadas por circuito, tanto de ganancia como constante de tiempo, respectivamente.

4.4. EQUIPO NECESARIO PARA REALIZAR LAS PRUEBAS.

Para la debida ejecución de las pruebas, el equipo que se recomienda utilizar para realizar las diferentes mediciones es el siguiente:

1. Oscilógrafo.
6. Multímetros digitales.
1. Fuente variable c.c. +/- 15 v.
1. Transductor de tensión.

Y elementos tales como cables coaxial blindado, mesa de prueba pines de conexión.

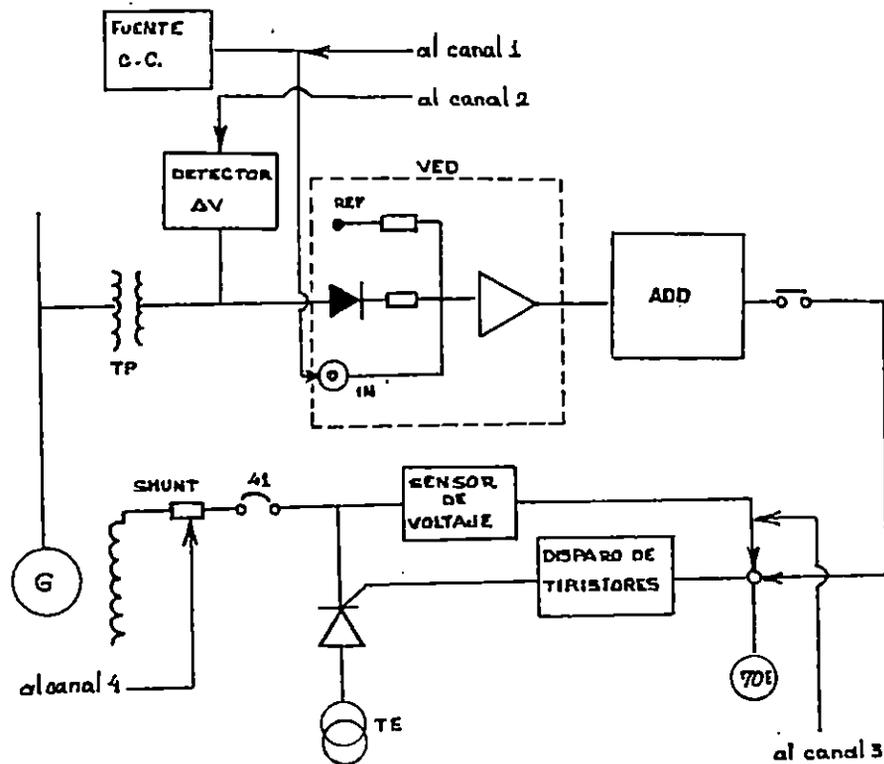


Figura 4.28. Conexión del equipo para la realización de la prueba de comportamiento del AVR.

4.5. CONCLUSIONES.

-El sistema de excitación de la C. H. 15 de Septiembre pertenece a la cuarta generación de reguladores de voltaje, los cuales se caracterizan por tomar la potencia de excitación de los terminales del generador y por su elevada rapidez en su respuesta.

-Según las normas definidas por la IEEE el sistema de excitación de la C. H. 15 de Septiembre, se puede representar adecuadamente por el modelo correspondiente al SEXS.

-De los circuitos que conforman en su totalidad al AVR, y que se involucran directamente en la determinación de los parámetros más importantes del mismo son: el circuito detector de voltaje, circuito sumador, circuito RCC y la unidad PSS.

-Entre las consideraciones tomadas en cuenta para determinar los métodos de prueba de los circuitos, es que las funciones de transferencia de los circuitos bajo prueba no son muy complicadas, por tanto pueden ser determinadas utilizando el método de respuesta al escalón.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] "MANUAL DE OPERACION DEL AVR DE LA C. H. 15 DE SEPTIEMBRE", HITACHI 1980.
- [2] Méndez Agüero R., Porras Calderón E. "MANUAL DE CALIBRACION, REGULADORES AUTOMATICOS DE VOLTAJE PLANTA ARENAL", Dirección de producción y Transporte de Energía. Costa Rica, 1988.
- [3] Hernández R. "PRUEBAS PARA LA DETERMINACION EXPERIMENTAL DE PARAMETROS DE REGULADORES DE VOLTAJE Y VALIDACION DEL MODELO DE REGULACION", LAPEM, MEXICO, 1991.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES.

- 1.- Los sistemas de excitación pueden ser representados por modelos matemáticos utilizando diagramas de bloques que describen la función de transferencia de los diferentes elementos que constituyen el sistema de excitación bajo estudio.
- 2.- Normalmente los modelos matemáticos no presentan una correspondencia de uno a uno con los componentes del sistema físico, ya que estos presentan características de uso general. Si el modelo presenta las mismas características de ganancia y fase, como las del equipo real, se puede considerar adecuado para su representación.
- 3.- Es recomendable utilizar simplificaciones o modelos intermedios siempre que sea posible en modelos demasiado complicados, utilizando métodos de reducción algebraicos.
- 4.- En modelos de sistemas complejos, algunos valores calculados por la reducción de los parámetros del modelo pueden diferir ampliamente de los medidos en el campo. Por tanto, el modelo matemático puede ser elaborado en detalle, reteniendo la correspondencia de uno a uno con el sistema físico, o puede ser un modelo reducido en el cual se represente el sistema de excitación en su forma más simple. Lo cual dependerá del tipo de estudio y de la exactitud que se desee obtener.
- 5.- Entre los métodos de prueba utilizados de gran señal, es preferible siempre que sea posible utilizar el modelo en caso de contar con este, para la determinación del comportamiento de la máquina síncrona bajo condiciones determinadas, debido a los efectos que se puedan producir en el sistema de potencia.
- 6.- Las pruebas de pequeña señal son preferibles debido a su fácil implementación, y que su realización se puede hacer con la máquina síncrona desconectada del sistema de potencia, y cuando se trate de circuitos que posean una función de transferencia sencilla de definir.
- 7.- La cantidad y calidad de los datos recolectados durante la realización de las pruebas depende tanto del equipo utilizado como de la debida calibración de este, así como la de la debida determinación de los puntos seleccionados para la toma de lecturas.

8.- Dependiendo del equipo con que se cuenta se determinará el tipo de prueba adecuado para este. Es recomendable utilizar equipo sofisticado tal como un analizador de espectros, y efectuar la prueba de respuesta en frecuencia, debido a que resulta más fácil la obtención de datos más confiables.

9.- Se recomienda realizar las pruebas que involucren causar disturbios en el sistema de potencia durante horas de la madrugada preferiblemente en época de invierno debido a que el nivel de agua en los embalses no es crítico, para minimizar el impacto de estos en los usuarios.

