

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

Estudio del Estabilizador de
Potencia de los Generadores de
la Central Hidroeléctrica
Molino - Paute

M. FERNANDO DAVILA S.

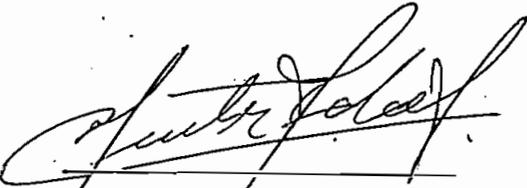
Tesis de Grado previa a la obtención del Título de Ingeniero
Eléctrico en la Especialidad de Electrónica y
Telecomunicaciones

Enero de 1989

QUITO - ECUADOR

C E R T I F I C A C I O N :

Certifico que la presente
Tesis de Grado ha sido elaborada en
su totalidad por Fernando Dávila S.



Ing. Menteor Poveda
DIRECTOR DE TESIS

Quito, Diciembre 30 de 1988

I N D I C E

PROLOGO	9
INTRODUCCION	11
CAPITULO I .- DESCRIPCIONES GENERALES	14
1.1.- El Sistema Nacional Interconectado	14
1.2.- El Proyecto Hidroeléctrico Paute	20
1.3.- Datos Técnicos del Generador	22
1.4.- El Sistema de Excitación Thyripol-Siemens del Generador	24
1.4.1.- Características y modo de operación	24
1.4.1.1.- El Regulador de Voltaje	26
1.4.1.2.- El Regulador Manual	26
1.4.1.3.- Limitador en Subexcitación	26
1.4.1.4.- Estabilizador de Oscilaciones de Potencia Activa	27
1.4.1.5.- Excitación	29
1.4.1.6.- Control de Disparo	31
1.4.1.7.- Protección de Sobrevoltaje	32
1.4.1.8.- Desexcitación	33
1.4.1.9.- Fuentes de Alimentación	33
1.4.1.10.- Detección de falla a tierra del rotor	34
1.4.2.- Especificaciones del Sistema de Excitación	36

CAPITULO II .- MODELO MATEMATICO DEL SISTEMA DE EXCITACION

Y PARAMETROS DEL GENERADOR

37

2.1.- Función de Transferencia del Filtro de Entrada del Voltaje Terminal realimentado	38
2.2.- Función de Transferencia del Regulador de Voltaje	41
2.3.- Función de Transferencia del Excitador	46
2.3.1.- Conversión a valores por unidad	46
2.3.2.- Constante de tiempo del Excitador	46
2.4.- Función de Transferencia del Estabilizador de Oscilaciones de Potencia	49
2.4.1.- Transductor - Vatímetro	49
2.4.2.- Filtro de Entrada	50
2.4.3.- Red de Compensación	51
2.4.4.- Amplificador - Limitador de Salida	52
2.4.5.- Función de Transferencia Total del Estabilizador	52
2.4.6.- Comparación de diagramas calculados y medidos	53
2.5.- Modelo y Parámetros del Generador	55

CAPITULO III .- VALIDACION DE LA MODELACION DE LA EXCITACION-

GENERADOR-SISTEMA

57

3.1.- Configuración Generador, Reactancia y Constante de inercia equivalentes	58
3.2.- Simulaciones en Estado Estable	61
3.2.1.- Generador en Vacío	61
3.2.2.- Generador en Condición Nominal	65
3.3.- Simulaciones de Perturbaciones	69

3.3.1.- Respuesta Transitoria de la Excitación en Vacío	69
3.3.2.- Respuesta Transitoria en Sincronismo, sin PSS, 1984	73
3.3.3.- Respuesta Transitoria en Sincronismo, con PSS, 1984	77
3.3.4.- Respuesta Transitoria en Sincronismo, sin PSS, 1987	81
3.3.5.- Respuesta Transitoria en Sincronismo, con PSS, 1987	85
3.3.6.- Respuesta Transitoria en Sincronismo, sin PSS, 1988	89
3.3.7.- Respuesta Transitoria en Sincronismo, con PSS, 1988	93
3.3.8.- Rechazo de Carga en la Central Agoyán, 1987	97
3.4.- Comentarios	101
CAPITULO IV .- CALIBRACION DEL ESTABILIZADOR	103
4.1.- Reajuste del Estabilizador	108
4.2.- Comprobación del reajuste	113
CAPITULO V .- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES FINALES	120
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	123
APENDICE I .- DESCRIPCION DE LA CENTRAL MOLINO	125
I.1.- Presa Daniel Palacios	125
I.2.- Captación y Conducción	126
I.3.- Casa de Máquinas	127
I.4.- Patio de Maniobras	128
I.5.- Campamento Guarumales	129
I.6.- Costo y Financiamiento de Pauta Fase AB	130

APENDICE II.- DESCRIPCION DEL GENERADOR	131
II.1.- Descripción de la Máquina tipo constructivo W41 de Siemens	131
II.2.- Operación del Generador	136
II.3.- Sistemas Auxiliares del Generador	141
APENDICE III.- DEDUCCION DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA	145
III.1.- Función de Transferencia del Voltaje Terminal realimentado	145
III.1.1.- Deducción analítica	145
III.1.2.- Obtención experimental	149
III.2.- Función de Transferencia del Regulador de Voltaje	153
III.2.1.- Deducción analítica	153
III.2.2.- Obtención experimental	156
III.3.- Obtención de la Función de Transferencia del Excitador a rectificadores controlados	160
III.3.1.- Función de Transferencia del Excitador en pu	166
III.4.- Función de Transferencia del Estabilizador de Potencia	167
III.4.1.- Deducciones analíticas	167
III.4.1.1.- Función de Transferencia del Transductor - Watímetro	167
III.4.1.2.- Función de Transferencia del Filtro de Entrada	168
III.4.1.3.- Función de Transferencia de la Red de Compensación	170
III.4.1.4.- Función de Transferencia del Amplificador	

de salida del PSS	171
III.4.2.- Obtención experimental	172
III.5.- Equipo utilizado en las pruebas de campo	177
APENDICE IV .- PROGRAMA EN BASIC DE SIMULACION	179
IV.1.- Diagrama de Flujo	179
IV.2.- Listado del Programa	184
Macros	194
IV.3.- Variantes al programa principal	195
APENDICE V .- MANUAL DE USO DEL PROGRAMA	196

P R O L O G O

La presente Tesis de Grado ha sido enfrentada desde una perspectiva académico - práctica para resolver por un lado una tarea pendiente también académica del autor y, principalmente, para encontrar algunas guías técnicas para estudiar el problema de calibración de los compensadores electrónicos " Power System Stabilizers ", PSS o Estabilizadores de Oscilaciones de Potencia de los generadores de la Central Hidroeléctrica Molino-Paute, la de mayor importancia en el país. Además, equipos similares serán instalados también en las próximas unidades de la Central y otros son ya parte integrante de los generadores de la Central Agoyán. De una adecuada calibración depende su contribución positiva al amortiguamiento de las oscilaciones de Potencia Efectiva que se presentan en el Sistema de Potencia y, por tanto, a la ampliación de los márgenes de estabilidad dinámica.

Los problemas superados para terminar este trabajo han sido importantes, desde las limitaciones geográficas hasta las personales. Cabe entonces insistir en que la Universidad trate de disponer de suficientes proyectos, acompañados de programas serios de ejecución, que aseguren la oportuna y creativa culminación académica de los estudiantes.

Pero frente a las dificultades ciertas encontradas es mi

obligación destacar y agradecer la poderosa y generosa dirección que aceptó dar y que ha brindado a este proyecto el Ingeniero Méntor Poveda, así como, el apoyo constante que he recibido de mi padre el Ingeniero Bolívar Dávila P. a quien debo dedicar este logro singular.

También vaya mi reconocimiento para el Instituto Ecuatoriano de Electrificación en especial para la Dirección de Operación del Sistema Nacional Interconectado y en particular para el personal de la Central Molino, Superintendencia de Producción y Transporte y Despacho de Carga, quienes, han posibilitado y en diversas circunstancias han colaborado para la elaboración de esta Tesis.

Se espera haber contribuido a la Ingeniería de Operación y Mantenimiento del Sistema Nacional Interconectado así como al desarrollo de los programas de investigación de la Escuela Politécnica Nacional en lo que respecta a la Simulación Digital de Sistemas Eléctricos.

F. Dávila S.

I N T R O D U C C I O N

Desde los años cincuenta, y más próximamente en los años sesenta, gran parte de los generadores para los sistemas de potencia fueron equipados con reguladores de voltaje de acción continua. Tan pronto como este tipo de unidades se convirtieron en la mayor parte de la generación instalada, se hizo evidente que la intervención de los reguladores tenía una acción negativa en la estabilidad de estado permanente de los sistemas, pues aparecían oscilaciones sostenidas de baja frecuencia y pequeña magnitud que llegaban a veces a limitar la capacidad de transferencia de potencia.

Los estabilizadores de potencia fueron desarrollados para ayudar en el amortiguamiento de esas oscilaciones por medio de la modulación de la excitación de los generadores. La función básica de un " PSS " es extender los límites de estabilidad procurando amortiguamiento a las oscilaciones de los rotores de las máquinas sincrónicas de unos respecto a otros. Estas oscilaciones involucradas típicamente ocurren en el rango de frecuencias de 0.2 a 2.5 Hz. Para conseguir su objetivo el estabilizador debe producir una componente de torque eléctrico en el rotor la cual esté en fase con las variaciones de velocidad.

Para cualquier señal de entrada (w, f, P) la función de

transferencia del estabilizador debe compensar las características de ganancia y fase del sistema de excitación, el generador y el sistema de potencia, las cuales colectivamente determinan la función de transferencia desde la salida del estabilizador a la componente del torque eléctrico que puede ser modulado por medio de la excitación. Esta función de transferencia está fuertemente influenciada por la ganancia del regulador de voltaje, el nivel de potencia del generador y la robustez del sistema AC.

Se han desarrollado estabilizadores con tres señales de entrada alternativas: velocidad, frecuencia y potencia efectiva. Cada tipo de compensador posee sus propias características de comportamiento y calibración según el rango de frecuencias de oscilación, las condiciones de operación o la robustez del sistema eléctrico. Los estabilizadores que utilizan la potencia como señal de entrada pueden ser diseñados con una característica de fase no - mínima utilizando redes de atraso en lugar de redes de adelanto asociadas con la característica de fase mínima utilizada con las entradas velocidad o frecuencia. Aunque esta característica de fase no - mínima es menos sensible a ruido de alta frecuencia e interacción torsional, ella es, sin embargo, sensible a fenómenos de baja frecuencia tales como cambios en la potencia mecánica, para lo cual se debe proveer de filtros de compensación de entrada (washout stages). (9)

El presente estudio constituye una aplicación de los progra-

mas digitales de simulación de máquinas sincrónicas existentes, para: ensayando un modelo simplificado del S.N.I. visto desde la Central Molino, incorporar el Estabilizador de Oscilaciones de Potencia de los generadores de esa Central cuya señal de información es la Potencia Eléctrica y, previa la validación del modelo desarrollado por contrastación con oscilogramas de campo, proceder a aplicar reajustes y a analizar sus resultados. Lógicamente, tratándose de simulación y además, habiendo convenido en hacer ciertas aproximaciones, son inevitables ciertas diferencias con la realidad; tómese en cuenta que se ha puesto la principal atención en el tratamiento del sistema de control.

Sobre el tema han existido ya algunos trabajos: uno introductorio, otro como parte de la asesoría extranjera que arrojó sugerencias de recalibración de los estabilizadores y un tercero que evaluó esas recomendaciones mediante la utilización de técnicas y modelos convencionales (10,11,12).

C A P I T U L O I

D E S C R I P C I O N E S G E N E R A L E S

1.1 .- EL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO (1)

El Sistema Nacional Interconectado está formado por el conjunto de Centrales de Generación hidráulicas y térmicas que abastecen de energía eléctrica a la Sierra y a la Costa a través de las líneas de transmisión a 230 kV y 138 kV .

Las principales Centrales del Sistema Nacional Interconectado, y que pertenecen al Instituto Ecuatoriano de Electrificación son:

a) Hidráulicas:

Paute (Molino)

Agoyán

Pucará (Pisayambo)

b) Térmicas:

Gonzalo Zevallos (Estero Salado)

Esmeraldas

Santa Rosa

Guangopolo

Desde estas Centrales parten las líneas de transmisión que llegan a las subestaciones principales, ubicadas cerca de los centros poblados.

La meta del SNI es brindar suficiente energía eléctrica a todo el país, por medio de la explotación programada y coordinada de

los diferentes recursos naturales de que dispone el Ecuador.

El Sistema se reforzará paulatinamente de acuerdo con la demanda de energía, al incorporarse en el futuro proyectos de generación tales como: Paute Fase C y Mazar, Daule - Peripa, Coca - Codo Sinclair, San Francisco, etc.; y de transmisión y distribución tales como: cierre del Anillo a 230 kV, Paute - Guasmo, Anillo Quito a 138 kV, Subtransmisión Fase "B", Distribución y Electrificación Rural, etc.

En el mapa de la figura 1.1 se indica la configuración actual y en la figura 1.2 se incluye el diagrama unifilar del SNI. Como se puede ver, cuando se complete el anillo de 230 kV con el Sistema de Transmisión Paute - Riobamba - Totoras el SNI se volverá más robusto.

En los cuadros de las figuras 1.3 y 1.4 se ilustran aspectos importantes de conformación del Sistema Nacional Interconectado.

SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO

CENTRALES GENERADORAS

CENTRAL	POTENCIA NOMINAL [MW]	POTENCIA EFECTIVA POR UNIDAD [MW]	TIPO (1)	AÑO DE ENTRADA EN OPERACION
1. Pucará	76.0 (2)	2 x 35.0	H	1977
2. Guangopolo	31.2 (3)	6 x 5.2	T	1977
3. Santa Rosa	76.8 (4)	3 x 17.1	G	1981
4. G. Zevallos	30.9 (5)	1 x 20.0	G	1976
5. G. Zevallos	146.0	2 x 73.0	V	1980
6. Esmeraldas	132.5	1 x 132.5	V	1982
7. Paute	500.0	5 x 100.0	H	1983
8. Agoyán	156.0	2 x 78.0	H	1987
TOTAL :	1449.4	1107.0		

NOTAS :

(1) H= Hidráulica

T= Térmica

G= Gas

V= Vapor

n= nominal

(2) MVAn= 40.0 MVA/U

(3) MVAn= 6.5 MVAn/U

(4) MVAn= 32.0 MVAn/U

(5) MVAn= 36.4 MVAn/U

Figura 1.3 (2)

SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO

L I N E A S D E T R A N S M I S I O N

N O M B R E	TENSION	Nº DE CIRC.	LONG. [km]	LIMITE TERMICO DE LA L/T	
	[kV]			[MVA]	[Amp]
1. Pucará-Ambato	138	1	30.0	157.8	660.0
2. Pucará-Vicentina	138	1	125.0	157.8	660.0
3. Vicentina-Ibarra	138	2	80.0	157.8	660.0
4. Guangopolo-Vicentina	138	1	7.0	157.8	660.0
5. Vicentina-Santa Rosa	138	1	18.5	157.8	660.0
6. Sto. Dmgo-Esmeraldas	138	2	154.0	239.0	692.3
7. Quevedo-Portoviejo	138	2	107.0	239.0	692.3
8. Pascuales-Salitral	138	2	17.0	239.0	692.3
9. Paute-Cuenca	138	2	70.0	157.8	660.0
10. Milagro-Babahoyo	138	1	37.0	239.0	692.3
11. Agoyán-Totoras	138	2	33.0	239.0	692.3
12. Cuenca-Loja	138	1	135.0	141.0	589.9
13. Milagro-Machala	138	1	133.7	141.0	589.9
S U B T O T A L	138		947.2		
14. Sta. Rosa-Sto. Dmgo.	230	2	78.0	448.2	1125.0
15. Sto. Dmgo.-Quevedo	230	2	105.0	469.3	1178.0
16. Quevedo-Pascuales	230	2	144.4	469.3	1178.0
17. Pascuales-Milagro	230	2	41.0	469.3	1178.0
18. Milagro-Paute	230	2	142.0	448.2	1125.0
19. Totoras-Santa Rosa	230	1	105.0	448.2	1125.0
S U B T O T A L	230		615.0		
T O T A L			1562.2		

Figura 1.4 (2)

1.2 .- EL PROYECTO HIDROELECTRICO PAUTE (1,3)

El Proyecto Hidroeléctrico Paute, es un aprovechamiento de río Paute en la zona conocida como Cola de San Pablo, en el límite de las provincias de Azuay, Cañar y Morona Santiago, en este sector el río Paute presenta un desnivel aproximado de 1000 metros entre la confluencia con el río Dudas y la confluencia, aguas abajo, con el río Sopladora; aprovechando este desnivel se proyectaron varias etapas que son: Fase AB, Fase C, Mazar y Sopladora.

El Proyecto se inicia con la ejecución de la Central Molino (Fases AB y C). La presa está ubicada en la confluencia del río Paute con el río Púlpito (o Palmira). El agua para mover las turbinas se encausa a través de dos túneles, consiguiéndose una caída total de 670 metros bajo la confluencia del río Molino donde se construyó la Casa de Máquinas subterránea. La capacidad instalada actualmente es de 500 MW. que será incrementada en 625 MW. al concluir la Fase C, actualmente en construcción. La Subestación se encuentra a 300 metros sobre la Casa de Máquinas.

Mazar constará de una presa a construirse cerca de la confluencia con el río Mazar, el mismo que, a través de un desvío, aumentará también al embalse existente. Se calcula una capacidad de almacenamiento de 413 millones de metros cúbicos que ofrecerán una mejor regulación de caudales que la ofrecida por el embalse Amaluza; cuya capacidad es de 120 millones de metros cúbicos, además de contribuir al control de sedimentos. Al pie de la presa se construirá una Central de 180 MW.

La Central Sopladora aprovechará el potencial del río entre la Central Molino y el río Sopladora, utilizando el caudal regulado por los dos embalses aguas arriba. Se construirá una presa en derivación y en el sitio Marçayacu, una Central de 450 MW.

El costo de la Fase AB del Proyecto Hidroeléctrico Paute, actualizada a 1982, ascendió a 678 millones de dólares. (1)

En el Apéndice I se describe en detalle la Central Molino.

1.3 .- DATOS TÉCNICOS DEL GENERADOR

La Central Molino posee cinco máquinas sincrónicas generadoras idénticas, cuyas características principales se indican a continuación:

- Accionamiento	Turbina Pelton de seis chorros
- Potencia Nominal	111 MVA.
- Sobrecarga máxima	15 %
- Voltaje Nominal	13.8 kV.
- Corriente Nominal	4644 A.
- Factor de Potencia Nominal	± 0.9
- Velocidad Angular Nominal	360 rpm.
- Clase de Servicio	Permanente y en interior
- Excitación	Estática
- Sentido de Giro	Antihorario
- Clase de Aislamiento	Estator F/B Rotor B
- Momento de Inercia	518500 Kg.m ²
- Refrigeración	Aire - Agua

En la Figura 1.3.1 se presenta el diagrama unifilar del Generador. En el Apéndice II se describen en detalle las características técnicas del Generador.

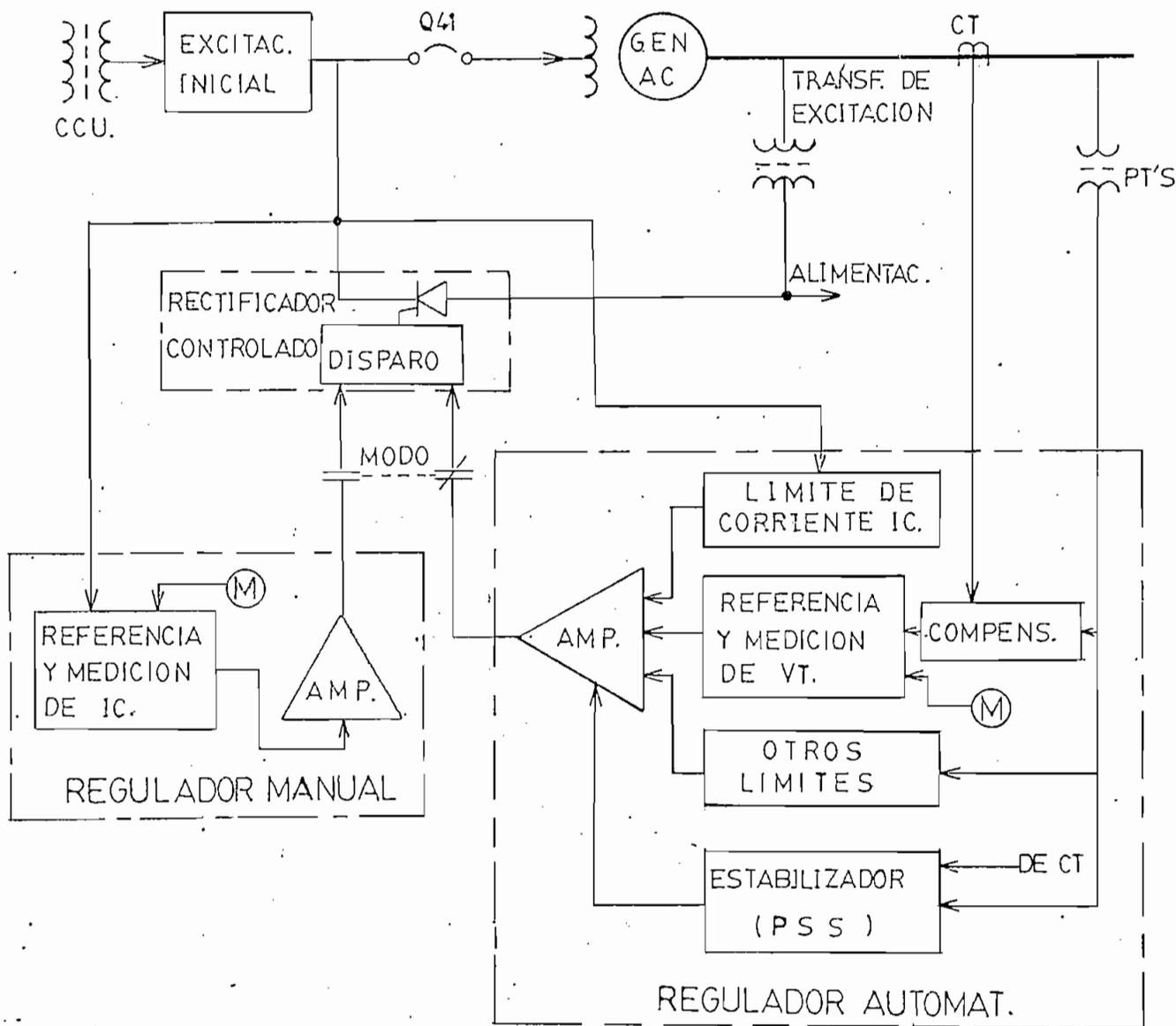
1.4.- EL SISTEMA DE EXCITACION THYRIPOL-SIEMENS DEL GENERADOR (5)

THYRIPOL es un sistema de Excitación diseñado para generadores y condensadores sincrónicos. En general es adaptable a un amplio campo de aplicaciones en plantas de generación hidroeléctricas, térmicas o nucleares.

La excitación de la máquina sincrónica es controlada directamente por un convertidor a tiristores (SCR) alimentado desde transformadores y equipado con un regulador electrónico de voltaje; esto es, el convertidor alimenta directamente el devanado de campo de la máquina, sin pasar por amplificadores intermedios. En contraste con un excitador rotativo, el convertidor a tiristores prácticamente no presenta un retraso de tiempo inherente.

1.4.1 Características y modo de operación.

Referirse a las figuras 1.4.1.1 y 1.4.1.3 . La variable principal controlada es el voltaje terminal del generador. El valor de referencia puede ser variado en $\pm 10\%$ (12.4 kV. a 15.2kV.) durante la operación, por medio de un ajustador motorizado de referencia. Adicionalmente el voltaje puede ser controlado como una función de la corriente reactiva para estabilizar la distribución de potencia reactiva entre los generadores operados en paralelo. Esta función es realizada por un dispositivo compensador de estatismo ajustable, el cual también es usado para compensar la caída de voltaje a través del transformador principal; esta última ca-



Sistema de Excitación Estático THYRIPOL
 Con Fuente de Potencial para el Excitador

Figura 1.4.1.1

racterística se la tiene fuera de servicio por problemas presentados en la condición de generador en vacío.

1.4.1.1 El Regulador de Voltaje (AVR) controla alrededor de la referencia así formada con una precisión de $\pm 0.5\%$ (74 V.) el valor máximo a carga normal de la máquina. Posee una característica de Control Proporcional - Integral.

La máquina sincrónica puede ser operada solamente por cortos períodos sobre el valor de carga normal. Después de un tiempo prefijado (lento: 25 segundos, rápido: 10 segundos) el limitador actúa reduciendo la corriente de excitación hasta el límite permisible (1150 A.). Esto es para evitar sobrecarga térmica del rotor.

1.4.1.2 El Regulador Manual, es independiente del Regulador Automático de Voltaje, sirve principalmente para aumentar la confiabilidad operativa. Cuando se escoge el modo manual de operación es regulada la corriente de excitación; puede ser ajustada entre el 40 % y el 100 % del valor nominal. Se ha provisto de un sistema de conmutación de automático a manual y viceversa, con seguimiento del manual al automático.

1.4.1.3 Limitador en Subexcitación.- Cuando varios generadores o centrales operan en paralelo con altas potencias reactivas capacitivas, el ajuste a diferentes valores de las referencias de voltaje puede ser causa de que generadores indivi-

duales estén regulando muy abajo en la región de subexcitación. Este peligro es eliminado empleando el limitador en subexcitación, el que utiliza dos diferentes principios de operación: Figura 1.4.1.2

a) Operación como función del ángulo del rotor.- Tan pronto como la diferencia entre el vector ángulo del voltaje terminal del generador y el ángulo del rotor excede un valor prefijado, la excitación se aumenta independientemente de la magnitud del voltaje terminal. En consecuencia se conforma un límite de ángulo y el generador mantiene el margen necesario del límite de estabilidad. En el caso indeseable que el generador salga de estabilidad momentáneamente, este dispositivo permite el retorno al sincronismo con la polaridad correcta.

b) Operación como función del valor de la corriente del estator.- La curva de limitación se forma comparando el voltaje del generador con un valor que es dependiente de la corriente del estator y del ángulo eléctrico entre voltaje y corriente.

1.4.1.4 Estabilizador de Oscilaciones de Potencia Activa. (PSS:

Power System Stabilizer).- El Estabilizador de Potencia detecta variaciones en la Potencia Activa en el rango crítico de frecuencias (0.1 Hz - 3 Hz) y ejerce una influencia amortiguadora sobre el generador por medio del regulador de voltaje y de la Excitación. Este dispositivo es utilizado

Paute 1117127,7 MVA 13,8 kV 4644/5343 A $\cos\phi=0,9$ 60Hz 360 U/min

Erzeugungsdarstellung

(rechnerisch ermittelt)

Diagrama de potencia

(determinado por cálculo)

untererreggt
subexcitado

übererreggt
sobreexcitado

Praktische Stabilitätsgrenze
Límite práctico de estabilidad

Theoretische Stabilitätsgrenze
Límite teórico de estabilidad

Die praktische Stabilitätsgrenze
schließt gegenüber der theoretischen
Wirkungssicherheit von 10% der
Nennwirkleistung ein.

El límite práctico de estabilidad
comprende, comparado con el
teórico, una seguridad de la
carga efectiva del 10% de la
nominal

1,05 UN
UN
0,95 UN

Generator-Nennpunkt
Punto nominal del
alternador

1,05 UN
UN
0,95 UN



p.u. 1,4 1,2 1,0 0,8 0,6 0,4 0,2 0 0,2 0,4 0,6 0,8 p.u.

P_{bu}

P_{bu}

Figura 1.4.1.2

PA 23

ya que el generador opera en un sistema con líneas de transmisión de longitud considerable (Línea Paute - Milagro = 142 Km), las cuales hacen peligrar la estabilidad de régimen permanente. Además es un auxiliar que ayuda y mejora las propiedades de amortiguamiento natural del generador.

El comportamiento de este subsistema es el objetivo de investigación del presente estudio.

1.4.1.5 Excitación .- Cuando la máquina en giro alcanza el 90 % de velocidad (324 rpm.) se cierra el interruptor de campo (Q 41) y entra en acción la excitación inicial desde el Centro de Carga de la Unidad a través de un transformador de 6 kVA, trifásico, 480 V / 50 V y de un puente rectificador trifásico que suministra 70 VDC al campo; simultáneamente desde los transformadores de excitación se suministra corriente al campo. Cuando el voltaje terminal alcanza el 20 % (2.8 kV) se desconecta la excitación desde el Centro de Carga, a $V_{\text{campo}} = 88 \text{ VDC}$, quedando la corriente de campo al mando del regulador de voltaje a través de los rectificadores controlados.

Tres transformadores monofásicos secos de 195 kVA cada uno y relación 13.8 kV / 0.324 kV conectados en estrella - triángulo suministran la alimentación desde los terminales del generador a tres puentes trifásicos de tiristores conectados en paralelo, de los cuales se obtiene el Voltaje de Excitación.

El máximo voltaje negativo de excitación es alrededor del 85 % del voltaje límite positivo (Ceiling Voltage= 405 V) que es función del ángulo impuesto (150 grados) para el máximo inverso del convertidor. Sin embargo ello permite que la corriente de campo se reduzca a cero en un tiempo extremadamente corto. Esta desexcitación tan rápida es particularmente ventajosa en los rechazos de carga, ya que se reduce la ocurrencia de los sobrevoltajes de frecuencia de red.

Para aumentar la confiabilidad operativa se han usado puentes múltiples de rectificadores controlados. Cada rectificador está protegido separadamente por un fusible HRC ; así, en caso de falla individual los demás pueden seguir operando quedando aislado el defectuoso. Los fusibles protegen a los tiristores contra cortocircuitos en el lado de DC. Los trastornos resultantes de cortocircuitos en el lado de AC de la máquina sincrónica no son problema porque han sido tomados en cuenta para especificar las características de los tiristores.

Si falla uno de los puentes el generador puede continuar operando prácticamente a corriente de excitación nominal (se limita a 1000 A) sin que los tiristores alcancen su máxima temperatura. Un margen adecuado de seguridad contra sobrevoltajes se obtiene usando tiristores con alto voltaje de pico inverso (1650 V). Las pérdidas de calor son disipadas por aire forzado proveniente de un ventilador con res-

paldo que posee su propio sistema de vigilancia de flujo de aire, alerta y arranque del segundo ventilador.

1.4.1.6 Control de Disparo .- La función del equipo de control de disparo es conformar los pulsos y transmitirlos a las compuertas de los tiristores. El ángulo de disparo es fijado en la tarjeta A95 de acuerdo al comando desde el regulador para producir el voltaje de excitación requerido.

La duración del tren de impulsos suministrado por el control de compuertas corresponde a 20 grados eléctricos. Un pulso de disparo es aplicado al siguiente ramal de tiristores después de 60 grados eléctricos, en cada caso. Adicionalmente el pulso es repetido después de 60 grados de tal manera de hacer conducir a un tiristor hacia la barra positiva y a uno hacia la barra negativa simultáneamente.

Es necesario que los tiristores conectados en paralelo conduzcan también simultáneamente. Para esto se les suministra suficiente potencia de disparo a través de amplificadores individuales de impulsos.

La forma del tren de impulsos es finalmente configurada en la unidad instalada directamente junto a cada tiristor; que consta del transformador de impulsos y de un condensador que ayuda a derivar los impulsos con una corriente relativamente alta lo cual asegura confiabilidad y precisión en los disparos. La corriente de compuerta es mantenida durante unos 20 grados eléctricos para asegurar que la corriente de carga

exceda a la corriente de sostenimiento (I_h), dada la inductancia del devanado de campo.

1.4.1.7 Protección de sobrevoltaje.- Cuando el devanado de campo de una máquina sincrónica se conecta a convertidores controlados o no controlados, se requiere de medidas especiales para prevenir sobrevoltajes. Estos sobrevoltajes pueden ser alcanzados por corrientes inducidas transferidas al circuito de campo desde el estator de la máquina sincrónica durante perturbaciones transitorias, por ejemplo. También podrían ser causados por conmutaciones en el circuito de suministro AC para el sistema de excitación, en este caso, en los circuitos de Excitación Inicial o de los Transformadores de Excitación.

El sistema está equipado con rectificadores como protección contra sobrevoltajes. Consiste de diodos de Selenio conectados cual zeners al devanado de campo a través de un puente rectificador de Silicio para descargar sobrevoltajes de cualquier polaridad.

Ellos pueden conducir en dirección reversa por un tiempo corto y así limitar el sobrevoltaje (≤ 700 V). Si los rectificadores de protección conducen se genera una alarma por medio de un relé de corriente de monitoreo. Si la corriente que fluye a través de la protección es de gran magnitud y duración (2 seg.) o repetitiva (en 18.5 seg.) la protección saca de servicio o dispara la máquina.

1.4.1.8 Desexcitación.- La desexcitación total del generador se realiza con la simple apertura del interruptor de campo, gracias a una combinación de los contactos principales con un contacto auxiliar que conecta la resistencia de desexcitación (0.6Ω) en paralelo con el campo, instantes antes de la apertura, para que absorba la energía almacenada en el devanado.

De esta manera, la desexcitación de la máquina sincrónica se realiza independientemente del control de disparo del convertidor a tiristores.

1.4.1.9 Fuentes de alimentación.- Como se indicó antes la alimentación AC para el convertidor a tiristores proviene de los transformadores de excitación que a su vez se alimentan desde las barras del generador. Por esta razón el sistema THYRIPOL encaja, dentro de la clasificación de los sistemas de excitación, denominada Sistema a Rectificadores Controlados con Fuente de Potencial. (6)

Los subsistemas de regulación y control se alimentan de dos canales, el uno desde el Sistema de Corriente Continua, a 125 V, y el otro desde los transformadores de excitación. Durante el arranque y en casos de disparo de la máquina el canal de DC suministra la alimentación. Tan pronto como el voltaje nominal de la máquina se alcanza en el proceso de arranque, cuando la excitación se ha establecido, el canal desde los transformadores prácticamente suministra toda la

energía auxiliar.

Las alarmas y protecciones se alimentan desde el suministro DC o desde el suministro AC para servicios auxiliares de la Casa de Máquinas.

1.4.1.10 Detección de falla a tierra del rotor.- En los generadores que reciben el voltaje de excitación por medio de anillos rozantes y escobillas es muy importante la supervisión de fallas a tierra del rotor, puesto que una falla de este tipo puede producir desbalances magnéticos de tal magnitud que destruirían la máquina. El desgaste continuo de las escobillas produce la contaminación del recinto y la formación de caminos conductivos hacia tierra; la alarma oportuna del equipo de supervisión (Resistencia rotor-tierra $< 80 \text{ k}\Omega$) alerta al personal de mantenimiento para realizar limpieza.

En casos extremos de falla de aislamiento el generador será sacado de servicio por la protección si la resistencia entre rotor y tierra es menor que $5 \text{ k}\Omega$.

También se bloquea el arranque de la máquina si la detección no es posible por fallas del equipo o falta de alimentación.

1.4.2 .- Especificaciones del Sistema de Excitación

- Voltaje a carga nominal	215 V
- Voltaje nominal en vacío	105 V
- Voltaje de techo	405 V
- Corriente a carga nominal	1.150 A
- Corriente nominal en vacío	610 A
- Corriente máxima	1.200 A (t < 25 Seg.) 1.500 A (t < 10 Seg.)
- Angulo de control de impulsos	18-150 ° eléc.
- Resistencia del rotor	148 mΩ a 20 °C
- Resistencia de desexcitación	600 mΩ
- Transformador de excitación	195 kVA / 60 Hz 13.8 kV / 0.324 kV
- Tiristores (S C R)	VRRM = VDRM = 1650 V IATV = 450 A ITrms = 710 A
- Flujo del aire forzado	0.7 m ³ / seg.

CAPITULO I I

MODELO MATEMATICO DEL SISTEMA DE EXCITACION Y PARAMETROS DEL GENERADOR

En este capítulo se van a plantear las funciones de transferencia obtenidas para el modelo indicado en diagrama de bloques en la figura 2.1 .

Las funciones han sido obtenidas matemáticamente a partir de los circuitos electrónicos y comprobadas con oscilogramas experimentales para los casos: Filtro de Entrada del Voltaje Terminal, Regulador y PSS.

Los oscilogramas se obtuvieron introduciendo a la entrada de los circuitos en prueba un voltaje constante de frecuencia variable entre 0.1 Hz y 10 Hz, y registrando entrada y salida.

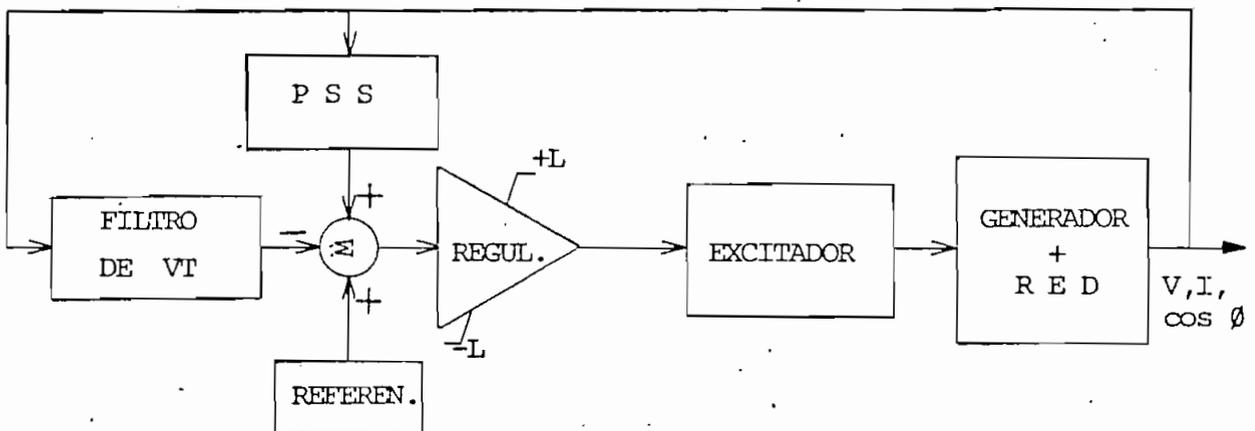


Figura 2.1

Para el caso del Excitador se intentó la deducción de la función de transferencia a partir de oscilogramas de prueba aunque finalmente los resultados no fueron precisos.

El detalle de los cálculos y procedimientos se presenta en el Apéndice III.

2.1 FUNCION DE TRANSFERENCIA DEL FILTRO DE ENTRADA DEL VOLTAJE TERMINAL REALIMENTADO

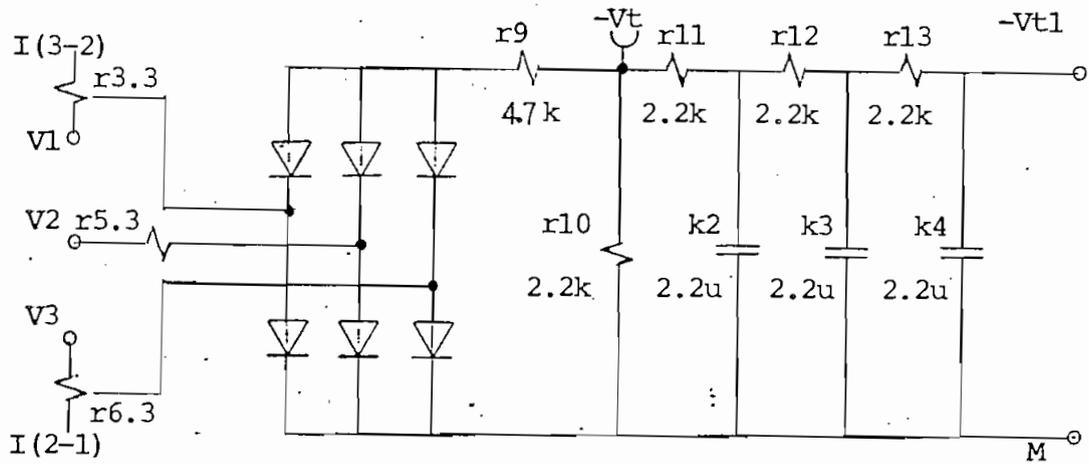


Figura 2.1.1 Circuito de entrada para $-V_t$

El Voltaje Terminal pasa por varias etapas de transformación hasta ingresar al puente rectificador y luego al filtro de entrada al Regulador.

La función de transferencia de interés se calcula entre $-V_{t1}$ y $-V_t$ (Fig. 2.1.1) y es igual a:

$$F(s) = \frac{-V_{t1}(s)}{-V_t(s)} = \frac{1}{r^3 \cdot c^3 \cdot s^3 + 5 \cdot r^2 \cdot c^2 \cdot s^2 + 6 \cdot r \cdot c \cdot s + 1}$$

Para $r = 2.2 \text{ k}\Omega$, $C = 2.2 \text{ }\mu\text{F}$ y considerando los términos más significativos, queda:

$$F_{\text{filtro}}(s) \approx \frac{1}{1 + 0.029 \cdot s}$$

En las figuras 2.1.3 y 2.1.4 se comparan las respuestas de frecuencia gráficas resultantes del cálculo, con las del análisis de los oscilogramas experimentales correspondientes al circuito de la figura 2.1.2

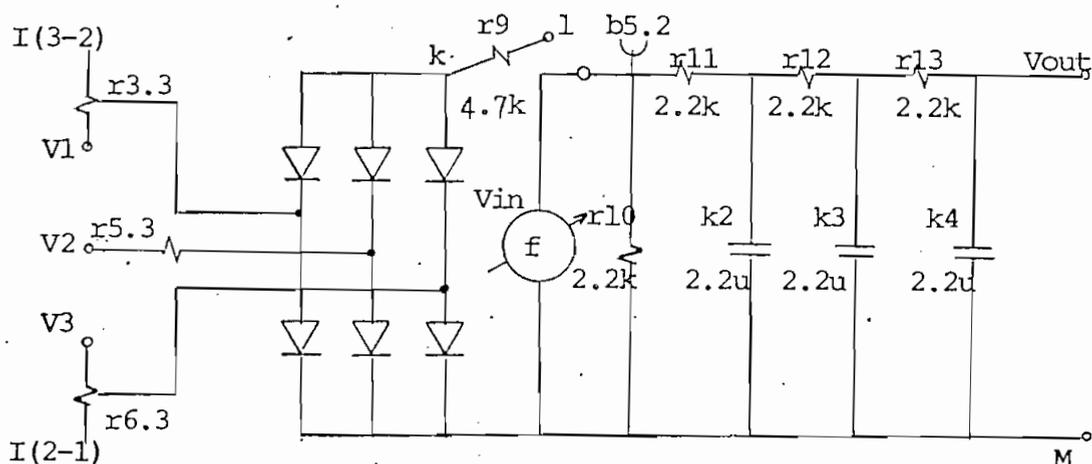


Figura 2.1.2

Se puede concluir que la función matemática describe con gran aproximación la respuesta de frecuencia real del Filtro de Entrada, tomando en cuenta las simplificaciones numéricas realizadas.

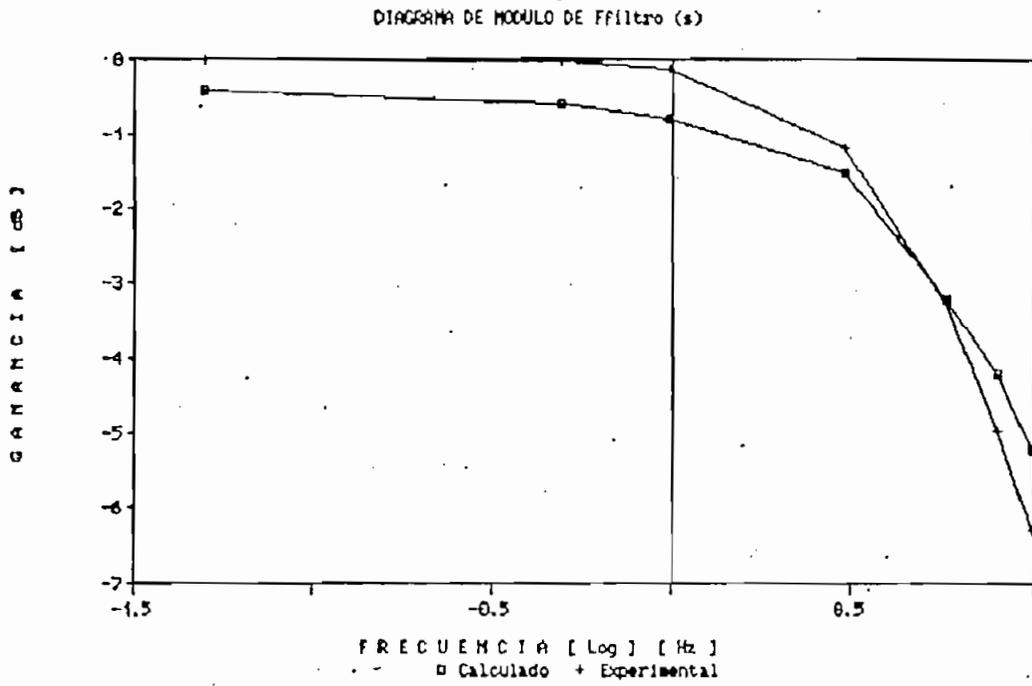


Figura 2.1.3

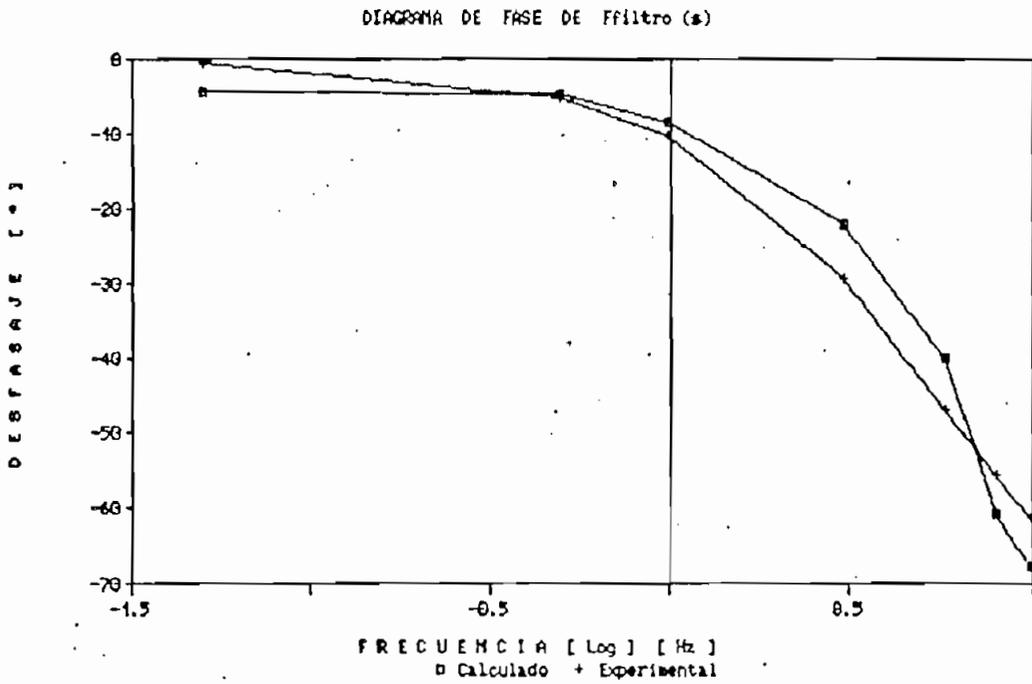
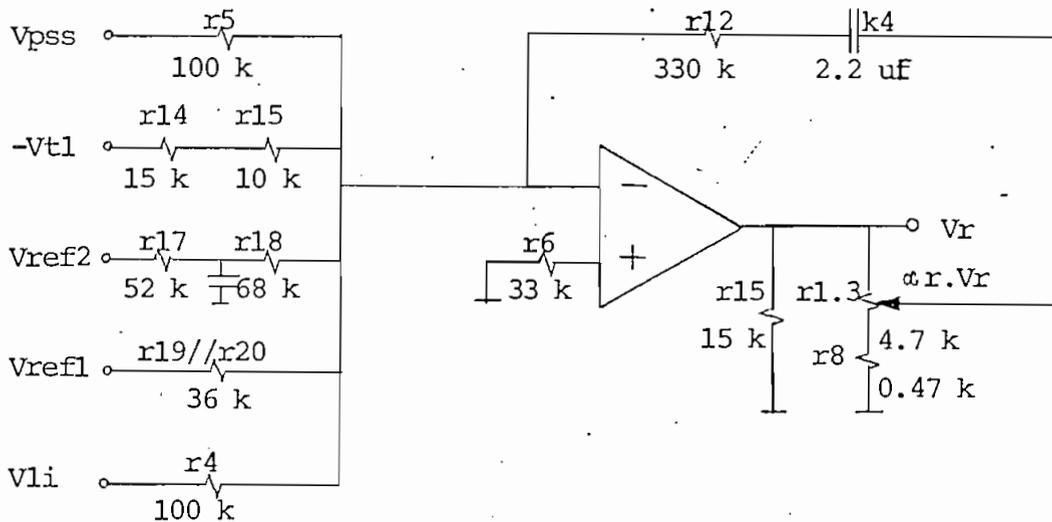


Figura 2.1.4

2.2 FUNCION DE TRANSFERENCIA DEL REGULADOR DE VOLTAJE

En la figura 2.2.1 se indica el circuito del Regulador de Voltaje con todas las entradas; sin embargo es solamente de interés la relación: $V_r(s) / -V_{t1}(s)$ pues V_{ref} no varía con s .