ANEXOS

Anexo A

TABLAS DE VALORES TIPICOS

Table A.1. Definitions of Tabulated Generator Unit Data

GENERATOR		EXCITER (continued)	
Unit no.	Arbitrary reference number	V_{Rmax}	pu (4) Maximum regulator output, starting at full load field voltage
Rated MVA	Machine-rated MVA; base MVA for impedances	V_{Rmin}	pu (4) Minimum regulator output, starting at full load field voltage
Rated kV	Machine-rated terminal voltage in kV; base kV for impedances	K_E	pu Exciter self-excitation at full load field voltage
Rated PF	Machine-rated power factor	τ_E	s Exciter time constant
SCR (1)	Machine short circuit ratio	$S_{E,75max}$	(5) Rotating exciter saturation at 0.75 ceiling voltage, or K_f for SCPT exciter
X_d'	pu Unsaturated d axis subtransient reactance	S_{Emax}	(5) Rotating exciter saturation at ceiling voltage, or K_p for SCPT exciter
X_d	pu Unsaturated d axis synchronous reactance	A_{EX}	(5) Derived saturation constant for rotating exciters
X_q'	pu Unsaturated q axis subtransient reactance	B_{EX}	(5) Derived saturation constant for rotating exciters
X_q	pu Unsaturated q axis transient reactance	E_{FDmax}	pu (5) Maximum field voltage or ceiling voltage, pu
X_{q0}	pu Unsaturated q axis synchronous reactance	E_{FDmin}	pu Minimum field voltage
r_a	pu Armature resistance	K_F	pu Regulator stabilizing circuit gain
X_L or X_p	pu Leakage or Potier reactance	τ_{F1} or τ_{F1}	s Regulator stabilizing circuit time constant (#1)
r_2	pu Negative-sequence resistance	τ_{F2}	s Regulator stabilizing circuit time constant (#2)
r_2	pu Negative-sequence reactance		
X_0	pu Zero-sequence reactance		
τ_d''	s d axis subtransient short circuit time constant	TURBINE-GOVERNOR	
τ_d'	s d axis transient short circuit time constant	GÖV	(6) Governor type: G = general, C = cross-compound, H = hydraulic
τ_{d0}''	s d axis subtransient open circuit time constant	R	(6) Turbine steady-state regulation setting or droop
τ_{d0}'	s d axis transient open circuit time constant	P_{max}	MW Maximum turbine output in MW
τ_q''	s q axis subtransient short circuit time constant	τ_1	s Control time constant (governor delay) or governor response time (type H)
τ_q'	s q axis transient short circuit time constant	τ_2	s Hydro reset time constant (type G) or pilot valve time (type H)
τ_{q0}''	s q axis subtransient open circuit time constant	τ_3	s Servo time constant (type G or C), or hydro gate time constant (type G) or dashpot time constant (type H)
τ_{q0}'	s q axis transient open circuit time constant	τ_4	s Steam valve bowl time constant (zero for type G hydrogovernor) or ($\tau_H/2$ for type H)
τ_a	s Armature time constant	τ_5	s Steam reheat time constant or 1/2 hydro water starting time constant (type C or G) or minimum gate velocity in MW/s (type H)
W_R	MW·s Kinetic energy of turbine + generator at rated speed in MJ or MW·s	F	(6) pu shaft output ahead of reheat or -2.0 for hydro units (types C or G), or maximum gate velocity in MW/s (type H)
r_F	Ω Machine field resistance in Ω		
$S_{G1,0}$	(2) Machine saturation at 1.0 pu voltage in pu		
$S_{G1,2}$	(2) Machine saturation at 1.2 pu voltage in pu		
$E_{FD,FL}$	(2) Machine full load excitation in pu		
D	(3) Machine load damping coefficient		
			STABILIZER
EXCITER		PSS	(7) PSS feedback: F = frequency, S = speed, P = accelerating power
VR Type	(4) Excitation system type	K_{QV}	(7) PSS voltage gain, pu
Name	Excitation system name	K_{QS}	(7) PSS speed gain, pu
RR	(4) Exciter response ratio (formerly ASA response)	τ_Q	s PSS reset time constant
τ_R	s Regulator input filter time constant	τ_{Q1}	s First lead time constant
A_1	pu Regulator gain (continuous acting regulator) or fast raise-lower contact setting (rheostatic regulator)	τ_{Q1}	s First lag time constant
τ_{11} or τ_{A1}	s Regulator time constant (#1)	τ_{Q2}	s Second lead time constant
τ_{12}	s Regulator time constant (#2)	τ_{Q2}	s Second lag time constant
		τ_{Q3}	s Third lead time constant
		τ_{Q3}	s Third lag time constant
		V_{stim}	pu PSS output limit setting, pu

Table A.2 (continued)

TURBINE-GOVERNOR										
GOV	(6)	G	$G$	$G$	$G$	$G$	$G$	$G$	$G$	$G$
K	(6)	0.050	0.050	0.050	0.050	0.056	0.050	0.050	0.050	0.050
P_{max}	MW	8.60	14.00	23.80	40.00	40.00	52.50	65.50	90.00	86.00
τ_1	s	48.440	16.000	16.000	16.000	0.000	0.000	25.600	20.000	12.000
τ_2	s	4.634	2.400	2.400	2.400	0.000	0.000	2.800	4.000	3.000
τ_3	s	0.000	0.920	0.920	0.920	0.500	0.000	0.500	0.500	0.500
τ_4	s	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
τ_5	s	0.579	0.300	0.300	0.300	0.430	0.785	0.350	0.850	1.545
F	(6)	-2.000	-2.000	-2.000	-2.000	-2.000	-2.000	-2.000	-2.000	-2.000
STABILIZER										
PSS	(7)	...	...	...	...	...	...	F	F	F
K_{Q1}	(7)	...	...	...	...	...	...	0.000	0.000	0.000
K_{Q5}	(7)	...	...	...	...	...	...	1.000	4.000	3.150
τ_Q	s	...	...	...	...	...	...	30.000	30.000	10.000
τ_{Q1}	s	...	...	...	...	...	...	0.500	0.700	0.758
τ_{Q1}	s	...	...	...	...	...	...	0.030	0.100	0.020
τ_{Q2}	s	...	...	...	...	...	...	0.500	0.700	0.758
τ_{Q2}	s	...	...	...	...	...	...	0.030	0.050	0.020
τ_{Q3}	s	...	...	...	...	...	...	0.000	0.000	0.000
τ_{Q3}	s	...	...	...	...	...	...	0.000	0.000	0.000
I_{slim}	pu	...	...	...	...	...	...	0.100	0.100	0.095

Table D.2. (cont.)

Table A.2 (continued)

TURBINE-GOVERNOR										
GOV	(6)	G	G	G	G	G	G	G	G	G
R	(6)	0.030	0.051	0.050	0.050	0.038	0.050	0.050	0.050	0.050
P _{max}	MW	133.00	115.00	171.00	120.00	160.00	155.00	267.00	250.00	603.30
T ₁	s	52.100	...	31.00	27.500	65.300	...	124.470	30.000	36.000
T ₂	s	4.800	...	4.120	3.240	6.200	...	8.590	3.500	6.000
T ₃	s	0.500	...	0.393	0.500	0.500	...	0.250	0.520	0.000
T ₄	s	0.000	...	0.000	0.000	0.000	...	0.000	0.000	0.000
T ₅	s	0.498	...	0.515	0.520	0.650	...	0.740	0.415	0.900
F	(6)	-2.000	-2.000	-2.000	-2.000	-2.000	-2.000	-2.000	-2.000	-2.000