- Vpss = Voltaje desde el Estabilizador de Potencia
- Vt1 = Voltaje Terminal con realimentación negativa
- Vref1 = Voltaje de referencia gruesa para la regulación
- Vref2 = Voltaje de referencia fina dado por el operador
- Vli = Voltaje desde los limitadores de corriente del generador o de corriente de campo
- Vr = Voltaje de salida del Regulador

Figura 2.2.1 Regulador de Voltaje

Del circuito de la figura 2.2.1 se deduce que:

$$F(s) = \frac{V_r(s)}{V_t(s)} = - \frac{1 + r_{12} \cdot k_4 \cdot s}{\alpha r \cdot (r_{14} + r_{15}) \cdot k_4 \cdot s}$$

Para: $r_{12} = 330 \text{ k}\Omega$, $k_4 = 2.2 \text{ }\mu\text{F}$, $r_{14} + r_{15} = 25 \text{ k}\Omega$, $\alpha r = 0.09 \rightarrow 1$

$$F_{reg}(s) = - \frac{1 + 0.73 \cdot s}{\alpha r \cdot 0.05 \cdot s}$$

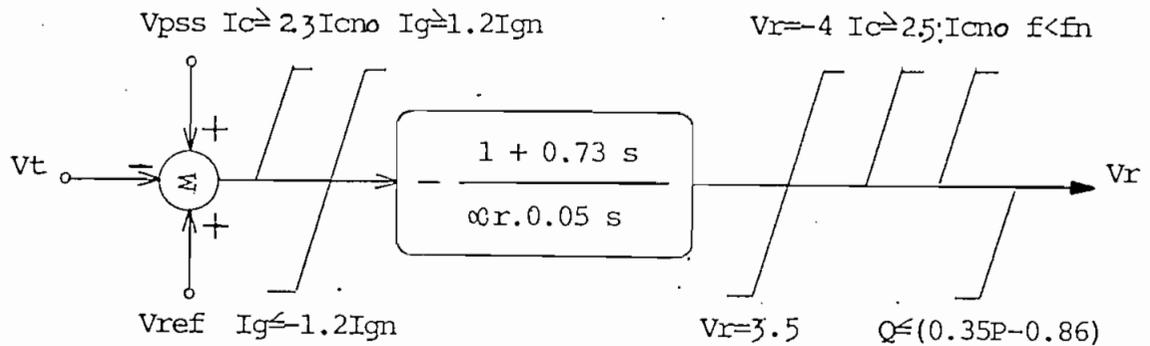
La función de transferencia que arroja la señal V_{pss} será deducida más adelante.

Las dos señales de referencia para la regulación son superpuestas e introducidas como una sola, V_{ref} . en por unidad (pu)

V_{li} .- Causa limitación por excesiva corriente del Generador o de la Excitación. Si I_g , corriente del Generador, es mayor o igual que $1.2 \cdot I_{g \text{ nominal}}$, V_{li} ordena disminuir la excitación hasta que $I_g \leq 1.2 \cdot I_{gn}$.

En forma similar si la corriente de campo $I_c \geq 2.3 \cdot I_{cno}$, V_{li} ordena disminuir la excitación hasta que $I_c \leq 2.3 \cdot I_{cno}$.

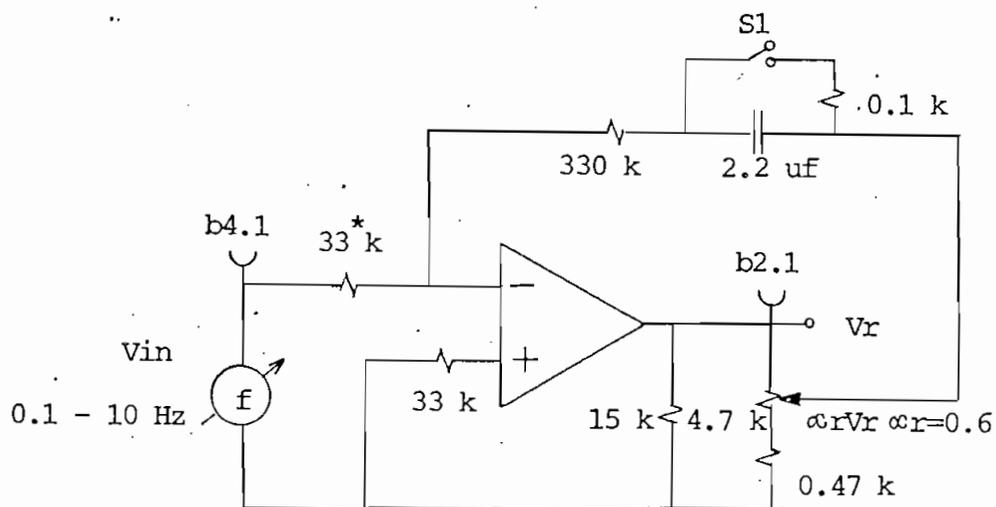
Introduciendo los límites prioritarios a la salida, el modelo del Regulador de Voltaje queda finalmente representado en la figura 2.2.2 . Los límites tienen efecto si la condición indicada se presenta.



- I_c : Corriente de campo
 I_{cno} : Corriente nominal de campo v,
 I_g : Corriente del generador
 I_{gn} : Corriente nominal del generador
 V_t : Voltaje Terminal del generador
 V_{ps} : Voltaje de salida del Estabilizador de Potencia
 V_{ref} : Voltaje de Referencia
 a_r : Ganancia ajustable del Regulador
 V_r : Voltaje de salida del Regulador
 f : Frecuencia de la red
 f_n : Frecuencia nominal de la red
 Q : Potencia reactiva
 P : Potencia Activa
 $Q \leq 0.35P - 0.86$: Característica de limitación en subexcitación.

Figura 2.2.2

En las figuras 2.2.4 y 2.2.5 se comparan las respuestas de frecuencia gráficas, resultantes del cálculo, con las del análisis de los oscilogramas experimentales correspondientes al circuito de la figura 2.2.3. Se puede concluir que la aproximación entre los resultados analíticos y los experimentales es muy aceptable.



(*) El circuito real utiliza 25 k Ω

Circuito de prueba para obtención de oscilogramas

Figura 2.2.3

DIAGRAMA DE MODULO DE Freq (s)
 $T_n = 0.73 \text{ seg.}$ $\text{Alfar} = 0.6$

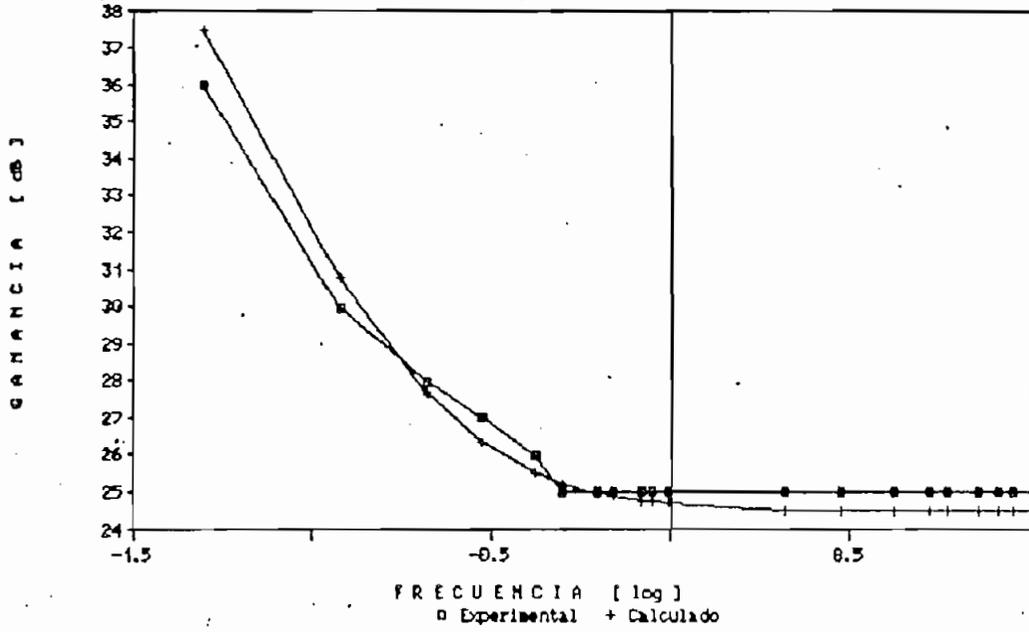


Figura 2.2.4

DIAGRAMA DE FASE DE Freq (s)
 $T_n = 0.73 \text{ seg.}$ $\text{Alfar} = 0.6$

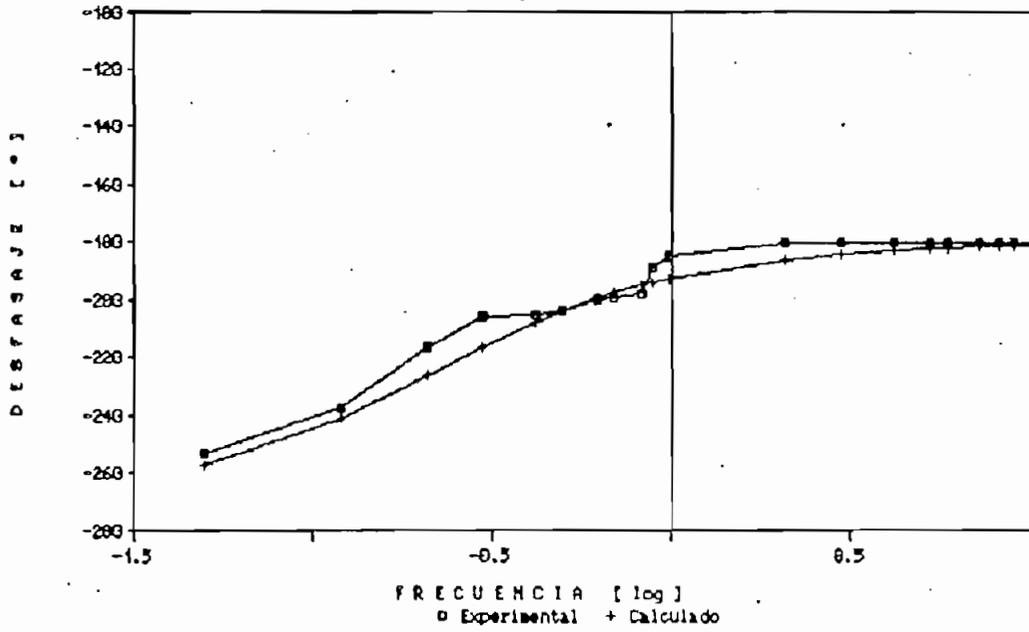


Figura 2.2.5

2.3 FUNCION DE TRANSFERENCIA DEL EXCITADOR

Para este caso, ante la práctica imposibilidad de realizar una deducción matemática a partir de los circuitos electrónicos, se procedió a la inversa de los casos anteriores. En base de oscilogramas experimentales se dedujo la función de transferencia que describe adecuadamente los diagramas de módulo y fase obtenidos.

Los diagramas se parecen mucho a los correspondientes a un filtro pasabajos de la forma $- K_e / (1 + j\omega T_e)$. Con cálculos iterativos se encuentra que los valores $K_e = .77$ y $T_e = 0.27$ segundos, describen con gran exactitud las funciones módulo y ángulo. En las figuras 2.3.1 y 2.3.2 se comparan los gráficos obtenidos experimental y analíticamente.

2.3.1 CONVERSION A VALORES POR UNIDAD DE LA FUNCION DE TRANSFERENCIA DEL EXCITADOR

Tomando como valores base los correspondientes a la condición de vacío del generador, esto es: $V_c = 105$ V, $V_r = -1.3$ V, queda:

$$F(s) = - \frac{1}{1 + 0.27 \cdot s}$$

2.3.2 CONSTANTE DE TIEMPO DEL EXCITADOR

La utilización de la constante de tiempo $T_e = 0.27$ seg. dedu-

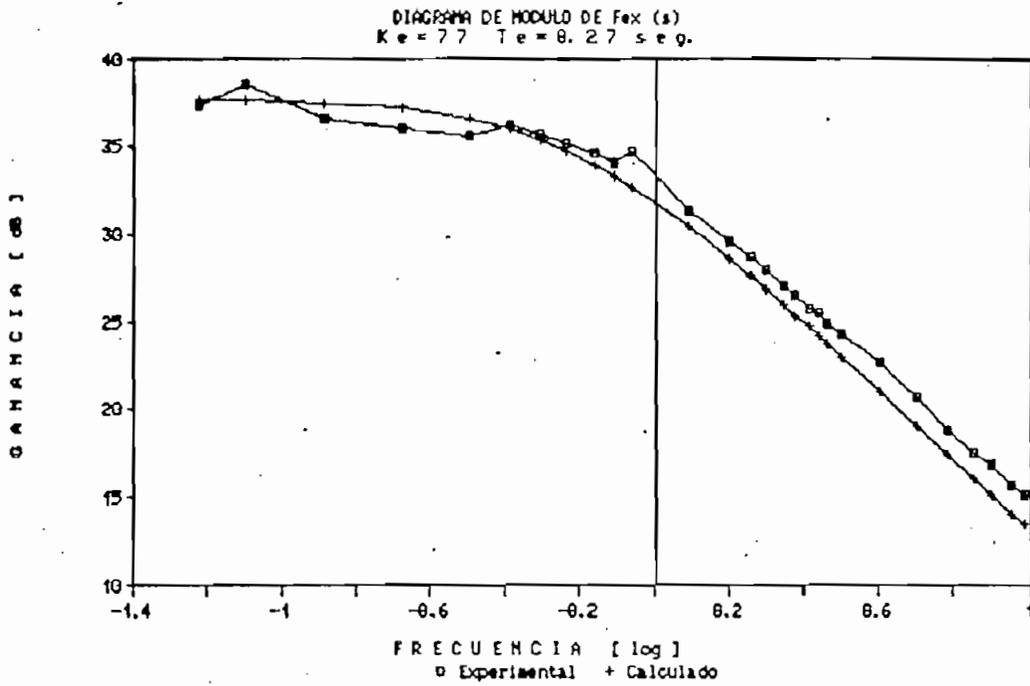


Figura 2.3.1

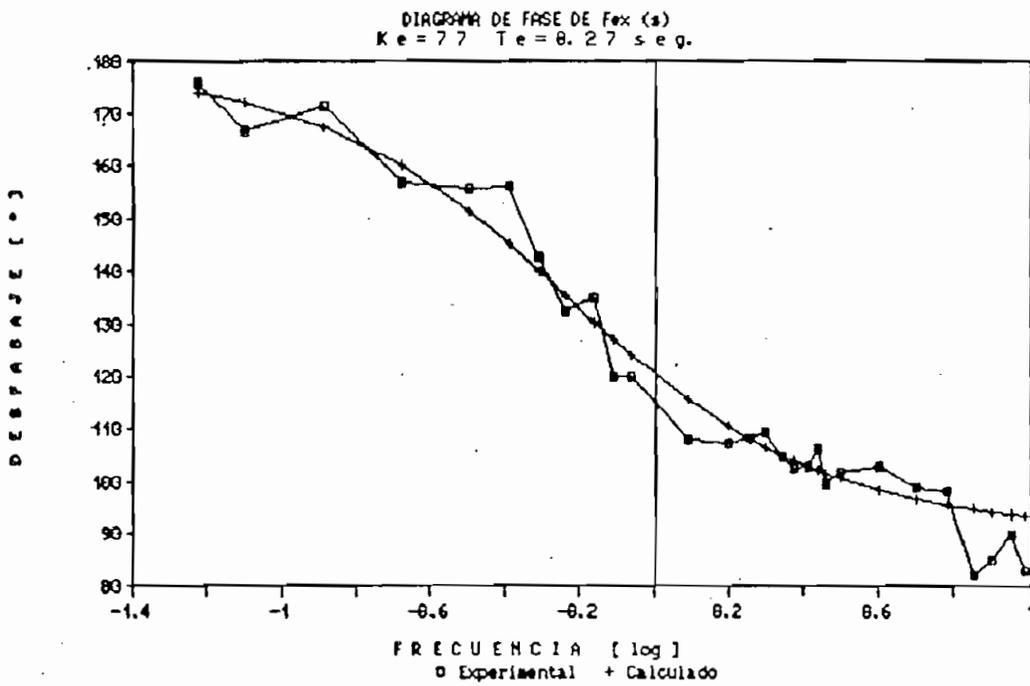


Figura 2.3.2

cida arrojará más luego gruesos errores de respuesta en el tiempo para la Simulación completa del Generador - Sistema de Potencia; por lo que se resuelve utilizar una constante de tiempo más coherente con el sistema de excitación de alta respuesta en el tiempo, y que permita mejorar los resultados en contrastación con oscilogramas disponibles.

La función de transferencia aproximada, sin tomar en cuenta el comportamiento no lineal del convertidor a tiristores en las zonas de máxima y mínima excitación, pero que se puede utilizar en la región normal de trabajo es:

$$F_{ex}(s) = \frac{1}{1 + 0.005 \cdot s}$$

2.4 FUNCION DE TRANSFERENCIA DEL ESTABILIZADOR DE POTENCIA

El Estabilizador de oscilaciones de potencia utiliza como señal de entrada la Potencia Activa. Está constituido por los siguientes bloques, figura 2.4 , cuyos circuitos y funciones de transferencia equivalentes se presentan a continuación, figuras 2.4.1 , 2.4.2 , 2.4.3 y 2.4.4 .

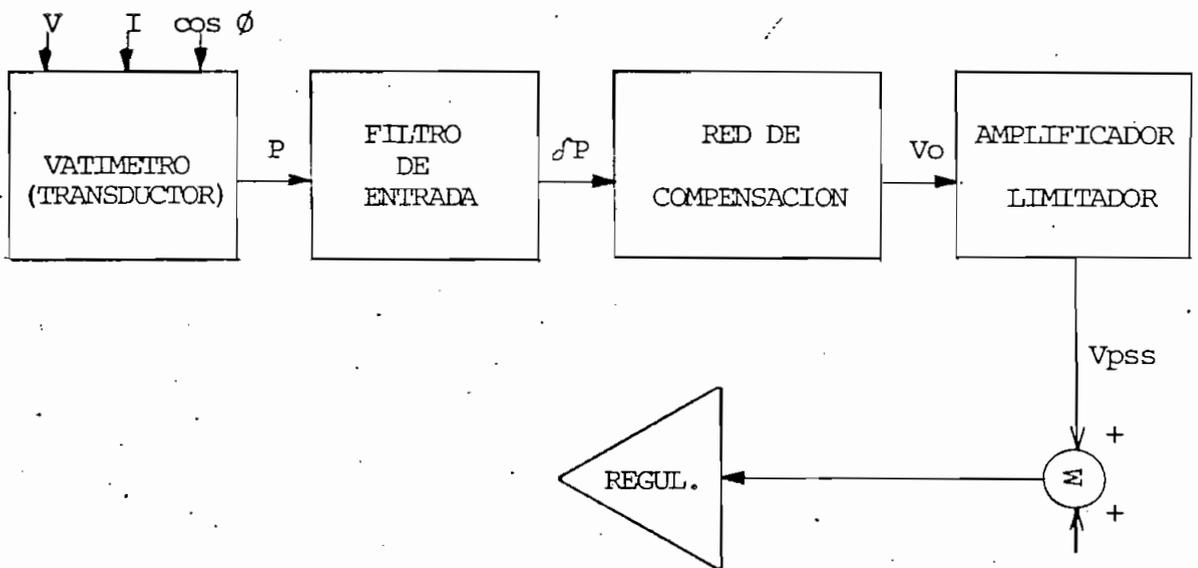


Figura 2.4 Estabilizador de Potencia

2.4.1 TRANSDUCTOR .- Es un medidor de Potencia Activa que aprovecha el efecto Hall. El amplificador produce un pequeño retraso de tiempo.

$$F_1(s) = \frac{P(s)}{V_i(s)} = - \frac{K_h}{1 + T_h \cdot s}$$

Kh: 35 → 44 Th: 5.6 → 6.6 msec

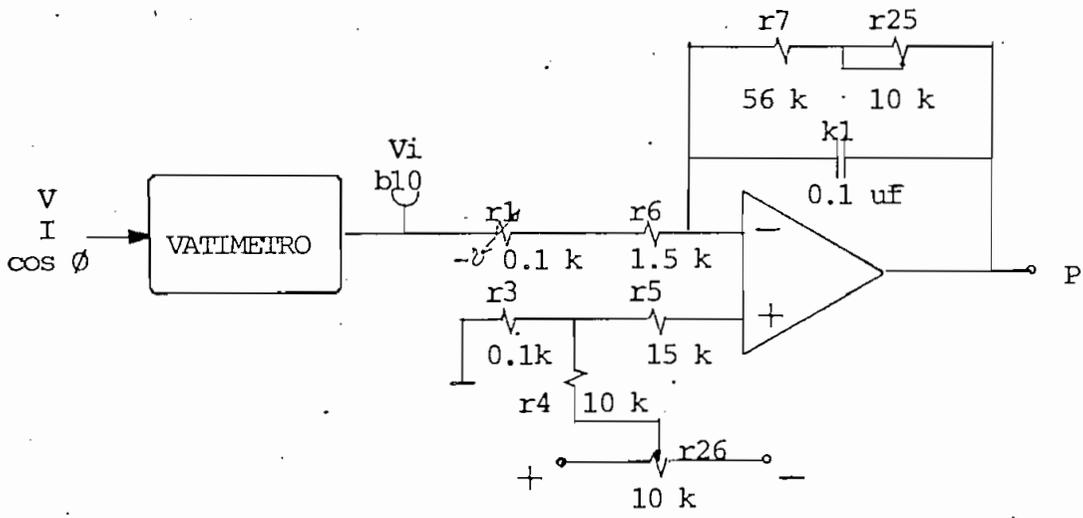


Figura 2.4.1 Vatímetro - Amplificador

2.4.2 FILTRO DE ENTRADA .- Filtra solamente las oscilaciones de Potencia.

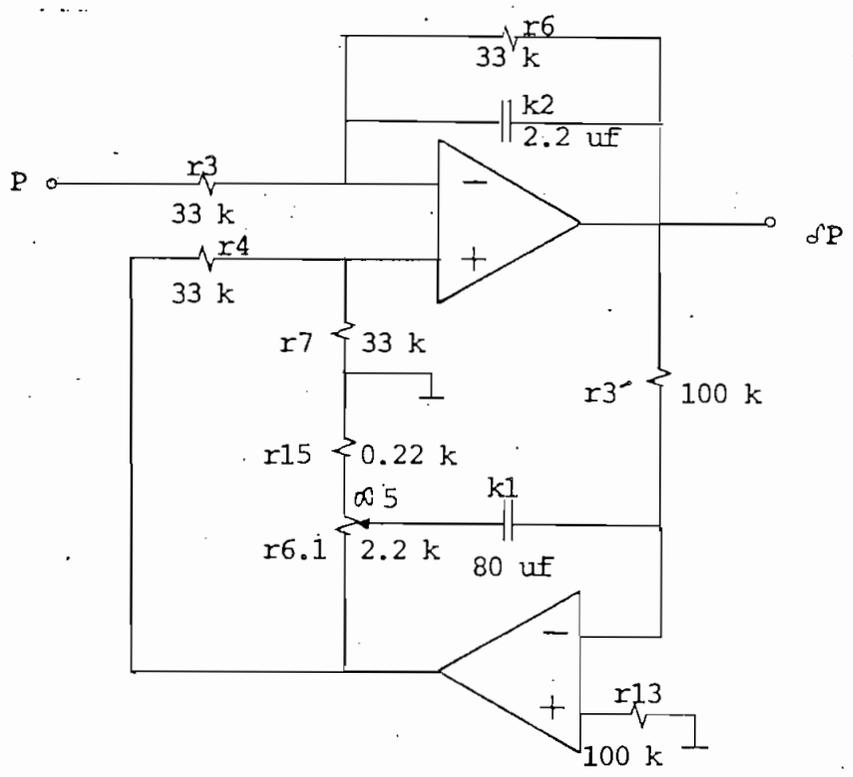


Figura 2.4.2

$$F2(s) = \frac{\delta P(s)}{P(s)} = \frac{\alpha_5 \cdot r'3 \cdot k1 \cdot s}{(r6 \cdot k2) \cdot (\alpha_5 \cdot r'3 \cdot k1) \cdot s^2 + \alpha_5 \cdot r'3 \cdot k1 \cdot s + 1}$$

Como: $\alpha_5 \cdot r'3 \cdot k1 \gg r6 \cdot k2$

$$F2(s) \approx \frac{\alpha_5 \cdot r'3 \cdot k1 \cdot s}{1 + \alpha_5 \cdot r'3 \cdot k1 \cdot s}$$

Como: $r'3 = 100 \text{ k}\Omega$, $k1 = 80 \text{ }\mu\text{F}$; $T5 = r'3 \cdot k1 = 8 \text{ seg}$ y $\alpha_5: 0.1 \rightarrow 1$

$$F2(s) \approx \frac{\alpha_5 \cdot T5 \cdot s}{1 + \alpha_5 \cdot T5 \cdot s}$$

2.4.3 RED DE COMPENSACION

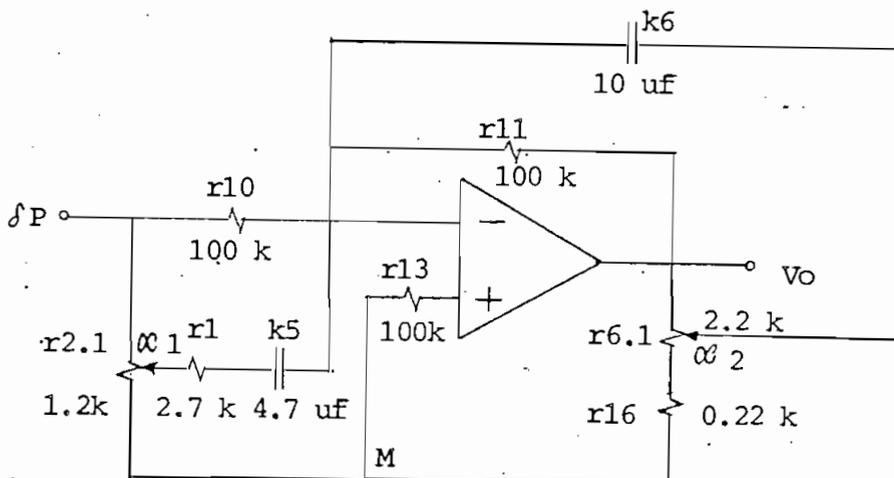


Figura 2.4.3

$$F3(s) = \frac{Vo(s)}{\delta P(s)} = \frac{1 + r1 \cdot k5 \cdot s + \alpha_1 \cdot r11 \cdot k5 \cdot s}{(1 + r1 \cdot k5 \cdot s) \cdot (1 + \alpha_2 \cdot r11 \cdot k6 \cdot s)}$$

Como: $r11 = 100 \text{ k}\Omega$, $k5 = 4.7 \text{ }\mu\text{F}$, $T1 = r11 \cdot k5 = 0.47 \text{ seg}$.

$k6 = 10 \text{ }\mu\text{F}$, $T2 = r11 \cdot k6 = 1 \text{ seg}$.

$r1 = 2.7 \text{ k}\Omega$,

$T3 = r1 \cdot k5 = 0.0127 \text{ seg}$.

$\alpha_1: 0 \rightarrow 1$

$\alpha_2: 0.1 \rightarrow 1$

$$F3(s) = \frac{1 + (T3 + \alpha1 \cdot T1) \cdot s}{(1 + T3 \cdot s) \cdot (1 + \alpha2 \cdot T2 \cdot s)}$$

2.4.4 AMPLIFICADOR - LIMITADOR DE SALIDA

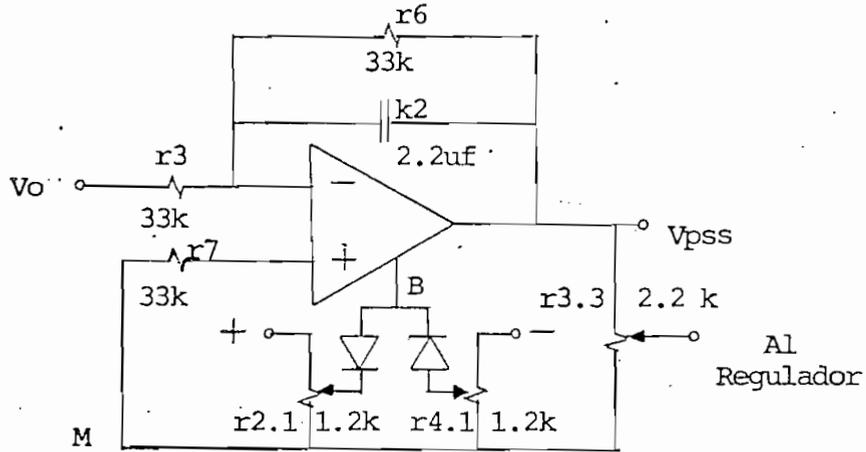


Figura 2.4.4

$$F4(s) = \frac{Vpss(s)}{Vo(s)} = \frac{1}{1 + r6 \cdot k2 \cdot s}$$

Como: $r6 = 33 \text{ k}\Omega$, $k2 = 2.2 \text{ }\mu\text{F}$, $T4 = r6 \cdot k2 = 0.0726 \text{ seg.}$

$$F4(s) = \frac{1}{1 + T4 \cdot s}$$

En el punto B de la figura 2.4.4 se limita la salida a $\pm L \%$ mediante los potenciómetros $r2.1$ y $r4.1$.

2.4.5 FUNCION DE TRANSFERENCIA TOTAL DEL ESTABILIZADOR DE POTENCIA

$$Fpss(s) = F1(s) \cdot F2(s) \cdot F3(s) \cdot F4(s)$$

$$Fpss(s) = \frac{Kh \cdot \alpha5 \cdot T5 \cdot s \cdot [1 + (T3 + \alpha1 \cdot T1) \cdot s]}{(1 + Th \cdot s)(1 + \alpha5 \cdot T5 \cdot s)(1 + T3 \cdot s)(1 + \alpha2 \cdot T2 \cdot s)(1 + T4 \cdot s)}$$

Reemplazando los valores de las constantes de tiempo:

$$F_{pss}(s) = \frac{K_{pss} \cdot s \cdot [1 + (0.0127 + 0.47\alpha_1)s]}{(1 + 0.007s)(1 + 8\alpha_5s)(1 + 0.0127s)(1 + \alpha_2s)(1 + 0.073s)}$$

$$K_{pss} = K_h \cdot \alpha_5 \cdot K_n \quad \Rightarrow 0 \rightarrow 44 \quad (*)$$

$$K_h = 35 \rightarrow 44$$

$K_n =$ Ganancias adicionales en cascada

$$\alpha_1 = 0 \rightarrow 1$$

$$\alpha_2 = 0.1 \rightarrow 1$$

$$\alpha_5 = 0.1 \rightarrow 1$$

$$L = 0 \rightarrow 0.1 \text{ pu}$$

(*) En la simulación $K_{pss}: 0 \rightarrow 1$ ya que $K_h = 1$ para que $V_1(s) = -P(s)$ (Figura 2.4.1) y así poder introducir la función de transferencia del vatímetro.

2.4.6 COMPARACION DE DIAGRAMAS CALCULADOS Y MEDIDOS

En las figuras 2.4.5 y 2.4.6 se presentan los diagramas de módulo y fase obtenidos de la función $F_{pss}(s)$ y los obtenidos de oscilogramas experimentales; en ambos casos los valores de los parámetros utilizados fueron los siguientes:

$$K_{pss} = 40$$

$$\alpha_1 = 0.8$$

$$\alpha_2 = 0.1$$

$$\alpha_5 = 0.55$$

$$L = \pm 0.1$$

DIAGRAMA DE MÓDULO DE Fps (s)

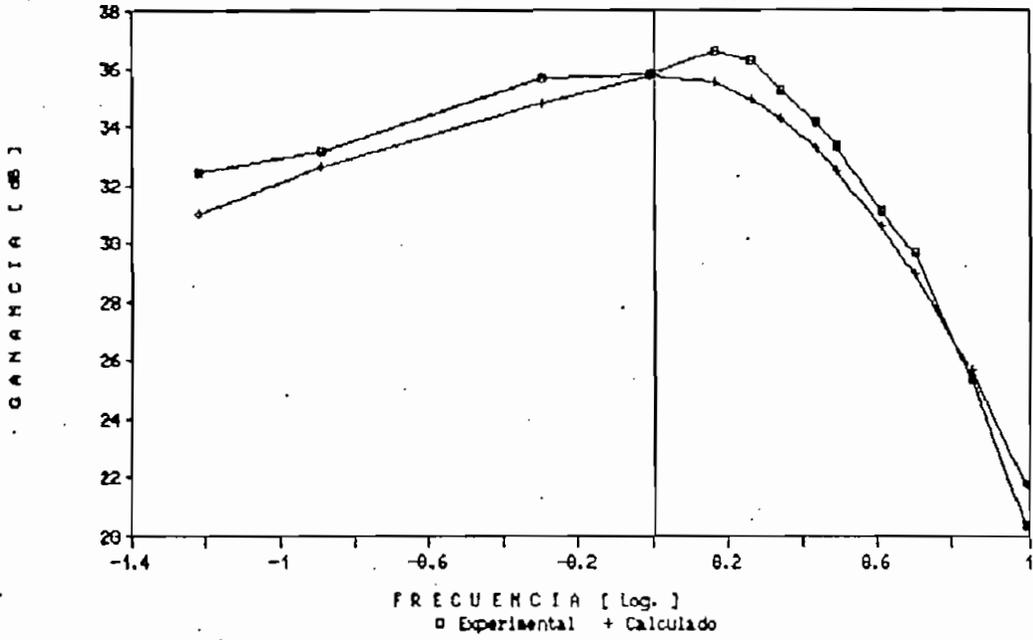


Figura 2.4.5

DIAGRAMA DE FASE DE Fps (s)

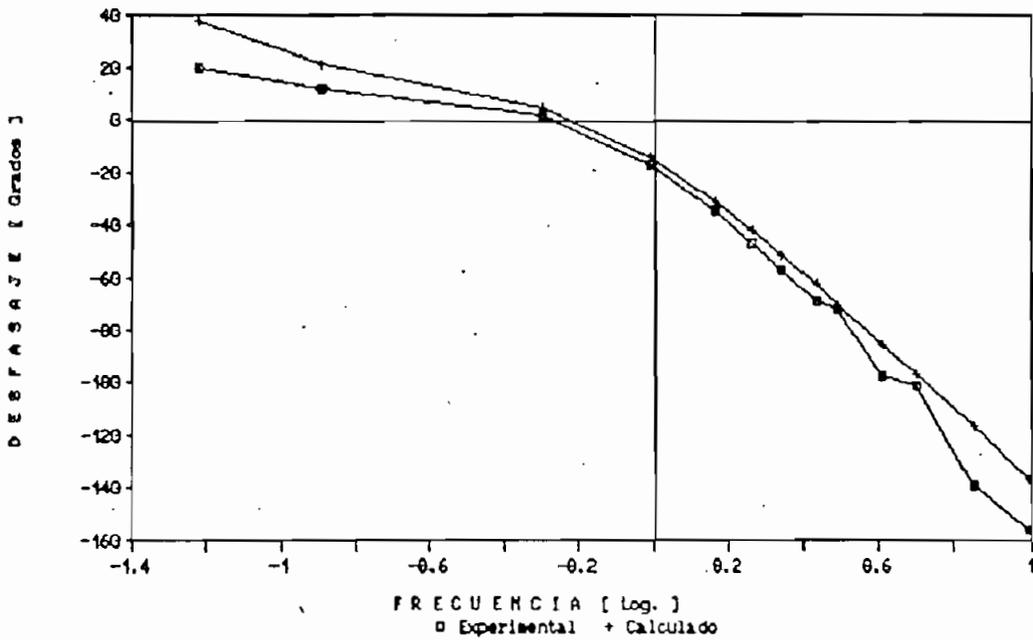


Figura 2.4.6

2.5 MODELO Y PARAMETROS DEL GENERADOR

El modelo matemático que se utiliza es el que toma como variables de estado a las concatenaciones de flujo por segundo, según las referencias (7),(8) .

Los parámetros del generador necesarios para esta modelación se indican a continuación (8) :

Voltaje Terminal fase-fase base	V_{t0-0}	13.8 kV
Potencia Aparente base	S_b	111 MVA
Corriente Terminal base	I_b	4644 Amp
Impedancia base	Z_b	1.7156 Ω
Corriente de circuito abierto del excitador	I_{exoc}	610 Amp
Resistencia de secuencia positiva	$r(sec.+)$	0.00284 pu
Reactancia de secuencia cero	$X(sec.0)$	0.11 pu
Reactancia sincrónica del eje directo	X_d	1.09 pu
Reactancia sincrónica del eje en cuadratura	X_q	0.67 pu
Reactancia transitoria del eje directo	$X'd$	0.35 pu
Reactancia subtransitoria del eje directo	$X''d$	0.19 pu
Reactancia subtransitoria del eje en cuadratura	$X''q$	0.2 pu (*)

Constante de tiempo transitoria de eje directo de circuito abierto	T'do	7.03 seg.
Constante de tiempo subtransitoria de eje directo de circuito abierto	T''do	0.046 seg.
Constante de tiempo subtransitoria de eje en cuadratura de circuito abierto	T''qo	0.14 seg.

(*) Valor estimado

C A P I T U L O I I I

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

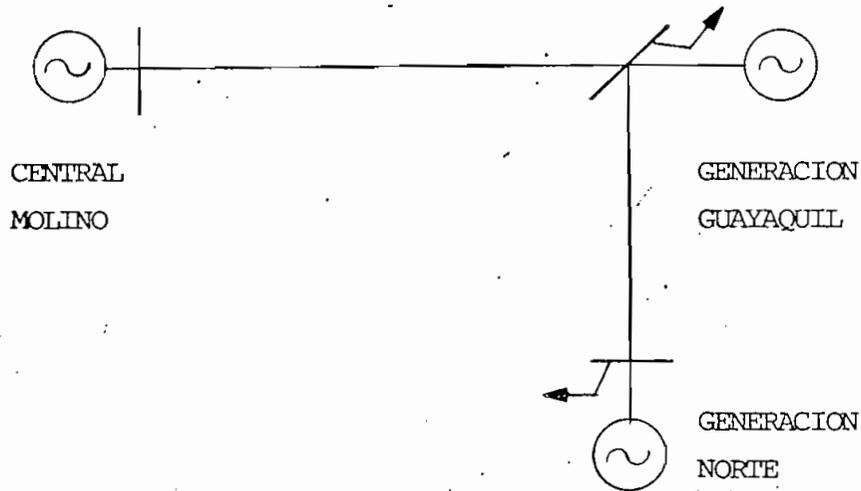
El objetivo de aplicación del modelo a desarrollarse es el estudio del comportamiento del Estabilizador de Oscilaciones de Potencia y su calibración más adecuada.

Por tanto, su desenvolvimiento deberá ser fiel con la realidad, principalmente para perturbaciones causales de oscilaciones de potencia efectiva y respuestas que incorporen la reacción del Sistema de Excitación incluido el PSS.

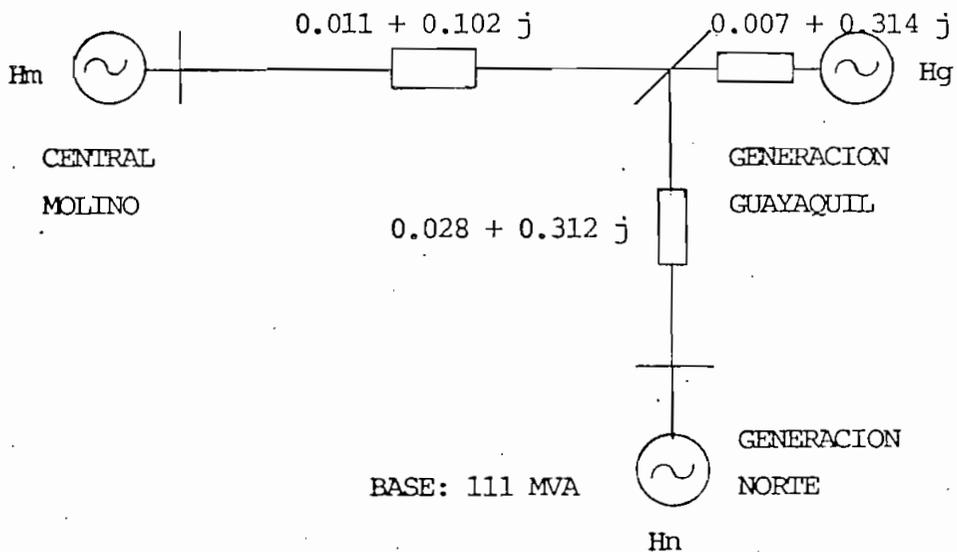
Desde este punto de vista se han efectuado simplificaciones y equivalencias con respecto al sistema eléctrico real; que, reduciendo la complejidad de la modelación han producido, sin embargo, resultados aceptables y confiables. Esto tiene que ver con la configuración considerada para el conjunto Central Molino - Sistema Nacional Interconectado, así como, con la exclusión del Regulador de Velocidad del Modelo del Generador; pues, precisamente, la resolución por el PSS de los transitorios estudiados es mucho más rápida que la respuesta de ese sistema de control.

3.1 CONFIGURACION GENERADOR. REACTANCIA Y CONSTANTE DE INERCIA EQUIVALENTES

La configuración del S.N.I., reducida a la región más significativa, es la siguiente:



Representando las impedancias y constantes de inercia equivalentes, queda: (Fuente: Protecciones INECEL-DOSNI)

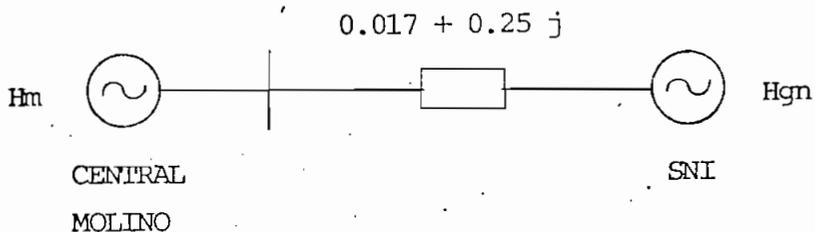


Hm: Constante de inercia equivalente de la Central Molino

Hg: Constante de inercia equivalente de la Generación Guayaquil

Hn: Constante de inercia equivalente de la Generación Norte

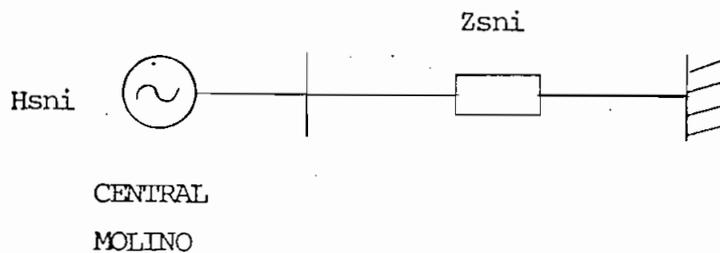
Lo anterior puede ser reducido a:



BASE: 111 MVA

Hgn: Constante de inercia equivalente de la Generación del SNI excepto la Central Molino

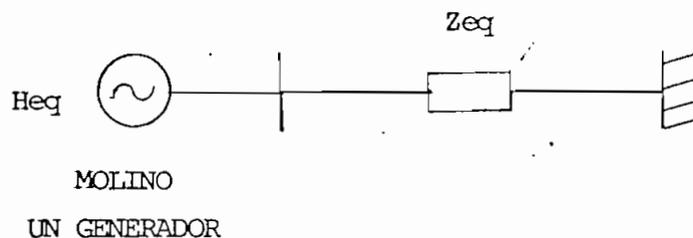
Y, finalmente:



H_{sni} : Constante de inercia equivalente del SNI incluida la Central Molino

Z_{sni} : Impedancia equivalente del SNI desde la Central Molino

Para la simulación se utilizan las siguientes aproximaciones:



H_{eq} : Constante de inercia equivalente del SNI desde un Generador de la Central Molino. Su valor es variable, dependiendo de las condiciones de operación del Sistema en la perturbación. Su valor en las simulaciones realizadas está entre 1.65 y 5.775 seg.

Z_{eq} : Impedancia equivalente del SNI desde un Generador de la Central Molino. Su valor es eminentemente reactivo, $Z_{eq} = 0.001 + j 0.2$ [pu] en la base de 111 MVA y se lo mantiene como constante, aunque rigurosamente es también variable como H_{eq} .

3.2 SIMULACIONES EN ESTADO ESTABLE

Como punto de partida se confirman las condiciones estables de generador en vacío y generador sincronizado con carga y factor de potencia nominales.

3.2.1 Generador en vacío

Por definición los valores de las siguientes magnitudes corresponden a 1 pu en esta condición.