STABILIZER										
	(7)	F	F	F	F	F	F	F	F	F
PSS	(7)	0.000	0.000	0.000	...	...	...	0.000	0.000	0.000
K _{QV}	(7)	1.000	0.300	8.000	...	...	...	4.000	10.000	5.000
K _{QS}	(7)	10.000	10.000	30.000	...	...	...	55.000	15.000	10.000
r _Q	s	0.700	0.431	0.600	...	...	...	1.000	0.000	0.380
r _{Q1}	s	0.020	0.020	0.100	...	...	...	0.020	0.053	0.020
r _{Q2}	s	0.700	0.431	0.600	...	...	...	1.000	0.000	0.380
r _{Q3}	s	0.020	0.020	0.040	...	...	...	0.020	0.053	0.020
r _{Q3}	s	0.000	0.000	0.000	...	...	...	0.000	0.000	0.000
r _{Q3}	s	0.000	0.000	0.000	...	...	...	0.000	0.000	0.000
r _{slim}	pu	0.050	0.100	0.100	...	...	...	0.090	0.060	0.050

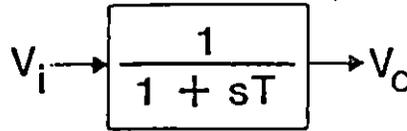
RESPUESTAS CARACTERISTICAS

Anexo B

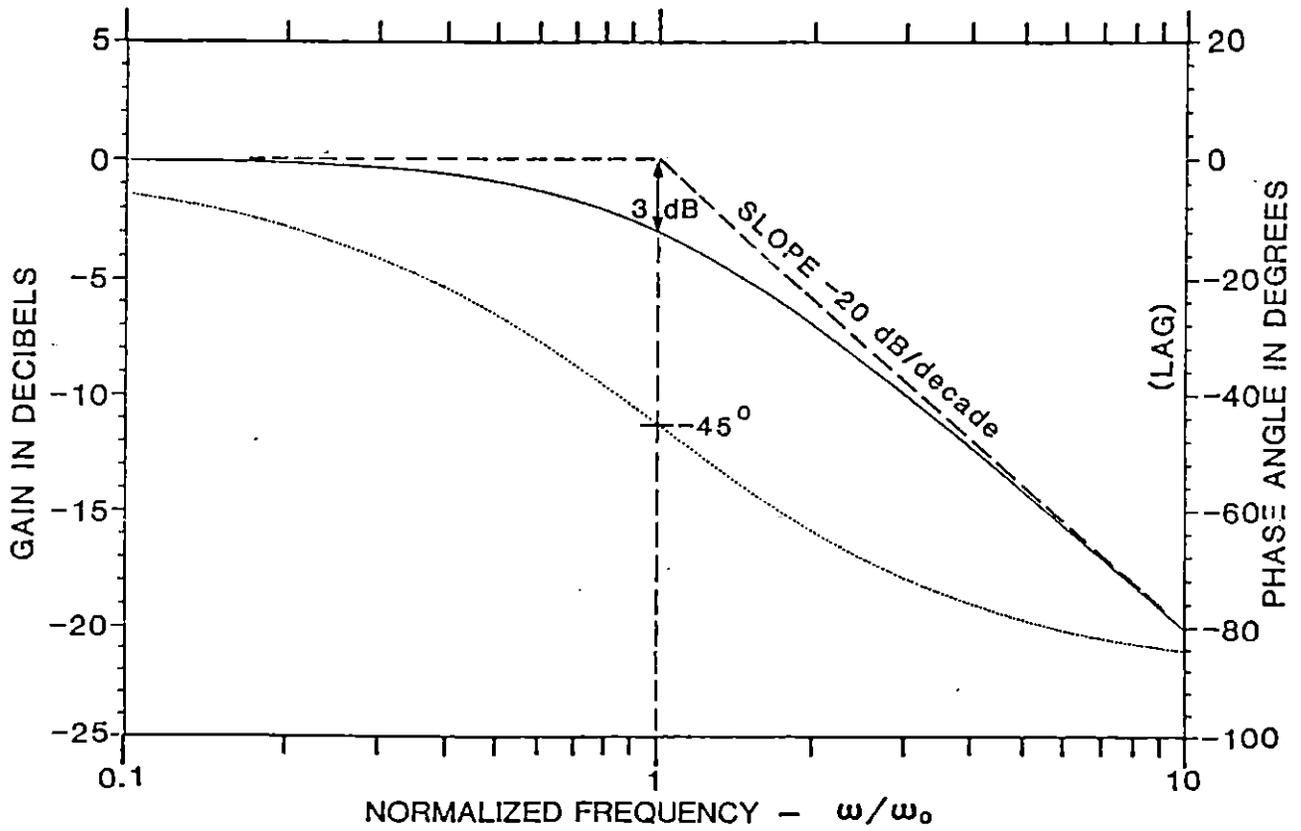
Appendix B
Frequency Response Characteristics of Typical Excitation Control System Elements

Appendix B consists of a series of figures that illustrate the frequency responses for several typical excitation control system elements.