Voltaje de campo = 105 V

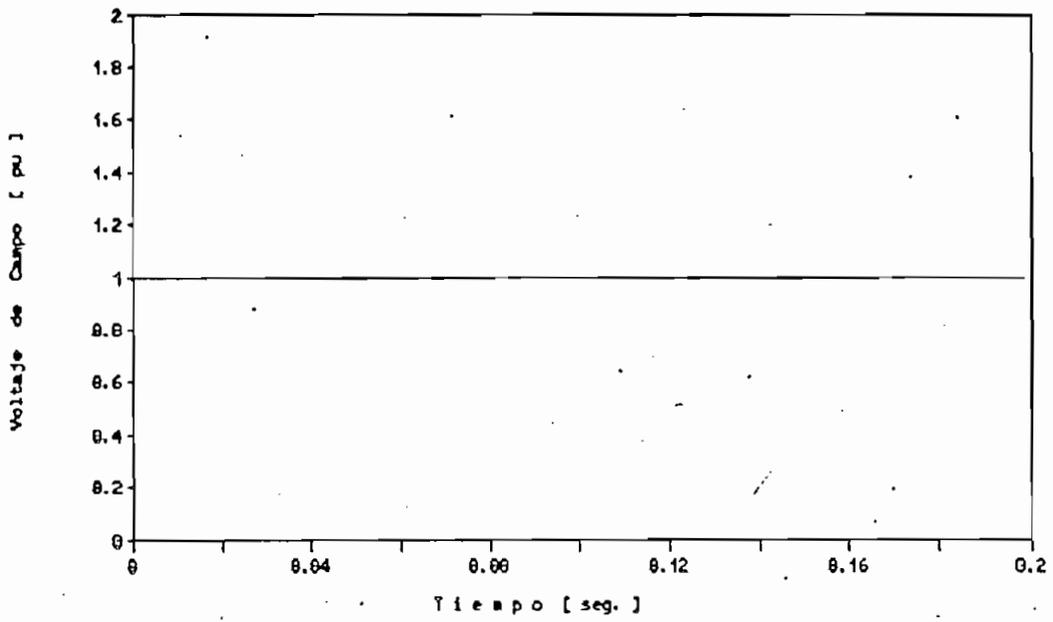
Corriente de campo = 610 A

Voltaje del Regulador = - 1.3 V

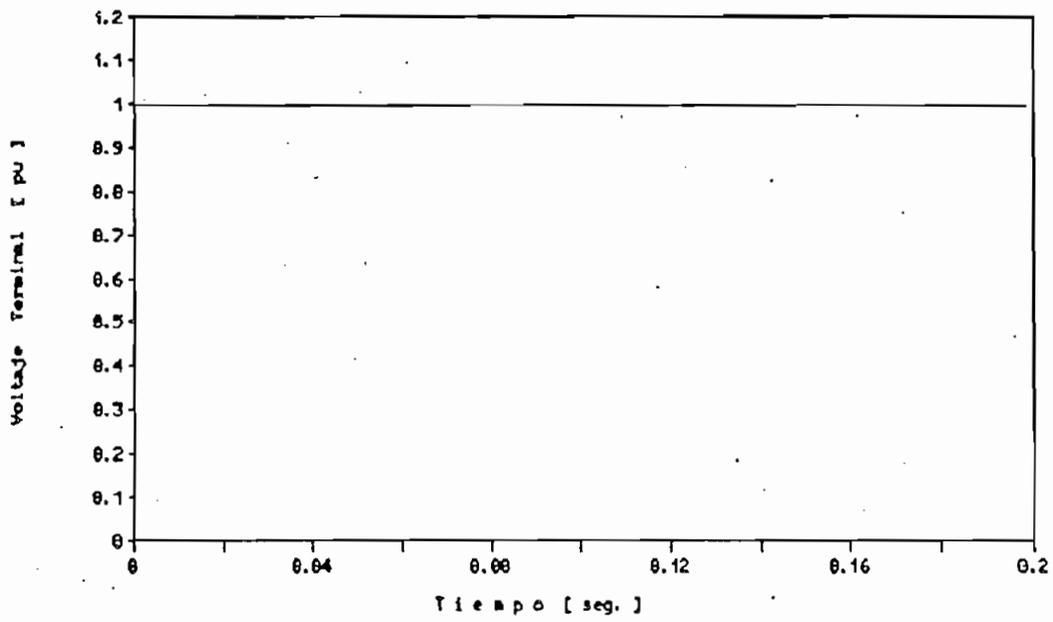
Voltaje Terminal = 13.8 kV

Para la simulación de vacío se utilizó una variante del programa asignando a V_q y V_d del generador las expresiones matemáticas necesarias para que la corriente de fase sea igual a cero.

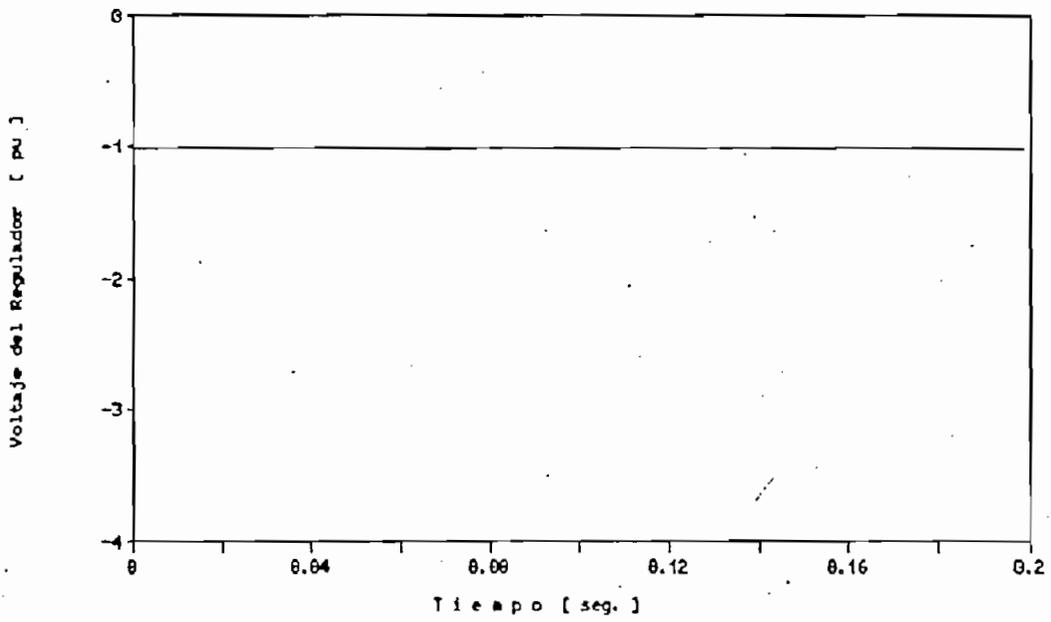
Generador en Vacío - Estado estable



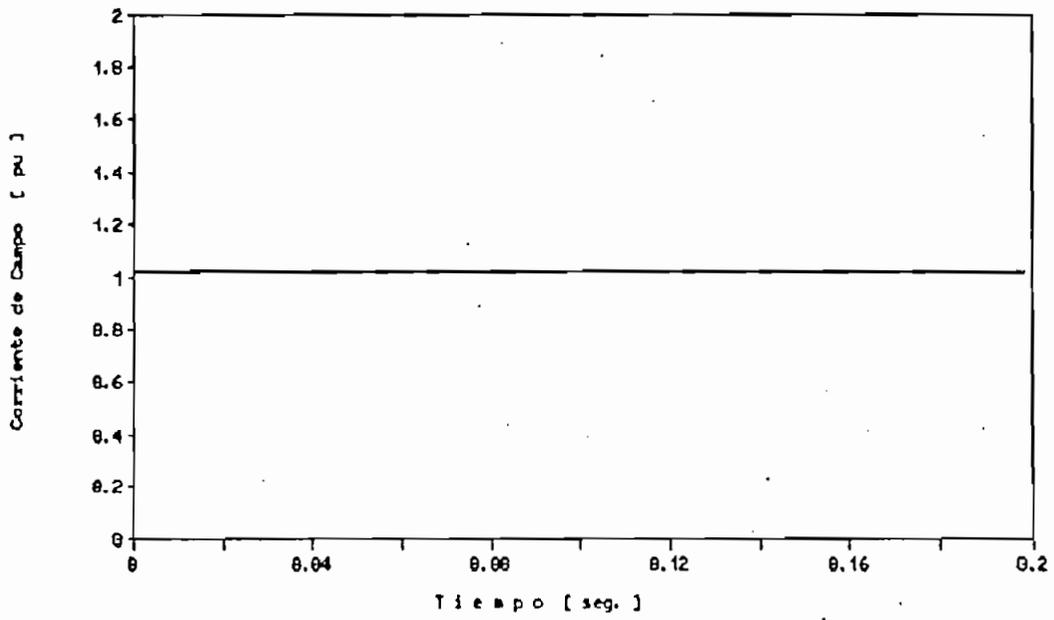
Generador en Vacío - Estado estable



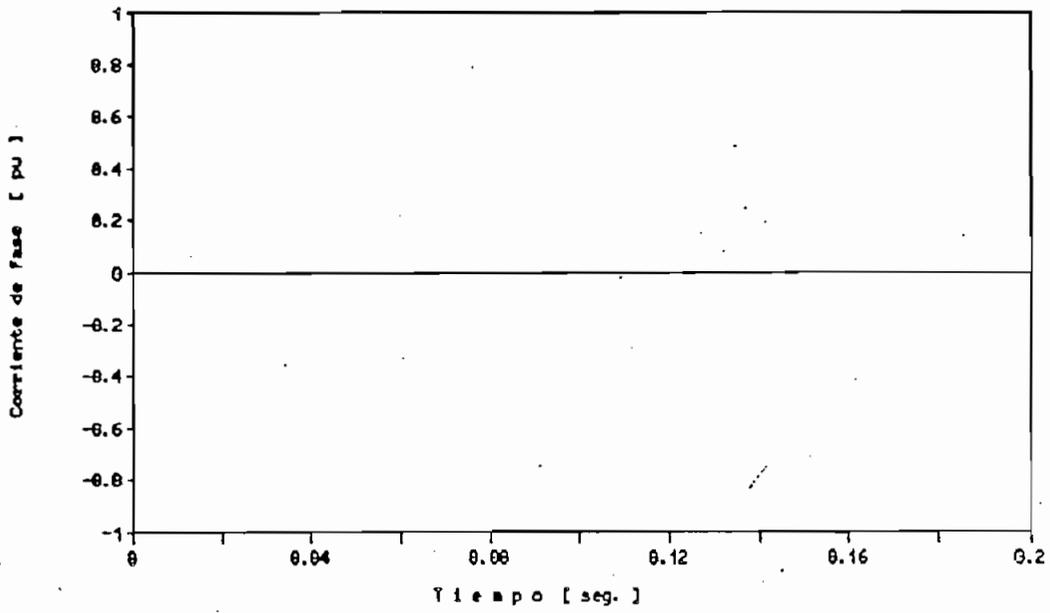
Generador en Vacío - Estado estable



Generador en Vacío - Estado estable



Generador en Vacío - Estado estable



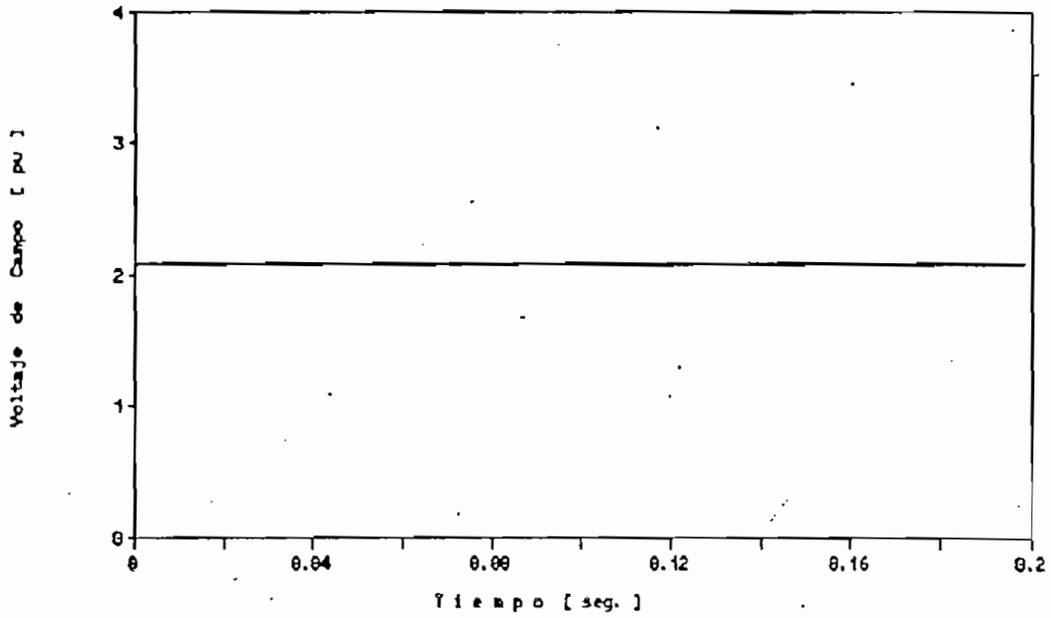
3.2.2 Generador en condición nominal

Las magnitudes de interés tienen generalmente los siguientes valores:

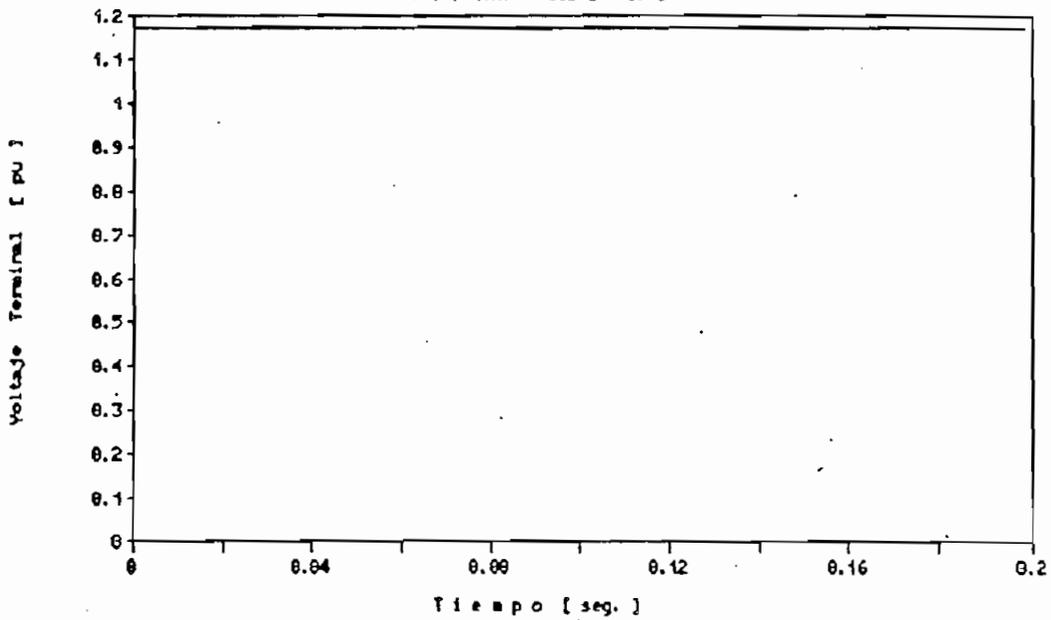
Potencia Aparente = 111 MVA	=	1 pu
Factor de potencia = 0.9	θ =	-0.451 radianes
Potencia Activa = 100 MW	=	0.9 pu
Potencia Reactiva = 48.4 MVAR	=	0.436 pu
Voltaje Terminal = 15 kV	*	1.1 pu
Corriente de Fase = 4350	*	0.94 pu
Voltaje de Campo = 215 V	*	2 pu
Corriente de Campo = 1150 A	*	2 pu

La diferencia en el Voltaje Terminal se debe al valor de la reactancia equivalente deducida para el SNI en la simulación, que exige ese nivel de voltaje alto en el generador para conseguir que el voltaje del sistema sea 1 pu en la barra infinita. Sin embargo, el valor escogido es el adecuado para la resolución de los transitorios en el tiempo en las siguientes simulaciones de perturbaciones.

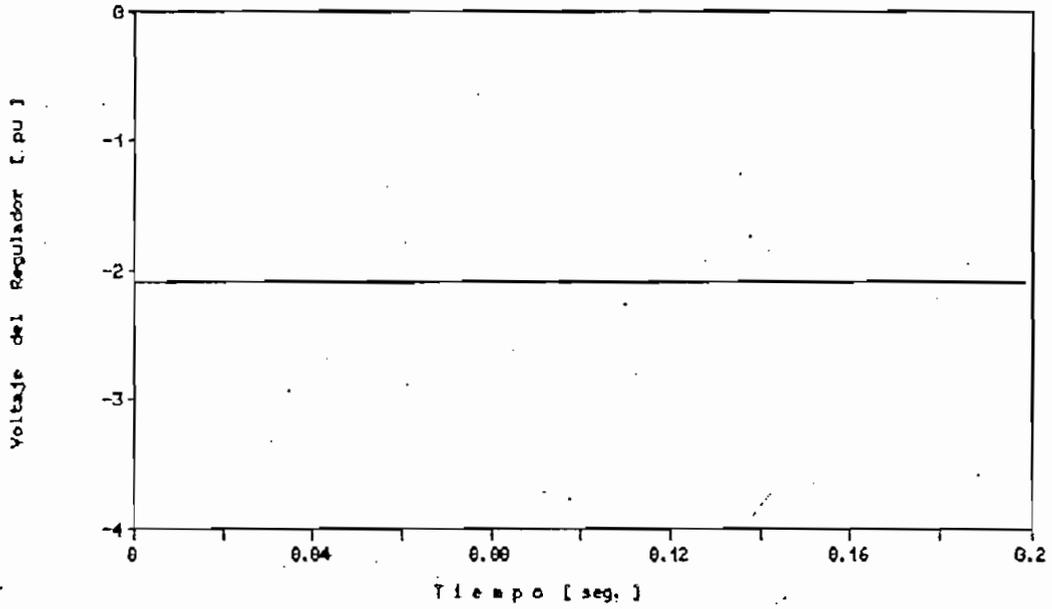
Generador en Condición Nominal
1.11 MVA $\cos \theta = 0.9$



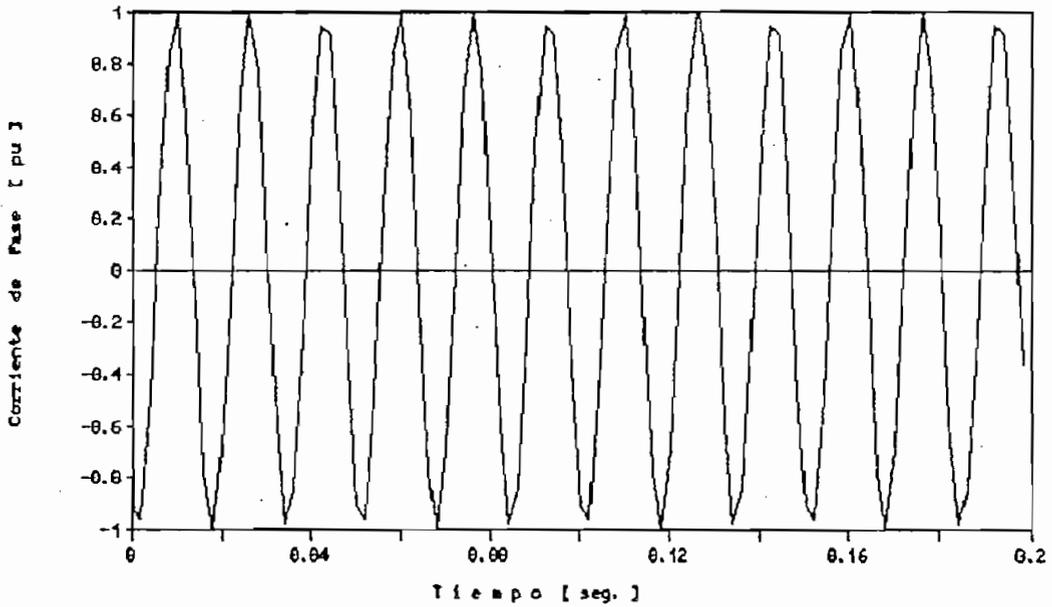
Generador en Condición Nominal
1.11 MVA $\cos \theta = 0.9$



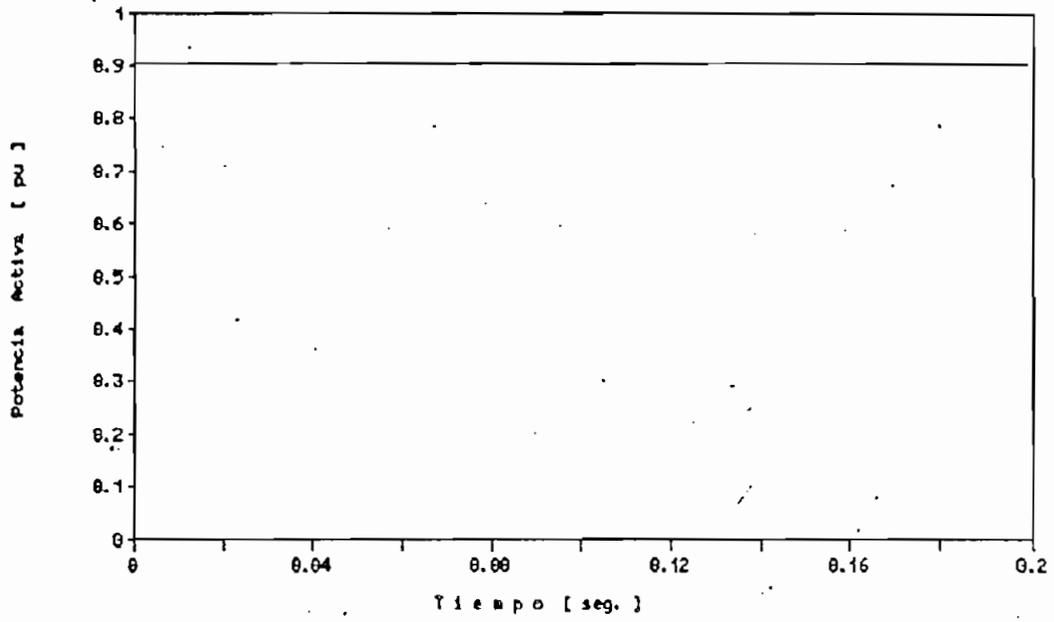
Generador en Condición Nominal
1.11 MVA $\cos \theta = 0.9$



Generador en Condición Nominal
1.11 MVA $\cos \theta = 0.9$



Generador en Condición Nominal
1.11 MVA $\cos \theta = 0.9$



3.3 SIMULACIONES DE PERTURBACIONES

A continuación se contrastan oscilogramas de campo obtenidos en diferentes épocas , y por tanto, diversas configuraciones del SNI, con las simulaciones respectivas.

3.3.1 Respuesta Transitoria de la Excitación en Vacío

La prueba fue realizada en la Unidad N^o 5 . En los oscilogramas el Voltaje Terminal aparece como una franja debido al rizado introducido por el puente rectificador trifásico utilizado para la medición y localizado antes del filtro de entrada al Regulador de Voltaje.

La perturbación es un escalón de voltaje introducido en el punto de suma a la entrada del Regulador.

Para la simulación se modifica la referencia, en este caso la nueva referencia en el instante de la perturbación es igual a 1.08 veces la referencia inicial.

Se presenta también la corriente de fase resultante de la simulación.

$V_t = 1.5 \text{ pu}$ $V_c = 3.5 \text{ pu}$

MOLINO, 88 - 01 - 22

1 seg

UNIDAD Nº 5 EN VACIO

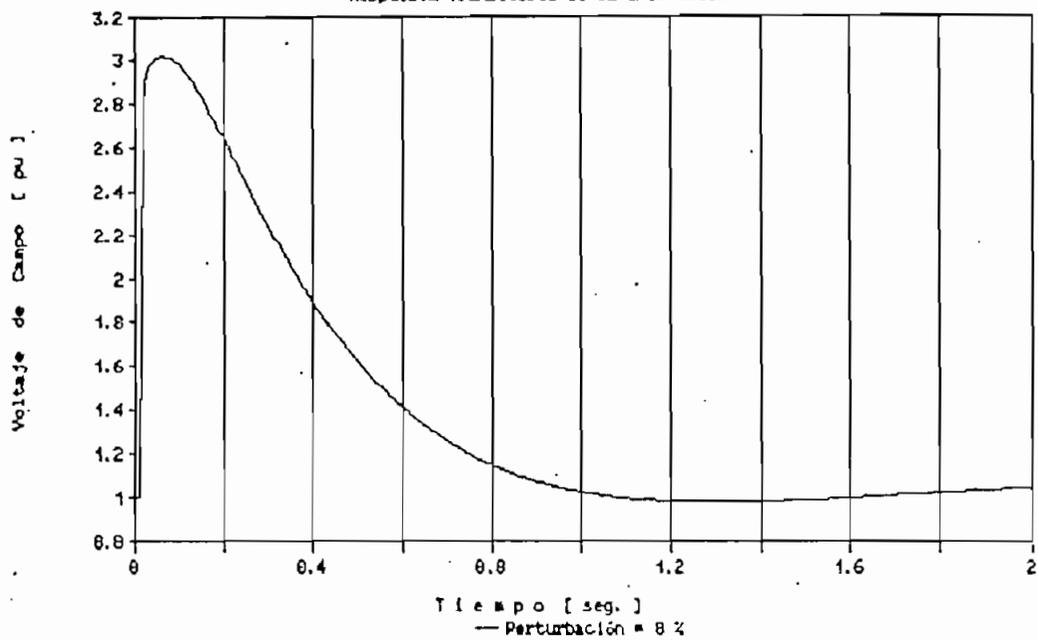
RESPUESTA TRANSITORIA

$V_t = 1.0 \text{ pu}$

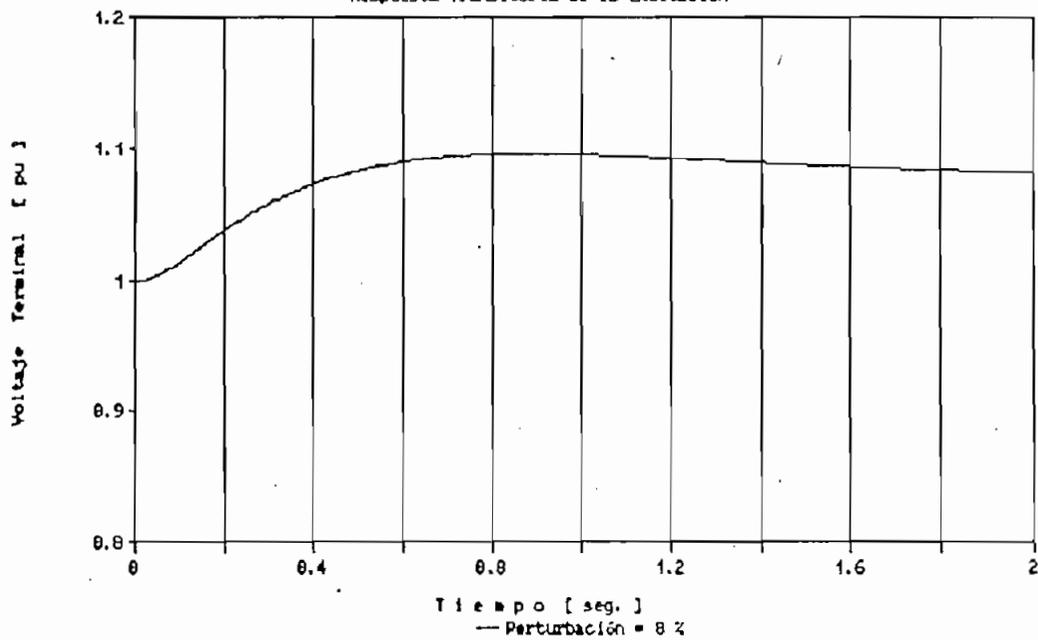
$V_t = 0.5 \text{ pu}$

$V_c = 1.0 \text{ pu}$

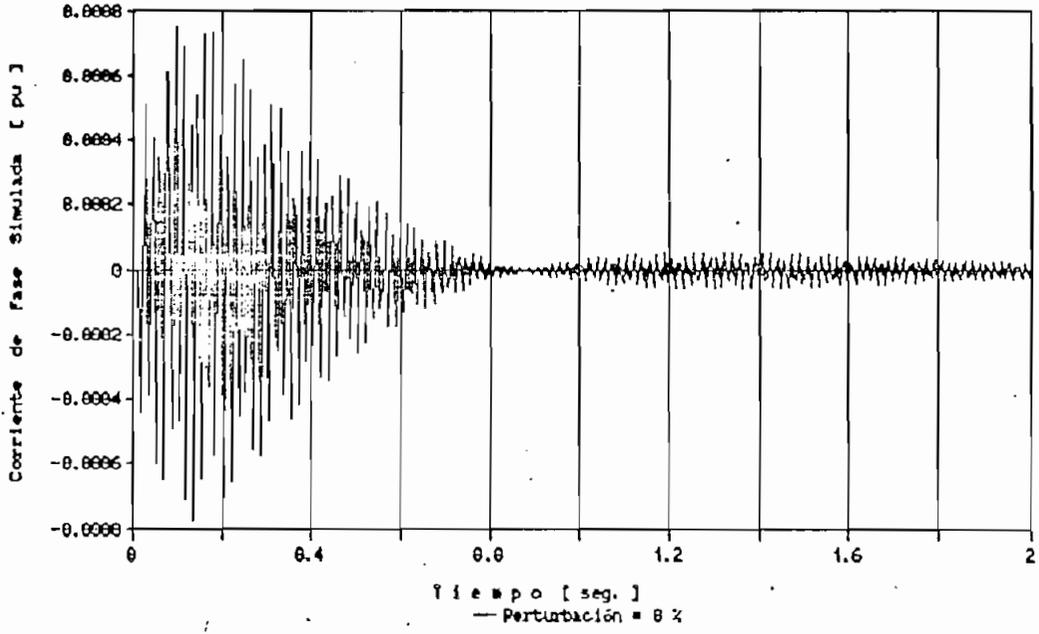
Generador en vacío
Respuesta Transitoria de la Excitación



Generador en vacío
Respuesta Transitoria de la Excitación



Generador en vacío
Respuesta Transitoria de la Excitación



3.3.2 Respuesta Transitoria de la Excitación en Sincronismo
Año 1984 - Sin PSS

El oscilograma corresponde a las verificaciones del efecto del Estabilizador en ese año. La prueba fue realizada en la Unidad N^o 2 , desconectando el límite de subexcitación.

Las condiciones iniciales son:

Potencia Activa = 113 MW

Potencia Reactiva = - 35 MVAR

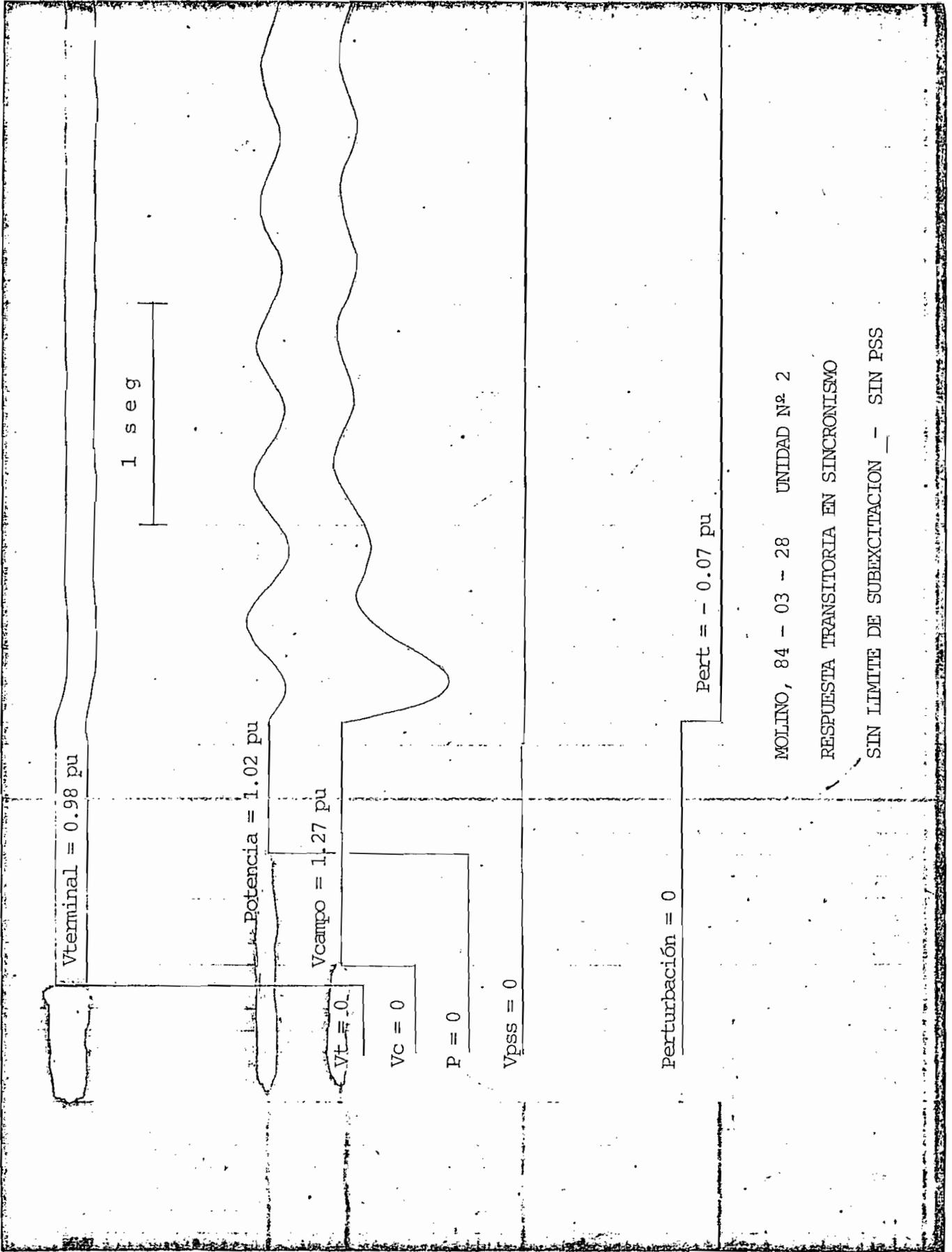
Voltaje de Campo = 133 V

Voltaje Terminal = 13.52 kV

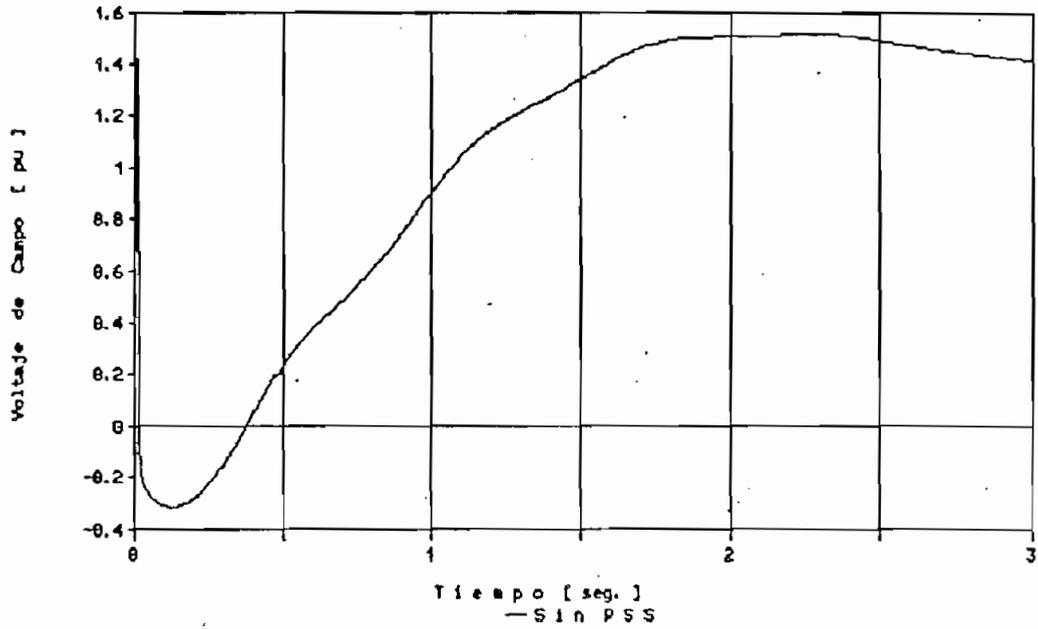
La perturbación sobre el Regulador de Voltaje cambió la Potencia Reactiva de - 35 MVAR a - 50 MVAR. (R8 = 0.93)

En ese año no entraban en servicio aún la Central Agoyán y varias subestaciones nuevas.

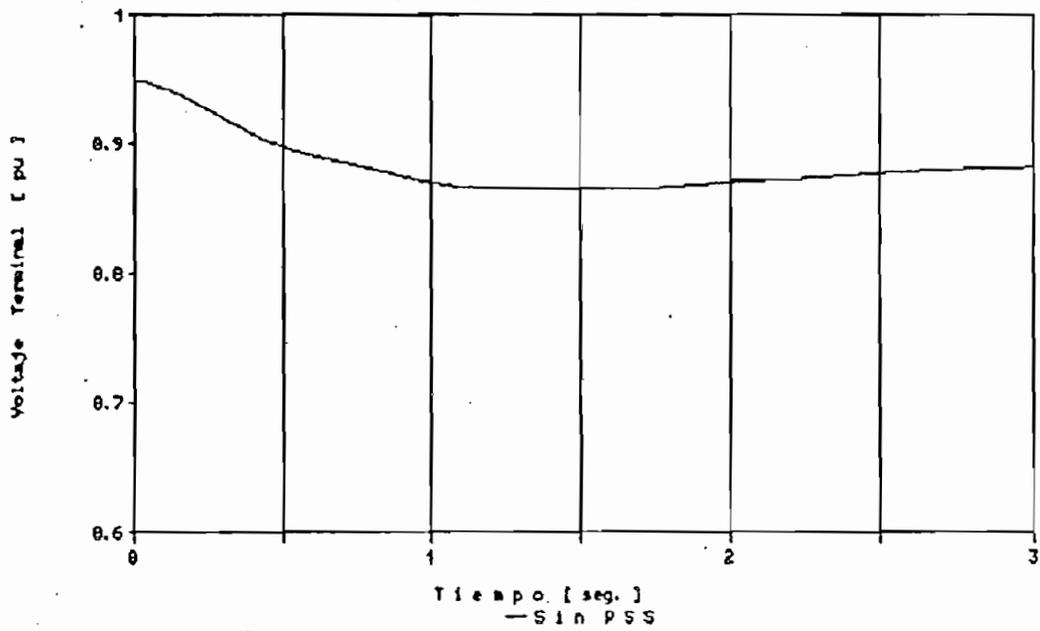
Se dedujo la constante de inercia equivalente $H = 1.65$ seg.



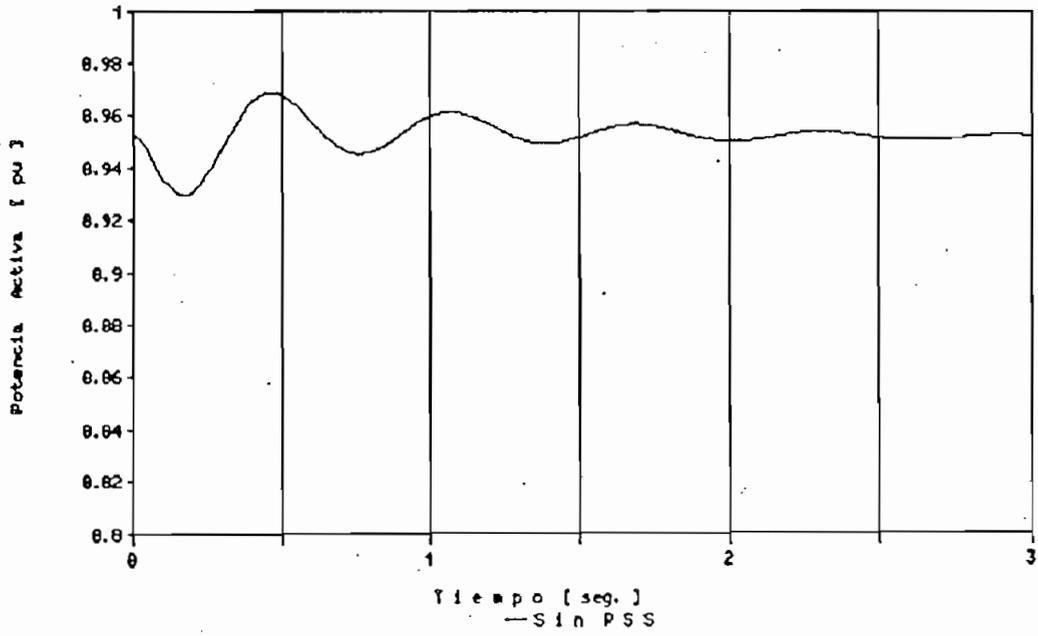
Respuesta Transitoria de la Excitación
1984 Perturbación = 8.93 * ReP



Respuesta Transitoria de la Excitación
1984 Perturbación = 8.93 * ReP



Respuesta Transitoria de la Excitación
1984 Perturbación = 0.93 * Ref



3.3.3 Respuesta Transitoria de la Excitación en Sincronismo
Año 1984 - Con PSS

Esta prueba corresponde al caso 3.3.2 anterior con la intervención del Estabilizador; sus calibraciones eran:

$$\alpha_5 = 0.55$$

$$\alpha_1 = 0.52$$

$$\alpha_2 = 0.1$$

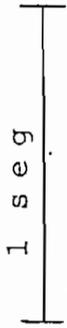
$$L_{pss} = 0.1 \text{ pu}$$

$$K_{pss} = 0.4$$

En la región de subexcitación se advertía una mayor influencia del Estabilizador para amortiguar las oscilaciones de potencia causadas.

$V_{terminal} = 0.98 \text{ pu}$

RESPUESTA TRANSITORIA EN SINCRONISMO
SIN LIMITE DE SUBEXCITACION
CON PSS



Potencia = 1.02

$V_{campo} = 1.27 \text{ pu}$

$V_t = 0$

$V_c = 0$

$P = 0$

$0 = 0V$

$0 = 0$

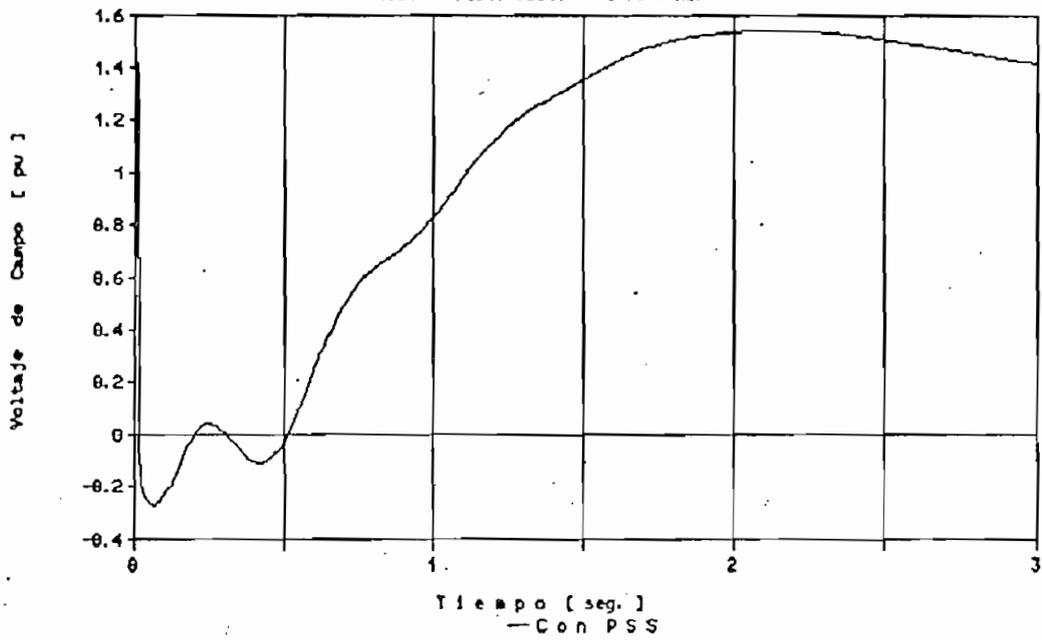
$V_{pss} = 0$

$V_{pss} = -0.1 \text{ pu}$

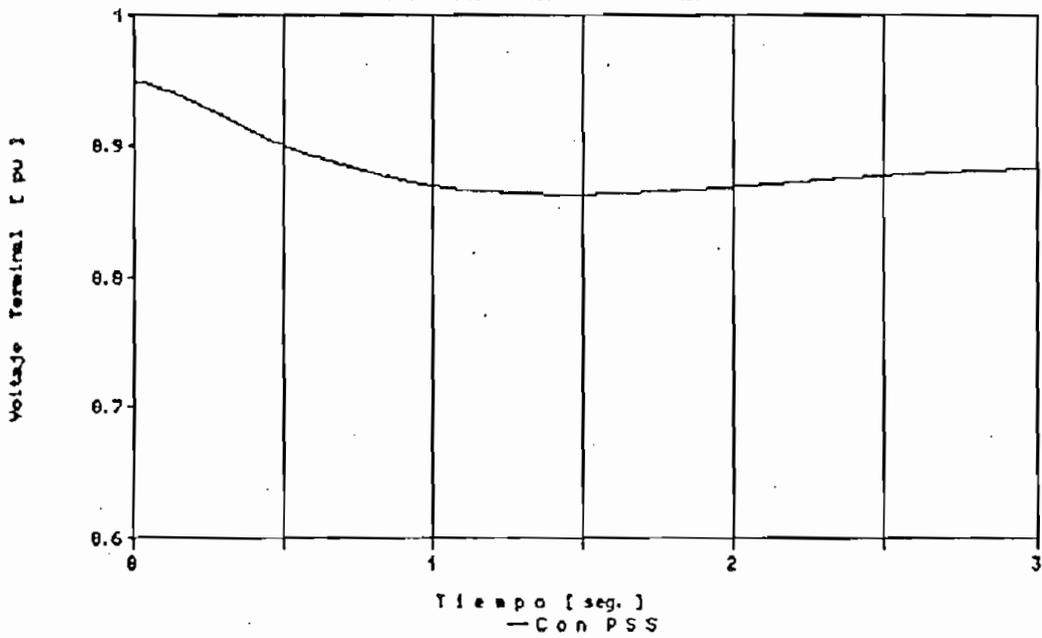
Perturbación = 0

Pert = - 0.07 pu

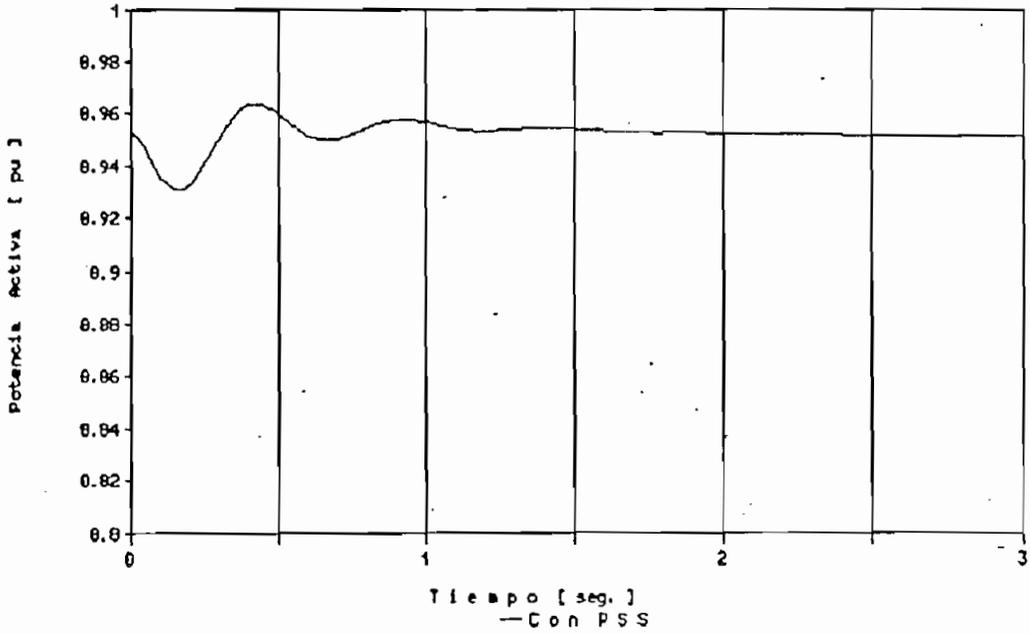
Respuesta Transitoria de la Excitación
1984 Perturbación = 8.93 * Ref



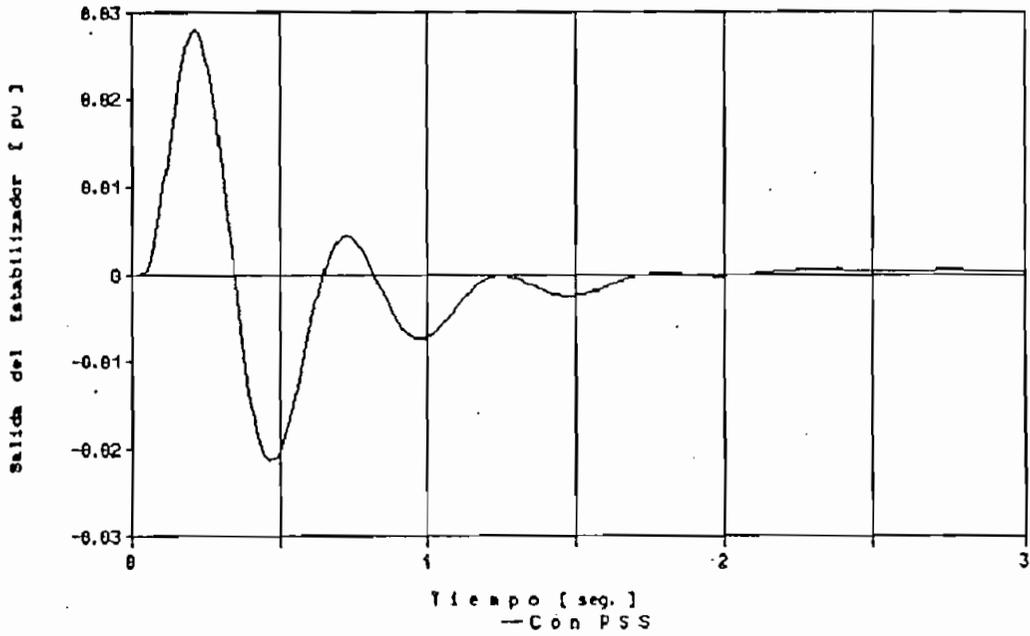
Respuesta Transitoria de la Excitación
1984 Perturbación = 8.93 * Ref



Respuesta Transitoria de la Excitación
1984 Perturbación = 8.93 * Ref



Respuesta Transitoria de la Excitación
1984 Perturbación = 8.93 * Ref



3.3.4 Respuesta Transitoria de la Excitación en Sincronismo Año 1987 - Sin PSS

El oscilograma corresponde a pruebas para la determinación del Voltaje de Techo para la Excitación. Fue realizado en la Unidad N° 5 .

Condiciones iniciales:

Potencia Activa = 60 MW

Potencia Reactiva = - 35 MVAR

Voltaje de Campo = 84 V

Voltaje Terminal = 13.1 kV

La perturbación cambió la Potencia Reactiva de - 35 MVAR a 50 MVAR. (R8 = 1.16)

Se trató de una prueba nocturna con cuatro generadores en servicio en la Central.

La constante de inercia deducida $H = 1.8$ seg

Se puede notar que en la simulación la limitación del Regulador de Voltaje afecta directamente al Voltaje de Campo, pues no se está modelando la saturación del convertidor AC - DC a tiristores que constituye el Excitador y que es determinante en la característica real.

MOLINO, 87 - 05 - 29 UNIDAD N° 5

Pert = 0.18 pu

RESPUESTA TRANSITORIA EN SINCRONISMO - SIN PSS
" CEILING VOLTAGE " - LIMITACION DEL REGULADOR

Perturbación = 0

Vregulador = 0 Vr = - 0.95 pu

Vc = 0.8 pu

1 seg

P = 0.55 pu

Vt = -0.95pu

10V

30V

3V

3V

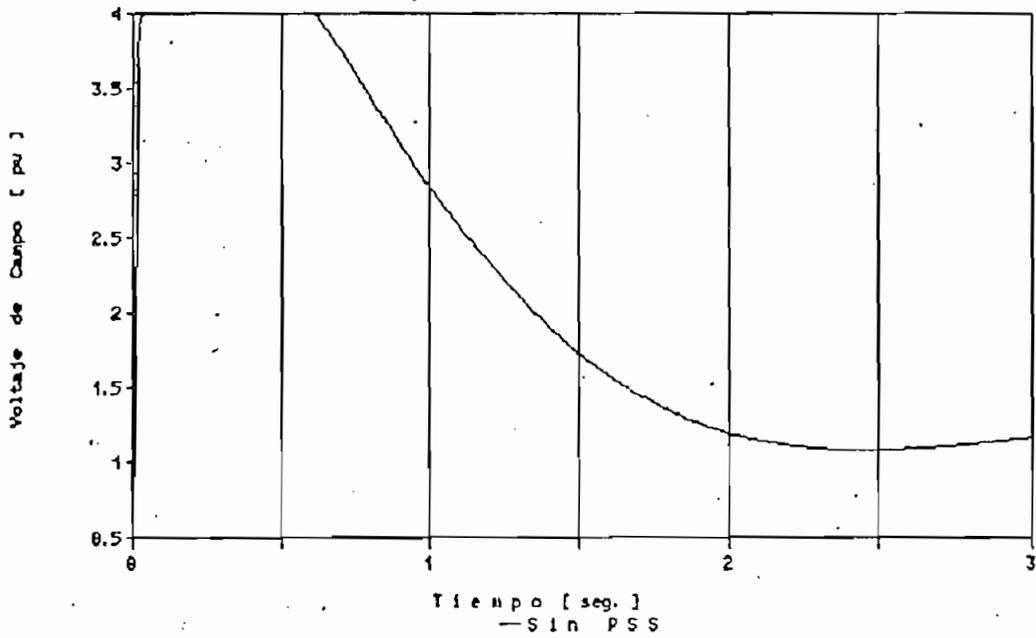
Vcampo = 0

Vterminal = 0

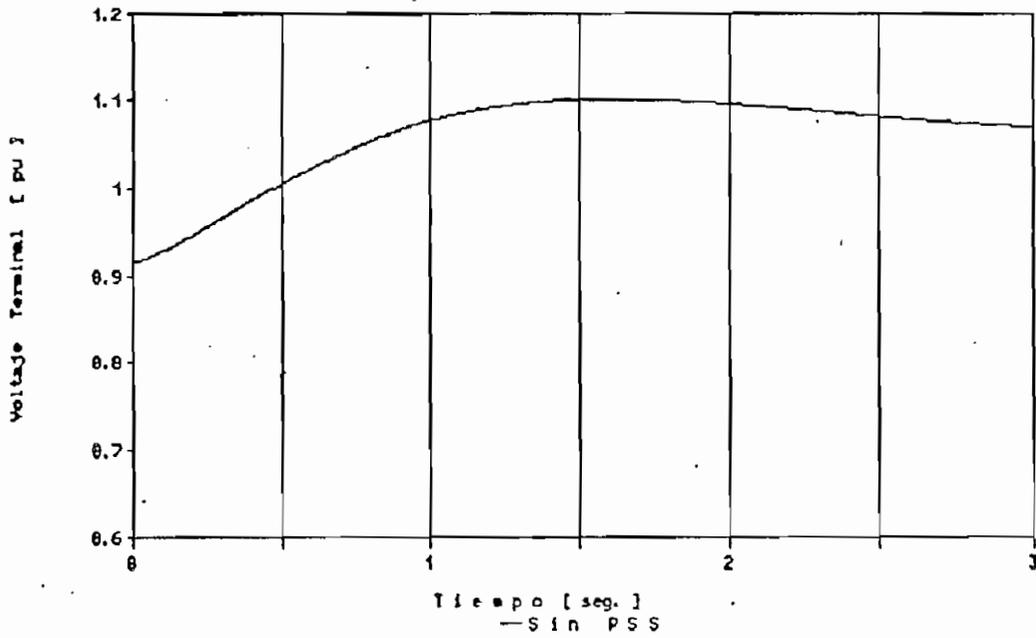
3V

Potencia = 0

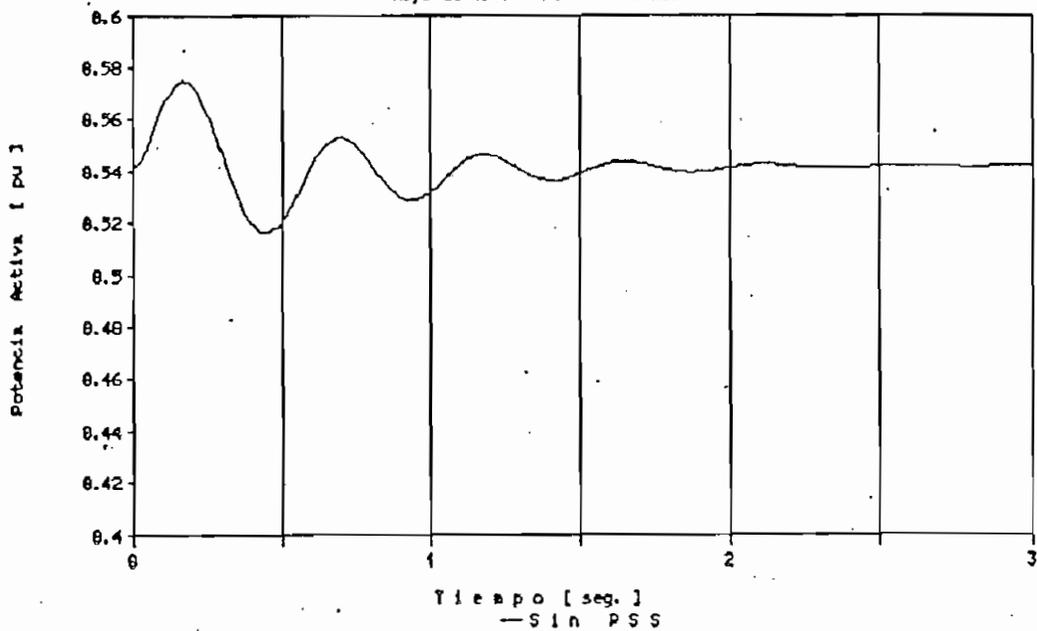
Respuesta Transitoria de la Excitación
Mayo de 1987 Pert= 1.16*Ref



Respuesta Transitoria de la Excitación
Mayo de 1987 Pert= 1.16*Ref



Respuesta Transitoria de la Excitación
Mayo de 1987 Pert= 1.16*Ref



3.3.5 Respuesta Transitoria de la Excitación en Sincronismo

Año 1987 - Con PSS

La prueba corresponde al caso anterior 3.3.4 pero con la intervención del Estabilizador.

Las calibraciones fueron:

$$\alpha_5 = 0.55$$

$$\alpha_1 = 0.8$$

$$\alpha_2 = 0.1$$

$$L_{pss} = 0.1 \text{ pu}$$

$$K_{pss} = 0.4$$

El factor α_1 había sido modificado en 1985 de 0.52 a 0.8 por sugerencia y como resultado de los estudios de Estabilidad de SWEDPOWER, lo que ciertamente mejoraba el desempeño del PSS. (11)

La sugerencia también incluía la reducción del límite a 0.05 pu pero por existir ambigüedad en las relaciones en por unidad esto no fue correctamente ajustado (Afirmación que es posible hacerla ahora).

MOLINO, 87 - 05 - 29 UNIDAD Nº 5;
RESPUESTA TRANSITORIA EN SINCRONISMO - CON PSS

Pert = 0.18 pu

PERTURBACION = 0

Vregulador = 0 Vr = - 0.95 pu

Vcampo = 0.8 pu

Vc = 0

1 seg

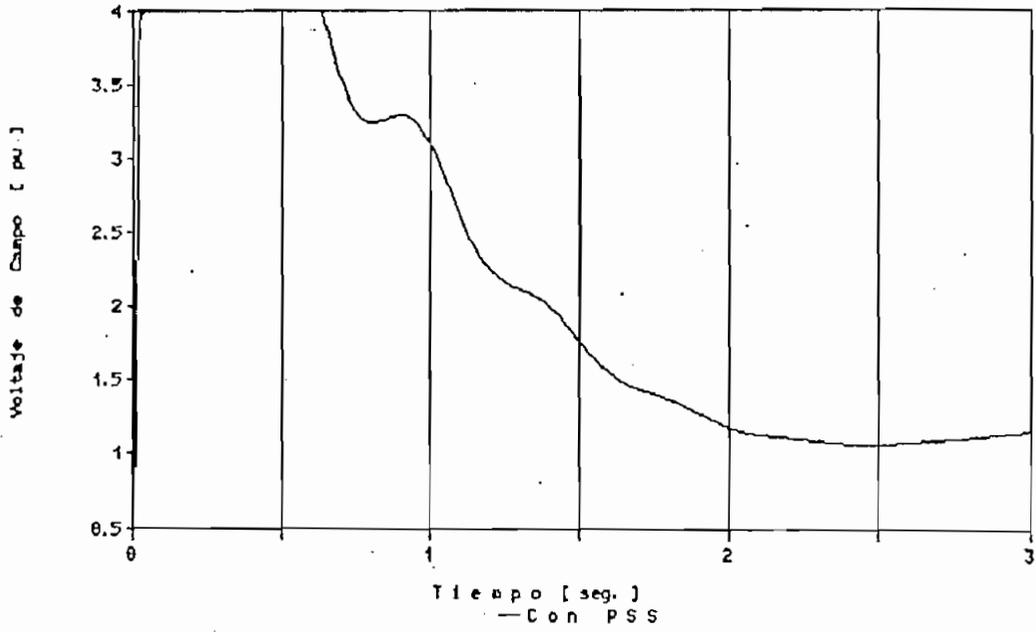
Vterminal = 0

P = 0.55 pu

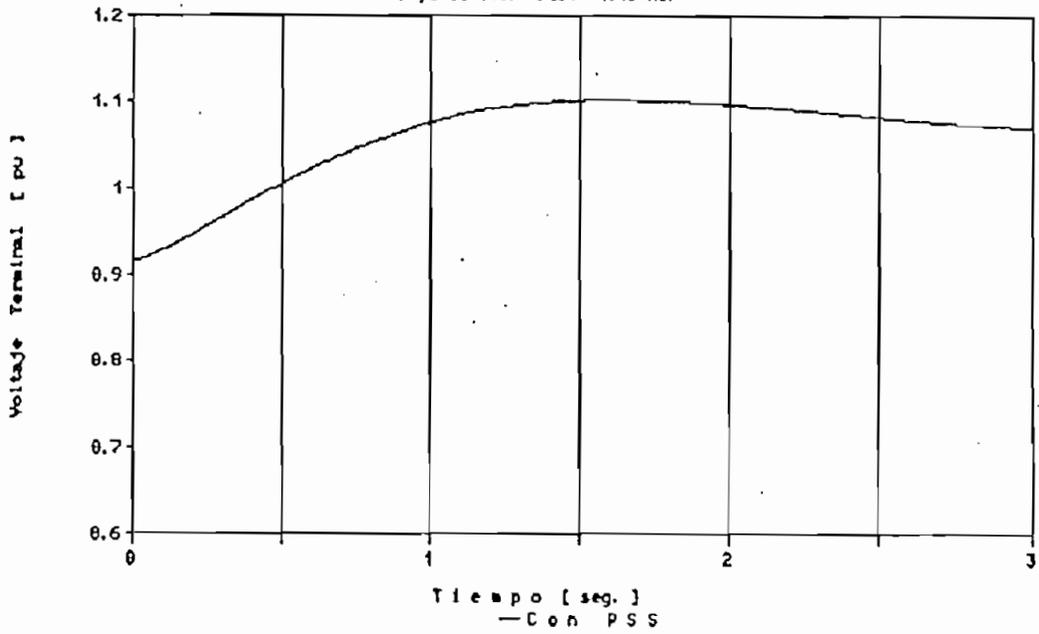
Vt = - 0.95 rpu

Potencia = 0

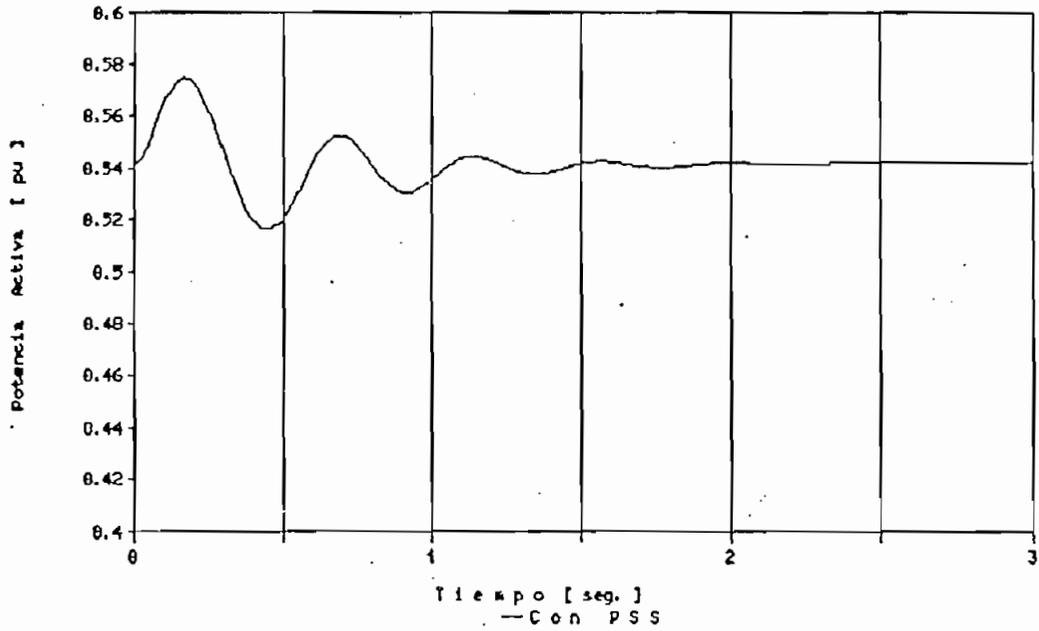
Respuesta Transitoria de la Excitación
Mayo de 1987 Pert= 1.16*Ref



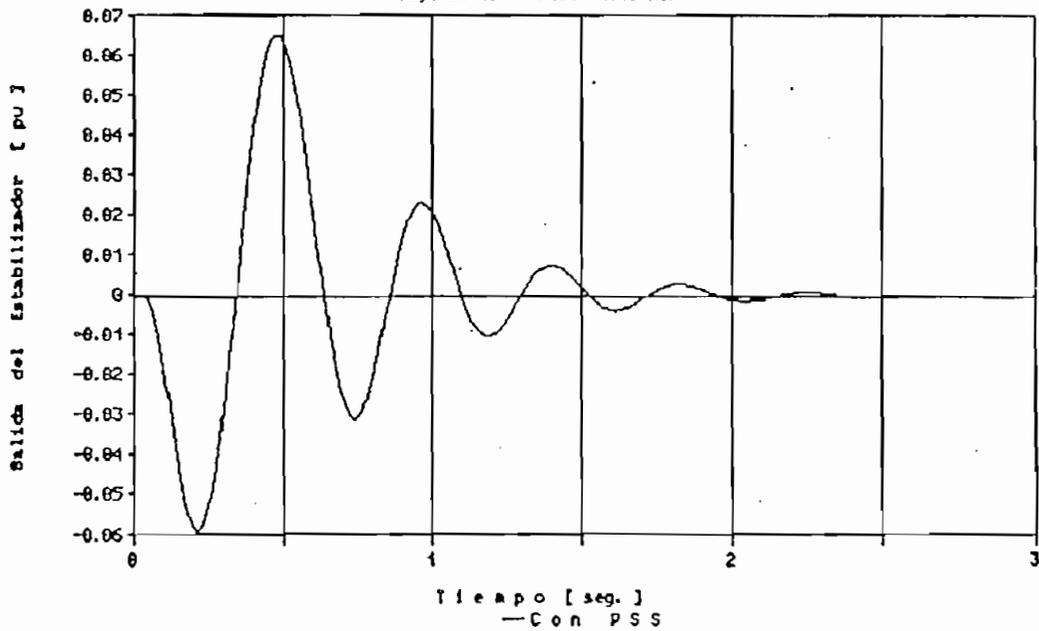
Respuesta Transitoria de la Excitación
Mayo de 1987 Pert= 1.16*Ref



Respuesta Transitoria de la Excitación
Mayo de 1987 Pert= 1.16*Ref



Respuesta Transitoria de la Excitación
Mayo de 1987 Pert= 1.16*Ref



3.3.6 Respuesta Transitoria de la Excitación en Sincronismo

Año 1988 - Sin PSS

La prueba es realizada en la Unidad N^o 1, en la tarde cerca de la hora pico, con los cinco generadores prácticamente a plena carga.

Condiciones iniciales:

Potencia Activa = 97 MW

Potencia Reactiva = 22 MVAR

Voltaje de Campo = 182 V

Vóltaje Terminal = 15.04 kV

La perturbación en el Regulador de Voltaje cambia la Potencia Reactiva de 22 MVAR a = 30 MVAR (R8 = 1.025)

El SNI está en su configuración actual, se han incorporado la Central Agoyán y las subestaciones nuevas: Loja, Machala, Posorja y Santa Elena.

La constante de inercia deducida $H = 2.475$ seg.

Vregulador= 0

100% I

1 seg

$V_I = -1.43$ pu

$V_{campo} = 1.73$ pu

$V_C = 0$

$V_t = 1.09$ pu

$V_{pss} = 0$

$P = 0.87$ pu

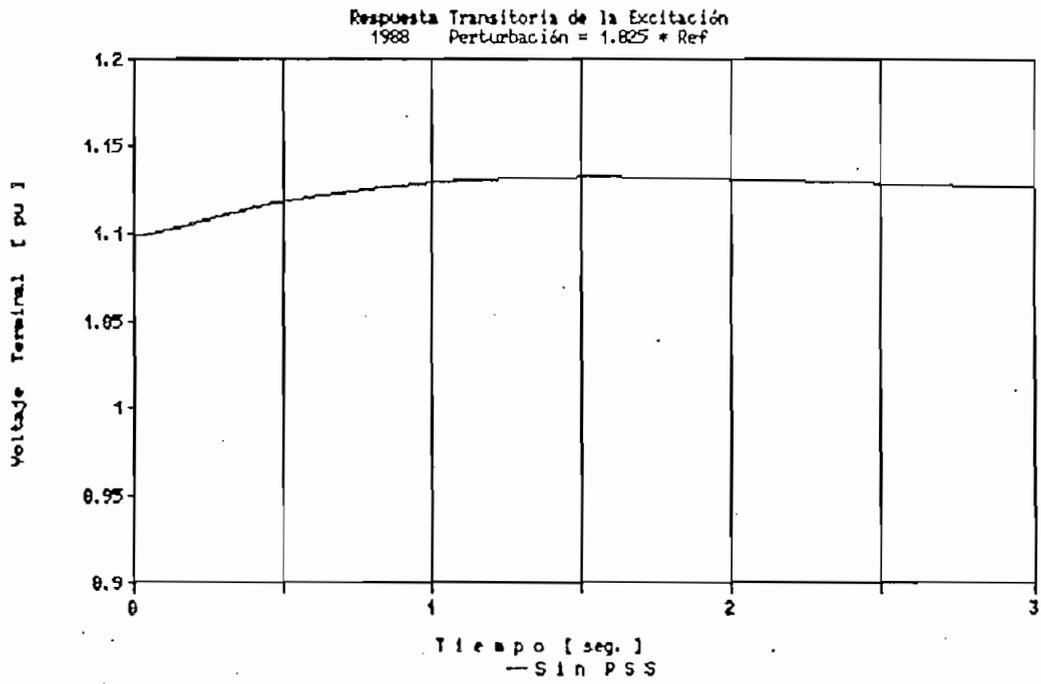
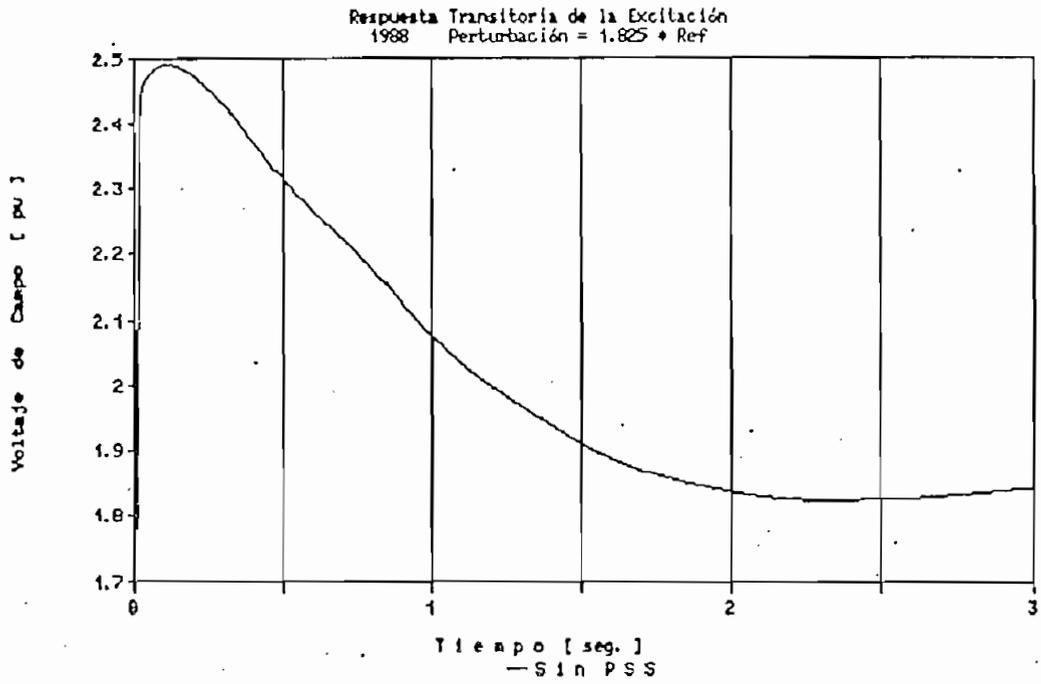
$V_{terminal} = 0$

RESPUESTA TRANSITORIA EN SINCRONISMO
SIN PSS

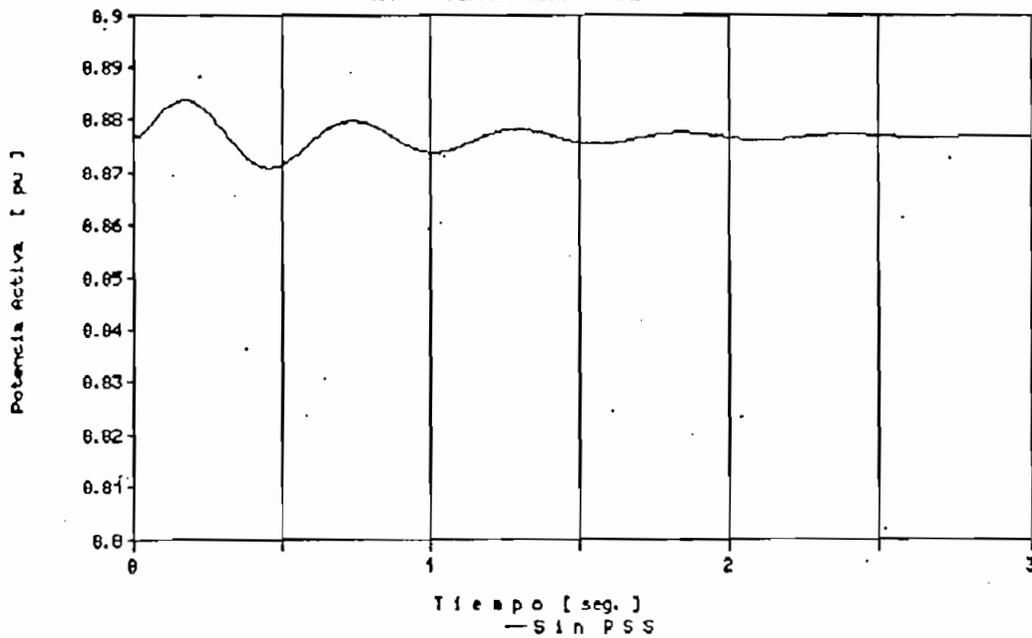
GRUPO DE INVESTIGACION EN ELECTRICIDAD
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA



100% VS. 0



Respuesta Transitoria de la Excitación
1988 Perturbación = 1.825 + Ref



3.3.7 Respuesta Transitoria de la Excitación en Sincronismo
Año 1988 - Con PSS

Se trata de la misma prueba 3.3.6 pero con la intervención del Estabilizador.

Las calibraciones son las vigentes desde el año 1985.

MOLINO, 88 - 10 - 18 UNIDAD N° 1 (7)

10 [0.1 pu]

Vregulador= 0

1 seg

$V_r = -1.43$ pu

Vcampo= 1.73 pu

$V_c = 0$

$V_t = 1.09$ pu

$V_{pss} = 0.1$ pu

$V_{pss} = 0$

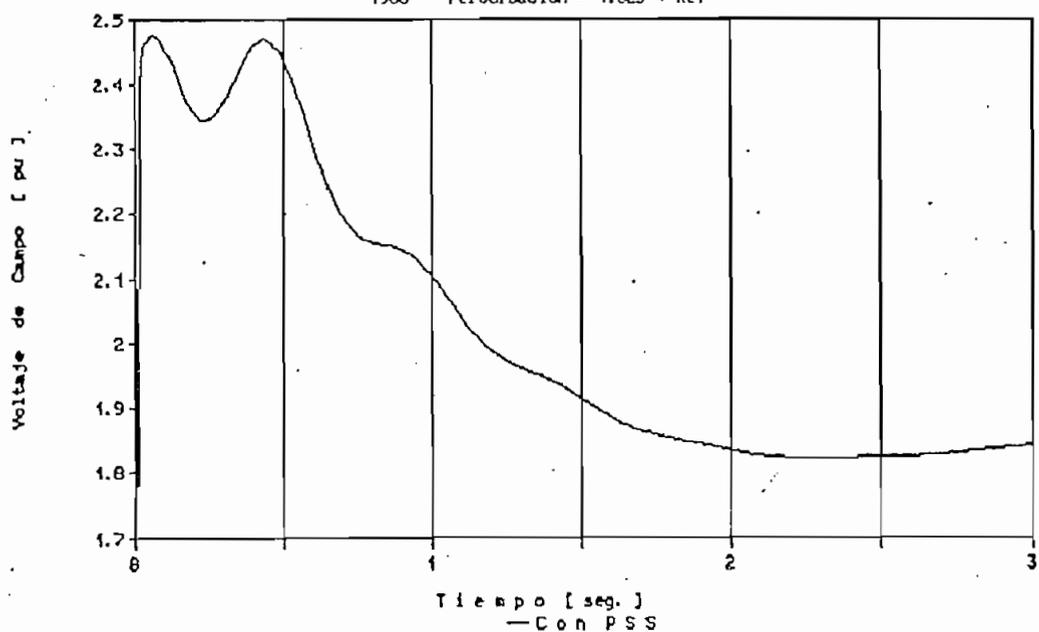
$P = 0.87$ pu

$V_{terminal} = 0$

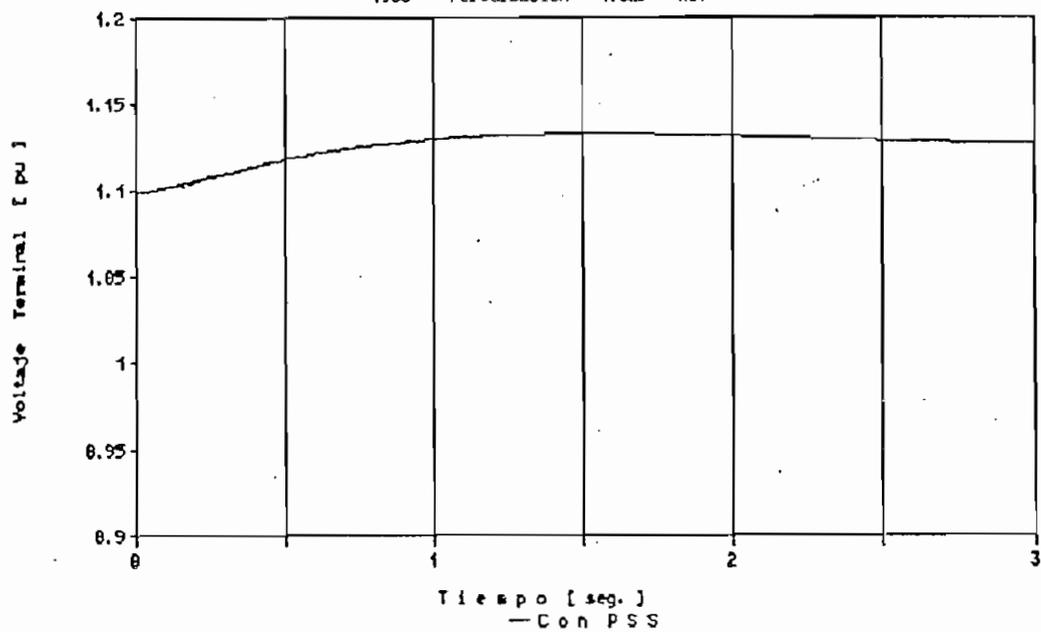
RESPUESTA TRANSITORIA EN SINCRONISMO
CON PSS

CONTRIBUCION DE ALTERNANCIAS

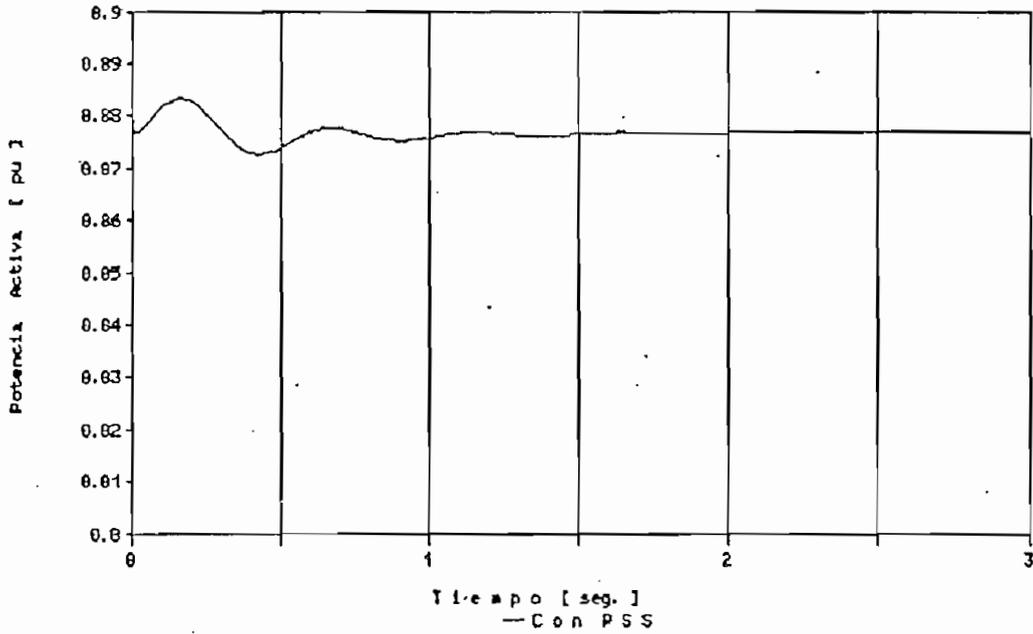
Respuesta Transitoria de la Excitación
1988 Perturbación = 1.825 * Ref



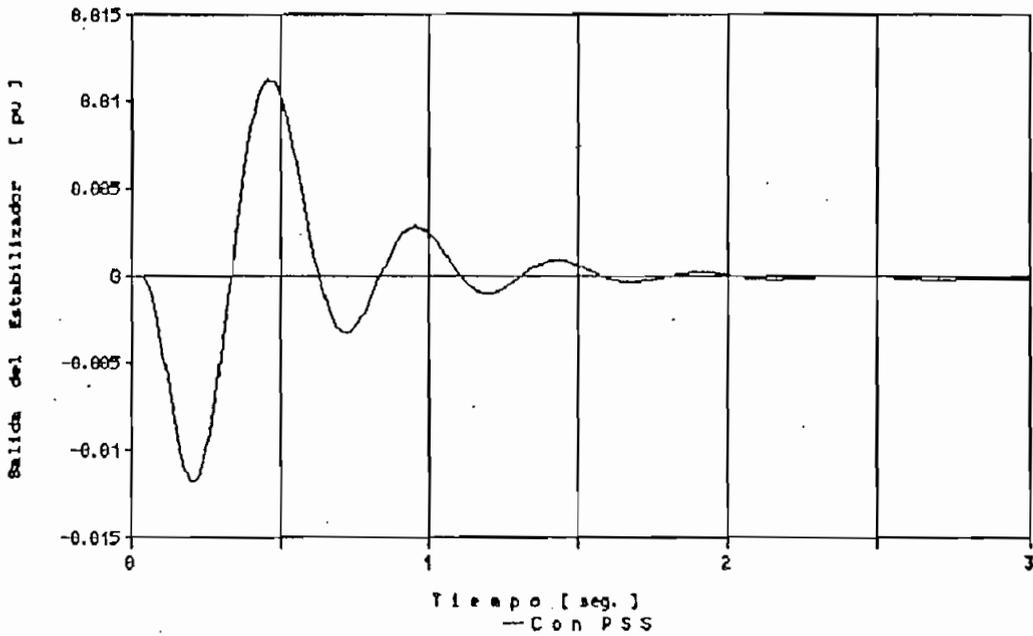
Respuesta Transitoria de la Excitación
1988 Perturbación = 1.825 * Ref



Respuesta Transitoria de la Excitación
1988 Perturbación = 1.825 * Ref



Respuesta Transitoria de la Excitación
1988 Perturbación = 1.825 * Ref



3.3.8 Rechazo de Carga en la Central Agoyán. Año 1987 - Con desconexión del PSS

El oscilograma fue registrado en la Unidad N^o 5 y corresponde a la prueba de rechazo de carga simultáneo en la Central Agoyán, realizada dentro de los procedimientos de recepción de esos generadores.

Condiciones iniciales:

Potencia Activa = 55 MW

Potencia Reactiva = 22 MVAR

Voltaje de Campo = 146 V

Voltaje Terminal = 14.5 kV

La perturbación causó el incremento de la Potencia Activa de 55 MW a * 66 MW (R8 = 1.21)

La constante de inercia equivalente deducida $H = 5.775$ seg

El Estabilizador alcanzó el límite de protección de 0.1 pu (por esto se ha usado el límite dinámico $L_{pss} = 0.1$ ya que en realidad está ajustado en 0.5 pu) y se desconectó en la primera excursión negativa del voltaje V_{pss} de estabilización; solamente volvería a conectarse 15 segundos después.

Para la simulación se modificó el programa asignando un valor menor al límite y haciéndolo actuar únicamente durante un corto tiempo de tal manera de aproximar a la respuesta real.

1 seg

MOLINO, 87 - 06 - II UNIDAD N° 5

RECHAZO DE CARGA DE 160 MW EN LA CENTRAL ACOYAN

CON DESCONEXION DEL PSS

Potencia = 0.49 pu

P = 0

Frecuencia = 1 pu

Vregulador = 0

f = 0.95 pu

Vr = -1.1 pu

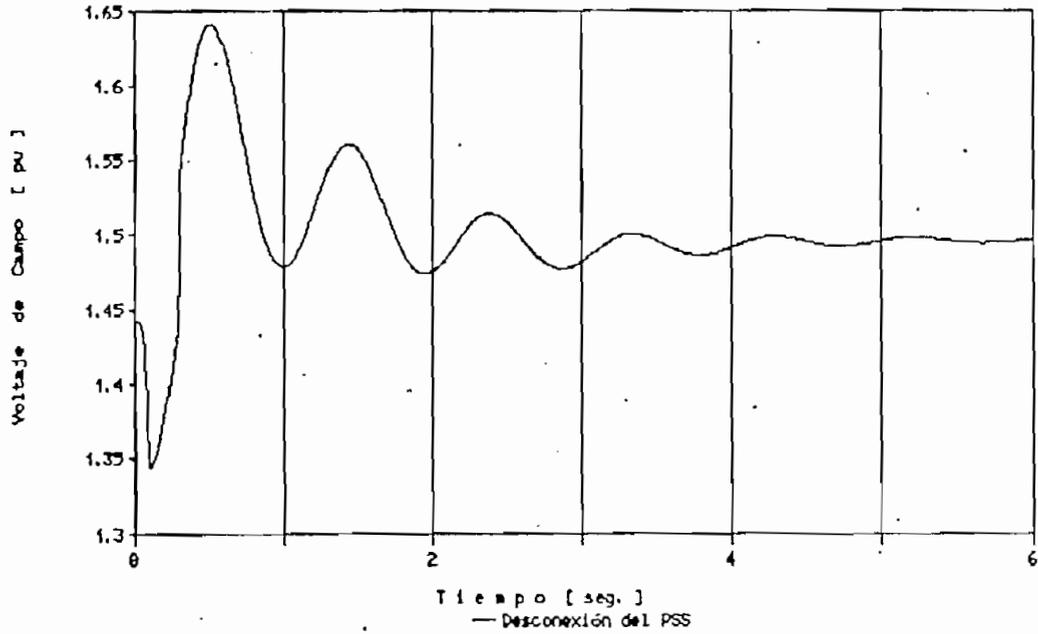
Vterminal = 0

Vcampo = 1.39 pu

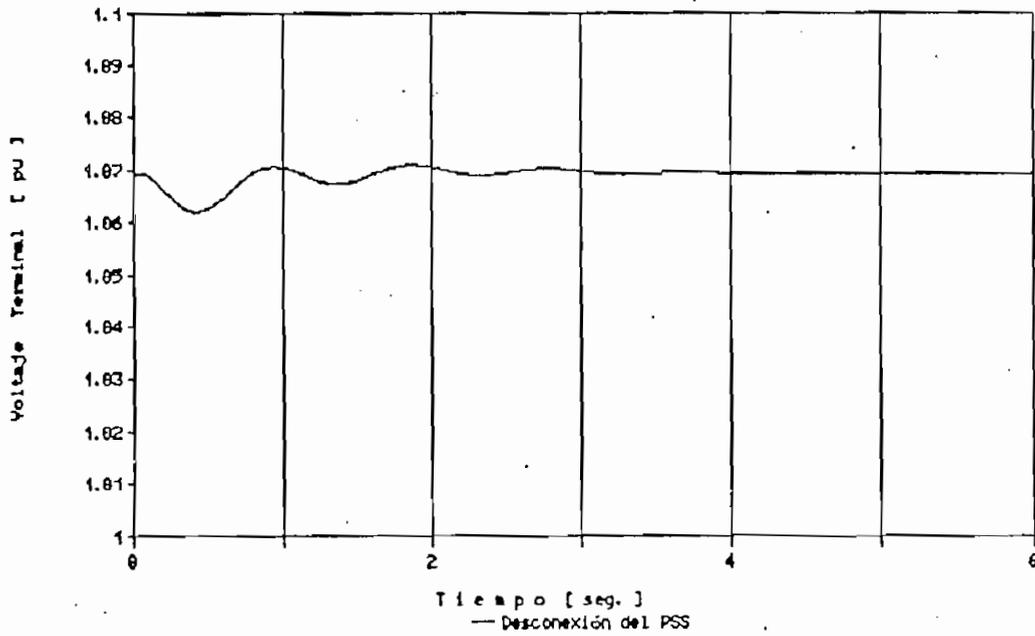
Vc = 0

- Vt = -1.05 pu

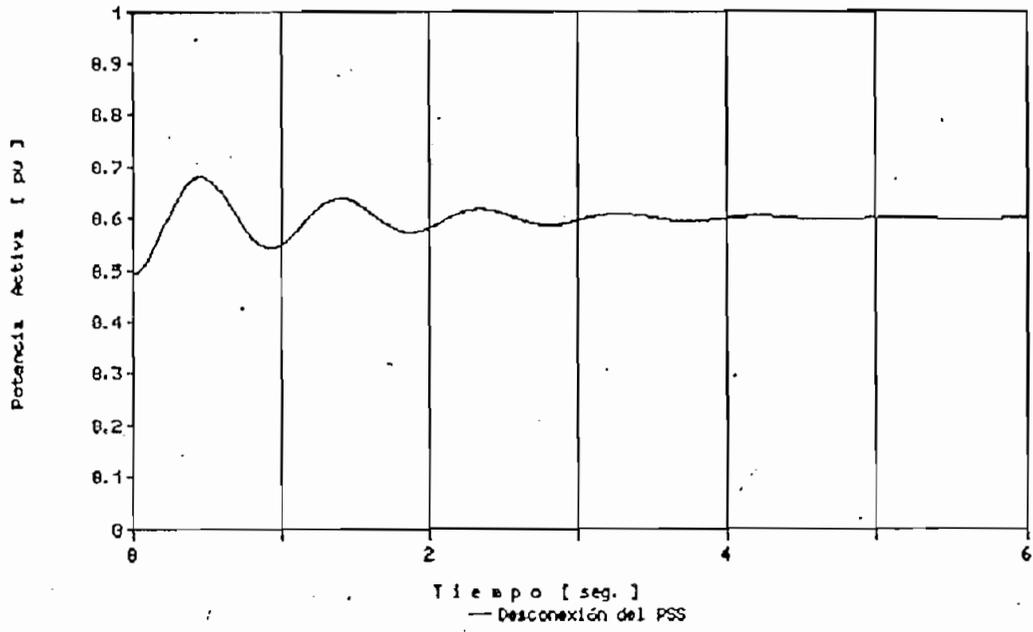
Rechazo de Carga Externo a la Central
1987 Perturbación = 1.21 * Torque



Rechazo de Carga Externo a la Central
1987 Perturbación = 1.21 * Torque



Rechazo de Carga Externo a la Central
1987 Perturbación = 1.21 * Torque



3.4 COMENTARIOS

La contrastación entre los oscilogramas y los gráficos resultantes de las simulaciones permite sacar algunas conclusiones generales:

Las diferencias en tiempo y amplitud de algunas magnitudes son debidas al sistema equivalente utilizado, pues en realidad en la Central Molino existen varios generadores más que intervienen respondiendo a las perturbaciones. Tanto con la impedancia como con la constante de inercia equivalentes, deducidas mediante las simulaciones, se ha tratado de compensar y reducir aquellas diferencias.

Ya se ha mencionado que no se complicó el modelo del Excitador, dado que, para los objetivos planteados es innecesario, por esto se encuentran imperfecciones en la pendiente de subida y en la saturación del Voltaje de Campo; así mismo, las relaciones entre el Voltaje del Regulador y el Voltaje de Campo no corresponden exactamente a las reales. Sin embargo, debe recalcar que la aproximación del modelo a los oscilogramas tomados de perturbaciones reales es suficiente para examinar el comportamiento del sistema de excitación, del PSS y de los ajustes que pueden admitir en la realidad.

Se puede apreciar que la virtud del modelo es representar aceptablemente la influencia del Sistema de Control de la Excitación

en las perturbaciones que causan oscilaciones de Potencia Efectiva.

Como un resultado interesante de las simulaciones se ha comprobado el ajuste descoordinado existente entre el límite dinámico de salida (Lpss) y el límite de protección con desconexión del Estabilizador.

De acuerdo a los resultados obtenidos se ha podido comprobar la operación del generador prácticamente fuera de la región de saturación, sin embargo, para utilizar la subrutina desarrollada, se ha introducido solo una mínima saturación segmentando la curva característica en dos secciones. Los coeficientes F9, P1, y P2 se ingresan en la rutina de parámetros del generador.

La modelación del Estabilizador por bloques permite disponer de las señales intermedias para análisis exhaustivos en cada etapa.

C A P I T U L O I V

C A L I B R A C I O N D E L E S T A B I L I Z A D O R

La calibración de los controles suplementarios de la Excitación para estabilizar los modos de oscilación de los sistemas ha sido materia de mucha investigación durante los últimos 20 años.