Fig B1
First Order System



$\omega_0 = 1/T$



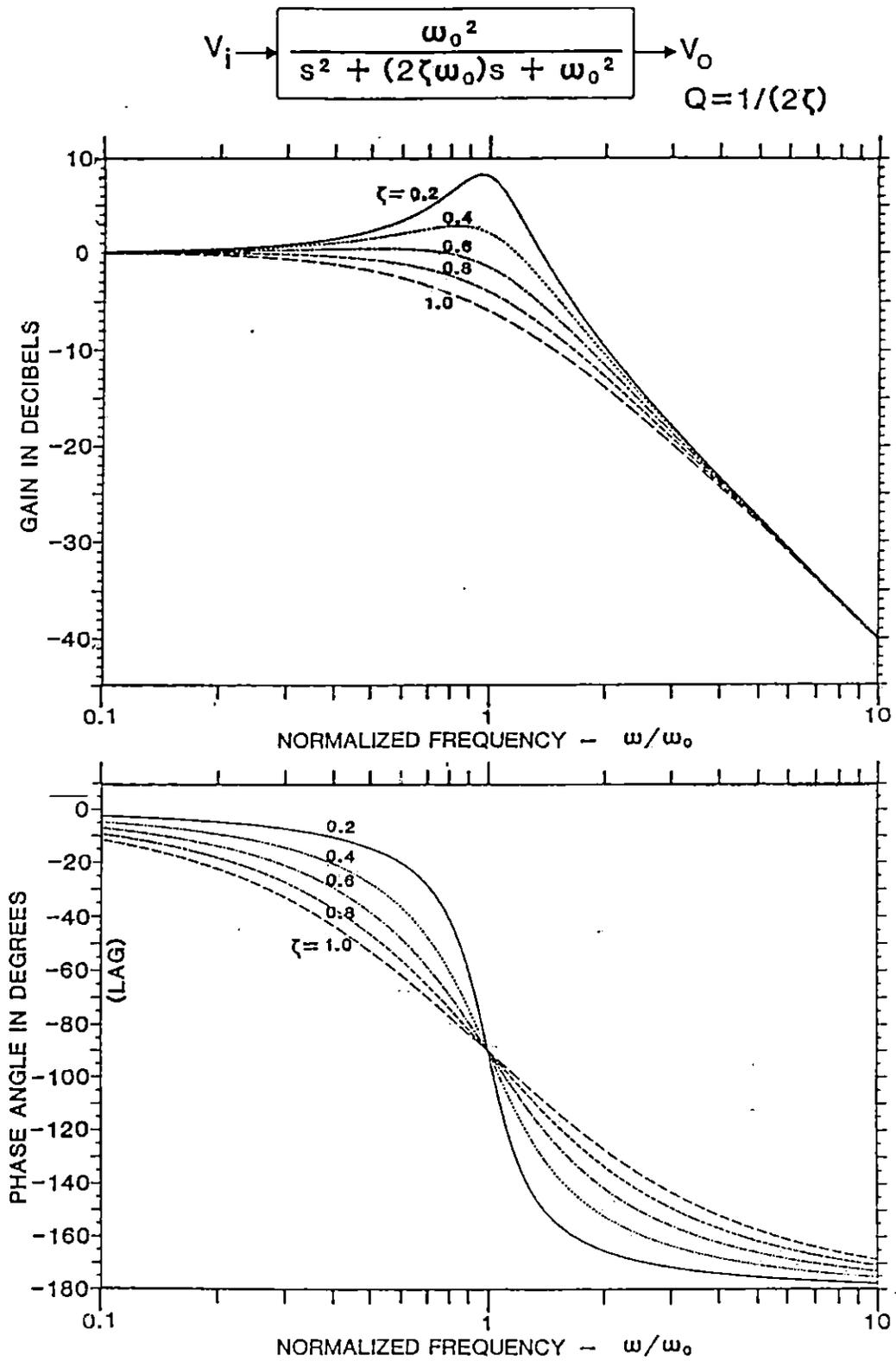


Fig B2
Second Order System

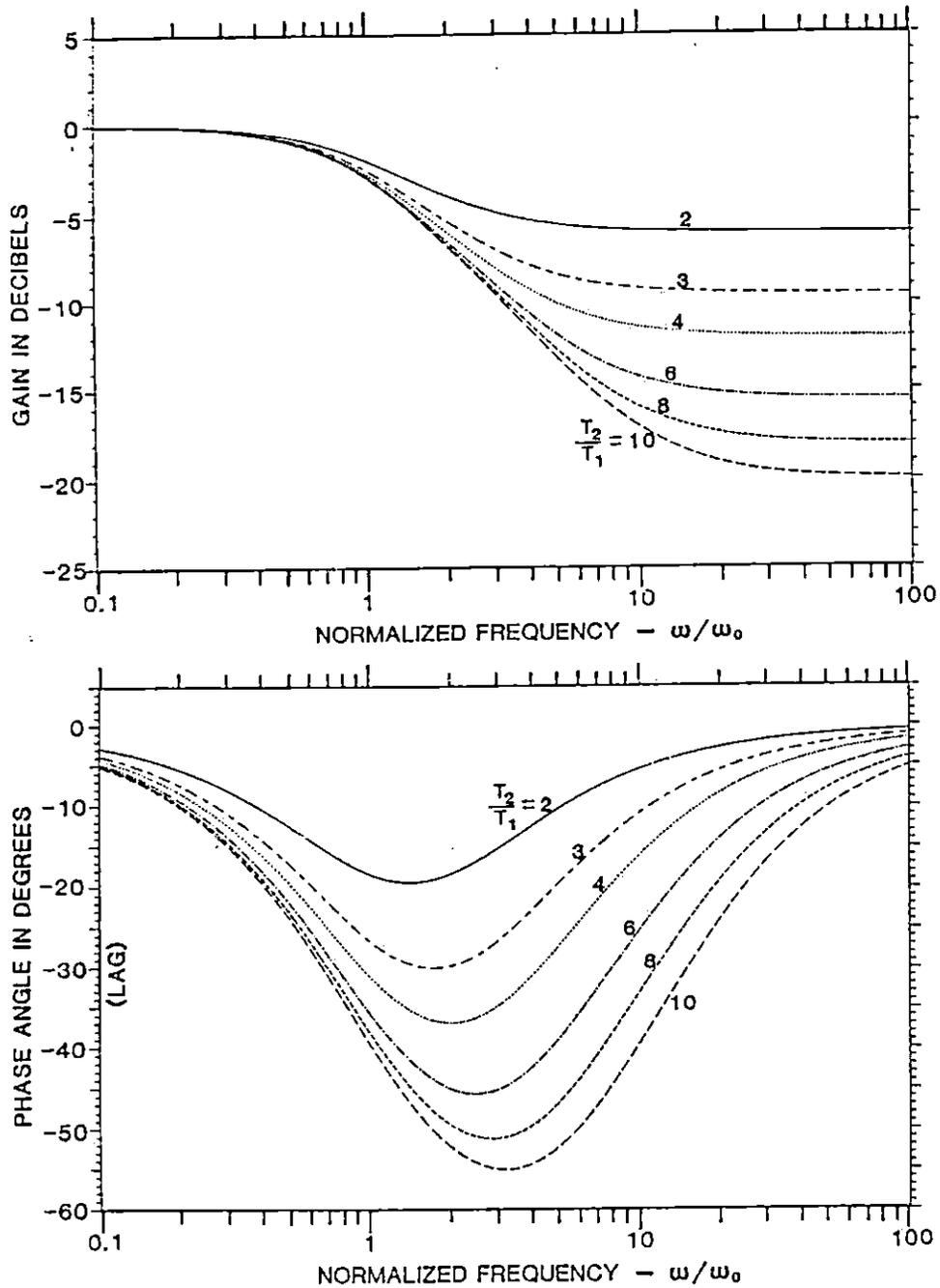
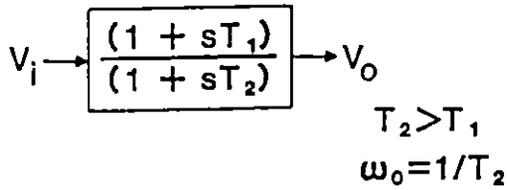