Dos técnicas básicas de calibración han sido exitosamente utilizadas en las aplicaciones de los estabilizadores de potencia: Compensación de fase y Lugar de las Raíces.

La Compensación de Fase consiste en ajustar el estabilizador para compensar los retrasos de fase a través del generador, sistema de excitación y sistema de potencia, de tal manera, que la trayectoria del estabilizador provea cambios los cuales estén en fase con las variaciones de velocidad. Esta es la técnica más directa, fácilmente comprensible e implementada en el campo, además, la más utilizada.

La síntesis por el Lugar de las Raíces involucra el desplazamiento de los eigenvalores asociados con los modos de oscilación del sistema de potencia ajustando los polos y ceros del estabilizador en el plano s . Esta técnica permite alcances adicionales ya que trabaja directamente con las características de lazo cerrado del sistema, en oposición a la naturaleza de lazo abierto de la técnica de Compensación de Fase, pero es mucho más complicada de aplicar particularmente en el campo.

Independientemente de la técnica utilizada para calibrar el equipo de estabilización es necesario reconocer la naturaleza no lineal de los sistemas de potencia y que el objetivo de incorporar estabilizadores es extender los límites de transferencia de potencia controlando las oscilaciones del sistema; incorporar amortiguamiento no es un fin en sí mismo, sino un medio de extender los límites de transferencia de potencia.

Normalmente se requieren amortiguamientos adicionales bajo condiciones débiles de transmisión y gran carga, como ocurre, por ejemplo, cuando se transmite potencia sobre líneas de transmisión de considerable longitud, desde plantas remotas de generación, como es el caso de la Central Molino y el SNI.

Es importante establecer que el estabilizador está previsto para proveer amortiguamiento a pequeñas desviaciones alrededor de un punto de operación estable y no para mejorar la estabilidad transitoria, es decir, la capacidad de recuperación ante perturbaciones severas. De hecho, el estabilizador frecuentemente tendrá un efecto anulante en la estabilidad transitoria intentando sacar prematuramente del nivel de techo al campo del generador en respuesta a una falla. Sin embargo, una medida del desenvolvimiento del estabilizador debe incluir no solamente las contribuciones al amortiguamiento de pequeña señal, sino también la influencia en el comportamiento del sistema luego de grandes perturbaciones, cuando todos los modos de oscilación del sistema son

excitados simultáneamente.

La planta a través de la cual actúa el estabilizador consiste del generador, excitación y sistema de potencia :

$$GEP (s) = \delta T_{ep} / \delta V_{pss}$$

donde:

$GEP (s)$ = la planta a través de la cual opera el estabilizador.

T_{ep} = componente del torque eléctrico debida solamente a la trayectoria del estabilizador.

V_{pss} = Salida del estabilizador

Esta planta tiene la ganancia más alta y el mayor retraso de fase bajo las condiciones de plena carga en la unidad y sistema de transmisión más fuerte. Estas condiciones, por tanto, representan el caso límite de ganancia alcanzable con un estabilizador que tenga la potencia eléctrica como entrada. Entonces, " la condición de calibración " es a plena carga y con el sistema de transmisión más fuerte. La condición de trabajo ocurre con un sistema de transmisión débil, lo cual es diferente de la condición de calibración. Ya que la ganancia de la planta disminuye así como el sistema se debilita, cuando se usa potencia, la contribución para el sistema fuerte debe ser maximizada para asegurar mejor efecto con un sistema débil.

En términos de Compensación de Fase existen dos criterios básicos de sintonización:

1.- Lo más importante es maximizar el ancho de banda dentro

del cual el retraso de fase permanezca menor a 90° (3 a 3.5 Hz).

La frecuencia a la cual ocurre inestabilidad es muy alta para una red de atraso - adelanto bien ajustada. Esto está relacionado con maximizar el ancho de banda dentro del cual el retraso de fase permanece menor a 90° .

2.- El retraso de fase en la frecuencia de modo local (0.2 a 1.5 Hz) debe ser menor que 45° . Es recomendable, para esto, fijar la constante de tiempo del filtro de oscilaciones (washout stage) mayor que 1 segundo.

La ganancia óptima para un ajuste de atraso - adelanto es, consistentemente, alrededor de un tercio de la ganancia que cree inestabilidad.

Las constantes de tiempo deseadas del estabilizador dependen de las características de fase de la función de transferencia de lazo abierto de la planta, es decir, de la salida del estabilizador al torque, con velocidad del rotor constante. Ya que la velocidad del rotor no puede ser mantenida constante mientras se hace mediciones en el campo, la medición de la función de transferencia de la salida del estabilizador al torque eléctrico no será GEP(s). Sin embargo, GEP(s) es proporcional a la característica de lazo cerrado del Regulador de Voltaje con velocidad del rotor constante.

La función de transferencia desde la Referencia de Voltaje al Voltaje Terminal, por lo tanto, provee la mejor medición de la

información de fase requerida. Esta medición se obtiene introduciendo una señal sinusoidal en el punto de suma de la entrada al Regulador de Voltaje en estado estable y luego analizando los oscilogramas obtenidos o utilizando un Analizador de funciones de transferencia para determinar la ganancia y fase entre las variaciones de Voltaje Terminal resultantes con respecto a la señal de entrada.

Una vez que se dispone de GEP(s) entonces se aplican los criterios de análisis planteados anteriormente para reajustar las constantes de tiempo y la ganancia del estabilizador.

Respecto a los límites de salida del estabilizador, estos deben ser aplicados para prevenir que la señal de amortiguamiento sature el sistema de excitación y por tanto anule la posibilidad de regulación de voltaje. Como una guía general, cuando la salida del estabilizador sea llevada a sus límites a frecuencias entre 0.5 y 2 Hz, la respuesta del sistema de excitación debe estar dentro de sus límites. Este criterio debe aplicarse con la unidad a plena carga y con un sistema de transmisión débil a moderado.

Los criterios aquí vertidos fueron tomados de la referencia (9) .

4.1 REAJUSTE DEL ESTABILIZADOR

Con la enorme ventaja de disponer ahora del modelo matemático, en el cual se puede simular prácticamente cualquier condición de operación o perturbación se aplica el método planteado y se obtienen en primer lugar las respuestas de frecuencia de fase sugeridas, en el rango de 0.1 a 10 Hz en la situación actual:

$\delta Te/V_{in}$, $\delta Te/\delta V_{pss}$, $\delta V_t/V_{in}$, $\delta V_t/\delta V_{pss}$ con $V_{in} = 0.05 \sin(\omega t)$.

Se aprecia en los gráficos de las páginas siguientes la certeza de la afirmación que las funciones de transferencia V_t/V_{ref} o $V_t/\delta V_{pss}$ describen la tendencia de variación de la fase de las funciones $\delta Te/V_{ref}$ o $\delta Te/\delta V_{pss}$ respectivamente. Para el reajuste, una vez efectuado, son más ilustrativas las funciones respecto al Voltaje Terminal.

En cuanto al comportamiento de la fase de V_t/V_{ref} en la situación actual de calibraciones se nota que hay una buena aproximación a la condición ideal deseada.

Se procede a estudiar la influencia de los parámetros α_1 , α_2 , α_5 y K_{pss} del Estabilizador determinándose que el incremento del factor α_1 y de la ganancia K_{pss} contribuyen a modificar convenientemente la respuesta de frecuencia y en el rango de frecuencias críticas de 1.5 a 4 Hz. Para las frecuencias bajas la condición de retraso de fase está ya satisfecha.

Con el auxilio de las simulaciones en el tiempo se comprueba que, si bien el ajuste de $L_{pss} = 0.1$ pu no perjudica a la acción del Regulador de Voltaje tampoco contribuye ostensiblemente a una amortiguación superior de oscilaciones de potencia, pero permite variaciones de voltaje mayores. Por esta razón se decide el ajuste en un menor valor.

Finalmente se acepta el siguiente reajuste como más conveniente y prácticamente óptimo para las condiciones actuales del sistema:

PARAMETRO DEL PSS	De	A
$\alpha 1$	0.80	1.00
$\alpha 2$	0.10	0.10
$\alpha 5$	0.55	0.55
K_{pss}	0.40	0.80
L_{pss}	0.10	0.05

En los gráficos siguientes se indican los diagramas de fase de las funciones de transferencia mencionadas en la situación actual y en la situación reajustada para evidenciar las correcciones producidas.

DIAGRAMA DE FASE DE $F(s) = T_e(s)/Y_{ref}(s)$
Obtención desde el Modelo Digital

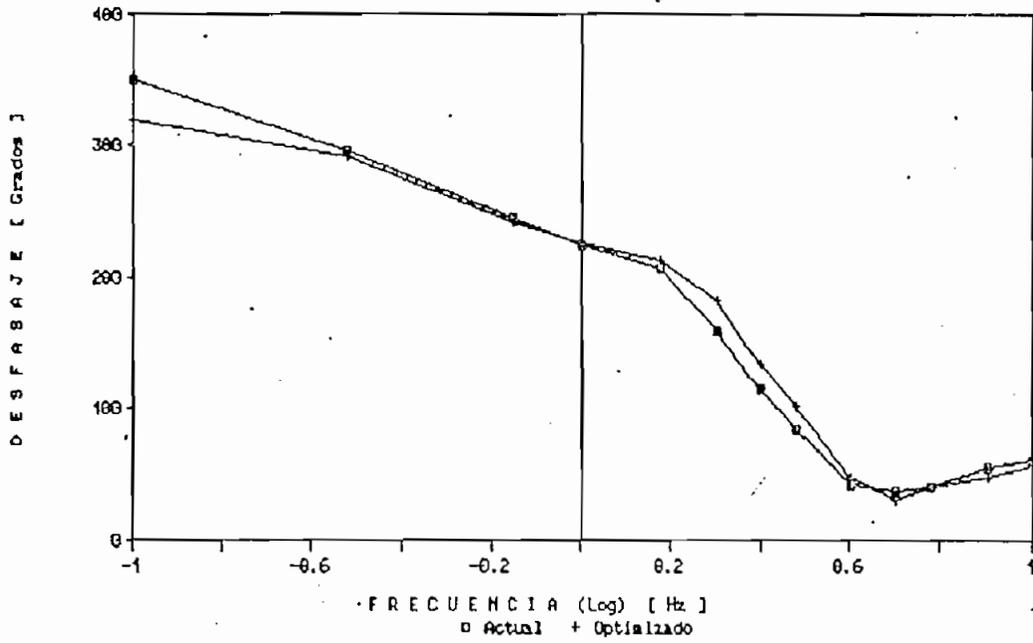


DIAGRAMA DE FASE DE $F(s) = V_t(s)/Y_{ref}(s)$
Obtención desde el Modelo Digital

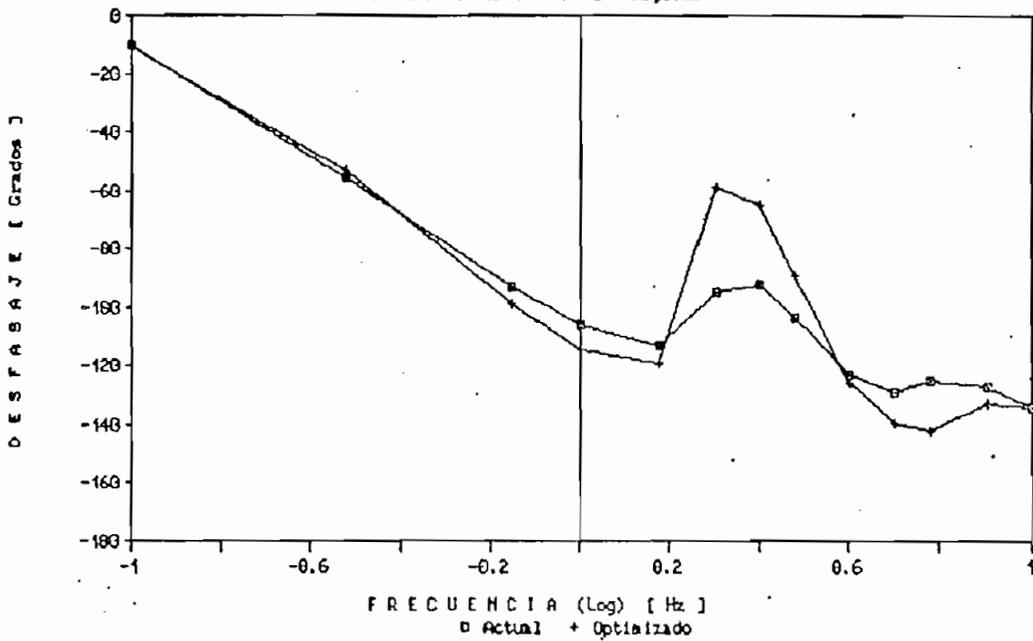


DIAGRAMA DE FASE DE $F(s) = T_o(s)/Y_{ps}(s)$
Obtención desde el Modelo Digital

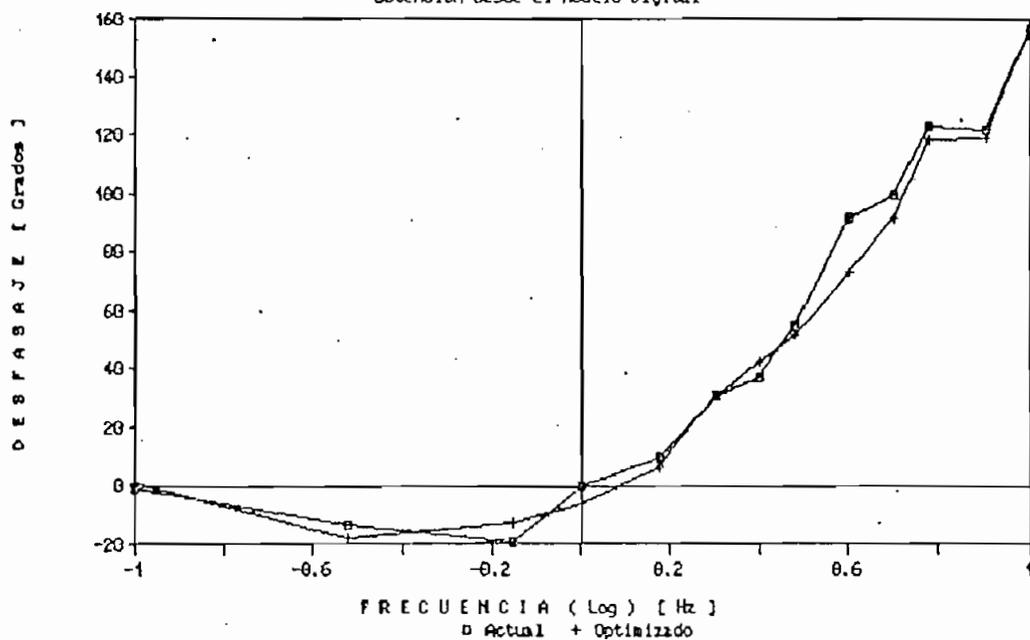


DIAGRAMA DE FASE DE $F(s) = V_t(s)/Y_{ps}(s)$
Obtención desde el Modelo Digital

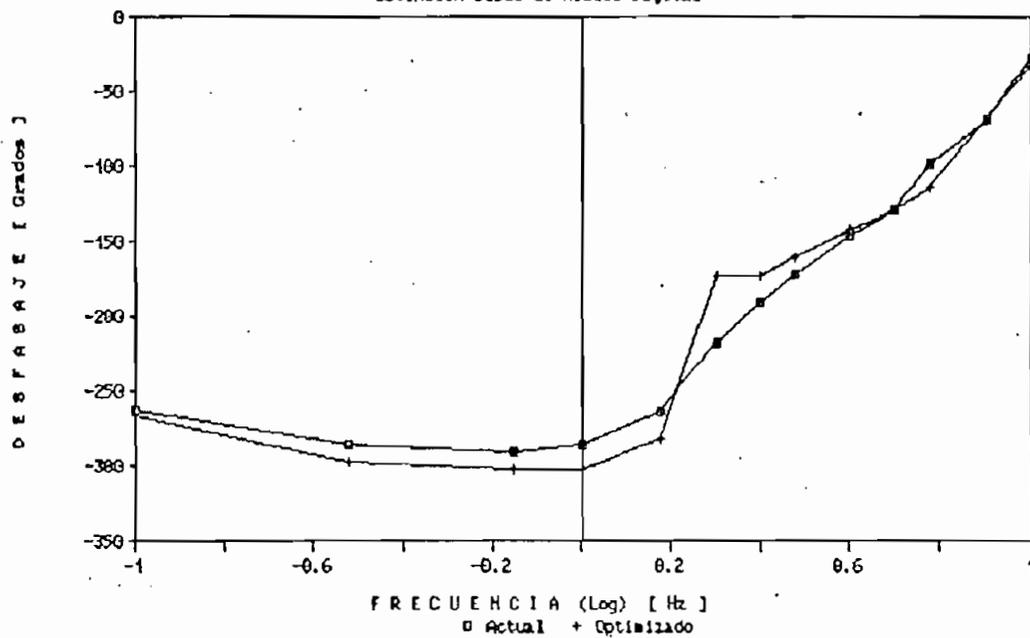


DIAGRAMA DE FASE DE $F(s) = Vt(s)/Vref(s)$
Obtención desde el Modelo Digital

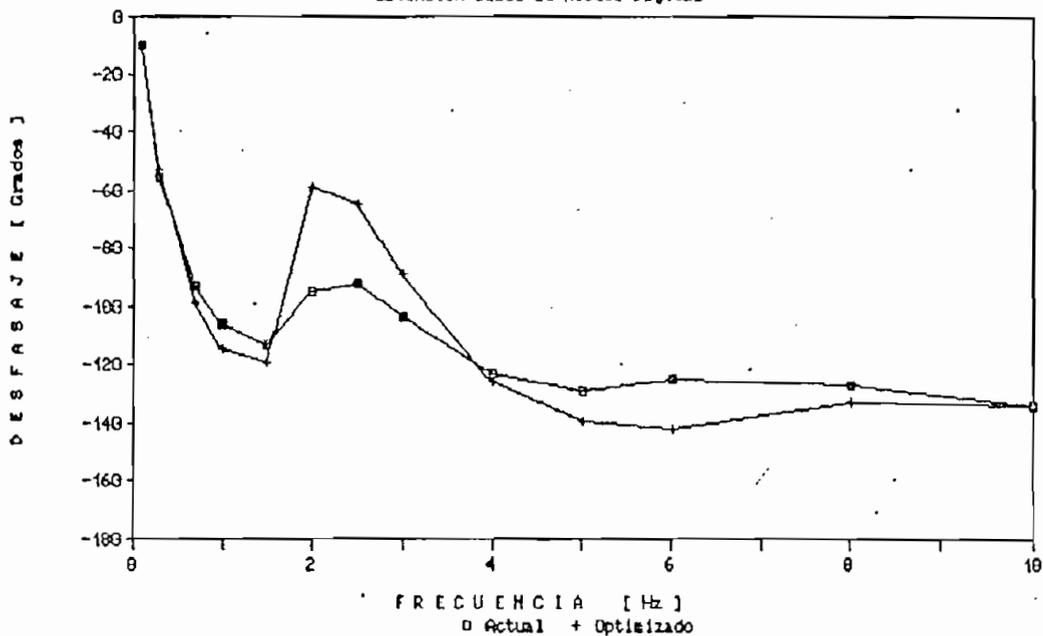
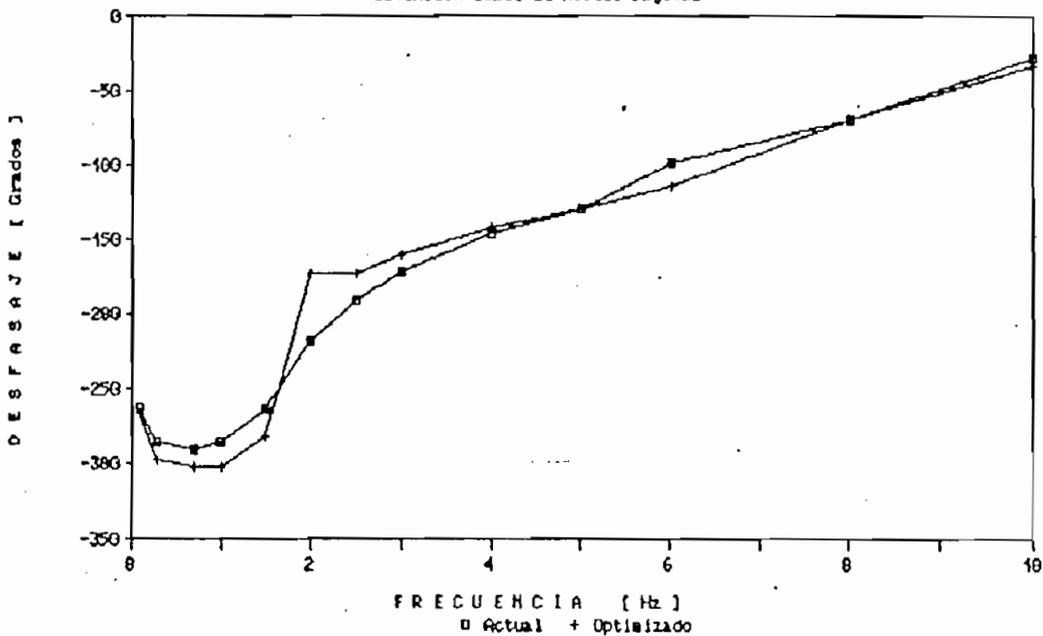


DIAGRAMA DE FASE DE $F(s) = Vt(s)/Vpas(s)$
Obtención desde el Modelo Digital

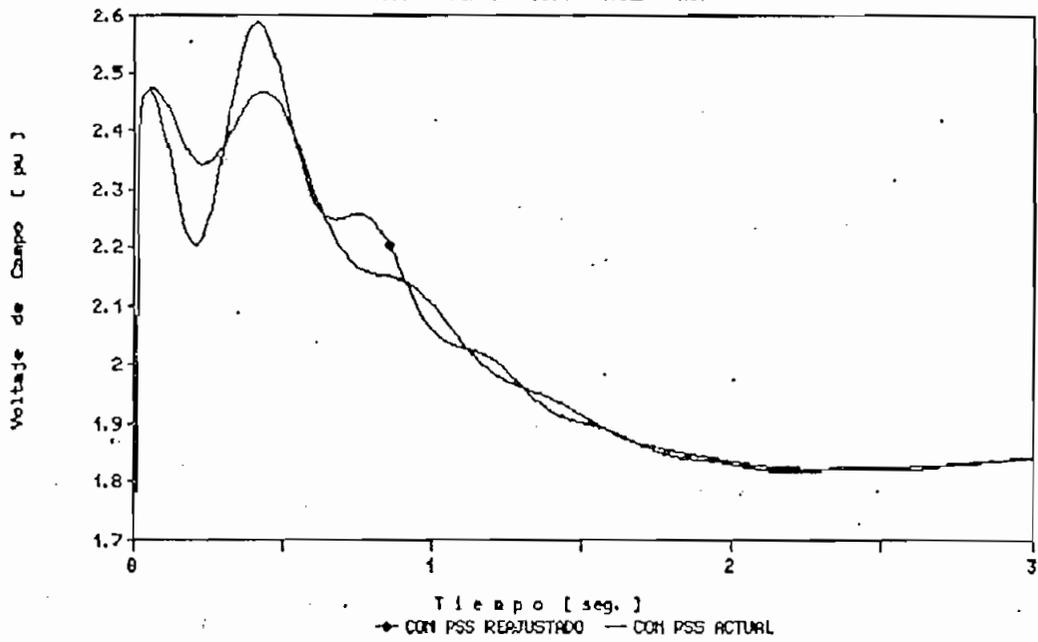


4.2 COMPROBACION DEL REAJUSTE DEL ESTABILIZADOR

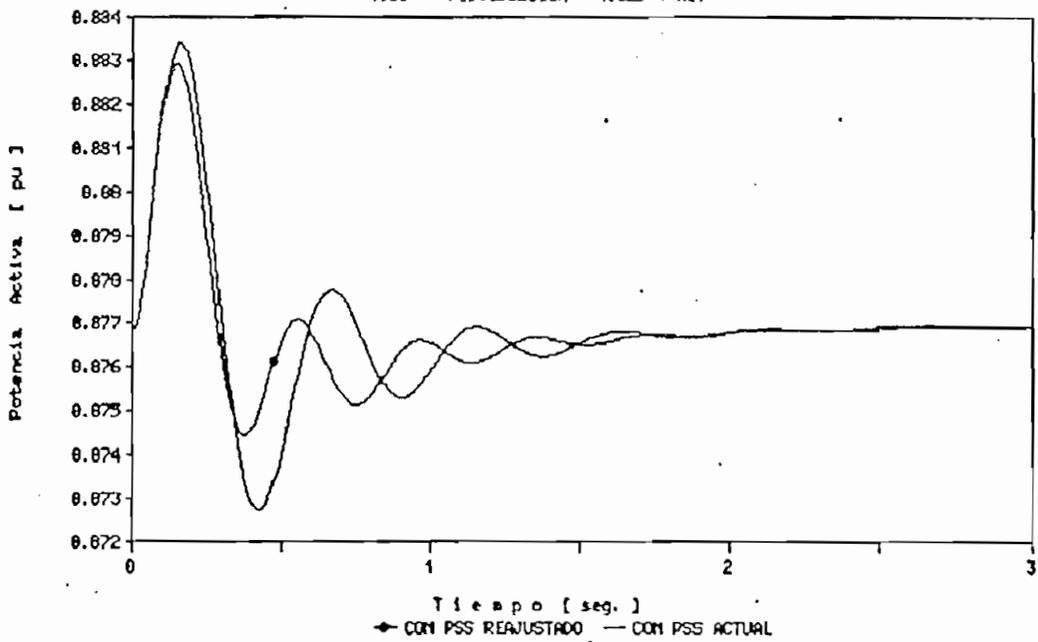
La demostración de la bondad de los reajustes del Estabilizador es posible hacerla presentando las respuestas en el tiempo para una misma perturbación pero con diferentes calibraciones; en tal sentido, tómnese como referencia las simulaciones de los casos 3.3.7 y 3.3.8 del Capítulo anterior las cuales ahora han sido corridas con los reajustes deducidos.

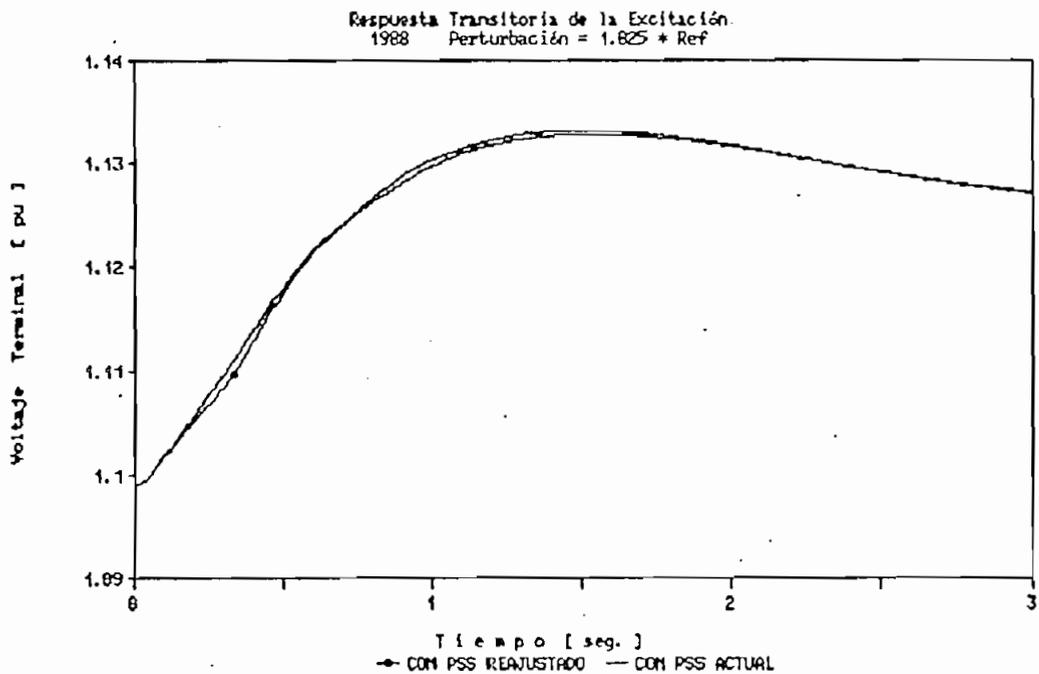
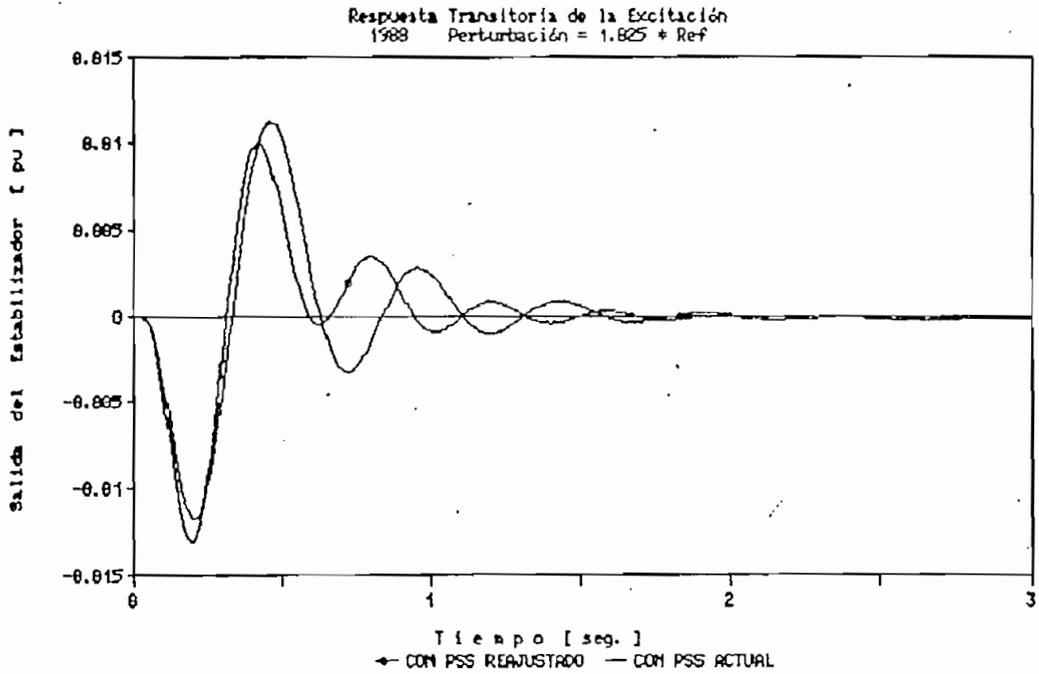
Finalmente se indican los resultados de simular el caso 3.3.8 pero con el límite $L_{pss} = 0.1$; se puede concluir que es preferible utilizar un límite menor.

Respuesta Transitoria de la Excitación
1988 Perturbación = 1.825 * Ref

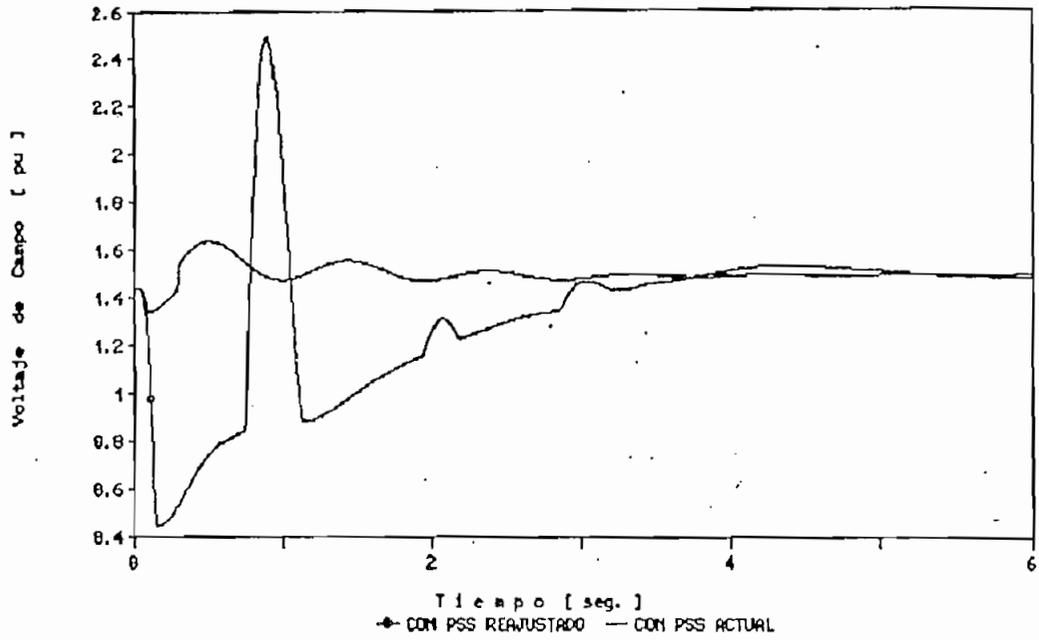


Respuesta Transitoria de la Excitación
1988 Perturbación = 1.825 * Ref

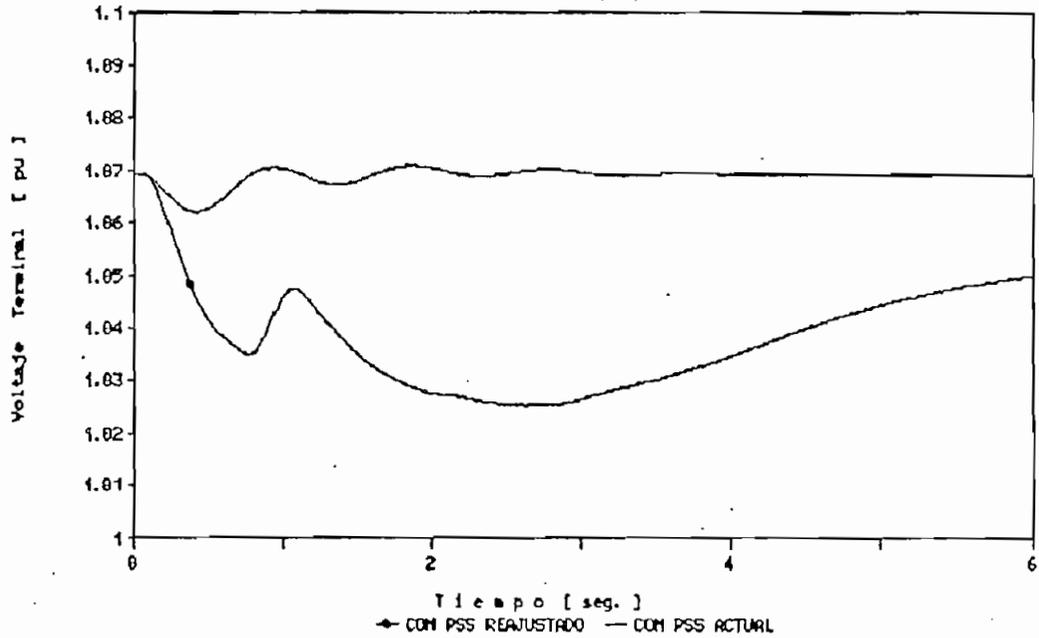




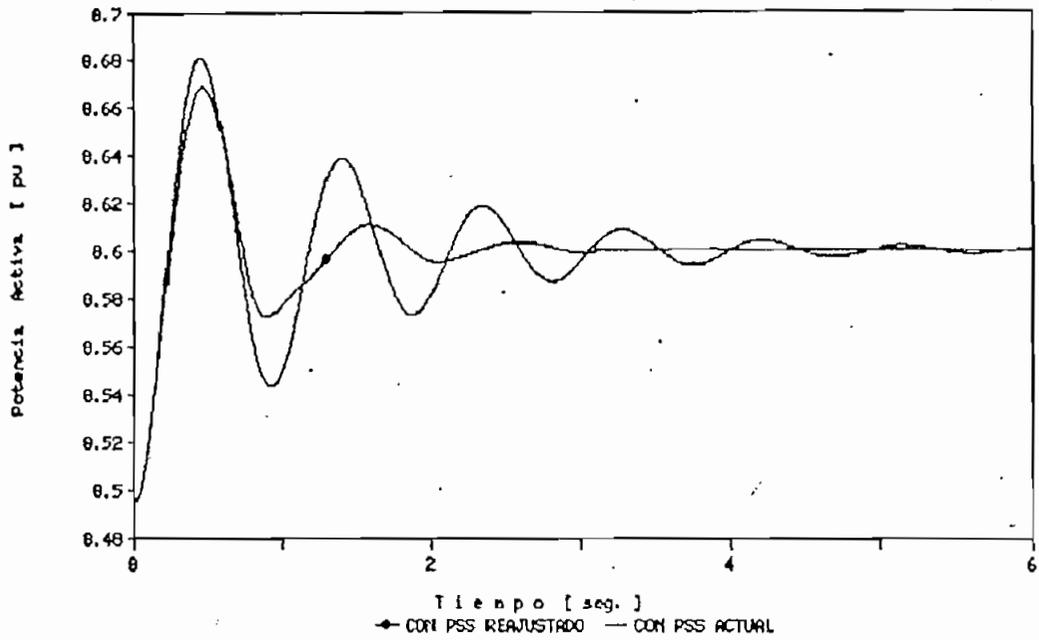
Rechazo de Carga Externo a la Central
 Perturbación = 1.21 * Torque ; LPSS=0.85



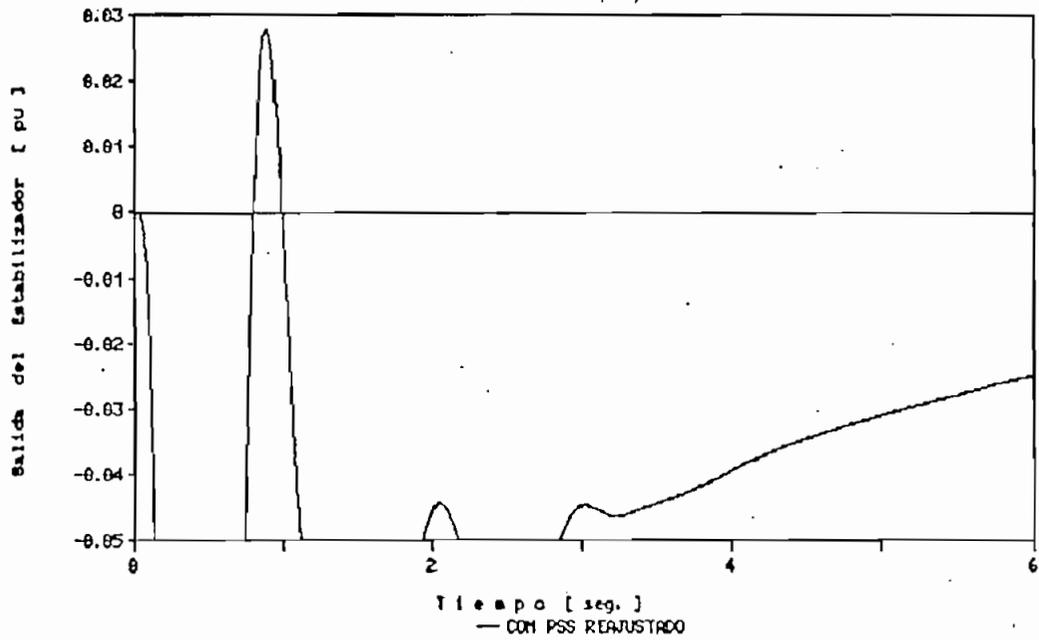
Rechazo de Carga Externo a la Central
 Perturbación = 1.21 * Torque ; LPSS=0.85



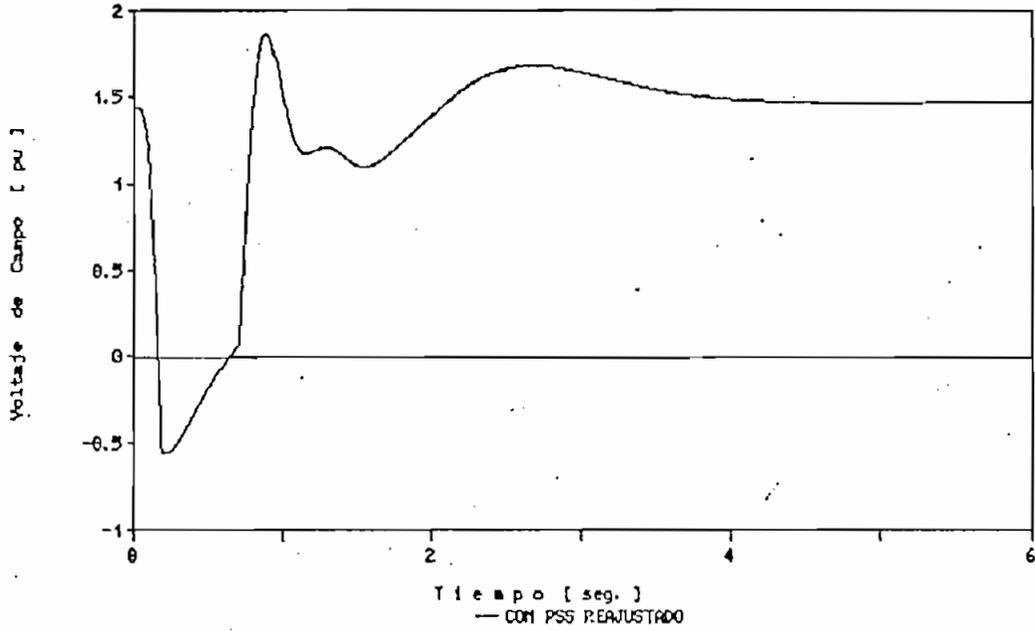
Rechazo de Carga Externo a la Central
 Perturbación = 1.21 * Torque ; LPSS=.85



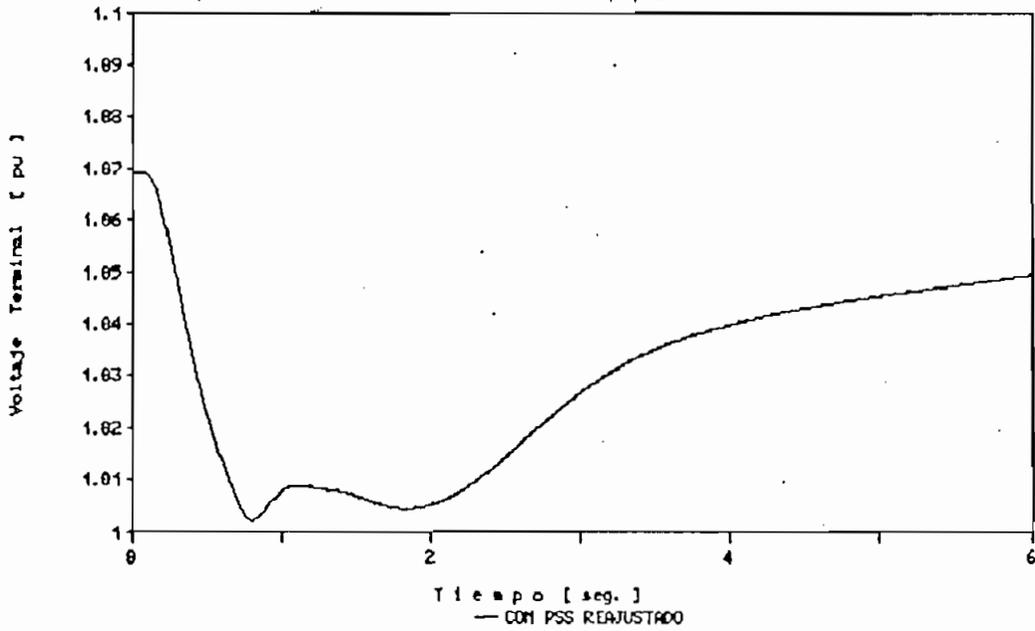
Rechazo de Carga Externo a la Central
 Perturbación = 1.21 * Torque ; LPSS=.85



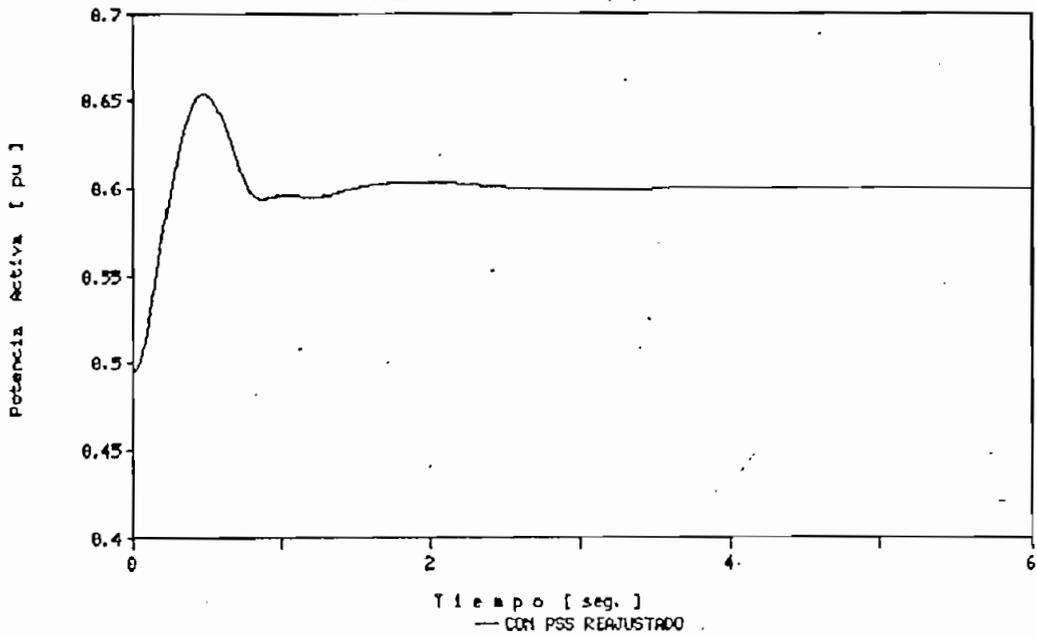
Rechazo de Carga Externo a la Central
Perturbación = 1.21 * Torque; LPSS=.1



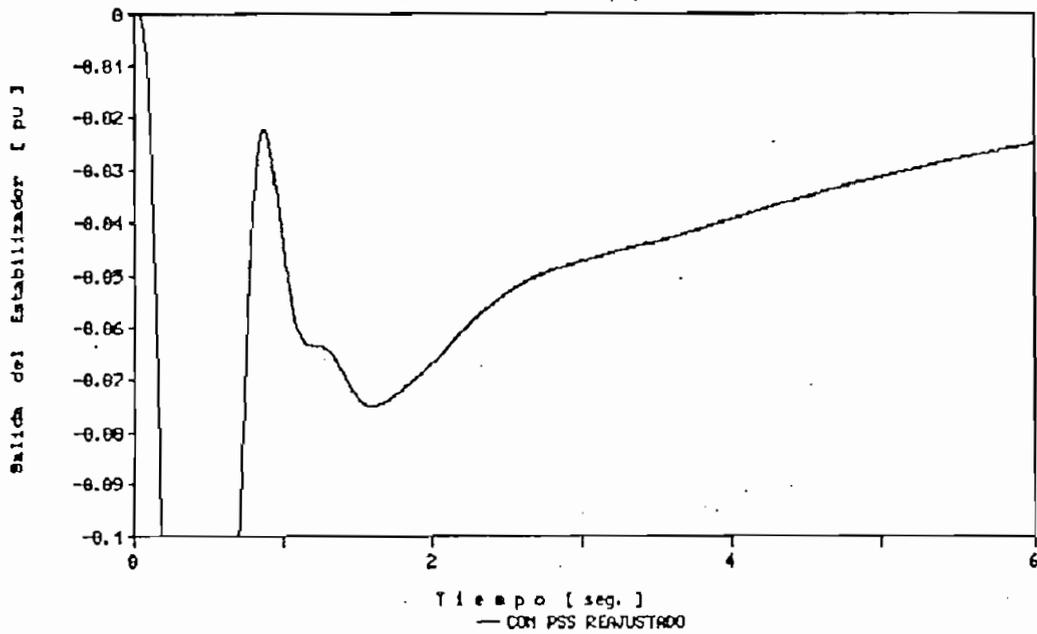
Rechazo de Carga Externo a la Central
Perturbación = 1.21 * Torque; LPSS=.1



Rechazo de Carga Externo a la Central
Perturbación = 1.21 * Torque; LPSS=.1



Rechazo de Carga Externo a la Central
Perturbación = 1.21 * Torque; LPSS=.1



C A P I T U L O V

C O N C L U S I O N E S Y R E C O M E N D A C I O N E S F I N A L E S

En base de programas anteriores (7,8) se ha logrado desarrollar un programa de simulación para el conjunto generador - excitación muy versátil en la medida en que, con pocas y sencillas instrucciones modificantes se puede obtener aplicaciones muy útiles: generador en vacío, rechazo de carga con desconexión del sistema, análisis de respuesta de frecuencia, etc. aparte de las opciones integradas: pruebas de respuesta transitoria positiva o negativa del sistema de excitación, rechazos o tomas súbitas de carga, variaciones del sistema de transmisión, inclusión o no del PSS, aplicación a otros generadores y sistemas; además el programa funciona en los populares microcomputadores personales.