Fig B3
Lag-Lead Function

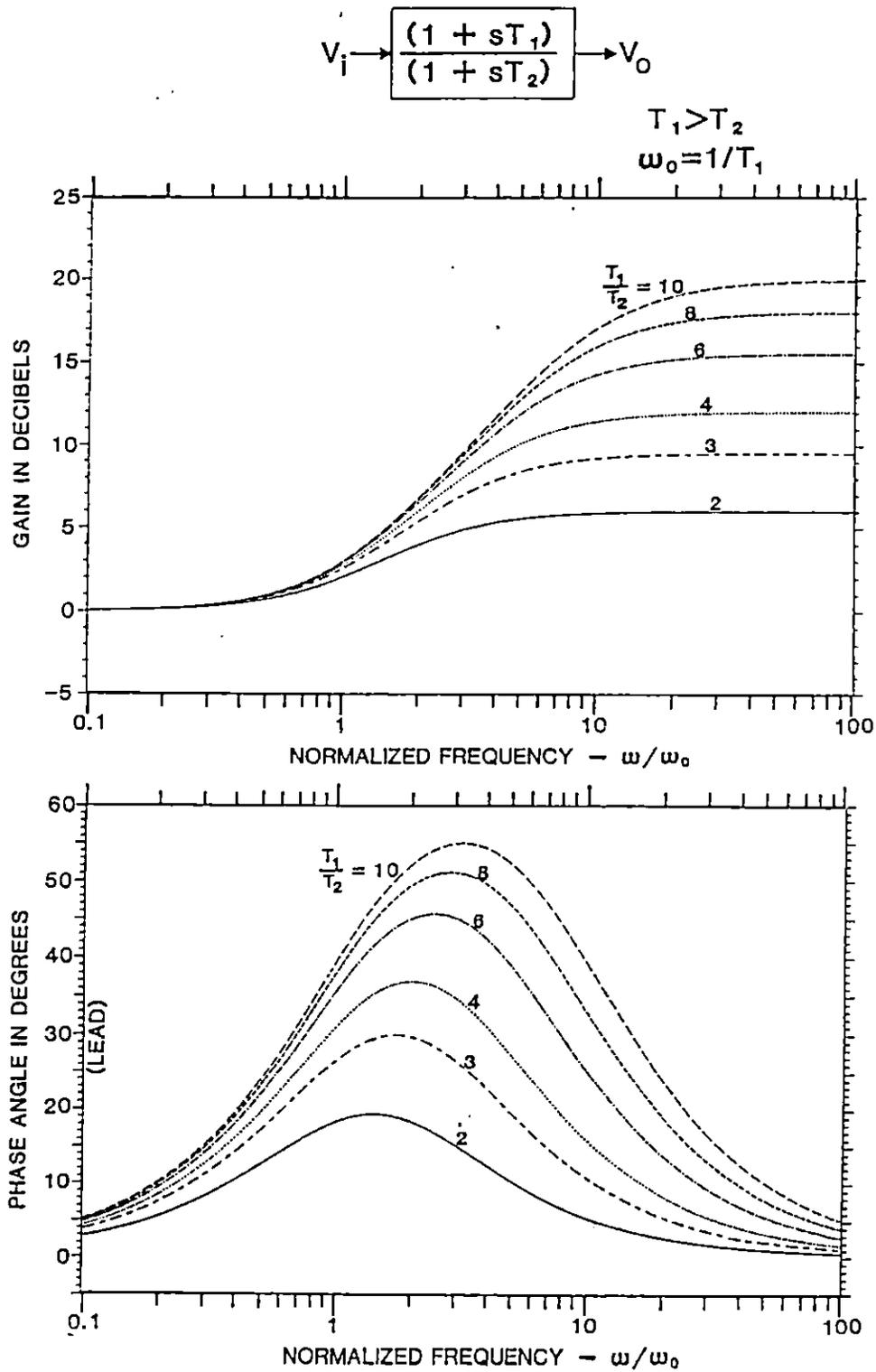


Fig B4
Lead-Lag Function

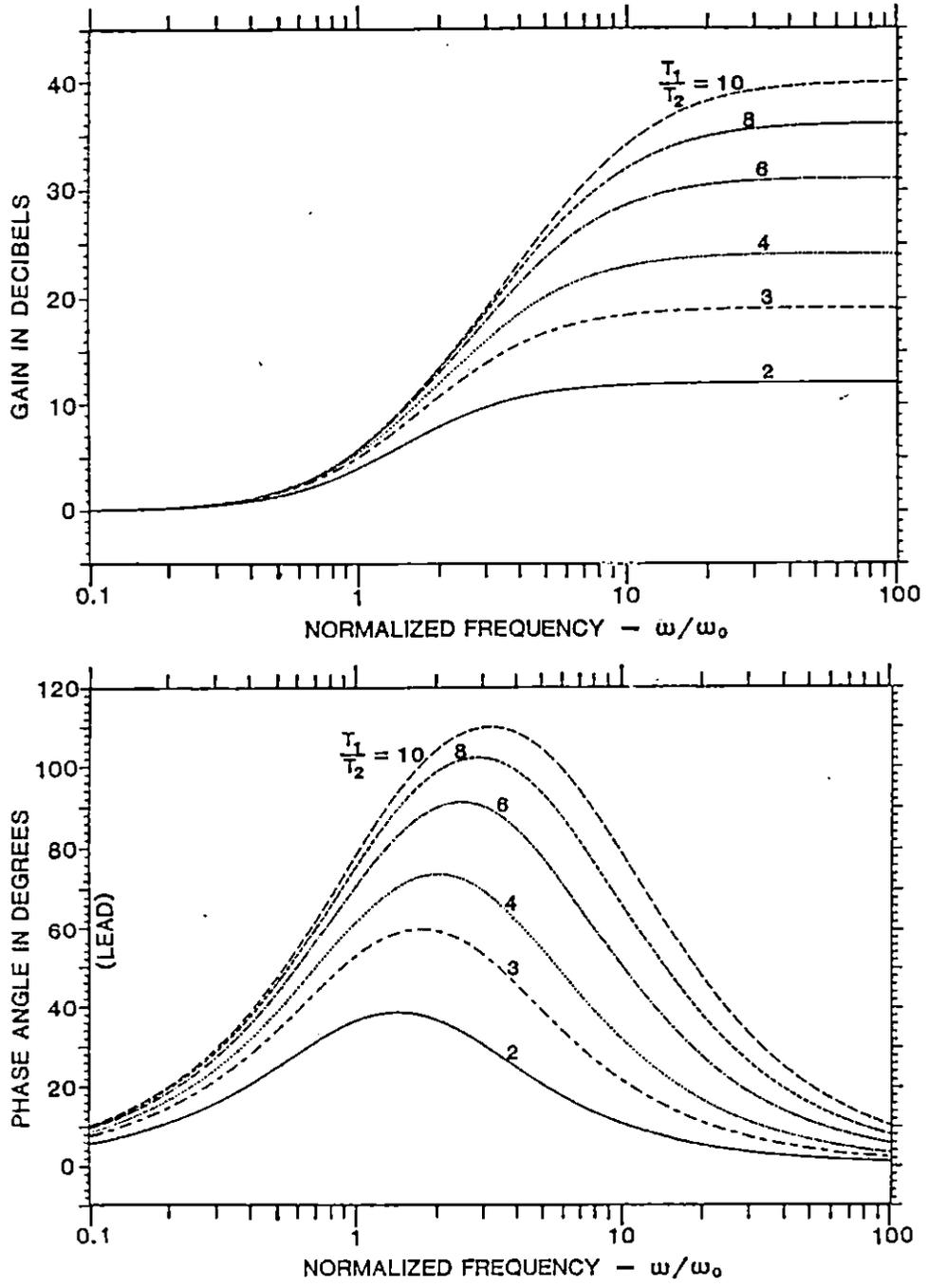
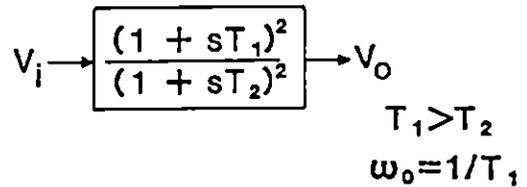


Fig B5
Twin Lead-Lag Function

$$V_o = \frac{s^2 + \omega_0^2}{s^2 + \omega_0^2 + (s/Q)\omega_0} V_i \quad Q = 1/(2\zeta)$$