También se han podido aplicar y confirmar aspectos técnicos existentes en la literatura relativa al tema.

Puesto que los objetivos y alcances del trabajo estuvieron claramente establecidos en la propuesta de investigación que sirve de base a esta Tesis, a saber: la modelación contrastada del generador y del sistema de excitación, el estudio del Estabilizador de Potencia y un tanto la difusión de las características de la Central y, que se consideran cumplidos, no se han dedicado más esfuerzos para producir una modelación más exacta de la Cen-

tral Molino y del sistema de potencia o un solo programa de utilización general, ni tampoco, la generación automática de gráficos; todo lo cual puede ser motivo de futuras investigaciones y desarrollos.

En ese sentido, habrá que determinar en el futuro el método de cálculo de la Potencia Reactiva para aplicarlo en la modelación de los generadores, en general, y para adicionalmente simular la limitación de subexcitación de los generadores de la Central Molino.

Se considera que es factible la aplicación del trabajo presentado para otras Centrales del SNI o para la misma Central Molino que próximamente será ampliada, en tanto se requieran nuevos reajustes.

Se ha comprobado que las sugerencias de SWEDPOWER de Suecia fueron adecuadas pero que se puede mejorar aún el ajuste del PSS.

La recomendación inmediata es aplicar en el sitio las sugerencias de reajuste obtenidas, y coordinar debidamente el límite de protección para desconexión del Estabilizador.

Se sugiere que el programa sea corrido en microcomputadores rápidos en los que los resultados se pueden obtener en pocos minutos para simulaciones prolongadas (10 seg) puesto que no solo la simulación sino la carga del archivo de cálculos al programa

de gráficos consumen el tiempo de procesamiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- (1) INECEL .- " Paute, energía para el desarrollo ", 23 de Mayo de 1983
- (2) INECEL - DOSNI .- " Informe de Operación del SNI ", Junio de 1987 y 1988
- (3) SALVADOR, EDUARDO y ABRIL, GALO .- " Centrales Hidráulicas Notas Generales ", Febrero de 1987
- (4) CONSORCIO SIEMENS - TRANSFORMATOREN - UNIÓN .- " Suministro de Generadores y Barras Colectoras Encapsuladas - Instrucciones de Montaje y Servicio - Tomo I - Generadores ", Alemania, Junio de 1982
- (5) SIEMENS .- " Thyripol, an Excitation System with a Thyristor Converter and a Voltage Regulator for Generators and Synchronous Condensers ", Alemania
- (6) IEEE - Std. 421 - 1972 .- " IEEE Standard Criteria and Definitions for Excitation Systems for Synchronous Machines " Estados Unidos, Junio de 1972
- (7) JATIVA, JESUS .- " Modelo Digital de Máquinas Sincrónicas incluida la Saturación " - Tesis de Grado. EPN, Quito, Diciembre de 1981
- (8) RIVERA, PABLO .- " Estudio de los Sistemas de Excitación y Reguladores de Voltaje de las Máquinas Sincrónicas " - Tesis de Grado. EPN, Quito, Julio de 1986
- (9) IEEE - TRANSACTIONS ON POWER APPARATUS AND SYSTEMS, Vol. PAS-100, N° 6 .- " Applying Power System Stabilizers ", Estados

Unidos, Junio de 1981

- (10) UQUILLAS, GONZALO y SANCHEZ, SANTIAGO .- " Análisis del Control de la Excitación de la Central Hidroeléctrica Paute sobre la Estabilidad Dinámica del SNI. " - Anales de las Jornadas en Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Vol. 5, Quito, Junio de 1984
- (11) SWEDPOWER .- " System Studies for INECEL ", Estocolmo, Junio de 1985
- (12) RUEDA, IVAN .- " Modelación del Turbogenerador de la Central Hidroeléctrica Paute y análisis de la influencia de la calibración del Control de la Excitación en su estabilidad dinámica ", Quito, Septiembre de 1985

A P E N D I C E I

D E S C R I P C I O N D E L A C E N T R A L M O L I N O (3)

I.1 PRESA DANIEL PALACIOS .- También denominada Amaluza, se le ha bautizado con el nombre de un técnico que tuvo mucho que ver en los estudios iniciales del proyecto.

La presa forma un embalse de una capacidad de almacenamiento de 120'000.000 de metros cúbicos, de los cuales son útiles 90'000.000 de metros cúbicos (100'000.000 m³ (1)). Es de concreto, del tipo arco-gravedad, tiene 170 metros de altura y 400 metros de longitud en la cresta, elevada 1994 metros sobre el nivel del mar.

En la parte central de la Presa se dispone de seis compuertas radiales, de doce metros de ancho con una capacidad total de evacuación por el vertedero de 7724 m³/seg.

El desagüe de fondo ubicado en la elevación 1881 m.s.n.m. tiene como función eliminar pequeñas cantidades de sedimento; consiste de dos tuberías de 2.13 m. de diámetro cada una, con válvulas de guardia tipo Ring Follower y una válvula para descargar tipo Hollow Cone donde es disipada la energía cinética en la descarga.

Se pueden descargar hasta 200 m³/seg. El control de las válvulas Ring Follower es hidráulico, teniendo para ello una Central Oleodinámica; para la operación de apertura se dispone de válvulas by-pass y otras de limpieza para la opera-

ción de cierre.

Para la desviación del río durante la construcción de la presa se hizo un túnel con sección de herradura modificada de doce metros de diámetro y 589 metros de longitud, estuvo diseñado para desviar 2200 m³/seg.

I.2 CAPTACION Y CONDUCCION .- En la elevación 1920 m.s.n.m., cerca del estribo izquierdo está localizada la toma de carga, constituida por: una rejilla de entrada de 118 metros cuadrados de área para la limpieza por gravedad, dos entradas controladas por compuertas de ruedas con malacates fijos (para servicio) y por una compuerta por malacates móviles para mantenimiento. Estas compuertas son de 8.83 m. de alto por 3.64 m. de ancho. Dos tuberías de acero de 4.3 m. de diámetro conducen el agua a través de la Presa para su acoplamiento con los túneles de carga. Adicionalmente cada toma dispone de válvulas de by-pass para la igualación de presiones en la operación de apertura.

El túnel de conducción o carga tiene una longitud aproximada de 6200 metros y una sección circular de 5 metros de diámetro, revestida de concreto, para una descarga máxima de 100 m³/seg. a 4.1 m/seg. de velocidad.

Al final del túnel de carga la conducción está conectada a la chimenea de equilibrio tipo orificio restringido, de 7 metros de diámetro y 191 metros de altura sobre el túnel de carga; el orificio es de 2.3 metros de diámetro.

La conducción continúa con una galería de presión inclinada 43 grados respecto a la horizontal; tiene 860 metros de longitud y en ella va embebida la tubería de presión de 3.75 metros de diámetro. Termina con un distribuidor que tiene longitud de 96.1 metros con cinco ramales longitudinales de 1.68 metros de diámetro cada uno. A la salida de estos ramales están las válvulas esféricas de entrada a cada turbina.

I.3 CASA DE MAQUINAS .- La Casa de Máquinas es subterránea, ha sido excavada con las siguientes dimensiones (Fase AB):

23 m. de ancho, 42 m. de alto, y 123 m. de longitud.

De acuerdo a los niveles de altura, se tiene lo siguiente:
1322 m.s.n.m. Piso de Turbinas: Cinco turbinas tipo Pelton de eje vertical de 116 MW para una caída de 650 metros. Velocidad angular: 360 rpm.

1327 m.s.n.m. Piso de Generadores: Cinco generadores trifásicos de polos salientes de 111 MVA, factor de potencia 0.9, voltaje nominal 13.8 kV, 60 ciclos por segundo.

1333 m.s.n.m. Piso de Transformadores: Cinco transformadores de 114 MVA, de relación 13.8 kV / 138 kV con enfriamiento tipo F.O.W.

1340 m.s.n.m. Piso del Sistema de Ventilación: Adicional - mente dos puentes grúa de 135 toneladas cada una para el montaje y desmontaje de los generadores.

Longitudinalmente la Casa de Máquinas se divide en bloque de servicio y bloque de unidades. En el bloque de servicio, en todos los niveles, hay áreas para mantenimiento y reparación; en el nivel 1327 m se han centralizado las alarmas de Casa de Máquinas, y se han dispuesto los tableros de servicios auxiliares; una vez concluida la Fase C este bloque quedará al centro de la Casa de Máquinas con cinco unidades a cada lado en forma simétrica.

Para el trayecto de los cables de transporte de la energía generada y de los cables multiconductores para protección y control que conectan los equipos de Casa de Máquinas con los del Patio de Maniobras localizado a 300 m. sobre Casa de Máquinas existe un túnel vertical, el cual sirve también para el ascensor; con un pequeño tramo horizontal que une el corto pozo de cables de C/M con el pozo de cables principal o del ascensor.

Las aguas turbinadas se descargan al Río Paute mediante un túnel de 8 metros de alto, 6.67 metros de ancho y 338.4 metros de longitud.

I.4 PATIO DE MANIOBRAS .- La subestación compacta está levantada a la intemperie, en la margen izquierda del Río Paute, a 300 m. sobre la Casa de Máquinas, en la misma se alojan los equipos de conexión y protección de la Central a más de los autotransformadores.

Según los niveles de altura se tiene:

1620 m.s.n.m. Edificio de Control .- Tableros de Control de las Unidades, Autotransformadores y Líneas. Equipos de comunicaciones. Oficinas de Mantenimiento.

1630 m.s.n.m. Subestación en 138 kV .- La cual recibe la energía de las cinco unidades, de esta sale la línea a Cuenca a doble circuito, en un esquema de doble barra con aislamiento en SF6.

1636 m.s.n.m. Patio de Autotransformadores .- Compuesto por seis autotransformadores monofásicos para formar dos bancos trifásicos de 300 MVA cada uno, de relación de transformación 138 kV / 230 kV - 13.8 kV, siendo 13.8 kV el voltaje correspondiente al terciario del que se alimentan los servicios auxiliares de la Central y los campamentos a través de dos transformadores de aislamiento de relación 1:1 y 3.75 MVA cada uno. En esta plataforma también se localizan dos bancos de reactores para controlar la Potencia reactiva.

1640 m.s.n.m. Subestación de 230 kV .- Recibe la energía desde los autotransformadores y de ella parte la línea hacia la S/E Milagro y de ahí hacia el SNI., es a doble circuito en un esquema de doble barra con aislamiento en SF6 .

I.5 CAMPAMENTO GUARUMALES .- Ubicado a la margen derecha del Río Paute frente al Patio de Maniobras. En él funcionan las oficinas de la Central, talleres, y reside el personal para

la operación y mantenimiento de las instalaciones, así como el personal extranjero dedicado a la construcción de Paute Fase C. El personal de INECEL encargado de la Fiscalización de las obras en construcción reside en el Campamento Arenales ubicado a 23 km hacia Cuenca, desde Guarumales.

I.6 COSTO Y FINANCIAMIENTO DE PAUTE FASE AB (1) El costo de las Fases A y B actualizado en 1982 ascendió a 678 millones de dólares que se descomponen en las siguientes categorías:

C A T E G O R I A	MONTO US\$	%
1.- Ingeniería y Administración	62'000.000	9.2
2.- Costos directos	348'000.000	51.3
3.- Imprevistos (años 1983 y 1984)	1'000.000	0.1
4.- Escalamiento de costos (1976-1984)	167'000.000	24.7
5.- Gastos financieros	100'000.000	14.7
T O T A L	----- US\$ 678'000.000	100.0

A P E N D I C E I I

D E S C R I P C I O N . D E L G E N E R A D O R (4)

II.1 DESCRIPCION DE LA MAQUINA TIPO CONSTRUCTIVO W41 DE SIEMENS (Según DIN 42950)

El dibujo en corte muestra la constitución básica de la máquina . Figura II.1

La máquina se compone de:

Rotor

Estator

Cojinetes

Blindaje

Soportes de los portaescobillas

Base de la máquina

Accesorios

ROTOR .- Se compone del árbol, rueda polar, anillos colectores, y partes rotatorias de los cojinetes.

El árbol 111 transmite al generador el momento de giro producido por la turbina; está acoplado rígidamente al árbol de la turbina.

La rueda polar se compone del cubo 115, del anillo de culata 121 y de los polos oblongos con sus devanados 130.

Soporta, además, los dos ventiladores 174, el anillo de frenar 185 y los conductores que van de los anillos colectores 161 a los

polos. El cubo es un cilindro hueco.

El anillo de culata, compuesto de chapas concatenadas, lleva los polos. Absorbe, además, las fuerzas centrífugas provenientes de los polos y cierra el circuito magnético formado por un par de polos y la correspondiente parte opuesta del paquete de chapas estatórico.

El anillo de culata se fija al cubo por medio de chavetas y calados. Estos elementos de unión transmiten el momento de giro y mantienen la posición concéntrica del anillo.

Los polos se componen del vástago, de la zapata y del devanado. Estos se encargan de producir el campo magnético que gira con la rueda polar.

Los polos se fijan al anillo de culata mediante acoples tipo cola de milano y por tanto son laminados en su totalidad.

Los polos tienen también el devanado amortiguador para contrarrestar los efectos de perturbaciones provenientes de la red, como:

cargas asimétricas, cortocircuitos bipolares, etc. En las zapatas polares se colocan, en sentido axial, barras de cobre, las cuales se unen entre sí como segmentos de cobre atornillados. Se obtiene así una jaula que permite las amortiguaciones longitudinal y transversal requeridas.

ESTATOR .- Consta de la carcasa 211, del paquete de chapas 220 y del devanado 240, insertado en las ranuras del paquete de chapas. El estator es de tres piezas, por su gran diámetro

(= 8 m) se armó y bobinó en la Casa de Máquinas. El devanado estatórico es de barras y sus bornes se encuentran en la parte superior del estator. El punto de cierre de la estrella se conduce al exterior como punto neutro prolongado, siendo cortocircuitado en el cubículo del neutro.

La corriente de excitación es producida por un equipo de tipo estático que se alimenta desde transformadores, a su vez conectados a las barras del generador.

En la parte superior del eje del generador está instalado el SSG o Generador de Señal de Velocidad, conformado por una rueda dentada, detectores magnéticos tipo PMG 582 y módulos amplificadores; este informa al Regulador Electrónico de Velocidad el valor de velocidad actual de la máquina.

El generador tiene dos cojinetes radiales, uno encima y otro debajo de la rueda polar. El superior está combinado con el cojinete axial. Este cojinete combinado 340 soporta las cargas axiales provenientes de la turbina y de las partes en rotación del generador.

La estrella soporte 348 absorbe las cargas verticales, centrando, al mismo tiempo, el rotor; la estrella de guía 349 sirve solo para centrar el rotor. La estrella soporte se apoya sobre la carcasa, la de guía, sobre el fundamento. Las placas de base 531, embebidas en el hormigón, forman las superficies de apoyo

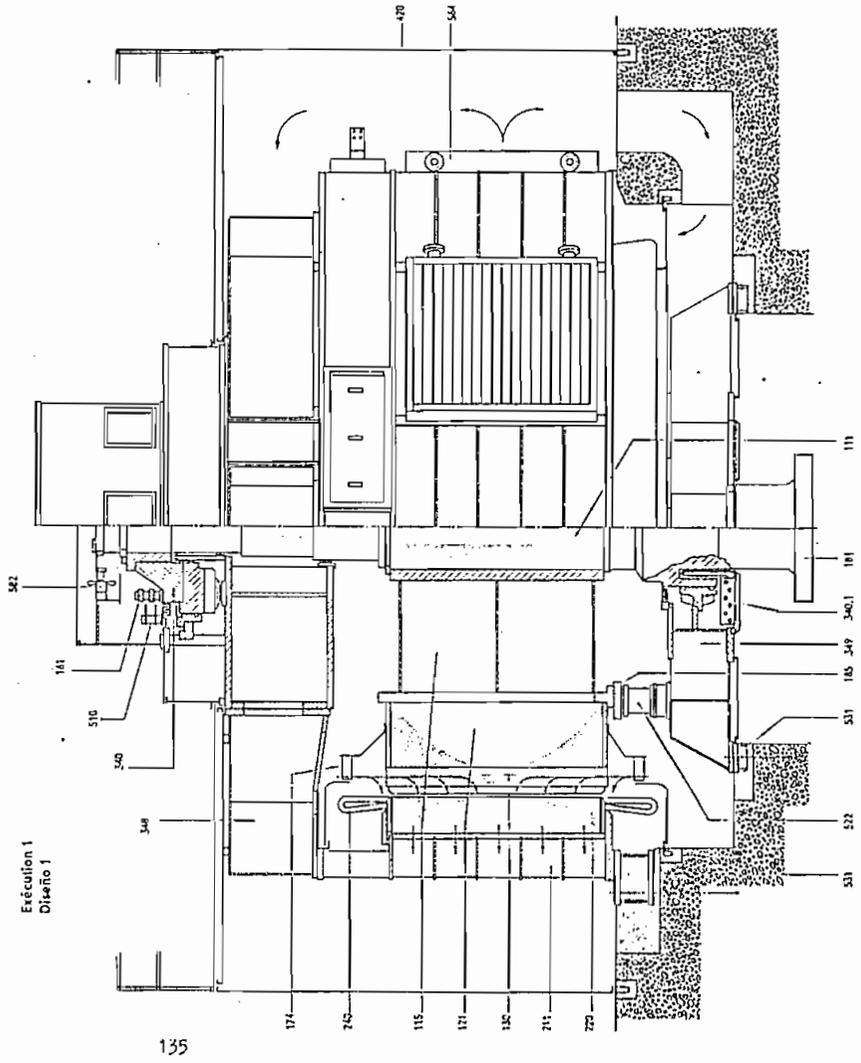
para la carcasa y la estrella de guía.

El generador tiene un circuito de refrigeración cerrado, por lo que está completamente recubierto. El blindaje 420 forma la cubierta superior, la cubierta del pozo separa el recinto del generador del recinto de la turbina. Sirve, sobretodo, para evitar que del recinto de la turbina pueda ser aspirado aire húmedo o aire que tenga aceite. El cierre periférico está formado por la fosa del generador, de hormigón.

El aire es movido por los dos ventiladores 174 que lo impelen en sentido axial y radial. El aire fluye desde el recinto anular exterior del generador a través del lado frontal superior de la máquina hasta el recinto interior del generador, arrastra consigo el calor producido por las pérdidas en los devanados y en el hierro para volver a su lugar de partida pasando por el dorso de la carcasa y por los seis refrigeradores 564 .

Como accesorios importantes cabe mencionar:

Los sensores de temperatura para el núcleo y devanados del estator, la cubierta del pozo, el equipo de frenado y elevación 522 , los dispositivos de vigilancia y protección de temperatura, niveles de aceite, transformadores de corriente, extinción de incendios y, en general, los accesorios necesarios para el montaje.



Execución 1
Diseño 1

- 111 Albed del rotor
- 121 Caja de aceite
- 130 Palo oblongo con drenado
- 171 Ventilador axial
- 174 Ventilador axial
- 181 Ventilador axial
- 185 Ventilador axial
- 211 Acoplamiento
- 215 Culo de llenar
- 220 Paquete de chapas del estator
- 240 Cevanado estibico
- 340,1 Paquete de chapas estib-radial
- 340,2 Paquete de chapas estib-radial
- 348 Estrella soporte
- 378 Estrella soporte
- 420 Brindaje
- 510 Soporte de los portestabiliz
- 511 Soporte de los portestabiliz
- 541 Placas de base
- 542 Refrigerador de aire por agua
- 582 Generador de inducts permanentes

- 111 Albed del rotor
- 121 Caja de aceite
- 130 Palo oblongo con drenado
- 171 Ventilador axial
- 174 Ventilador axial
- 181 Ventilador axial
- 185 Ventilador axial
- 211 Acoplamiento
- 215 Culo de llenar
- 220 Paquete de chapas del estator
- 240 Cevanado estibico
- 340,1 Paquete de chapas estib-radial
- 340,2 Paquete de chapas estib-radial
- 348 Estrella soporte
- 378 Estrella soporte
- 420 Brindaje
- 510 Soporte de los portestabiliz
- 511 Soporte de los portestabiliz
- 541 Placas de base
- 542 Refrigerador de aire por agua
- 582 Generador de inducts permanentes

Estacion 1: Alternator sans groupe de machines d'excitation
 Estacion 2: Alternator con grupo de maquinas para la excitacion
 Estacion 3: Alternator avec groupe de machines d'excitation
 Estacion 4: Alternator com grupo de maquinas para la excitacion

Alternator de forma W 41
 Generator, tipo Constructivo W 41

Figura II.1

II.2 OPERACION DEL GENERADOR (3)

El arranque y la parada de las unidades de la Central, pueden ser seleccionados en tres modos diferentes de operación: Manual, Local automático o Remoto.

En Manual se interviene directamente sobre cada uno de los equipos que componen la turbina, el generador y los auxiliares. La secuencia a seguir en el proceso de arranque (parada) es confiada al operador, quien deberá cumplir un orden lógico de maniobras. Esta modalidad es utilizada con el propósito de probar individualmente los equipos; generalmente cuando se realizan actividades de mantenimiento o luego de ejecutadas.

En Local Automático se comanda desde los tableros de control de la Unidad ubicados en la Casa de Máquinas; en Remoto se comanda desde el tablero respectivo ubicado en Sala de Control, o podría hacerse desde un Centro de Control remoto ubicado en la planta o fuera de ella.

En cualquiera de las formas automáticas de mando es necesario únicamente dar la orden de arranque (parada) y la secuencia es realizada automáticamente hasta que la Unidad está lista para sincronizar al Sistema, (o inclusive puede sincronizarse automáticamente) o en reposo, en la parada.

Cualquiera que sea el modo en que se ordena el arranque de la máquina, previamente es necesario que se establezcan ciertas

condiciones de estado de los equipos, que se denominan "Precondiciones de Arranque".

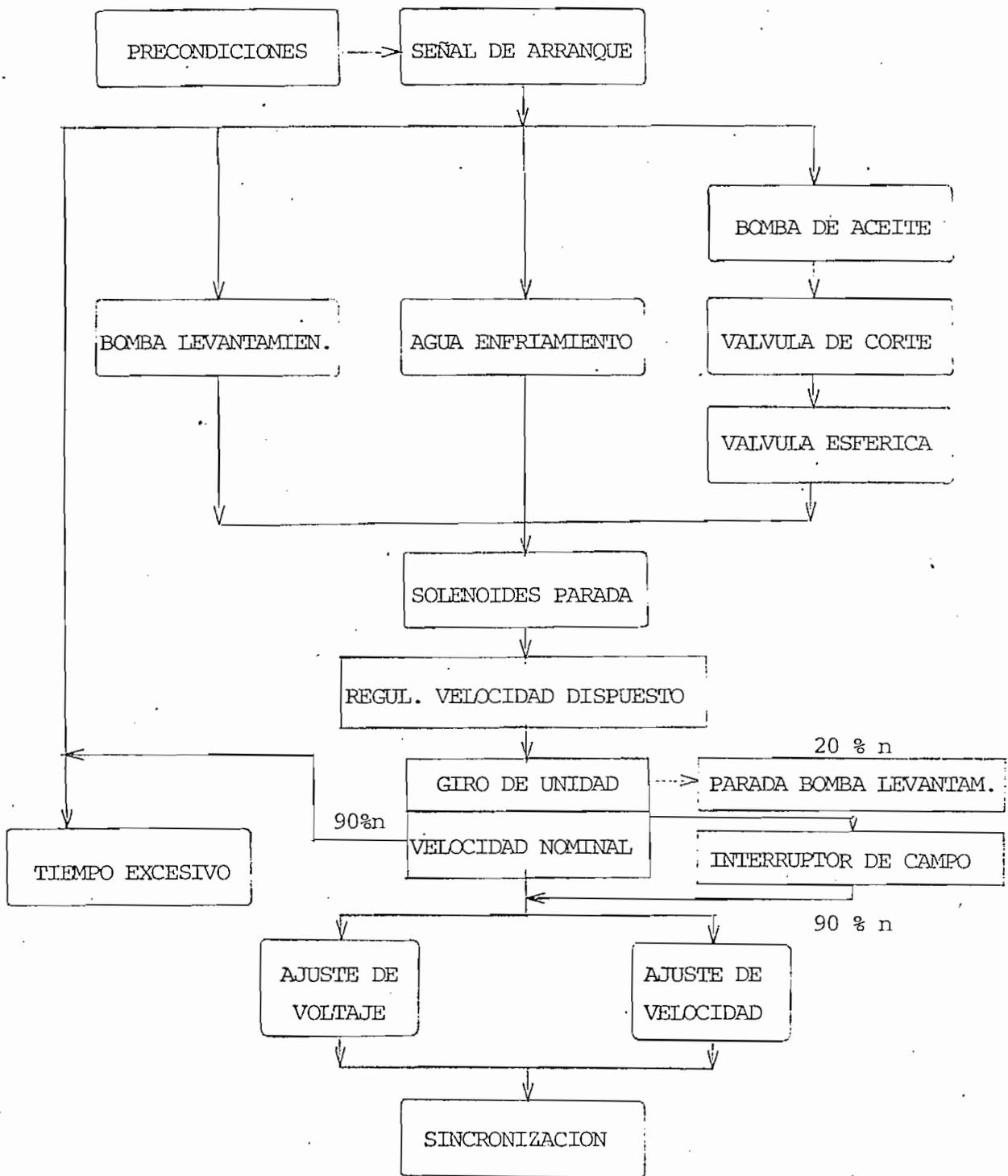
Normalmente el proceso de arranque de la Unidad dura aproximadamente cinco minutos, mientras que el proceso de parada toma poco más de treinta y cinco minutos.

En el arranque, una vez que la velocidad de la máquina llega al 90 % de la nominal, se permite el cierre del interruptor de campo y la consecuente excitación hasta conseguir el voltaje terminal nominal. Cuando llega al 98 % de la velocidad nominal el operador puede ajustar los parámetros frecuencia y voltaje con respecto a los del Sistema Nacional, estableciendo las condiciones de sincronismo; conseguido esto se puede cerrar el interruptor principal; quedando interconectados generador y sistema para que la unidad pueda tomar la carga que el operador determine.

La parada automática en condiciones de falla puede ser ordenada por las protecciones de origen eléctrico o mecánico en el generador o en sus sistemas auxiliares.

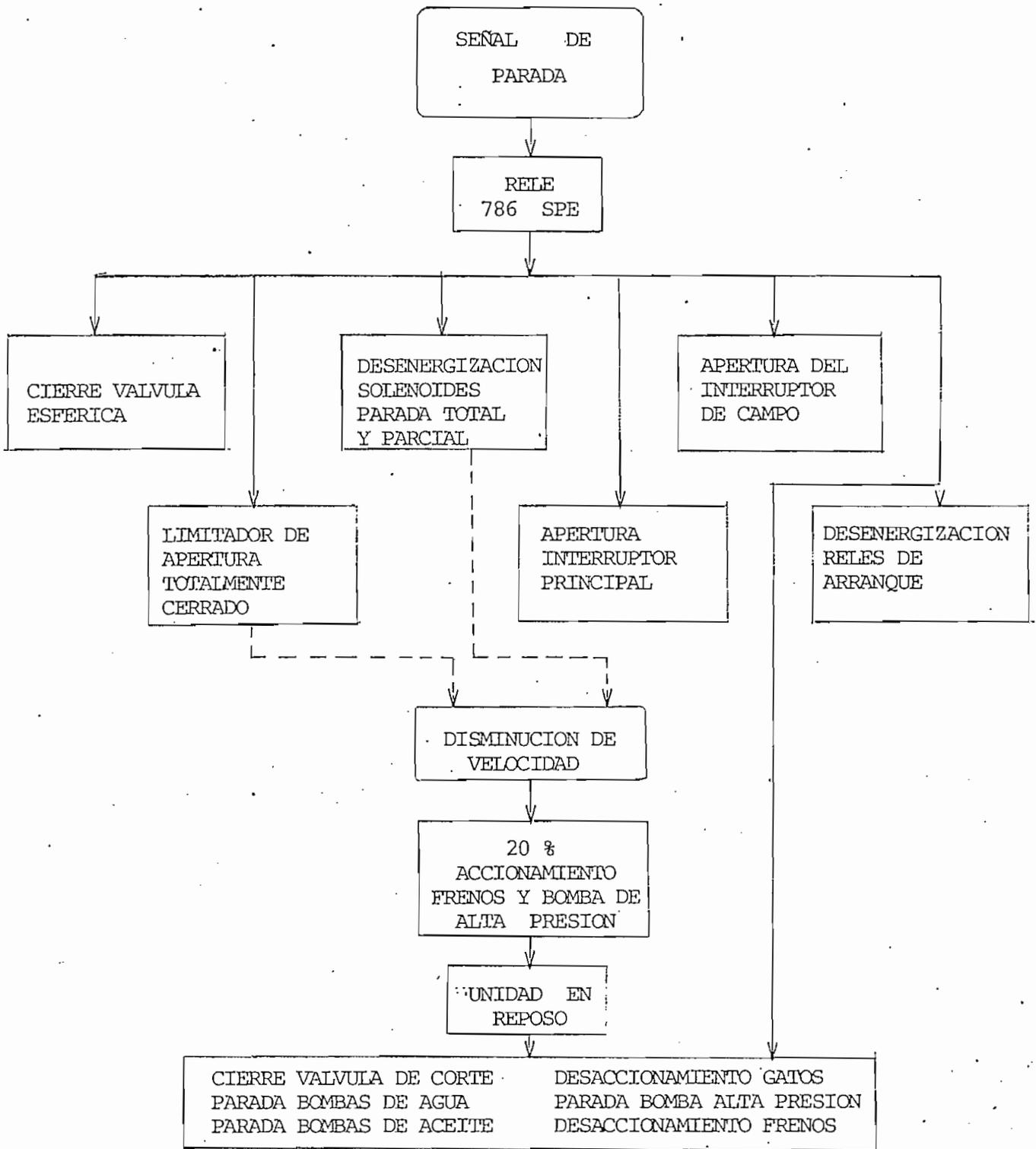
Cuando se presentan fallas externas a la máquina, o no existe peligro de que la máquina permanezca girando con tensión pero sin carga, se origina la parada parcial. En este caso el generador rechaza su carga y permanece girando fuera de sincronismo del Sistema, pero lista para volver a sincronizar si fue corregida la falla que motivó la salida inicial.

En las figuras II.2 , II.3 , II.4 se presentan en diagramas de bloques las secuencias de arranque y parada del generador.



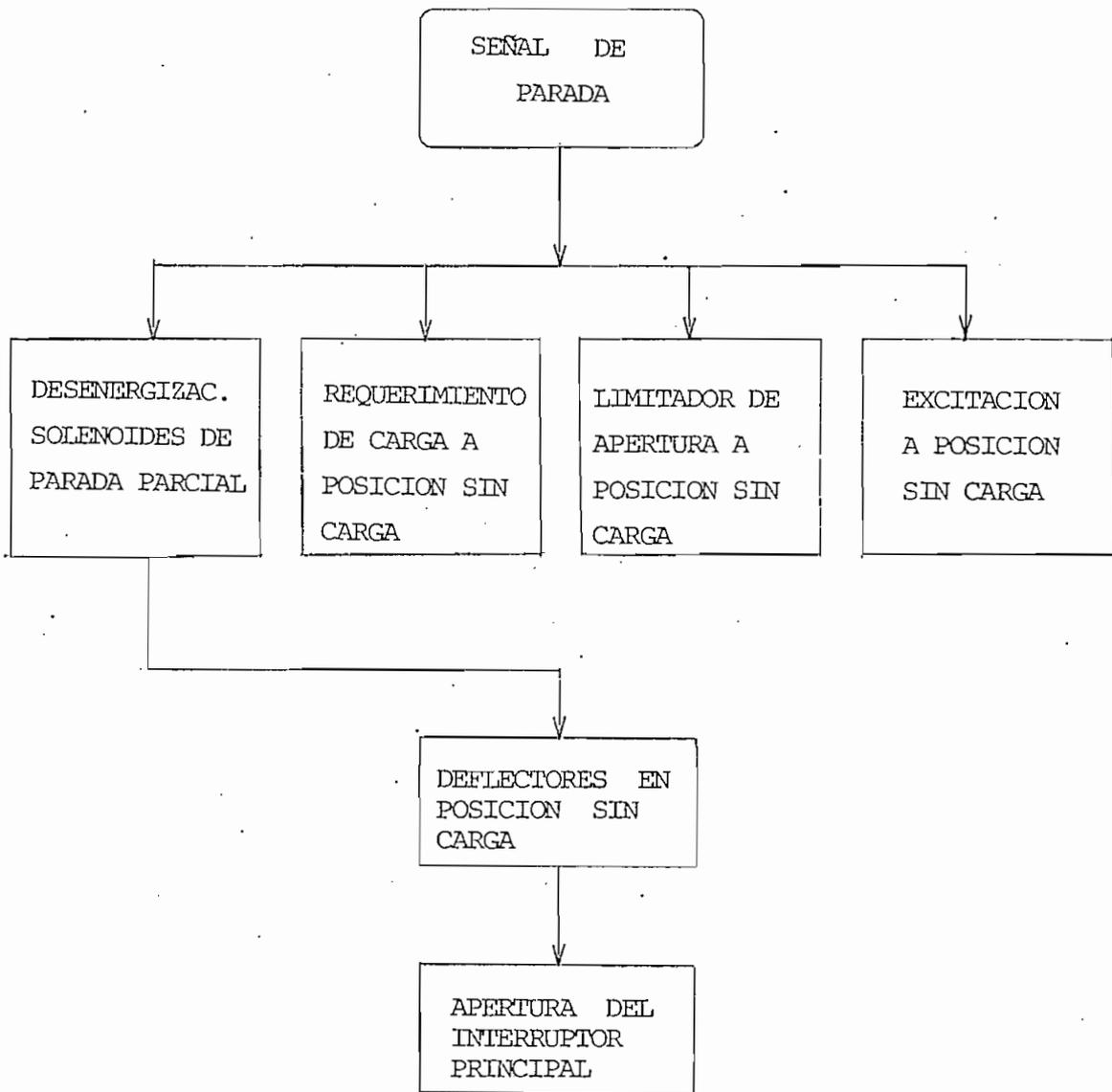
ARRANQUE DE LA UNIDAD

Figura II.2



PARADA DE EMERGENCIA

Figura II.3



PARADA PARCIAL

Figura II.4

II. 3 SISTEMAS AUXILIARES DEL GENERADOR

- Acumulación y Bombeo de Aceite para los sistemas hidráulicos de accionamiento de la válvula principal de agua y del servosistema para la regulación de velocidad.
- Válvula Esférica .- Es la válvula principal que controla el paso de agua desde la tubería de presión hacia el distribuidor e inyectores.
- Turbina .- La máquina hidráulica de impulsión para el generador, conformada por el caracol, los seis inyectores y sus deflectores, la rueda Pelton ($\phi = 3.89$ m.) y el acople al árbol del generador.
- Regulador electrónico de Velocidad .- Controla los procesos de arranque, sincronismo, rechazos o tomas de carga, regulación dinámica de frecuencia y parada de la máquina gracias a un control PID de regulación de frecuencia y a un control Velocidad-Carga determinado por el Estatismo seleccionado.
- Excitación estática .- Procura el campo magnético que al girar con el rotor produce la inducción del Voltaje Terminal en el Estator. Permite la regulación dinámica de voltaje, el control de la Potencia Reactiva, la circunscripción del funcionamiento del generador dentro de la curva de cargabilidad y además contribuye a la estabilización de oscilaciones de Potencia Activa.
- Agua de enfriamiento y ventilación para el control de temperatura de la máquina.

- Medición y protecciones varias para supervisión, control automático de fallas o condiciones inseguras de naturaleza eléctrica o mecánica.

En las figuras II.5 y II.6 se presentan las curvas de saturación y cortocircuito y las curvas V .

WkW Paute, Generador N° 3

Curva característica de vacío
Curva característica de cortocircuito

1 DH 6653 3WF 10-3 WkW Paute Gen 3
Wexk Nr 1 100 189 Fabr Nr D 77 100 189 03
MVA 13.8 KV 4600/5333 A cos φ 0.9
60 Hz 360 $\frac{r}{min}$



Entrehierro: 40 50 mm

Figura II.5

Pauta 111127,7 MVA 13,8 kV 4644/5343 A $\cos\phi = 0,9$ 60 Hz 360 U/min

V-Kurven

technisch ermittelt

Curva V

determinada por cálculo

unterregt
subexcitado

überregt
sobreexcitado

thermische Grenze des Ständers
límite térmico del estator

Stabilitätsgrenze
límite de estabilidad

thermische Grenze des Lä

(límite térmico del rotor
(127,7 MVA 1,05 I_n))

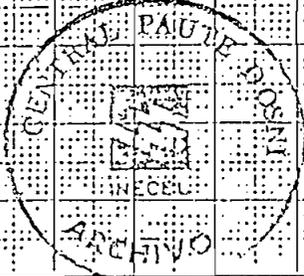
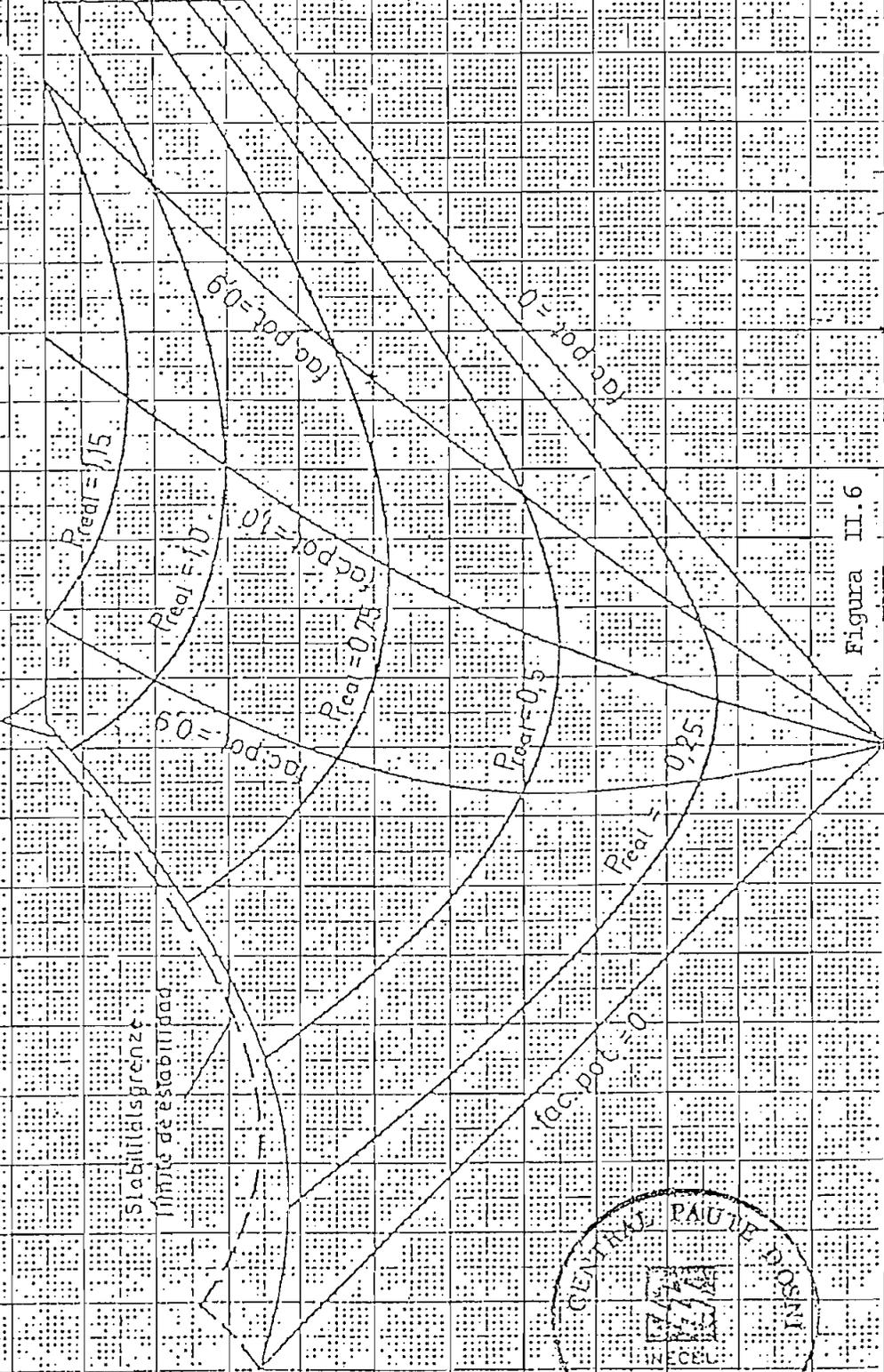


Figura II.6

A P E N D I C E I I I

D E D U C C I O N D E F U N C I O N E S D E
T R A N S F E R E N C I A

III.1 FUNCION DE TRANSFERENCIA DEL VOLTAJE TERMINAL REALIMENTADO

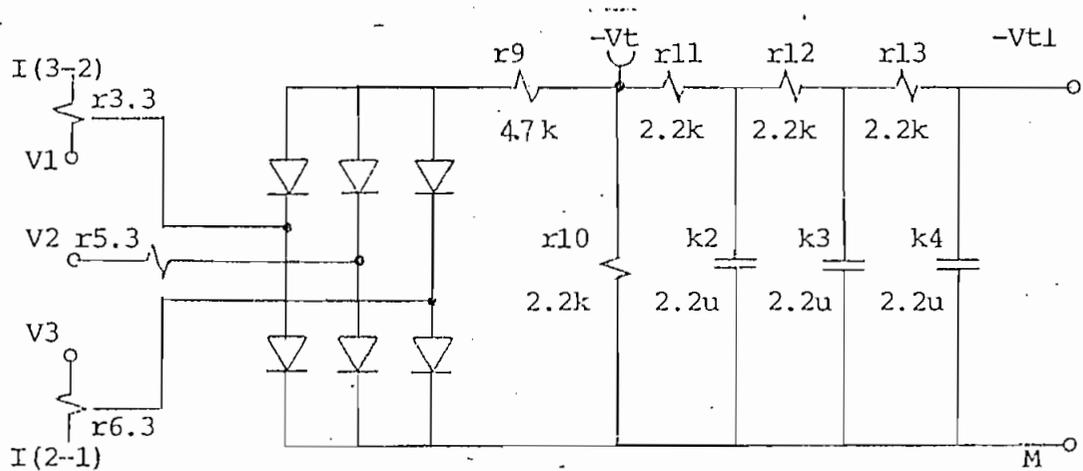
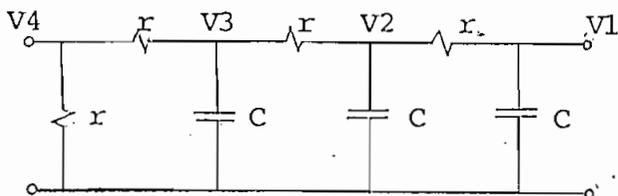


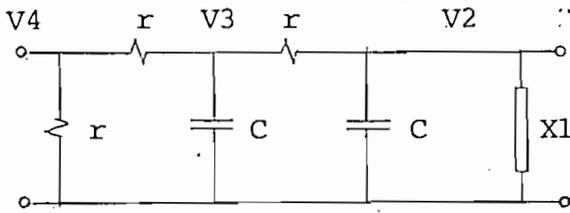
Figura III.1.1

El voltaje terminal pasa por varias etapas de transformación hasta ingresar al puente .rectificador y luego al filtro de entrada al Regulador. Se busca la función de transferencia entre $- V_{t1}$ y $-V_t$.

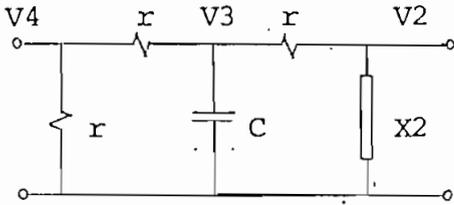
III.1.1 DEDUCCION ANALITICA



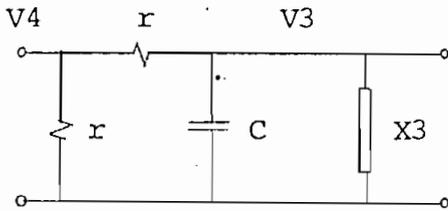
$$V_1 = - V_{t1} \quad V_4 = - V_t$$



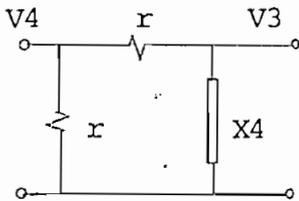
$$X1 = r + \frac{1}{Cs} = \frac{rCs + 1}{Cs}$$



$$X2 = \frac{X1/Cs}{X1 + 1/Cs} = \frac{X1}{X1Cs + 1}$$



$$X3 = r + X2$$



$$X4 = \frac{X3}{X3Cs + 1}$$

Utilizando las relaciones arriba establecidas se tiene:

$$V3 = \frac{X4}{r + X4} V4$$

$$V3 = \frac{X3/(X3Cs + 1)}{r + X3/(X3Cs + 1)} V4$$

$$V3 = \frac{X3}{(rCs + 1)X3 + r} V4$$

$$V3 = \frac{r + X2}{(rCs + 1)(r + X2) + r} V4$$

$$V3 = \frac{r + X2}{r^2Cs + rCX2s + 2r + X2} V4$$

$$V3 = \frac{r + X2}{(rCs + 1)X2 + r^2Cs + 2r} V4$$

$$V2 = \frac{X2}{r + X2} V3$$

$$V2 = \frac{X2}{r + X2} \cdot \frac{r + X2}{(rCs + 1)X2 + r^2Cs + 2r} V4$$

$$V2 = \frac{X2}{(rCs + 1)X2 + r^2Cs + 2r} V4$$

$$V2 = \frac{X1/(X1Cs + 1)}{[rCs + 1][X1/(X1Cs + 1)] + r^2Cs + 2r} V4$$

$$V2 = \frac{X1}{(rCs + 1)X1 + (r^2Cs + 2r)(X1Cs + 1)} V4$$

$$V2 = \frac{X1}{(rCs + 1)X1 + (r^2Cs + 2r)X1Cs + r^2Cs + 2r} V4$$

$$V2 = \frac{X1}{(r^2C^2s^2 + 3rCs + 1)X1 + r^2Cs + 2r} V4$$

$$V2 = \frac{(rCs + 1)/Cs}{[r^2C^2s^2 + 3rCs + 1][(rCs + 1)/Cs] + r^2Cs + 2r} V4$$

$$V2 = \frac{rCs + 1}{(r^2C^2s^2 + 3rCs + 1)(rCs + 1) + (r^2Cs + 2r)Cs} V4$$

$$V_1 = \frac{1/Cs}{r + 1/Cs} V_2$$

$$V_1 = \frac{1}{rCs + 1} V_2$$

$$V_1 = \frac{1}{rCs + 1} \cdot \frac{rCs + 1}{(r^2C^2s^2 + 3rCs + 1)(rCs + 1) + (r^2Cs + 2r)Cs} V_4$$

$$V_1 = \frac{1}{r^3C^3s^3 + 3r^2C^2s^2 + rCs + r^2C^2s^2 + 3rCs + 1 + r^2C^2s^2 + 2rCs} V_4$$

$$- V_{t1} = \frac{1}{r^3C^3s^3 + 5r^2C^2s^2 + 6rCs + 1} - V_t$$

Como $r = 2.2 \text{ k}\Omega$ y $C = 2.2 \text{ }\mu\text{F}$ queda:

$$- V_{t1} = \frac{1}{0.000000113 \cdot s^3 + 0.00012 \cdot s^2 + 0.029 \cdot s + 1} - V_t$$

Para fines prácticos tomamos la parte más significativa:

$$- V_{t1} \approx \frac{1}{1 + 0.029 \cdot s} (- V_t)$$

III.1.2 OBTENCION EXPERIMENTAL DE LA FUNCION DE TRANSFERENCIA DEL FILTRO DE ENTRADA DEL VOLTAJE TERMINAL REALIMENTADO

En laboratorio se somete al circuito R-C en análisis, a la inyección de voltaje sinusoidal, de amplitud constante y de frecuencia variable entre 0.05 Hz y 10 Hz . Utilizando un oscilógrafo multicanal se registran tanto la entrada como la salida del circuito, para posteriormente medir la relación de amplitudes y la diferencia de fase. Finalmente se grafican los resultados correspondientes.