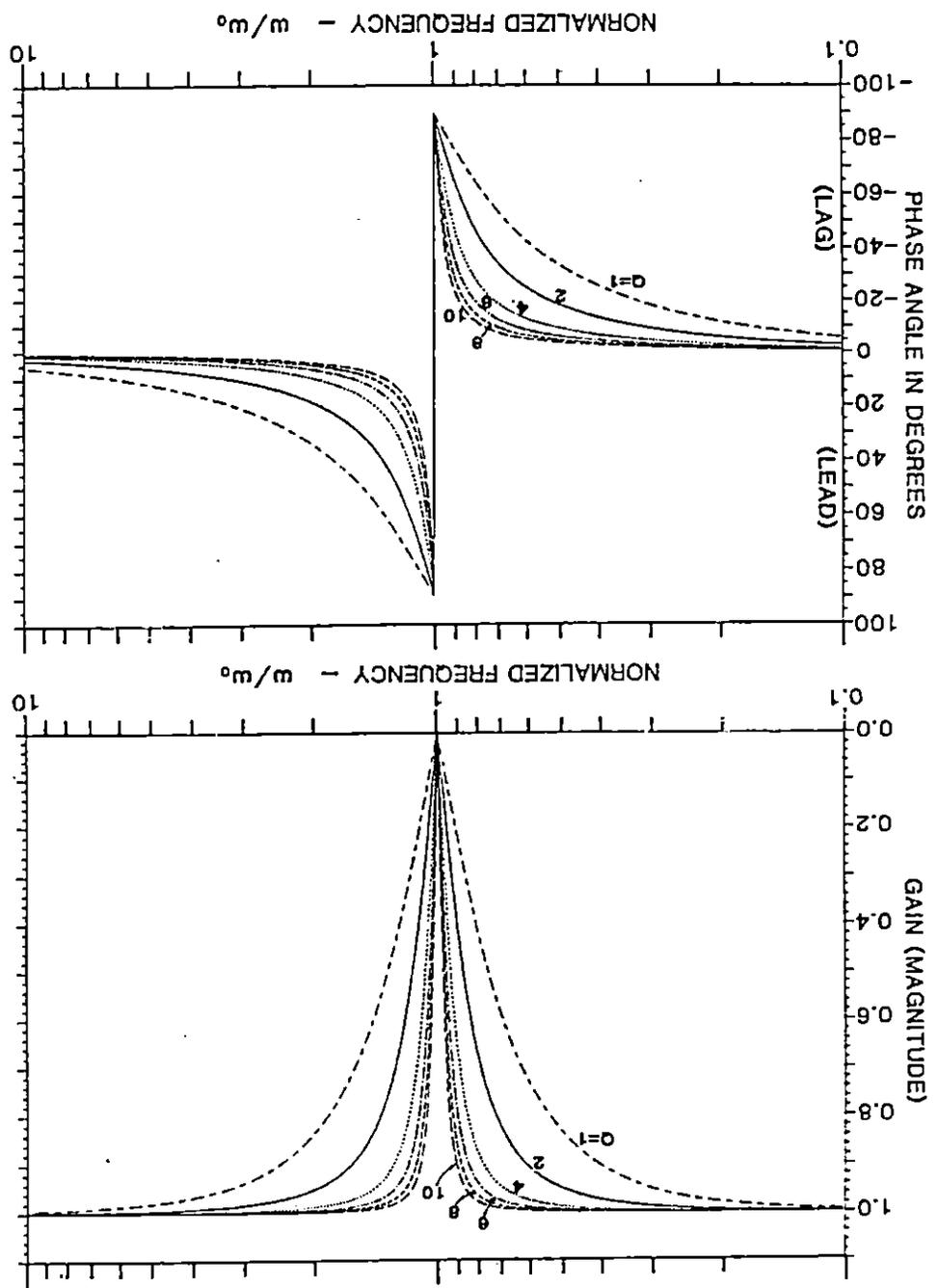
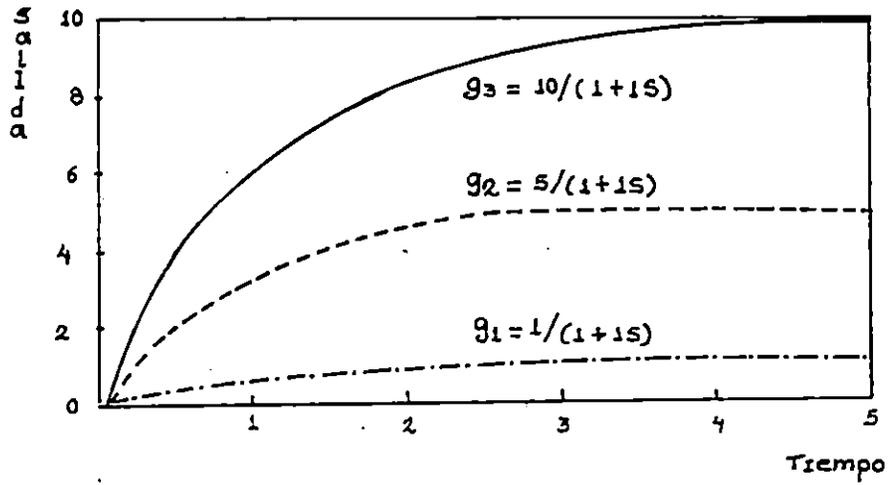
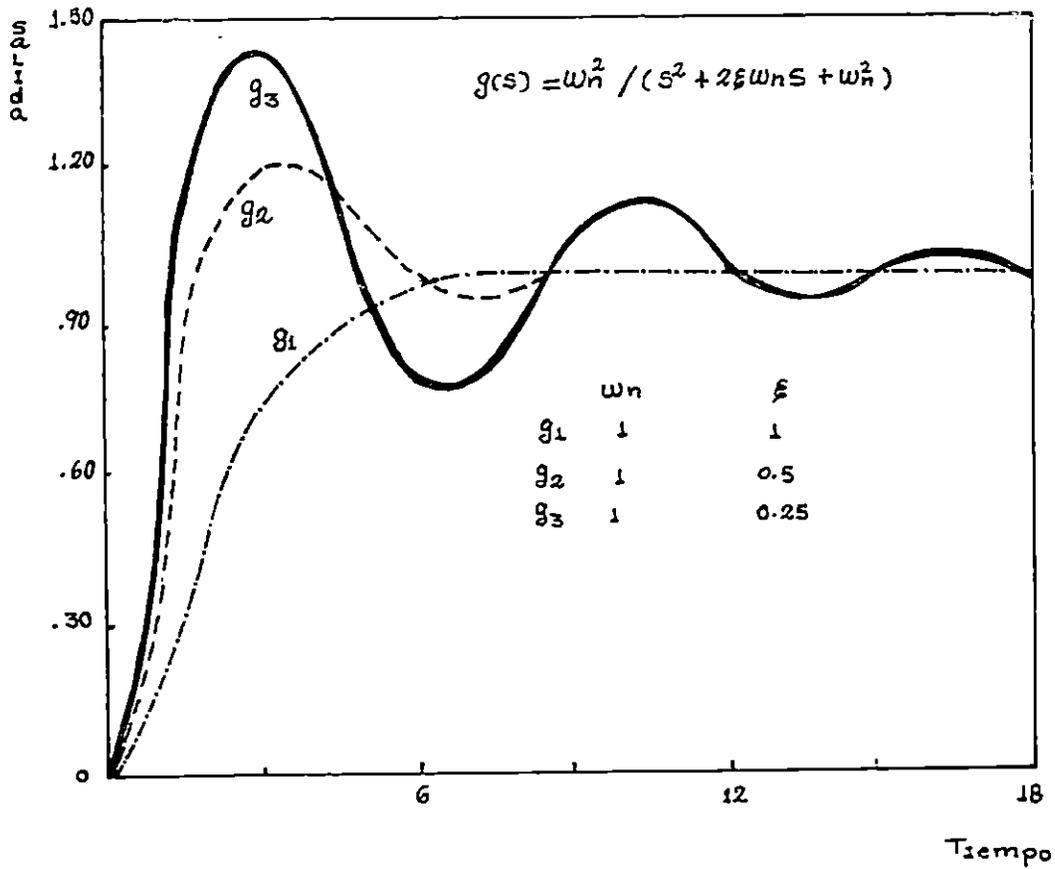


Fig B6
Biquadratic Notch Filter Function

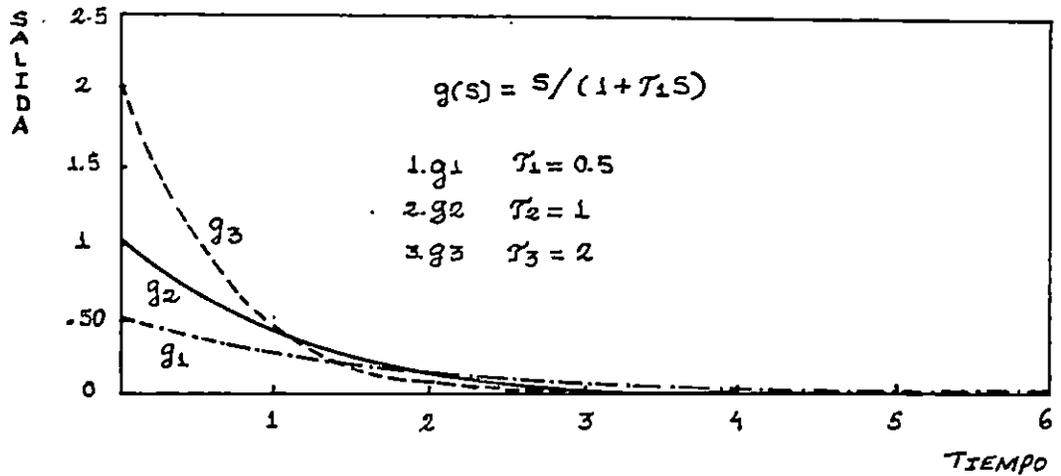
RESPUESTA AL ESCALON DE UN SISTEMA DE PRIMER ORDEN



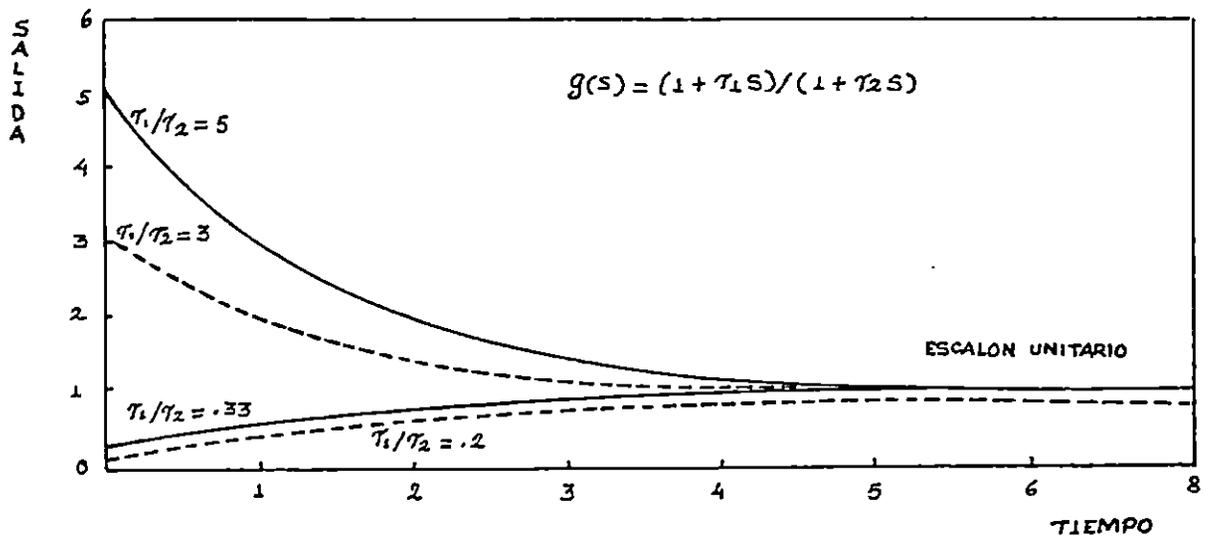
RESPUESTA AL ESCALON DE UN SISTEMA DE SEGUNDO ORDEN.



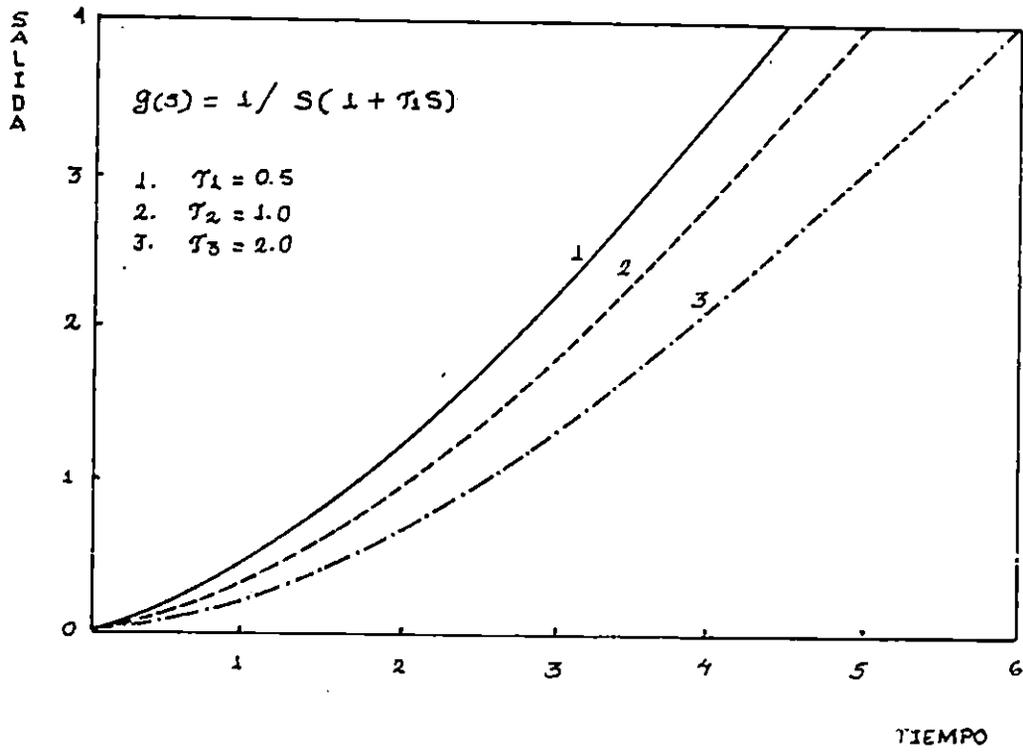
RESPUESTA AL ESCALON DE UN SISTEMA CON DERIVADOR



RESPUESTA AL ESCALON DE UNA RED ADELANTO - ATRASO.



RESPUESTA AL ESCALON DE UN SISTEMA CON INTEGRADOR.



Anexo C
FORMULARIOS PARA RECOLECCION
DE DATOS.

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

DURACION	H O R A S							
ACTIVIDAD	1	2	3	4	5	6	7	8
a) CON MAQUINA PARADA								
1-ALAMBRADO DE LOS PUNTOS DE PRUEBA AL TABLERO DE CONEXIONES Y EQUIPO DE MEDICION	▬▬▬▬	▬▬▬▬						
2-CALIBRACION DEL EQUIPO			▬▬▬▬	▬▬▬▬				
3-REVISION				▬▬▬▬				
4-EJECUCION DE LAS PRUEBAS					▬▬▬▬	▬▬▬▬	▬▬▬▬	▬▬▬▬
b) CON MAQUINA FUNCIONANDO								
1-ALAMBRADO DE LOS PUNTOS DE PRUEBA AL TABLERO DE CONEXIONES Y EQUIPO DE MEDICION	▨	▨						
2-CALIBRACION DEL EQUIPO			▨	▨				
3-REVISION				▨				
4-EJECUCION DE LAS PRUEBAS					▨	▨		

PRUEBA DE RESPUESTA AL ESCALON

CENTRAL _____

CIRCUITO _____

UNIDAD _____

RESPONSABLE _____

FECHA _____

V entrada	V salida	POSICION DE POTENCIOMETRO 1	POSICION DE POTENCIOMETRO 2	OBSERVACIONES

NOTAS: 1) EFECTUAR ESCALONES DESDE 1VDC HASTA 5VDC EN INCREMENTOS

DE 1VDC.