Se desconecta r9 (4.7 kΩ) en el punto 1 para eliminar el puente de diodos que limitaría el voltaje de entrada.

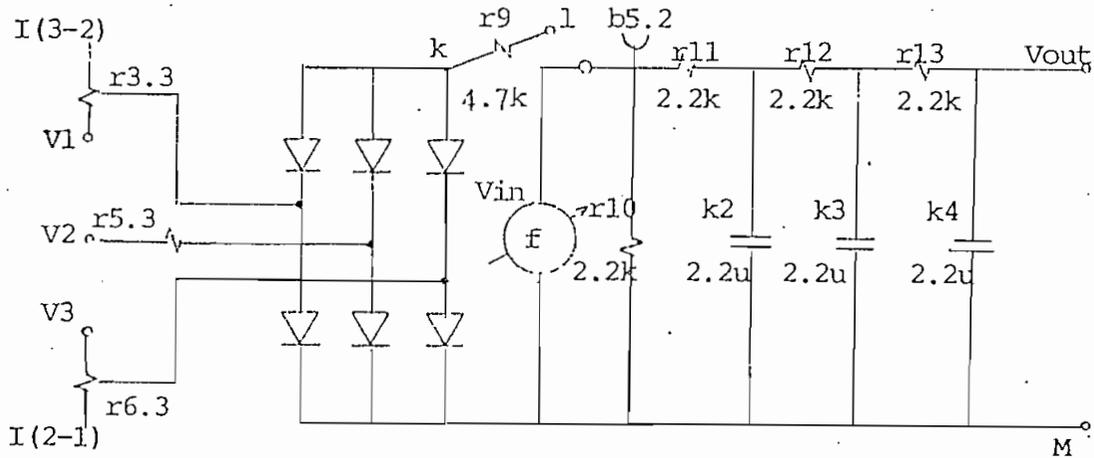


Figura III.1.2

En la figura III.1.3 se indica como muestra la sección del

registro correspondiente a 1 Hz.

Velocidad del papel: 500 cm/min = 83.3 mm/seg.

1) Voltaje de entrada (b5:2)

2) Voltaje de salida (r13 - r14)

3) Voltaje a la salida de la tarjeta 0.05 V/mm. (No es importante)

Para el siguiente cuadro de valores y cálculos se usan las siguientes relaciones:

$$\text{Frecuencia (F)} = \frac{\text{Velocidad del papel (v)} \text{ [mm/seg]}}{\text{Período (T)} \text{ [mm]}} \text{ [Hz]}$$

$$\text{Ganancia (G)} = \frac{\text{Amplitud p-p de la Salida (Ao) [mm]} \times \text{Eo [V/mm]}}{\text{Amplitud p-p de la Entrada (Ai) [mm]} \times \text{Ei [V/mm]}}$$

$$\text{Ganancia (GdB)} = 20 \cdot \log (G) \quad [\text{dB}]$$

$$\text{Desfasaje } (\delta\theta) = \frac{\text{Desfasaje } (\delta t) \text{ [mm]} \times 360 \text{ [}^\circ\text{]}}{\text{Período (T)} \text{ [mm]}} \text{ [}^\circ\text{]}$$

Eo: Escala de Ao = 0.15 V/mm

Ei: Escala de Ai = 0.15 V/mm

Ai = 42 mm = 6.3 V

Los valores de F, GdB y $\delta\theta$ se graficaron en las figuras 2.1.3 y 2.1.4 .

MOLINO, 87 - 10 - 13

OSCILOGRAMA PARA DETERMINAR LA FUNCION DE

TRANSFERENCIA DEL FILTRO DE - VI

Frecuencia = 1 Hz

1 seg

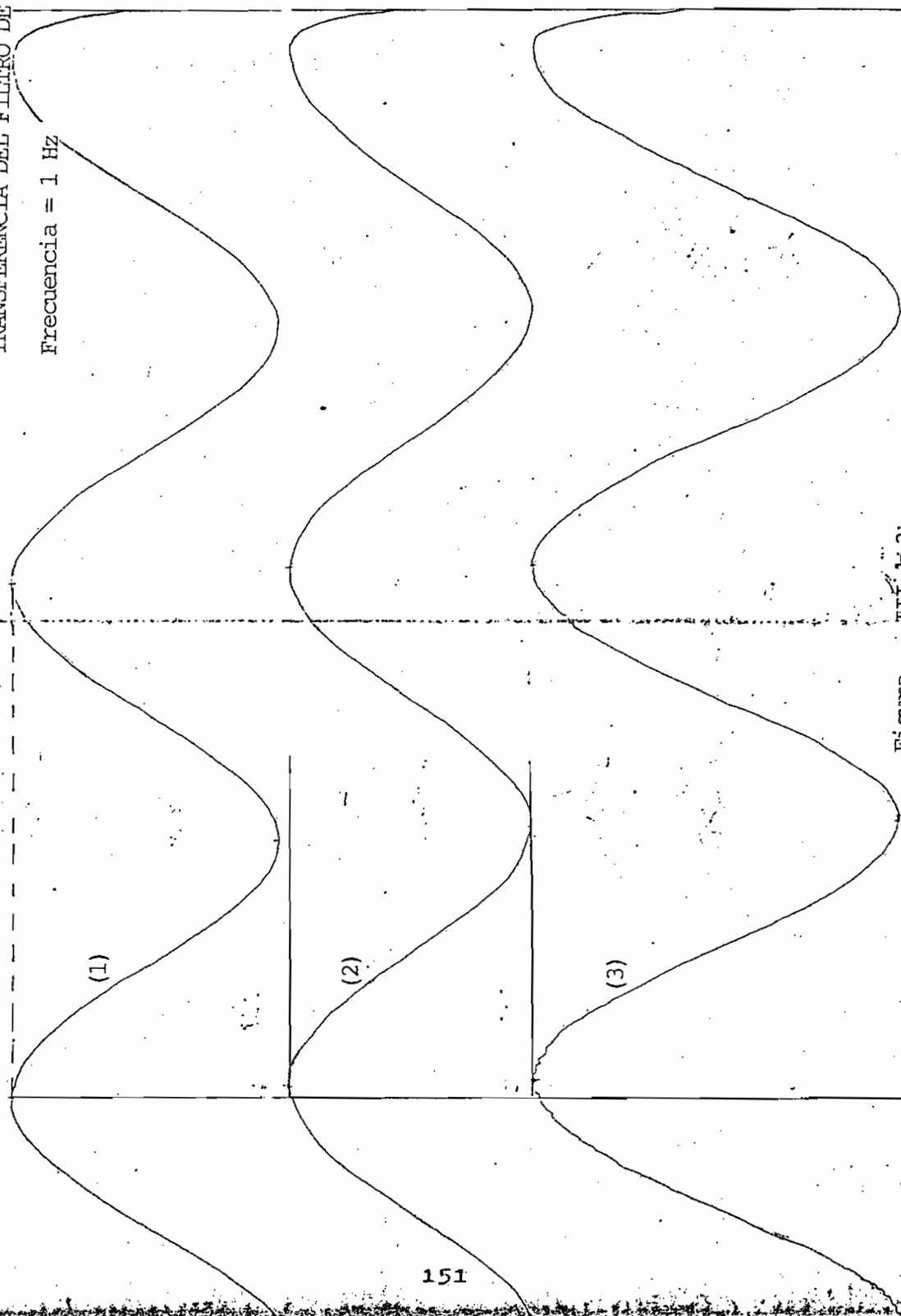


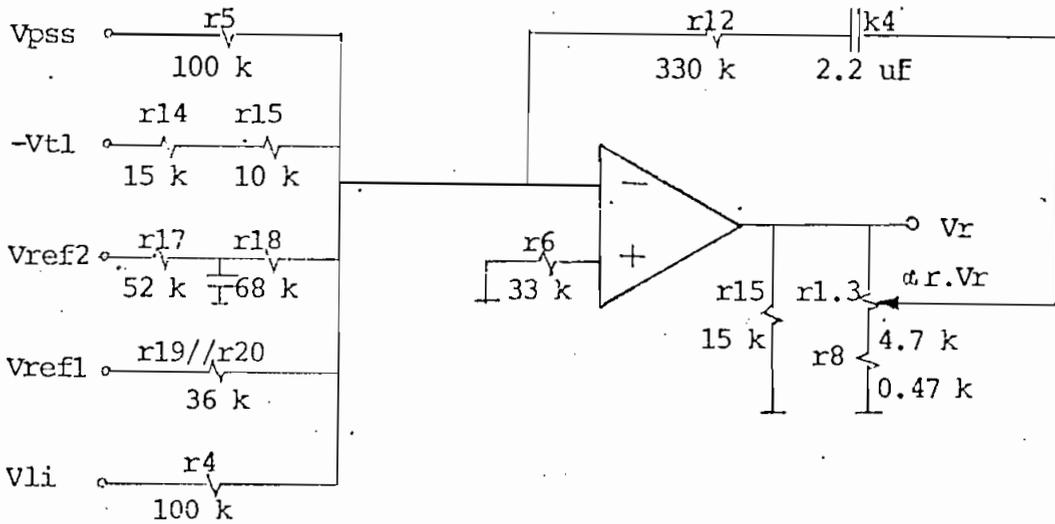
Figura III.1.3

CUADRO DE VALORES DE OSCILOGRAMAS PARA F(s) DEL FILTRO DE vt

Velocidad del papel	Voltaje de Entrada		V o l t a j e d e S a l i d a			
	T	F	Ao	GdB	δt	δθ
v [mm/seg]	[mm]	[Hz]	[mm]	[dB]	[mm]	[°]
250/60	84	0.05	40.0	-0.4	- 1.0	- 4.3
2500/60	85	0.49	39.0	-0.6	- 1.1	- 4.7
5000/60	85	0.98	38.5	-0.8	- 2.0	- 8.5
250	82	3.05	35.5	-1.5	- 5.0	-22.0
1000	172	5.81	29.0	-3.2	-19.0	-39.8
1000	125	8.00	26.0	-4.2	-21.0	-60.5
1000	101	9.90	23.0	-5.2	-19.0	-67.7

III.2 FUNCION DE TRANSFERENCIA DEL REGULADOR DE VOLTAJE

III.2.1 DEDUCCION ANALITICA



Vr: Voltaje de salida del Regulador

$$\alpha r = \frac{r \text{ [k}\Omega\text{]}}{4.7 + 0.47 \text{ [k}\Omega\text{]}}$$

$$r = 0.47 \text{ k}\Omega \rightarrow 5.17 \text{ k}\Omega$$

$$\alpha r = 0.09 \rightarrow 1$$

$$\alpha r V_r = - \frac{r_{12} + X_{k4}}{r_{14} + r_{15}} (V_{ref} - V_t)$$

$$V_r = - \frac{r_{12} + 1/k4s}{\alpha r (r_{14} + r_{15})} (- V_t)$$

Vref es invariante con s

$$V_r = - \frac{r_{12}k4s + 1}{\alpha r (r_{14} + r_{15})k4 \cdot s} (- V_t)$$

$$\frac{V_r}{-V_t} = \frac{1 + T_n \cdot s}{\alpha r \cdot T_r \cdot s}$$

$$T_n = r_{12} \cdot k4 = 0.726 \text{ seg}$$

$$T_r = (r_{14} + r_{15})k4 = 0.055 \text{ seg}$$

$$\alpha r = 0.09 \rightarrow 1$$

$$\text{Freg (s)} = \frac{V_r}{V_t} = \frac{1 + 0.73 \cdot s}{a_r \cdot 0.055 \cdot s}$$

- Límites impuestos al Regulador

La salida del Regulador puede variar entre -6 V para máxima excitación y 6 V para mínima excitación; siendo -1.3 V para la condición de vacío. Teóricamente, entonces, los límites serían - 4.6 pu y + 5.6 pu; sin embargo, por los ajustes inevitables para la simulación los límites aplicados son - 4 pu y 3.5 pu.

- Límite rápido de Corriente de Campo

Si por algún transitorio grande la corriente de campo llega hasta 2.5 veces la nominal o (610 A) se produce la limitación inmediata y reducción a su valor nominal.

- Límite Voltaje Terminal - Frecuencia

Si la frecuencia disminuye hasta 0.9 veces el valor nominal el Voltaje Terminal es limitado a máximo 1.0 pu, si la frecuencia se mantiene en el valor nominal, V_t puede alcanzar máximo el valor 1.1 pu.

Esta protección impide que se incrementen demasiado las corrientes de magnetización en transformadores y motores en caso de baja frecuencia.

- Límite de Subexcitación

Aproximadamente las potencias Activa P y Reactiva Q se relacionan de la siguiente manera: $Q = (0.35 \cdot P - 0.86)$ en la trayectoria de limitación en subexcitación impuesta, con el propósito de mantener la estabilidad mecánica de la máquina y proteger el devanado del estator.

Los circuitos de la limitación obligan a que $Q \geq (0.35 \cdot P - 0.86)$ puesto que siempre $P \geq 0$ en el caso generador.

La ecuación de la recta que define la limitación de subexcitación se obtiene de la curva de cargabilidad P vs. Q suministrada por el fabricante, Fig 1.4.1.2 .

Por simplificación se considera una recta continua en toda la región, sin tomar en cuenta el cambio de pendiente en $P = 0.2$ pu. Además se obtiene para el caso en que $V_t = V_t$ nominal.

La ecuación de la recta que se cumple es: $Q = aP + b$

- Si $P = 0$, $Q = - 0.86$

Entonces $Q = a(0) + b = - 0.86 \quad \Rightarrow \quad b = - 0.86$

- Si $P = 1$, $Q = - 0.51$

Entonces $Q = a(1) - 0.86 = - 0.51 \quad \Rightarrow \quad a = 0.35$

La ecuación de la recta queda definida como:

$$Q = 0.35 \cdot P - 0.86$$

Finalmente el modelo analítico del Regulador de Voltaje queda:

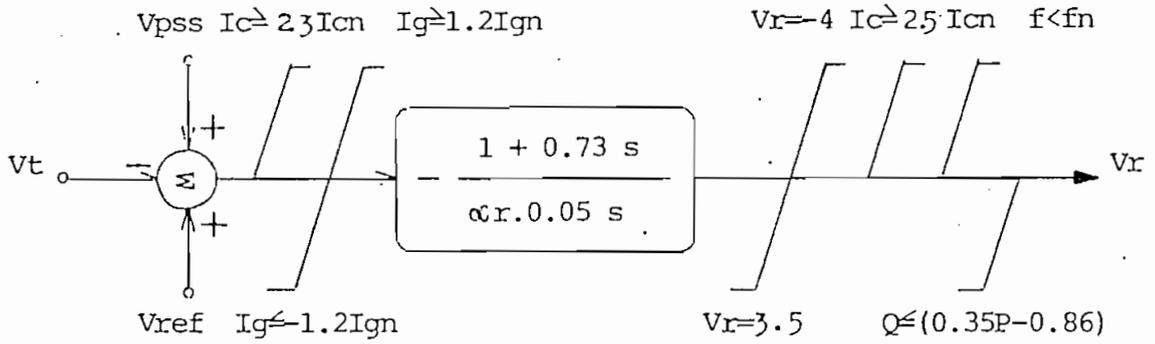


Figura III.2.1

III.2.2 OBTENCION EXPERIMENTAL DE LA FUNCION DE TRANSFERENCIA DEL REGULADOR

La tarjeta A77 de repuesto que contiene al Regulador de Voltaje es configurada tal como en las unidades en servicio.

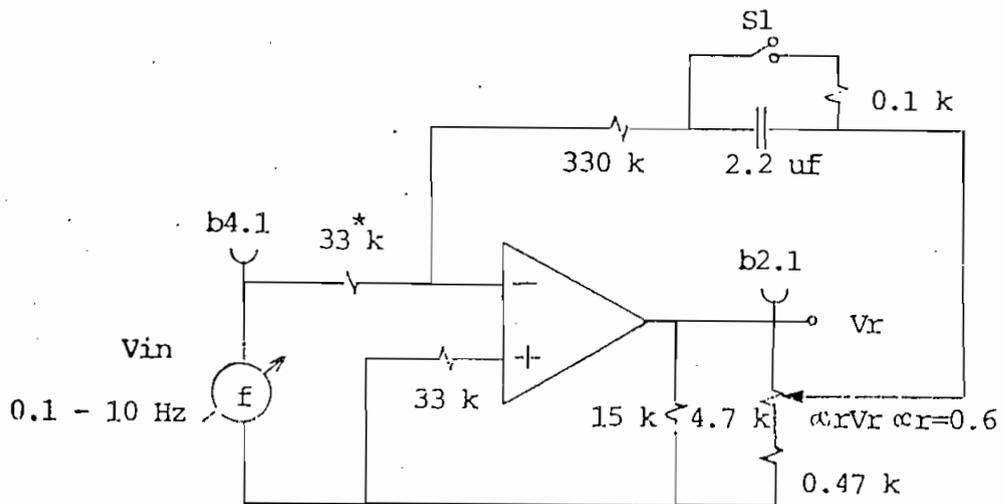


Figura III.2.2

(*) Posteriormente se confirma que este valor es $25 \text{ k}\Omega$.

Con procedimiento similar al utilizado para analizar el filtro de entrada, esto es, inyección de voltaje sinusoidal de amplitud constante y de frecuencia variable entre 0.05 Hz y 10 Hz se registran V_{in} y V_r .

Antes de cada registro se descarga el condensador de $2.2 \text{ }\mu\text{F}$ a través del interruptor S_1 y de la resistencia de $0.1 \text{ k}\Omega$.

En la figura III.2.3 se indica como referencia la sección del registro correspondiente a 0.5 Hz y 0.6 Hz .

Velocidad del papel: $100 \text{ cm/min} = 16.6 \text{ mm/seg}$.

1) Voltaje de entrada (b4.1)

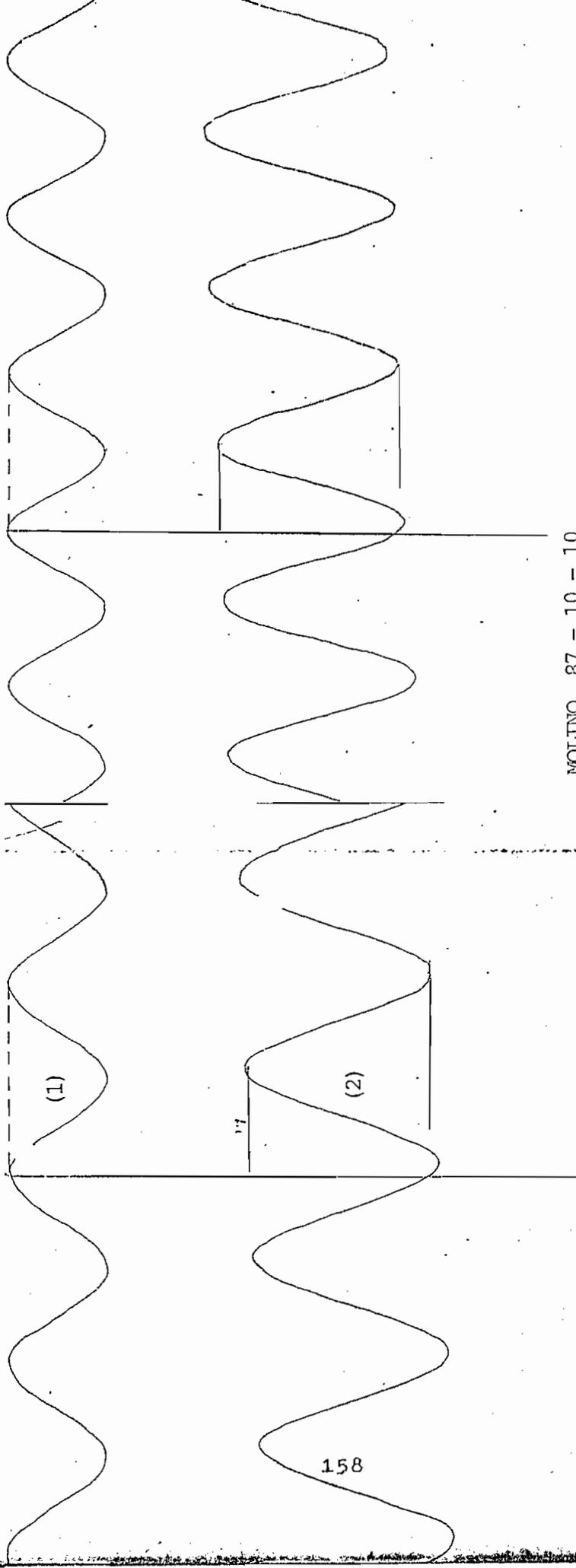
2) Voltaje de salida (b2.1)

A partir de los oscilogramas y aplicando las mismas relaciones establecidas en III.1.2 se obtiene el siguiente cuadro de valores y cálculos; del cual se utilizaron F , G_{dB} y $\delta\theta$ para construir las figuras 2.2.4 y 2.2.5 .

A_i (Amplitud p-p de la entrada)	=	0.085 V
E_i (Escala de A_i)	=	0.005 V/mm
E_o (Escala de A_o , Amplitud p-p de salida)	=	0.05 V/mm

1 seg

1 seg



MOLINO, 87 - 10 - 10

OSCILOGRAMA PARA DETERMINAR LA FUNCION DE TRANSFERENCIA
DEL REGULADOR DE VOLTAJE

Frecuencias = 0.5 Hz Y 0.6 Hz

Figura III.2.3

CUADRO DE VALORES DE OSCILOGRAMAS PARA F(s) DEL REGULADOR

Velocidad del papel	Voltaje de Entrada		V o l t a j e d e S a l i d a			
	v	T	F	Ao	GdB	δt
[mm/seg]	[mm]	[Hz]	[mm]	[dB]	[mm]	[°]
250/60	84.0	0.05	112.0	36	59.0	-253
	35.0	0.12	54.0	30	23.0	-237
	20.0	0.21	41.5	28	12.0	-216
	14.0	0.30	36.0	27	8.0	-206
	10.0	0.42	32.0	26	5.5	-205
1000/60	33.5	0.50	31.0	25	19.0	-204
	27.0	0.62	30.5	25	15.0	-200
	24.0	0.69	30.5	25	13.0	-199
	20.0	0.83	30.0	25	11.0	-198
	19.0	0.88	30.0	25	10.0	-189
2500/60	17.0	0.98	30.0	25	8.5	-185
	20.0	2.08	30.0	25	10.0	-180
	5000/60	28.0	2.98	30.0	25	14.0
100	20.0	4.17	30.0	25	10.0	-180
	16.0	5.21	30.0	25	8.0	-180
	17.0	5.88	30.0	25	8.5	-180
250	35.0	7.14	30.0	25	17.5	-180
	31.0	8.06	30.0	25	15.5	-180
	28.0	8.93	30.0	25	14.0	-180
	25.0	10.00	30.0	25	12.5	-180

III.3 OBTENCION DE LA FUNCION DE TRANSFERENCIA DE LA EXCITACION A RECTIFICADORES CONTROLADOS

Para este caso, ante la práctica imposibilidad de realizar una deducción matemática a partir de los circuitos electrónicos se procederá a la inversa de los casos anteriores. Experimentalmente se obtendrá la función de transferencia V_c / V_r con la máquina en sincronismo, y de los gráficos respectivos se deducirá la relación matemática que los describa aproximadamente.

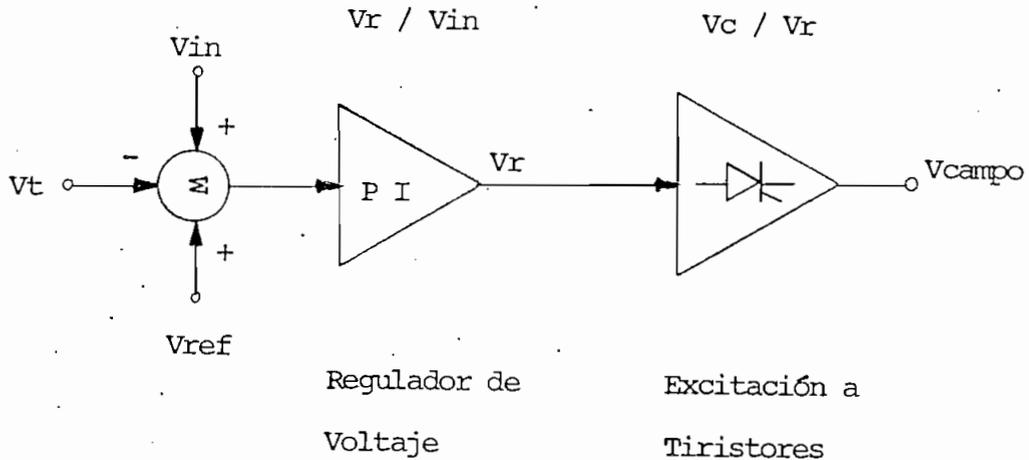


Figura III.3.1

Para obtener la respuesta de frecuencia del sistema representado en la figura III.3.1 se introduce una perturbación de amplitud constante y frecuencia variable en el sumador de señales a la entrada del Regulador de Voltaje. Para cada valor de frecuencia entre 0.05 Hz y 10.0 Hz se registra V_{in} , V_r , V_c y adicionalmente,

como referencia, V_t y P .

La oscilación causada en el voltaje terminal no debe ser mayor a 1 % .

De los oscilogramas se obtiene $V_c/V_{in}(s)$ y $V_r/V_{in}(s)$ de donde se puede calcular $V_c/V_r(s)$ puesto que :

$$\frac{V_c(s)}{V_r(s)} = \frac{V_c/V_{in}(s)}{V_r/V_{in}(s)}$$

ó, en las unidades correspondientes:

Ec. III.3.1

$$\left\{ \frac{V_c}{V_r}(s) \right\}_{dB} = \left\{ \frac{V_c}{V_{in}}(s) \right\}_{dB} - \left\{ \frac{V_r}{V_{in}}(s) \right\}_{dB}$$

Ec. III.3.2

$$\frac{V_c}{V_r}(s) = \frac{V_c}{V_{in}}(s) - \frac{V_r}{V_{in}}(s)$$

En la figura III.3.2 se muestra la sección correspondiente a 2.2 Hz y 2.4 Hz del oscilograma respectivo tomado de la Unidad N° 5 .

Condiciones de Operación:

$P = 60$ MW

$Q = 12$ MVAR

$V_t = 14.3$ kV

$V_c = 150$ V

$I_c = 850$ A

$V_{pss} = 0$ La señal de estabilización de Potencia Activa es desconectada.

Velocidad del papel = 100 cm/min

- | | |
|---|---------------------|
| 1) V_{in} : Voltaje de prueba de entrada. | Escala: 0.049 V/mm |
| 2) V_r : Voltaje del Regulador. | Escala: 0.140 V/mm |
| 3) V_t : Voltaje Terminal del generador | Escala: 0.228 kV/mm |
| 4) V_c : Voltaje de Campo | Escala: 7.320 V/mm |
| 5) P : Potencia Activa | Escala: 14.23 MW/mm |

A continuación se detalla los valores obtenidos de los oscilogramas y los cálculos respectivos; aplicando las relaciones establecidas en III.1.2 y Ecs. III.3.1 y III.3.2 .

Los valores de F , GdB y $\delta\theta$ sirvieron para construir los diagramas de las figuras 2.3.1 y 2.3.2 .

A_i (Amplitud p-p de la entrada)	= 1.52 V
E_i (Escala de A_i)	= 0.049 V/mm
E_{or} (Escala de V_r)	= 0.146 V/mm
E_{oc} (Escala de V_c)	= 0.146 V/mm

MOLINO, 87 - 05 - 29

OSCILOGRAMA PARA DETERMINAR LA FUNCION DE TRANSFERENCIA DEL EXCITADOR.

Frecuencia = 2.2 y 2.4 Hz

Vpss = 0

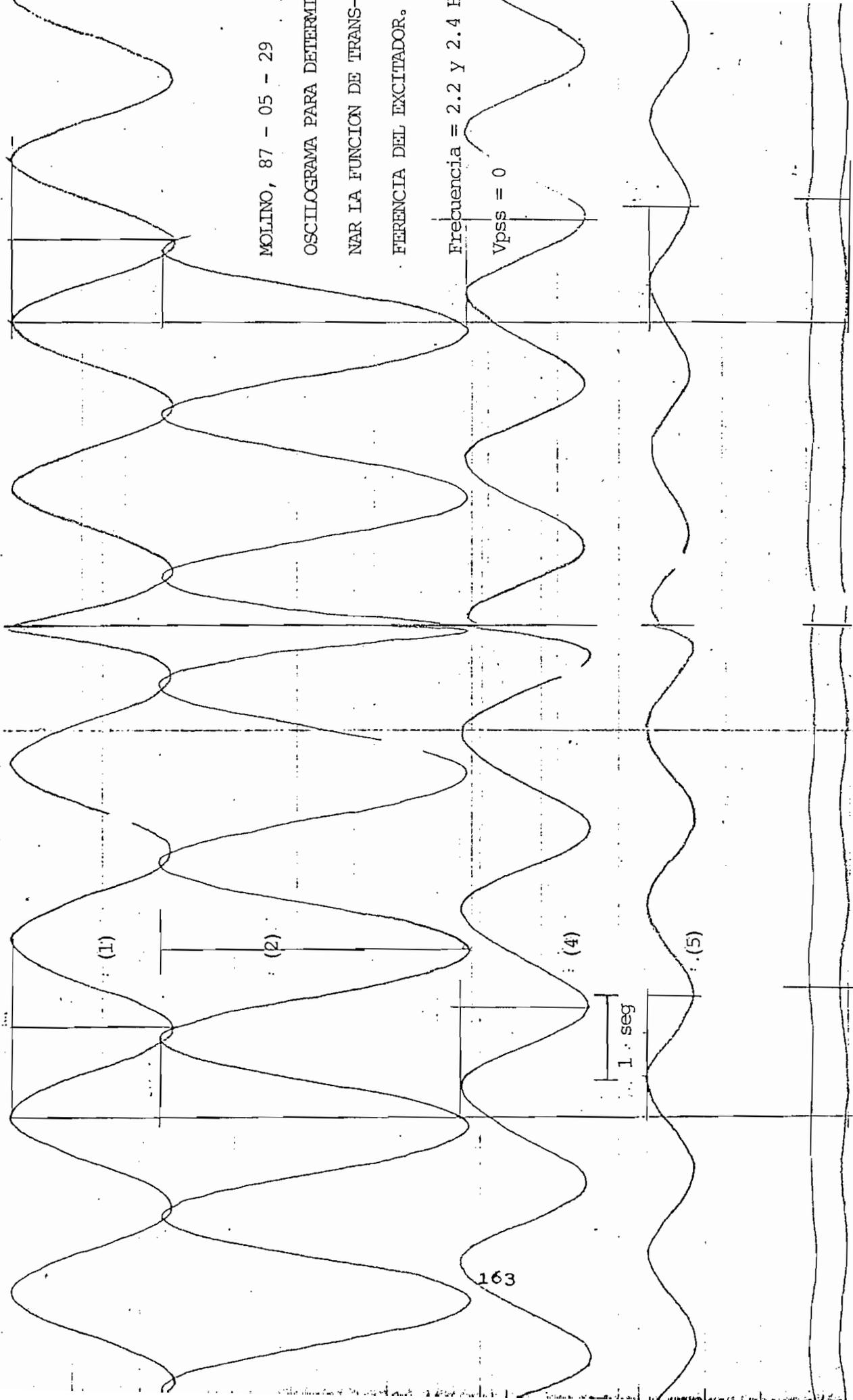


Figura III.3.2

CUADRO DE VALORES DE OSCILOGRAMAS PARA F(s) DEL EXCITADOR

Velocidad del papel	Voltaje de Entrada		Voltaje de Salida				Función de Transfe - rencia
	v	T	Ao	GdB	δt	$\delta \theta$	
[mm/seg]	[mm]	[Hz]	[mm]	[dB]	[mm]	[°]	
250/60	74.00	0.06	0.65	29.74	7.2	35	Vc/Vin
			0.49	-7.64	-29.0	-141	Vr/Vin
				37.40		176	Vc/Vr
	55.00	0.08	0.75	30.85	5.5	36	Vc/Vin
			0.45	-7.78	-20.0	-130	Vr/Vin
				38.60		166	Vc/Vr
	32.50	0.13	1.05	33.77	4.5	49	Vc/Vin
			0.80	-2.78	-11.0	-121	Vr/Vin
				36.60		171	Vc/Vr
	19.50	0.21	1.55	37.15	2.5	46	Vc/Vin
			1.25	1.10	-6.0	-110	Vr/Vin
				36.10		156	Vc/Vr
13.10	0.32	2.00	39.23	2.5	68	Vc/Vin	
		1.70	3.62	-4.0	-109	Vr/Vin	
			35.60		156	Vc/Vr	
1000/60	40.50	0.41	2.60	41.78	5.1	45	Vc/Vin
			2.05	5.53	-12.5	-111	Vr/Vin
				36.30		156	Vc/Vr
34.00	0.49	2.85	42.44	3.0	31	Vc/Vin	
		2.40	6.76	-10.0	-111	Vr/Vin	
			35.70		142	Vc/Vr	
1000/60	28.50	0.58	3.10	43.31	1.0	12	Vc/Vin
			2.75	8.08	-9.5	-120	Vr/Vin
				35.20		132	Vc/Vr
24.00	0.69	3.25	43.70	1.0	15	Vc/Vin	
		3.10	9.10	-8.0	-120	Vr/Vin	
			34.60		135	Vc/Vr	
21.50	0.78	3.35	44.00	0.2	3	Vc/Vin	
		3.40	9.90	-7.0	-117	Vr/Vin	
			34.10		120	Vc/Vr	
2500/60	48.00	0.87	3.35	44.00	0.0	0	Vc/Vin
			3.15	9.30	-16.0	-120	Vr/Vin
				34.70		120	Vc/Vr
34.00	1.23	3.30	43.90	-1.5	-15	Vc/Vin	
		4.55	12.50	-11.7	-123	Vr/Vin	
			31.40		108	Vc/Vr	
26.50	1.57	2.95	42.90	-2.2	-29	Vc/Vin	
		5.00	13.30	-10.1	-137	Vr/Vin	

				29.60			107	Vc/Vr
			3.00	43.00	- 1.5	- 23		Vc/Vin
	23.20	1.80	5.60	14.30	- 8.5	-131		Vr/Vin
				28.70		108		Vc/Vr
			2.90	42.70	- 1.6	- 27		Vc/Vin
	21.00	1.98	5.90	14.70	- 8.0	-137		Vr/Vin
				28.00		109		Vc/Vr
			2.70	42.00	- 6.0	- 56		Vc/Vin
5000/60	38.00	2.20	6.10	14.90	-16.5	-156		Vr/Vin
				27.10		105		Vc/Vr
			2.50	41.30	- 5.5	- 56		Vc/Vin
	35.00	2.38	6.05	14.80	-15.5	-159		Vr/Vin
				26.50		102		Vc/Vr
			2.30	40.70	- 5.2	- 57		Vc/Vin
	32.50	2.56	6.00	14.90	-14.5	-160		Vr/Vin
				25.80		103		Vc/Vr
			2.20	40.30	- 4.5	- 53		Vc/Vin
	30.50	2.73	5.95	14.80	-13.5	-159		Vr/Vin
				25.50		106		Vc/Vr
			2.05	39.70	- 4.9	- 61		Vc/Vin
	28.90	2.88	5.95	14.80	-12.9	-160		Vr/Vin
				24.90		99		Vc/Vr
			1.90	39.10	- 4.5	- 61		Vc/Vin
	26.50	3.14	5.95	14.80	-12.0	-163		Vr/Vin
				24.30		101		Vc/Vr
			1.60	37.40	- 3.5	- 60		Vc/Vin
	21.00	3.97	6.00	14.70	- 9.5	-162		Vr/Vin
				22.70		102		Vc/Vr
			1.25	35.30	- 4.5	- 81		Vc/Vin
10	20.00	5.00	5.95	14.60	-10.0	-180		Vr/Vin
				20.70		99		Vc/Vr
			1.00	33.30	- 3.0	- 65		Vc/Vin
	16.50	6.06	5.75	14.40	- 7.5	-163		Vr/Vin
				18.90		98		Vc/Vr
			0.82	31.60	- 9.0	- 91		Vc/Vin
25	35.50	7.04	5.60	14.10	-17.1	-173		Vr/Vin
				17.50		82		Vc/Vr
			0.75	31.00	- 8.5	- 96		Vc/Vin
	31.70	7.89	5.50	14.10	-16.0	-181		Vr/Vin
				16.90		85		Vc/Vr
			0.65	29.70	- 6.5	- 83		Vc/Vin
	28.00	8.93	5.45	14.00	-13.5	-173		Vr/Vin
				15.70		90		Vc/Vr
			0.60	29.00	- 6.5	- 90		Vc/Vin
	26.00	9.92	5.40	13.90	-12.5	-173		Vr/Vin
				15.10		83		Vc/Vr

III.3.1 FUNCION DE TRANSFERENCIA DEL EXCITADOR EN pu

$$V_c \text{ base} = 105 \text{ V}$$

$$|V_r \text{ base}| = 1.3 \text{ V}$$

$$F_{ex}(s) = - \frac{K_e}{1 + T_e \cdot s} = - \frac{77}{1 + 0.27s}$$

$$F_{ex}(s) = - \frac{V_c}{V_r} (s)$$

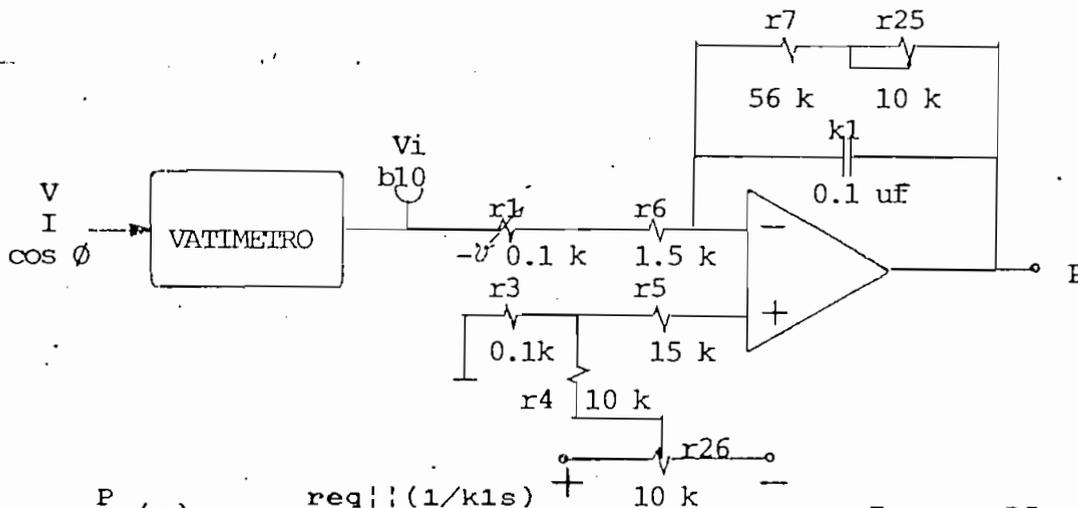
$$F_{ex}(s) \text{ pu.} = - \frac{V_c/V_c(\text{base})}{V_r/V_r(\text{base})} (s) = 0.013 - \frac{V_c}{V_r} (s)$$

$$F_{ex}(s) = - \frac{1}{1 + 0.27 \cdot s}$$

III.4 FUNCION DE TRANSFERENCIA DEL ESTABILIZADOR DE POTENCIA

III.4.1 DEDUCCIONES ANALITICAS

III.4.1.1 FUNCION DE TRANSFERENCIA DEL TRANSDUCTOR - VATIMETRO



$$\frac{P}{V_i}(s) = - \frac{req \parallel (1/k1s)}{rin} \quad \begin{aligned} req &= r7 + n \cdot r25 \\ rin &= n \cdot r1 + r6, \quad n = 0 \rightarrow 1 \end{aligned}$$

$$\frac{P}{V_i}(s) = - \frac{(req/k1s) / (req + 1/k1s)}{rin}$$

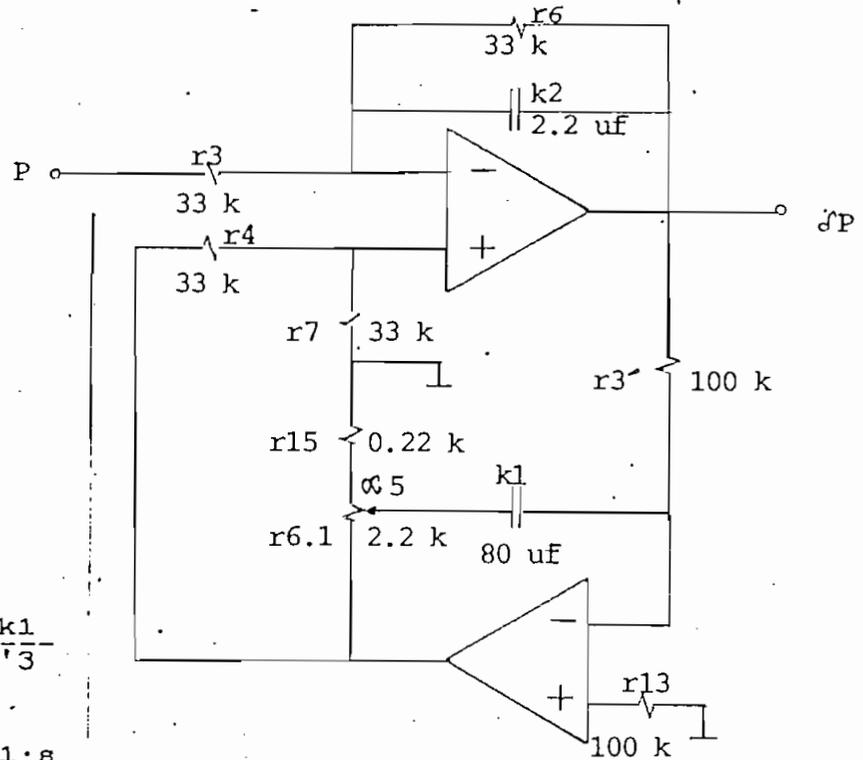
$$\frac{P}{V_i}(s) = - \frac{req}{rin} \cdot \frac{1}{reqk1s + 1}$$

$$\frac{P}{V_i}(s) = - \frac{Kh}{1 + Th \cdot s}$$

$$Kh = req/rin : 35 \rightarrow 44$$

$$Th = reqk1 : 5.6 \rightarrow 6.6 \text{ msec}$$

III.4.1.2 FUNCION DE TRANSFERENCIA DEL FILTRO DE ENTRADA



$$\frac{\alpha_5 \cdot V_{r4}}{\delta P}(s) = - \frac{Xk1}{r'3}$$

$$- \frac{V_{r4}}{\delta P}(s) = - \frac{1/k1 \cdot s}{\alpha_5 \cdot r'3}$$

$$- \frac{V_{r4}}{\delta P}(s) = - \frac{1}{\alpha_5 \cdot k1 \cdot r'3 \cdot s}$$

$$- \frac{V_{r4}}{\delta P}(s) = - \frac{1}{\alpha_5 \cdot T5 \cdot s} \quad [1]$$

$$T5 = r'3 \cdot k1 = 8 \text{ seg}$$

$$\alpha_5 = 0.1 \rightarrow 1$$

$$\delta P(s) = - \frac{r6 \parallel Xk2}{r3} (P - V_{r4})(s)$$

$$\delta P(s) = - \frac{(r6/k2s)/(r6+1/k2s)}{r3} (P(s) + \frac{\delta P(s)}{\alpha_5 \cdot T5 \cdot s}) \quad \text{De [1]}$$

$$\delta P(s) = - \frac{r6/(r6k2s + 1)}{r3} (P(s) + \frac{\delta P(s)}{\alpha5 \cdot T5 \cdot s})$$

$$\delta P(s) = - \frac{1}{1 + T4 \cdot s} (P(s) + \frac{\delta P(s)}{\alpha5 \cdot T5 \cdot s}) \quad r6=r3 \quad T4= r6 \cdot k2$$

$$-\delta P(s) + \frac{\delta P(s)}{\alpha5 \cdot T5 \cdot s(1 + T4 \cdot s)} = - \frac{P(s)}{1 + T4 \cdot s}$$

$$\delta P(s) \left[1 + \frac{1}{\alpha5 \cdot T5 \cdot s(1 + T4 \cdot s)} \right] = - \frac{P(s)}{1 + T4 \cdot s}$$

$$-\frac{\delta P}{P}(s) = - \frac{1/(1 + T4 \cdot s)}{1 + 1 / [\alpha5 \cdot T5 \cdot s(1 + T4 \cdot s)]}$$

$$-\frac{\delta P}{P}(s) = - \frac{\alpha5 \cdot T5 \cdot s}{\alpha5 \cdot T5 \cdot s(1 + T4 \cdot s) + 1}$$

$$-\frac{\delta P}{P}(s) = - \frac{\alpha5 \cdot T5 \cdot s}{\alpha5 \cdot T4 \cdot T5 \cdot s^2 + \alpha5 \cdot T5 \cdot s + 1}$$

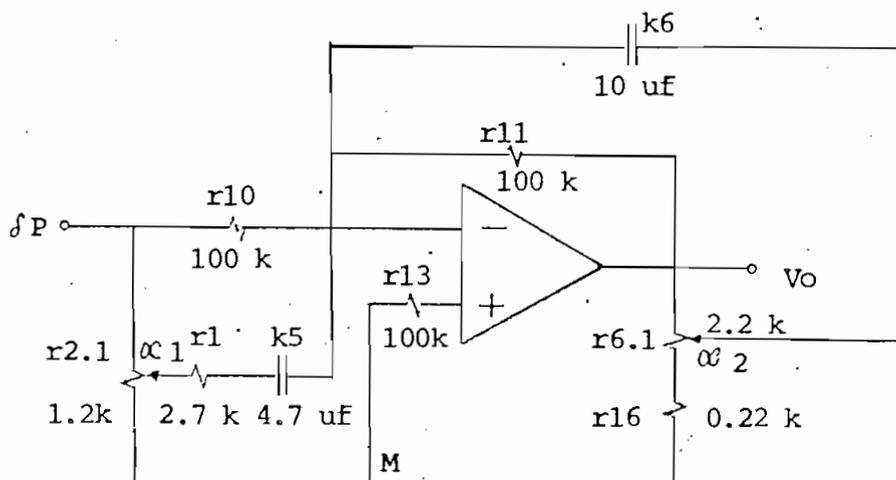
$$T4 = r6 \cdot k2 = 0.0726 \text{ seg} ; T5 = 8 \text{ seg} , \alpha5: 0.1 \rightarrow 1$$

$$-\frac{\delta P}{P}(s) = - \frac{8 \cdot \alpha5 \cdot s}{0.58 \cdot \alpha5 \cdot s^2 + 8 \cdot \alpha5 \cdot s + 1}$$

Considerando los términos más significativos queda:

$$-\frac{\delta P}{P}(s) \approx - \frac{8 \cdot \alpha5 \cdot s}{1 + 8 \cdot \alpha5 \cdot s}$$

III.4.1.3 FUNCION DE TRANSFERENCIA DE LA RED DE COMPENSACION



$$\frac{V_o}{\delta P}(s) = - \frac{r_{11} \parallel (Xk6 / \alpha_2)}{r_{10}} - \alpha_1 \frac{r_{11} \parallel (Xk6 / \alpha_2)}{r_1 + Xk5}$$

$$\frac{V_o}{\delta P}(s) = - \left[\frac{(r_{11}/\alpha_2 k_6 s) / (r_{11} + 1/\alpha_2 k_6 s)}{r_{10}} + \alpha_1 \frac{(r_{11}/\alpha_2 k_6 s) / (r_{11} + 1/\alpha_2 k_6 s)}{r_1 + 1/k_5 s} \right]$$

$$\frac{V_o}{\delta P}(s) = - \left[\frac{r_{11} / (\alpha_2 r_{11} k_6 s)}{r_{10}} + \alpha_1 \frac{r_{11} / (\alpha_2 r_{11} k_6 s)}{(r_1 k_5 s + 1) / k_5 s} \right]$$

$$\frac{V_o}{\delta P}(s) = - \left[\frac{r_{11}}{r_{10} (\alpha_2 r_{11} k_6 s)} + \frac{\alpha_1 r_{11} k_5 s}{(\alpha_2 r_{11} k_6 s + 1) (r_1 k_5 s + 1)} \right]$$

$$\frac{V_o}{\delta P}(s) = - \left[\frac{r_1 k_5 s + 1 + \alpha_1 r_{11} k_5 s}{(\alpha_2 r_{11} k_6 s + 1) (r_1 k_5 s + 1)} \right] \quad r_{10} = r_{11}$$

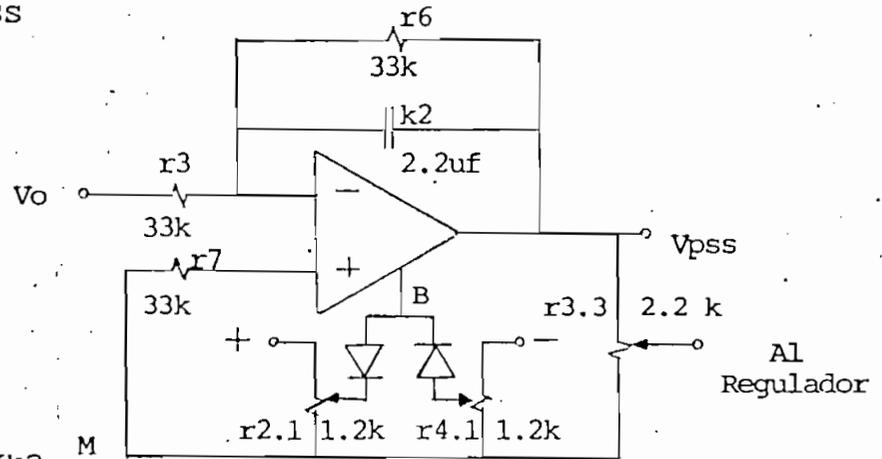
$$\frac{V_o}{\delta P}(s) = - \frac{1 + T_3 \cdot s + \alpha_1 \cdot T_1 \cdot s}{(1 + T_3 \cdot s) \cdot (1 + \alpha_2 \cdot T_2 \cdot s)}$$

$T_1 = r_{11} k_5 = 0.47 \text{ seg}$; $T_2 = r_{11} k_6 = 1 \text{ seg}$; $T_3 = r_1 k_5 = 0.0127 \text{ seg}$

$\alpha_1: 0 \rightarrow 1$; $\alpha_2: 0.1 \rightarrow 1$

$$\frac{V_o}{\delta P}(s) = - \frac{1 + (0.0127 + \alpha_1 \cdot 0.47) \cdot s}{(1 + 0.0127 \cdot s) \cdot (1 + \alpha_2 \cdot s)}$$

III.4.1.4 FUNCION DE TRANSFERENCIA DEL AMPLIFICADOR DE SALIDA DEL PSS



$$\frac{V_{pss}}{V_o}(s) = - \frac{r6 \parallel k2}{r1}$$

$$\frac{V_{pss}}{V_o}(s) = - \frac{(r6/k2s) / (r6 + 1/k2s)}{r1}$$

$$\frac{V_{pss}}{V_o}(s) = - \frac{r6 / (r6k2s + 1)}{r1}$$

$$\frac{V_{pss}}{V_o}(s) = - \frac{1}{1 + r6k2s} \quad r6 = r1$$

$$\frac{V_{pss}}{V_o}(s) = - \frac{1}{1 + T4 \cdot s}$$

$$T4 = r6k2 = 0.0726 \text{ seg}$$

$$\frac{V_{pss}}{V_o}(s) = - \frac{1}{1 + 0.0726 \cdot s}$$

En el amplificador operacional es posible limitar la salida V_{pss} , mediante la fijación de voltajes entre ± 10 V en las entradas $\pm L$; lo cual corresponde a una limitación de ± 1 pu para la señal de estabilización.