2) EN CASO DE EXISTIR POTENCIOMETROS QUE VARIEN GANANCIAS DEL CIRCUITO BAJO PRUEBA, REPETIR EL PROCEDIMIENTO PARA 3 POSICIONES DIFERENTES DE CADA POTENCIOMETRO.

PRUEBA DE RESPUESTA A LA FRECUENCIA

CENTRAL _____

CIRCUITO _____

UNIDAD _____

RESPONSABLE _____

FECHA _____

AMPLITUD	FRECUENCIA	V entrada	V salida	OBSERVACIONES

NOTA: VERIFICAR QUE LA AMPLITUD Y LA FRECUENCIA DE LA SEÑAL DE ENTRADA NO SOBREPASEN LOS VALORES CRITICOS DEL CIRCUITO BAJO PRUEBA.

RESPUESTA DEL AVR AL ESCALON

CENTRAL _____

RESPONSABLE _____ UNIDAD _____

FECHA _____

Vg	Ig	Vf	If	Vc.c.	Mp	Tr	Ts	OBSERVACIONES

NOTA: EFECTUAR ESCALONES DEL 5%, 10% Y 20% DEL VOLTAJE NOMINAL DEL GENERADOR.

REGULACION DE POTENCIA REACTIVA

CENTRAL _____

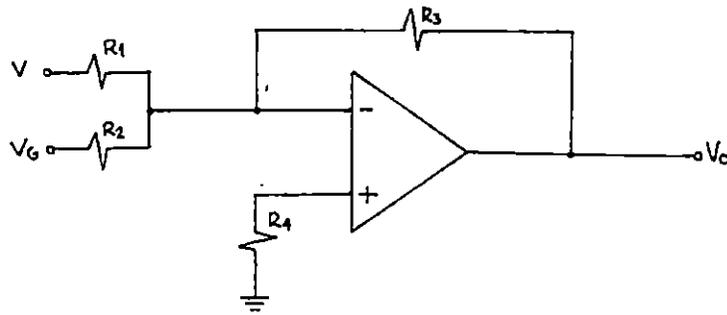
RESPONSABLE _____

UNIDAD _____

FECHA _____

Pe	Qe	V6	IG	Vf	If	OBSERVACIONES

NOTA: ABSORBER Y RECHAZAR REACTIVOS EN PASOS DEL 10% DEL VALOR NOMINAL DE POTENCIA.



FUNCION DE TRANSFERENCIA DEL CIRCUITO VD.

De la figura:

$$V_1 = V + (R_1/R_2)V_G \quad ; \quad I_1 = (V - V_1)/R_1 \quad ; \quad I_2 = (V_G - V_1)/R_2$$

$$I_3 = (V_o - V_1)/R_3$$

LCK en 1

$$I_1 + I_2 = I_3$$

sustituyendo

$$\frac{V - V_1}{R_1} + \frac{V_G - V_1}{R_2} = \frac{V_o - V_1}{R_3} \Rightarrow \frac{V}{R_1} + \frac{V_G}{R_2} - \frac{V_1}{R_1} - \frac{V_1}{R_2} = \frac{V_o}{R_3} - \frac{V_1}{R_3}$$

simplificando

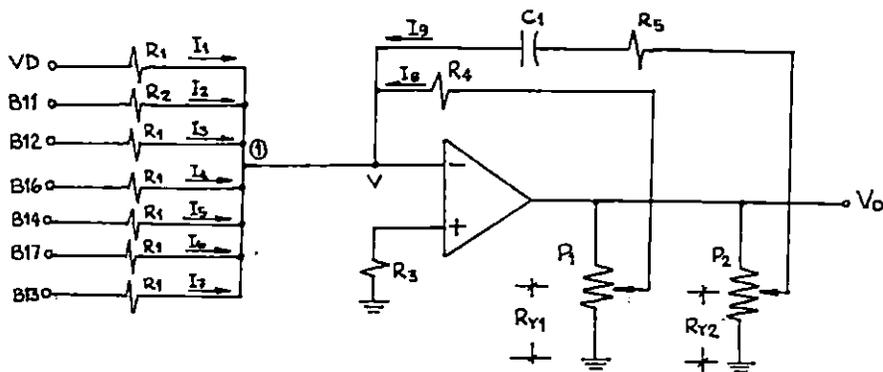
$$V_o/R_3 = -V_1 (R_2 + R_3)/R_2R_3 \Rightarrow V_o/V_1 = - (R_2 + R_3)/R_2$$

llegando a la forma

$$V_o(s)/V(s) = K$$

donde

$$K = - (R_2 + R_3)/R_2$$



FUNCION DE TRANSFERENCIA DEL CIRCUITO ADD.

De la figura:

$$V = VD + (R2/R1)B11 + B12 + B13 + B14 + B16 + B17$$

$$R2/R1 = 27 / 100 \sim 1/3.07 \Rightarrow R2 = R1/3.07$$

LCK en ①

$$I1 + I2 + I3 + I4 + I5 + I6 + I7 = I8 + I9 \quad (A)$$

donde

$$I1 = VD/R1 \quad ; \quad I2 = B11/R2 \quad ; \quad I3 = B12/R1 \quad ; \quad I4 = B16/R1$$

$$I5 = B14/R1 \quad ; \quad I6 = B17/R1 \quad ; \quad I7 = B13/R1$$

$$I8 = (Vo RY1/P1)/R4 = Vo RY1/P1 R4$$

$$I9 = (Vo RY2/P2)/(R5 + 1/SC1) = Vo RY2/P2 [(SC1R5 + 1)/SC1]$$

entonces

$$I2 = B11/R2 = B11/(R1/3.07) = 3.07B11/R1$$

sustituyendo en (A)

$$VD/R1 + 3.07B11/R1 + B12/R1 + B14/R1 + B17/R1 + B13/R1 \\ = Vo [(RY1/P1R4) + (SC1RY2/P2(1+SC1R5))]$$

despejando:

$$V/R1 = V_o [(RY1/P1R4) + (SC1RY2/P2(1 + SC1R5))]$$

$$\frac{V_o}{V} = \frac{1}{R1[(RY1/P1R3) + (SC1RY2/P2(1 + SC1R5))]}$$

de donde:

$$\frac{V_o}{V} = \frac{P1R4P2(1 + SC1R5)}{R1RY1P2[1 + SC1(R5RY1P2 + R4RY2P1)/RY1P2]}$$

se llega a la forma:

$$\frac{V_o(s)}{V(s)} = \frac{K1(1 + s\tau1)}{(1 + s\tau2)}$$

en donde

$$K1 = P1P2R4/R1RY1P2 ; \tau1 = R5 C1$$

$$\tau2 = (R5RY1P2 + R4RY2P1)C1/RY1P2$$