III.4.2 OBTENCION EXPERIMENTAL DE LA FUNCION DE TRANSFERENCIA DEL ESTABILIZADOR DE POTENCIA

En el generador N^o 2 en reposo, se somete a prueba los circuitos involucrados en el PSS .

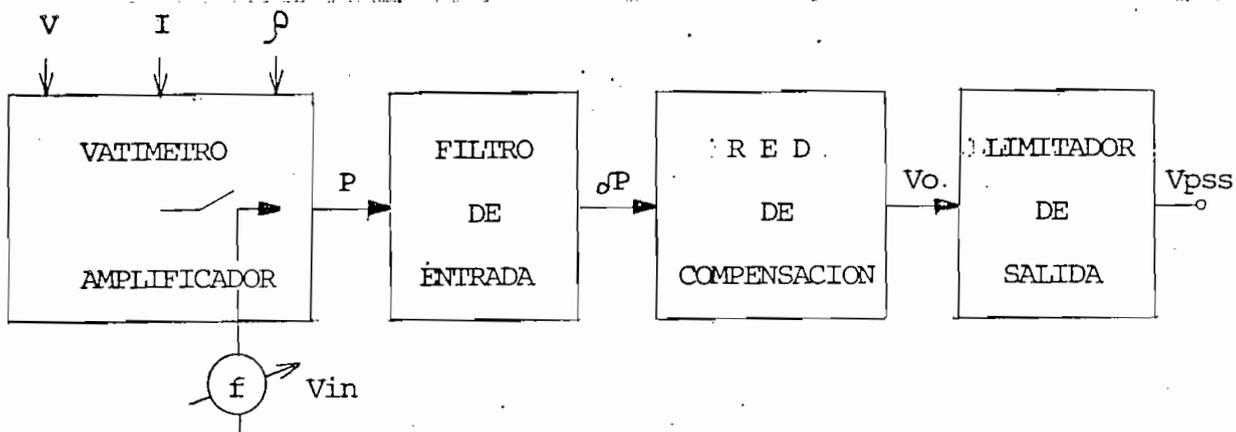


Figura III.4.2.1

En la posición indicada en la figura III.4.2.1 , luego del transductor de Potencia, se introduce el voltaje de prueba de entrada, de amplitud constante y frecuencia variable entre 0.1 Hz y 10 Hz .

A un oscilógrafo multicanal se ingresan las señales: V_{in} , P , δP , V_o , y V_{pss} . Posteriormente se miden las relaciones de amplitud y fase respecto a V_{in} .

En la figura III.4.2.2 se indica como referencia la sección del registro correspondiente a 0.8 Hz y 0.9 Hz .

Velocidad del papel: 250 cm/min = 4.17 cm/seg.

- | | |
|--|---------------------|
| 1) Vin: Voltaje de prueba de entrada. | Escala: 0.005 V/mm |
| 2) P: Potencia medida (111 MW → 6 VDC). | Escala: 8.418 MW/mm |
| 3) ΔP: Oscilaciones de potencia filtradas. | Escala: 2.775 MW/mm |
| 4) Vo: Señal compensada | Escala: 0.333 V/mm |
| 5) Vpss: Salida del Estabilizador hacia
el Regulador de Voltaje . | Escala: 0.333 V/mm |

A continuación se tabulan como referencia los valores obtenidos de los oscilogramas y los cálculos respectivos para la construcción de los diagramas de módulo y fase de la función de transferencia del Estabilizador, aplicando las relaciones establecidas en III.1.2.

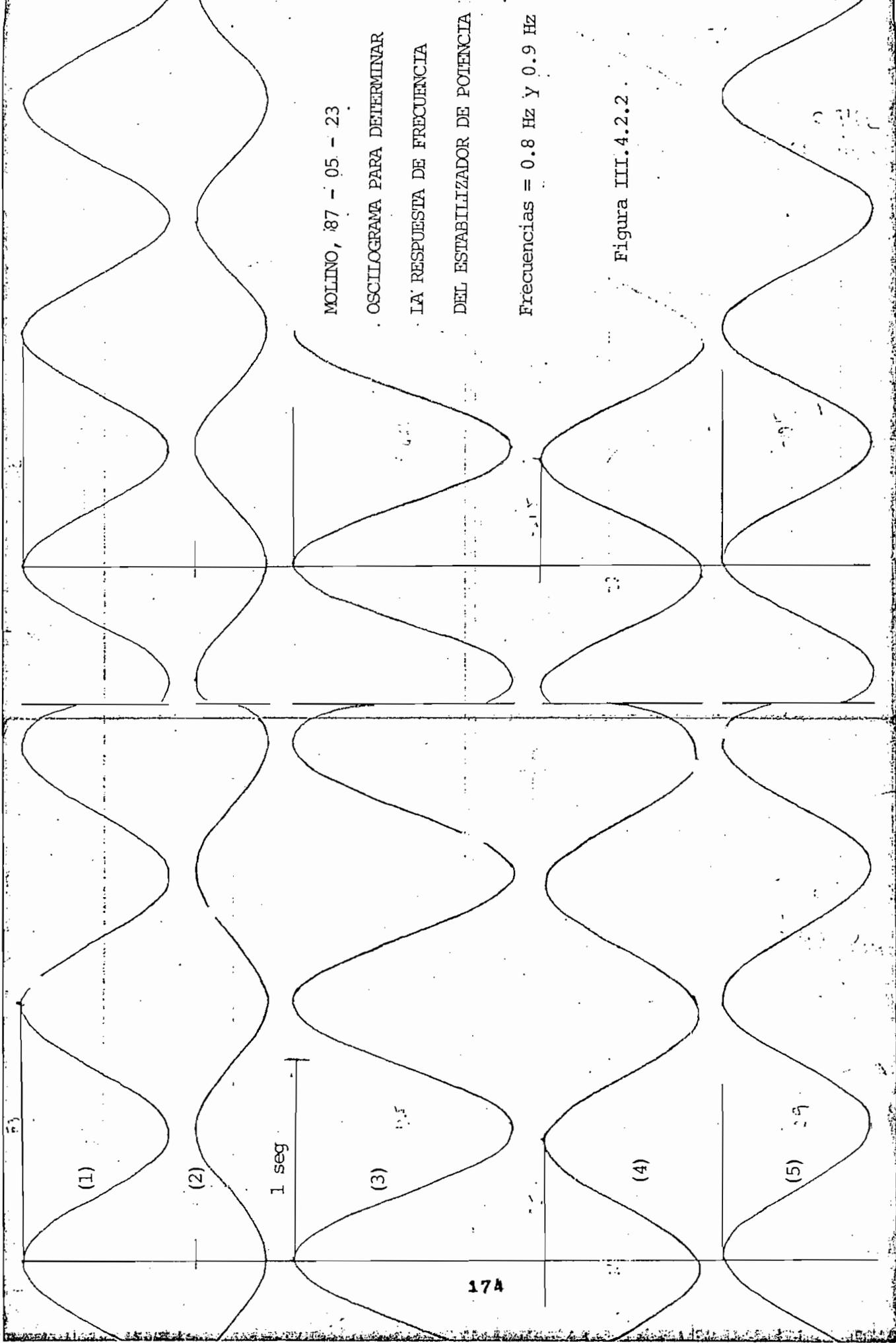
Los valores de F, GdB y δθ sirvieron para construir los diagramas de las figuras 2.4.5 y 2.4.6.

- | | |
|----------------------------------|--------------|
| Ai: (Amplitud p-p de la entrada) | = 0.143 V |
| Ei: (Escala de Ai, Vin) | = 0.005 V/mm |
| Eo: (Escala de Ao, Vpss) | = 0.333 V/mm |

MOLINO, 87 - 05 - 23
OSCILOGRAMA PARA DETERMINAR
LA RESPUESTA DE FRECUENCIA
DEL ESTABILIZADOR DE POTENCIA

Frecuencias = 0.8 Hz y 0.9 Hz

Figura III.4.2.2



CUADRO DE VALORES DE OSCILOGRAMAS PARA F(s) DEL ESTABILIZADOR

Velocidad del papel	Voltaje de Entrada		V o l t a j e d e S a l i d a			
	T	F	Ao	GdB	δt	δθ
v	[mm]	[Hz]	[mm]	[dB]	[mm]	[°]
250/60	71.5	0.06	18.0	32.5	4.0	20.1
	59.0	0.07	20.0	33.4	3.0	15.1
	33.0	0.13	19.5	33.2	12.0	12.0
1000/60	75.0	0.22	21.5	34.0	2.0	9.6
	54.0	0.31	23.0	34.6	1.0	6.7
	41.0	0.41	25.0	35.3	0.5	4.4
2500/60	84.0	0.50	26.0	35.7	0.5	2.1
	70.0	0.60	27.0	36.0	0.0	0.0
	60.5	0.69	28.5	36.5	- 0.5	- 3.0
	53.0	0.79	29.0	36.6	- 1.0	- 6.8
	48.0	0.87	29.5	36.8	- 1.5	- 11.3
	43.0	0.97	29.5	36.8	- 2.0	- 16.7
5000/60	58.0	1.44	29.0	36.6	- 5.5	- 37.1
	51.0	1.63	28.5	36.5	- 6.0	- 42.4
	46.0	1.81	28.0	36.3	- 6.0	- 47.0
	42.0	1.98	26.0	35.7	- 6.0	- 51.4
	38.0	2.19	25.0	35.3	- 6.0	- 56.8
100	42.0	2.40	24.5	35.2	- 6.5	- 55.7
	40.0	2.50	23.5	34.8	- 7.5	- 67.5
	36.5	2.70	22.0	34.2	- 7.0	- 69.0

	34.5	2.90	21.0	33.8	- 7.5	- 78.3
250	61.0	4.10	15.5	31.2	-16.5	- 97.4
	50.0	5.00	13.0	29.7	-14.0	-100.8
1000	143.0	6.99	8.0	25.4	-55.0	-138.5
250	25.5	9.80	4.5	20.4	-11.0	-155.3

III.5 EQUIPO UTILIZADO EN LAS PRUEBAS DE CAMPO

- 1.- Oscilógrafo de papel fotosensible
Marca: SIEMENS
Modelo: OSCILLOFIL M07645 16 Canales
- 2.- Adaptador Voltaje-Corriente para OSCILLOFIL
Marca: SIEMENS
Modelo: M07632-A 6 canales
- 3.- Generador de Funciones 0.01 Hz - 1 MHz
Marca: WAVETEK
Modelo: 110
- 4.- Multímetro Digital
Marca: Fluke
Modelo: 8062A
- 5.- Multímetro Digital
Marca: SIEMENS
Modelo: VMG 3 EFF
- 6.- Osciloscopio 60 MHz
Marca: Tektronix
Modelo: 2213
- 7.- Caja de pilas 0 -> ± 15 V ajustables
Marca: SIEMENS
Código: 7F 000 006
- 8.- Transformador de Aislamiento 300 VA - 220/220
Marca: SIEMENS
Código: 7N 200 010

9.- Tarjeta extensora de adaptación 48 polos

Marca: SIEMENS

Código: 7P 850 030 Para impresos SIMATIC N y TRANSIDYN B

10.- Atenuador Universal doble 500 V / 10 A

Marca: SIEMENS

Código: 6R 302

11.- Extensión cuádruple en caja de acero para alimentación

Código: 6Z 403 348

A P E N D I C E I V

P R O G R A M A E N B A S I C D E S I M U L A C I O N

IV.1 DIAGRAMA DE FLUJO

El programa está desarrollado a partir del programa INICIO y del módulo ST1 para sistemas de excitación estáticos de la referencia 8 . Tiene prácticamente la misma estructura concebida para esos programas, con las siguientes diferencias:

- Se han integrado el programa INICIO con el módulo ST1 en un solo conjunto.
- Se han insertado las ecuaciones del Estabilizador de Potencia entre las del Sistema de Excitación y existe la opción de utilizarlas o no.
- Se han utilizado las ecuaciones propias del Regulador de Voltaje y del Excitador del sistema Thyripol - Siemens; introduciendo los valores de los parámetros respectivos en una instrucción.
- Se ha incorporado la perturbación necesaria para obtener la respuesta transitoria del Sistema de Excitación.
- Se calcula la Potencia Activa.
- Y, no se ha utilizado la subrutina de gráficos en Basic de ese trabajo, para aprovechar más bien las facilidades a este respecto de la hoja electrónica del programa LOTUS.

Con referencia al Diagrama de Flujo presentado a continua-

ción, el programa TESISFD.BAS consta de los siguientes bloques:

- 1.- Rutina de ingreso de parámetros del Generador y Sistema desde operador o desde el archivo GENERAD.DAT .
- 2.- Rutina de ingreso de parámetros del Estabilizador desde operador o desde el archivo PSS.DAT .
- 3.- Ingreso de condiciones de operación: factor de potencia, potencia aparente y constante de inercia equivalente .
- 4.- Selección del tipo de perturbación a simularse: prueba de respuesta transitoria de la excitación, variación brusca de la carga o estado estable.
- 5.- Ingreso de condiciones de simulación: tiempo de simulación, incremento de tiempo para cada paso de integración, instante de conexión de la perturbación y magnitud relativa de la perturbación.
- 6.- Escritura opcional de los parámetros de los sistemas y escritura obligatoria de las condiciones iniciales calculadas así como de las condiciones de operación y de simulación.
- 7.- Subrutina de cálculo de condiciones iniciales del Generador y del Sistema de Excitación.
- 8.- Subrutina con el método numérico de Runge & Kutta de cuarto orden para la integración de las ecuaciones diferenciales del generador y del sistema de control.
- 9.- Ecuaciones diferenciales del Generador sincrónico.
- 10.- Ecuaciones diferenciales y limitadores del Sistema de Excitación: Regulador de Voltaje, PSS y Excitador.

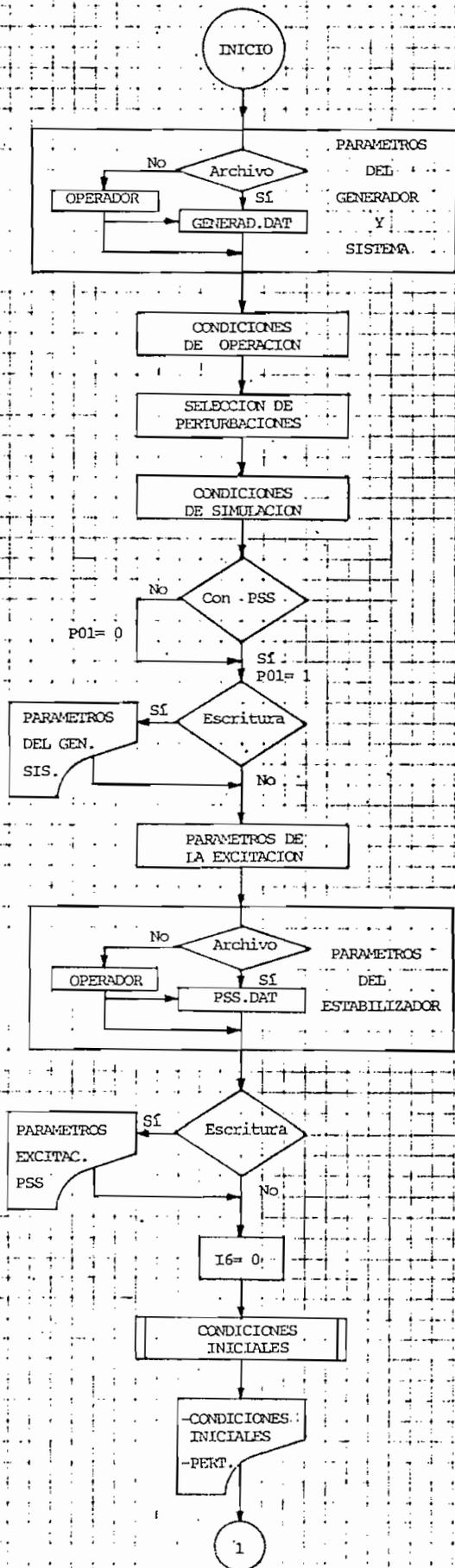
11.- Rutinas de cálculos de las variables del Generador y del Sistema de Excitación.

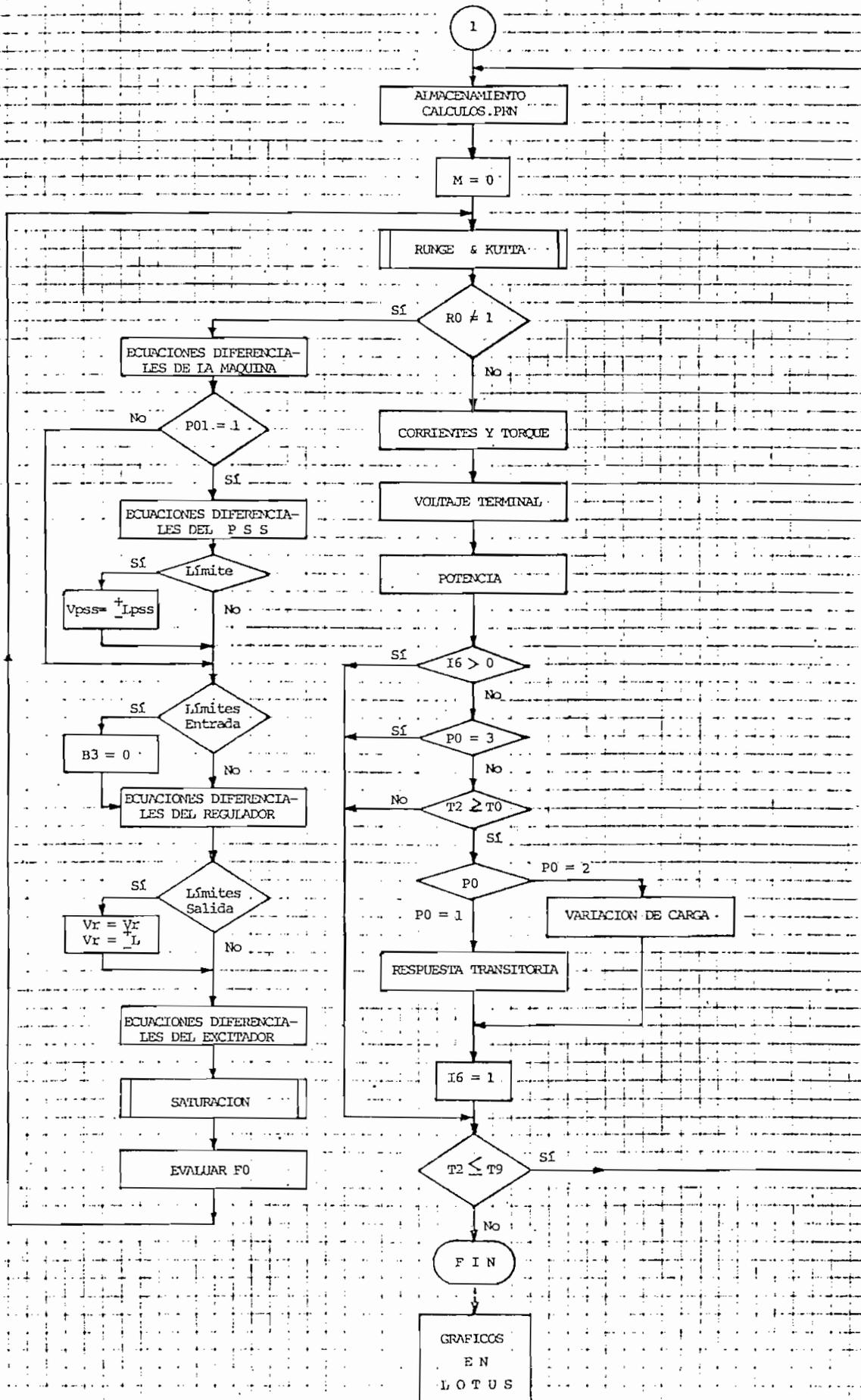
12.- Almacenamiento de resultados cada paso de integración en el archivo secuencial CALCULOS.PRN : Voltaje de Campo, Voltaje Terminal, Potencia Activa, y Salida del Estabilizador. En realidad puede almacenarse cualquier variable del sistema simulado pero se ha optado solamente por las de interés en el análisis para ahorrar en tiempo y espacio de almacenamiento y recuperación de la información.

13.- Condicionales y parámetros de control de ejecución del Programa.

14.- Aparte del Programa en Basic se han elaborado varios Macros sencillos para la importación del archivo de cálculos y la generación rápidas de gráficos en el LOTUS - 123 .

DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA TESISFD.BAS





IV.2 LISTADO DEL PROGRAMA TESISFD.BAS

```

10 PRINT "PROGRAMA PARA EL ESTUDIO DEL PSS DE LOS GENERADORES DE LA CENTRAL MOLINO"
20 PRINT :PRINT "Fernando Dávila S."
30 PRINT:PRINT:PRINT
40 REM INGRESO DE DATOS
50 PRINT "INGRESE LOS PARAMETROS DEL GENERADOR SINCRONICO Y SISTEMA DE POTENCIA"

60 PRINT
70 PRINT "SELECCION PARA EL INGRESO DE DATOS"
80 PRINT "O3=1 ---> INGRESO DE DATOS DESDE EL OPERADOR"
90 PRINT "O3=2 ---> INGRESO DE DATOS DESDE EL ARCHIVO GENERAD.DAT"
100 PRINT
110 INPUT "ESCOJA OPCION: O3= ";O3
120 IF O3=1 OR O3=2 THEN 140
130 GOTO 70
140 IF O3=1 THEN 160
150 GOTO 520
160 CLS
170 PRINT "INGRESO DE DATOS DEL GENERADOR SINCRONICO Y SISTEMA"
180 PRINT "-----"
190 INPUT "RESISTENCIA DE ARMADURA" R4= ";R4

200 INPUT "RESISTENCIA DEL DEVANADO AMORTIGUADOR EJE Q" R1= ";R1
210 INPUT "RESISTENCIA DEL DEVANADO AMORTIGUADOR EJE D" R2= ";R2
220 INPUT "RESISTENCIA DEL DEVANADO DE CAMPO" R3= ";R3
230 INPUT "RESISTENCIA EQUIVALENTE DEL SISTEMA" R5= ";R5
240 INPUT "REACTANCIA DE DISP. DEL DEVANADO DE ARMADURA" Y4= ";Y4
250 INPUT "REACTANCIA DE MAGNETIZACION DEL EJE Q" X1= ";X1
260 INPUT "REACTANCIA DE MAGNETIZACION DEL EJE D" X2= ";X2
270 INPUT "REACTANCIA DE DISP. DEL DEV. AMORTIGUADOR DEL EJE Q" X3= ";X3
280 INPUT "REACTANCIA DE DISP. DEL DEV. AMORTIGUADOR DEL EJE D" X4= ";X4
290 INPUT "REACTANCIA DE DISP. DEL DEVANADO DE CAMPO" X5= ";X5
300 INPUT "REACTANCIA EQUIVALENTE DEL SISTEMA" Y3= ";Y3
310 INPUT "REACTANCIA DEL TRANSFORMADOR" T7= ";T7

320 INPUT "LOS DATOS ESTAN BIEN INGRESADOS (SI O NO): ";B#
330 IF B#="SI" OR B#="S" THEN 350
340 GOTO 160
350 CLS

```

```

360 INPUT "VELOCIDAD INICIAL DEL ROTOR" V1= ";V1
370 INPUT "CONCATENACIONES DE FLUJO MUTUO CRITICO" F9= ";F9
380 PRINT "INGRESO DE COEFICIENTES DE LA CURVA DE VACIO"
390 INPUT "P1= ";P1
400 INPUT "P2= ";P2
410 INPUT "VELOCIDAD ANGULAR ELECTRICA EN rad/seg" V2= ";V2
420 INPUT "VOLTAJE TERMINAL FASE-NEUTRO" V3= ";V3
430 INPUT "LOS DATOS ESTAN BIEN INGRESADOS (SI O NO): ";B$
440 IF B$="SI" OR B$="S" THEN 460
450 GOTO 360
460 CLS
470 REM ESCRITURA DE DATOS EN ARCHIVO
480 OPEN "O",#1,"A:\GENERAD.DAT"
490 WRITE #1,R4,R1,R2,R3,R5,Y4,X1,X2,X3,X4,X5,Y3,T7,V1,F9,P1,P2,V2,V3
500 CLOSE #1
510 GOTO 550
520 OPEN "I",#1,"A:\GENERAD.DAT"
530 INPUT #1, R4,R1,R2,R3,R5,Y4,X1,X2,X3,X4,X5,Y3,T7,V1,F9,P1,P2,V2,V3
540 CLOSE #1
550 CLS
560 PRINT "INGRESE CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO"
570 PRINT "-----"
580 PRINT
590 INPUT "ANGULO DEL FACTOR DE POTENCIA EN radianes" A5= ";A5
600 INPUT "POTENCIA APARENTE MONOFASICA EN por unidad" K= ";K
610 INPUT "CONSTANTE DE INERCIA EQUIVALENTE EN segundos" H= ";H
620 PRINT
630 PRINT "INGRESE PERTURBACIONES"
640 PRINT
650 PRINT "PO= 1 ---> PRUEBA DE RESPUESTA TRANSITORIA"
660 PRINT "PO= 2 ---> VARIACION BRUSCA DE CARGA"
670 PRINT "PO= 3 ---> ESTADO ESTABLE"
680 PRINT
690 INPUT "ESCOJA OPCION PO= ";PO
700 IF PO=1 OR PO=2 OR PO=3 THEN 730
710 GOTO 620
720 REM CONDICIONES DE SIMULACION
730 PRINT
740 INPUT "TIEMPO MAXIMO DE LA SIMULACION EN Seg." T9= ";T9
750 INPUT "PASO DE INTEGRACION EN Seg." H0= ";H0
760 IF PO=3 THEN 860
770 INPUT "INGRESE INICIO DE LA PERTURBACION EN Seg." T0= ";T0
780 INPUT "INGRESE MAGNITUD DE LA PERTURBACION EN pu" R8= ";R8
790 PRINT
800 PRINT "P01= 1 ---> CON PSS"
810 PRINT "P01= 0 ---> SIN PSS"
820 PRINT
830 INPUT "ESCOJA OPCION P01= ";P01
840 IF P01=1 OR P01=0 THEN 860
850 GOTO 800
860 CLS
870 REM "IMPRESION DE DATOS"
880 INPUT "DESEA IMPRESION EN PAPEL (SI O NO): ";Y$
890 IF Y$="SI" OR Y$="S" THEN 910
900 GOTO 1210

```

```

910 INPUT "ALISTE LA IMPRESORA, PULSE RETURN PARA CONTINUAR";Y$
920 T$=TIME$
930 D$=DATE$
940 LPRINT " FECHA: ";D$
950 LPRINT " HORA: ";T$
960 LPRINT
970 LPRINT
980 LPRINT "PARAMETROS DEL GENERADOR SINCRONICO Y SISTEMA EN pu"
990 LPRINT "-----"
1000 LPRINT
1010 LPRINT
1020 LPRINT "MODELO SATURADO"
1030 LPRINT
1040 LPRINT "RESISTENCIA DE ARMADURA R4= ";R4
1050 LPRINT "RESISTENCIA DEL DEVANADO AMORTIGUADOR DEL EJE Q R1= ";R1
1060 LPRINT "RESISTENCIA DEL DEVANADO AMORTIGUADOR DEL EJE D R2= ";R2
1070 LPRINT "RESISTENCIA DEL DEVANADO DE CAMPO R3= ";R3
1080 LPRINT "RESISTENCIA EQUIVALENTE DEL SISTEMA R5= ";R5
1090 LPRINT "REACTANCIA DE DISP. DEL DEV. DE ARMADURA Y4= ";Y4
1100 LPRINT "REACTANCIA DE MAGNETIZACION DEL EJE Q X1= ";X1
1110 LPRINT "REACTANCIA DE MAGNETIZACION DEL EJE D X2= ";X2
1120 LPRINT "REACTANCIA DE DISP. DEL DEV. AMORTIGUADOR DEL EJE Q X3= ";X3
1130 LPRINT "REACTANCIA DE DISP. DEL DEV. AMORTIGUADOR DEL EJE D X4= ";X4
1140 LPRINT "REACTANCIA DE DISP. DEL DEVANADO DE CAMPO X5= ";X5
1150 LPRINT "REACTANCIA EQUIVALENTE DEL SISTEMA Y3= ";Y3
1160 LPRINT "REACTANCIA DEL TRANSFORMADOR T7= ";T7
1170 LPRINT "CONSTANTE DE INERCIA EQUIVALENTE EN Segundos H= ";H
1180 LPRINT "VELOCIDAD INICIAL DEL ROTOR V1= ";V1
1190 LPRINT "VELOCIDAD ANGULAR ELECTRICA EN rad/seg V2= ";V2
1200 LPRINT "VOLTAJE TERMINAL FASE-NEUTRO V3= ";V3
1210 CLS
1220 DIM V(15),F(15),S1(15),P9(15),C1(5),M1(10),P(20)
1230 PRINT "INGRESE PARAMETROS DEL SISTEMA DE EXCITACION"
1240 J1=.029:J2=.73:J3=.005:K2=.03:K3=1
1250 PRINT
1260 PRINT "SELECCION PARA EL INGRESO DE DATOS"
1270 PRINT "03=1 ---> INGRESO DE DATOS DESDE EL OPERADOR"
1280 PRINT "03=2 ---> INGRESO DE DATOS DESDE EL ARCHIVO"
1290 PRINT
1300 INPUT "ESCOJA OPCION: 03= ";03
1310 IF 03=1 OR 03=2 THEN 1330
1320 GOTO 1260
1330 IF 03=1 THEN 1350
1340 GOTO 1530
1350 CLS
1360 PRINT "PARAMETROS DEL SISTEMA DE EXCITACION"
1370 PRINT
1380 PRINT "PARAMETROS DEL ESTABILIZADOR (PSS)"
1390 PRINT
1400 INPUT "FACTOR DEL FILTRO DE ENTRADA AL5= ";A
L5
1410 INPUT "FACTOR DE LA RED DE COMPENSACION AL1= ";A
L1
1420 INPUT "FACTOR DE LA RED DE COMPENSACION AL2= ";A
L2

```

```

1430 INPUT "LIMITE DE SALIDA DEL ESTABILIZADOR                LPSS= ";L
PSS
1440 INPUT "ATENUACION DE ENTRADA AL REGULADOR              KPSS= ";K
PSS
1450 INPUT "LOS DATOS ESTAN BIEN INGRESADOS (SI O NO): ";B#
1460 IF B#="SI" OR B#="S" THEN 1480
1470 GOTO 1350
1480 REM ESCRITURA DE DATOS EN ARCHIVO
1490 OPEN "O",#2,"A:\PSS.DAT"
1500 WRITE #2,AL5,AL1,AL2,LPSS,KPSS
1510 CLOSE #2
1520 GOTO 1560
1530 OPEN "I",#2,"A:\PSS.DAT"
1540 INPUT #2,AL5,AL1,AL2,LPSS,KPSS
1550 CLOSE #2
1560 CLS
1570 INPUT "DESEA IMPRESION EN PAPEL (SI O NO): ";Y#
1580 IF Y#="SI" OR Y#="S" THEN 1600
1590 GOTO 1780
1600 LPRINT
1610 LPRINT "PARAMETROS DEL SISTEMA DE EXCITACION"
1620 LPRINT "-----"
1630 LPRINT
1640 LPRINT "CONSTANTE DE TIEMPO DEL FILTRO DE ENTRADA      J1= ";J1
1650 LPRINT "CONSTANTE DE TIEMPO DEL REGULADOR                    J2= ";J2
1660 LPRINT "CONSTANTE DE TIEMPO DEL EXCITADOR                       J3= ";J3
1670 LPRINT "GANANCIA DEL REGULADOR                                    K2= ";K2
1680 LPRINT "GANANCIA DEL EXCITADOR                                    K3= ";K3
1690 LPRINT
1700 LPRINT "PARAMETROS DEL ESTABILIZADOR (PSS)"
1710 LPRINT "-----"
1720 LPRINT "FACTOR DEL FILTRO DE ENTRADA                            AL5= ";AL5

1730 LPRINT "FACTOR DE LA RED DE COMPENSACION                        AL1= ";AL1

1740 LPRINT "FACTOR DE LA RED DE COMPENSACION                        AL2= ";AL2

1750 LPRINT "LIMITE DE SALIDA DEL ESTABILIZADOR                      LPSS= ";LPS
S
1760 LPRINT "ATENUACION DE ENTRADA AL REGULADOR                      KPSS= ";KPS
S
1770 I6=0
1780 CLS
1790 FOR I=1 TO 11
1800 PRINT
1810 NEXT I
1820 PRINT "      **SE ESTAN CALCULANDO CONDICIONES INICIALES, ALISTE LA IMPRESO
RA**"
1830 GOSUB 3430
1840 LPRINT
1850 LPRINT
1860 LPRINT "CONDICIONES INICIALES"
1870 LPRINT "-----"
1880 LPRINT

```

```

1890 LPRINT "TIEMPO DE CONEXION DE LA PERTURBACION"
" seg."
1900 LPRINT "TIEMPO MAXIMO DE SIMULACION"
" seg."
1910 LPRINT "PASO DE INTEGRACION"
" seg."
1920 LPRINT "MAGNITUD DE LA PERTURBACION"
" pu"
1930 LPRINT "CONSTANTE DE INERCIA EQUIVALENTE"
" seg."
1940 LPRINT
1950 LPRINT
1960 IF PO=3 THEN 2050
1970 IF PO=2 THEN 1990
1980 LPRINT "***** PRUEBA DE RESPUESTA TRANSITORIA *****":LPRINT:GOTO 2000
1990 LPRINT "***** VARIACION BRUSCA DE CARGA *****":LPRINT
2000 IF PO1=1 GOTO 2030
2010 LPRINT " S I N P S S"
2020 GOTO 2060
2030 LPRINT " C O N P S S"
2040 GOTO 2060
2050 LPRINT "***** ESTADO ESTABLE *****"
2060 LPRINT
2070 LPRINT "POTENCIA APARENTE MONOFASICA"
2080 LPRINT "ANGULO DEL FACTOR DE POTENCIA EN radianes"
2090 LPRINT "CORRIENTE DE FASE"
2100 LPRINT "CORRIENTE DE EXCITACION"
2110 LPRINT "VOLTAJE DE EXCITACION"
2120 LPRINT "VOLTAJE DE SALIDA DEL REGULADOR"
2130 LPRINT "VOLTAJE TERMINAL DEL GENERADOR"
2140 LPRINT "POTENCIA ACTIVA"
2150 REM
2160 V(1)=F1
2170 V(2)=F2
2180 V(3)=F3
2190 V(4)=F4
2200 V(5)=F5
2210 V(6)=V1
2220 V(7)=D
2230 V(8)=U71*J1
2240 V(9)=-VR*K2
2250 V(10)=VR*J3
2260 V(11)=-PW*.007
2270 V(12)=-PW1*AL5*B
2280 C1(1)=I2
2290 C1(2)=I3
2300 C1(3)=I5
2310 C1(4)=T1
2320 C1(5)=I4
2330 REM *****ALMACENAMIENTO DE VALORES INICIALES*****
2340 CLS
2350 PRINT:PRINT:PRINT
2360 PRINT" ESTUDIO DEL ESTABILIZADOR DE POTENCIA DE LOS GENERADORES DE LA CENTR
AL MOLINO"
2370 PRINT" -----
-----

```

```

T0= ";T0;
T9= ";T9;
H0= ";H0;
R8= ";R8;
H= ";H;
K= ";K
A5= ";A5
I5= ";I5
I4= ";I4
E6= ";E6
VR= ";VR
U7= ";U7
PW= ";PW

```

```

2380 PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT
2390 PRINT " ***** !!!!! PROGRAMAS DE SIMULACION EN EJECUCION !!!!!
! *****"
2400 PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT
2410 PRINT " M. Fernando Dávila S. 1988 Tesis de G
rado"
2420 OPEN "0",#1,"A:\CALCULOS.PRN"
2430 WRITE #1," TIEMPO", " V CAMPO", " V TERM", "POT ACT", " V PSS"
2440 REM
2450 REM ALMACENAMIENTO
2460 WRITE #1,T2,E6,U7,PW,VPSS
2470 REM EVALUACION DE LAS DERIVADAS POR EL METODO RUNGE KUTTA
2480 M=0
2490 GOSUB 4290
2500 IF R0 <> 1 THEN 3060
2510 V7=V3*COS(V(7))
2520 V8=V3*SIN(V(7))
2530 F(1)=V2*V7+P(1)*V(1)-V2*V(2)*V(6)+P(2)*V(3)
2540 F(2)=V2*V8+V2*V(1)*V(6)+P(3)*V(2)+V2*FO*P(10)
2550 F(3)=P(4)*V(1)+P(5)*V(3)
2560 F(4)=P(6)*V(4)+V2*FO*P(11)
2570 REM ECUACIONES DIFERENCIALES DEL SISTEMA DE EXCITACION
2580 F(5)=V2*E6*R3/X2+P(7)*V(5)+V2*FO*P(12)
2590 REM UTILIZACION DE LA CONSTANTE DE INERCIA EQUIVALENTE
2600 F(6)=(V(2)*(P(8)*V(1)+P(9)*V(3))-V(1)*((V(2)-FO)/X)-T1)/(2*H)
2610 F(7)=V2*(V(6)-1)
2620 F(8)=U7-V(8)/J1
2630 U71=V(8)/J1
2640 REM CONDICION CON/SIN ESTABILIZADOR
2650 IF P01=1 THEN 2680
2660 VPSS=0
2670 GOTO 2850
2680 REM ECUACIONES DIFERENCIALES DEL ESTABILIZADOR
2690 F(11)=-PW-V(11)/.007
2700 PW1=-V(11)/.007
2710 F(12)=-PW1-V(12)/(AL5*8)
2720 PW2=F(12)
2730 F(13)=PW2-V(13)/.0127
2740 PW3=(-(.0127+AL1*.47)*F(13)-V(13))/0.0127
2750 F(14)=PW3-V(14)/(AL2*1)
2760 PW4=V(14)/(AL2*1)
2770 F(15)=PW4-V(15)/.0726
2780 VPSS=-V(15)/.0726
2790 IF VPSS>=LPSS THEN GOTO 2820
2800 IF VPSS<=-LPSS GOTO 2840
2810 GOTO 2850
2820 VPSS=LPSS
2830 GOTO 2850
2840 VPSS=-LPSS
2850 VPS=KPS*VPSS
2860 D9=R7-U71
2870 B3=D9+VPS
2880 REM LIMITACIONES DE ENTRADA AL REGULADOR
2890 IF C1(5)>=2.3 OR C1(3)>=1.2 OR C1(3)<=-1.2 THEN B3=0
2900 F(9)=B3
2910 REM LIMITACIONES PRIORITARIAS EN EL REGULADOR
2920 IF C1(5)>=2.5 OR V(6)<=.95 THEN GOTO 2940

```

```

2930 VR=(-V(9)-F(9)*J2)/K2
2940 IF VR>=3.5 THEN 2970
2950 IF VR<=-4 THEN 2990
2960 GOTO 3000
2970 VR=3.5
2980 GOTO 3000
2990 VR=-4
3000 F(10)=VR-V(10)/J3
3010 E6=-V(10)*K3/J3
3020 REM LLAMADA A SUBROUTINA DE SATURACION
3030 GOSUB 4660
3040 FO=X6*(V(2)/X+V(4)/X4+V(5)/X5)-X6/X2*D1
3050 GOTO 2490
3060 REM CALCULO DE CORRIENTES IA, ID, IF, IC Y TORQUE
3070 C1(1)=P(8)*V(1)+P(9)*V(3)
3080 C1(2)=(V(2)-FO)/X
3090 T6=V(7)+V2*T2
3100 C1(3)=C1(1)*COS(T6)+C1(2)*SIN(T6)
3110 L9=SQR(C1(1)*C1(1)+C1(2)*C1(2))
3120 C1(4)=V(2)*C1(1)-V(1)*C1(2)
3130 C1(5)=(V(5)-FO)/X5
3140 REM CALCULO DEL VOLTAJE TERMINAL
3150 U2=P(14)*V7+1/X*(M1(1)*V(1)+M1(2)*V(2)*V(6)+M1(3)*V(3))
3160 U4=U2+1/X*(M1(4)*V(4)*V(6)+M1(5)*V(5)*V(6))
3170 U3=P(15)*V8+P(13)*E6*R3/X2+1/X*(M1(6)*V(1)*V(6)+M1(7)*V(2))
3180 U5=U3+1/X*(M1(8)*V(3)*V(6)+M1(9)*V(4)+M1(10)*V(5))
3190 U6=U5+Y5*(FO/X)*(P(10)*(X6/X-1)+P(11)*(X6/X4)+P(12)*(X6/X5))
3200 U7=SQR(U4*U4+U6*U6)
3210 REM CALCULO DE LA POTENCIA ACTIVA
3220 PW=-C1(4)*V(6)
3230 IF I6>0 THEN 3340
3240 IF P0=3 THEN 3340
3250 IF T2=>T0 THEN 3280
3260 GOTO 3340
3270 REM PERTURBACIONES
3280 ON PO GOTO 3290,3310,3340
3290 REM INTRODUCCION DE ESCALON EN EL REGULADOR DE VOLTAJE
3300 R7=R8*R7:GOTO 3330
3310 REM VARIACION DEL TORQUE (CARGA ACTIVA)
3320 T1=R8*T1
3330 I6=1
3340 IF T2<=T9 THEN 2440
3350 CLOSE #1
3360 CLS
3370 BEEP:BEEP
3380 CLS
3390 REM SALIR TEMPORALMENTE AL D.O.S. PARA ENTRAR AL LOTUS - 123
3400 SHELL
3410 CLS
3420 END
3430 REM SUBROUTINA DE CONDICIONES INICIALES
3440 REM COEFICIENTES DE LAS ECUACIONES DIFERENCIALES
3450 R=R4+R5
3460 Y5=Y3+T7
3470 X=Y4+Y5

```

```

3480 X7=1/(1/X1+1/X3+1/X)
3490 X6=1/(1/X2+1/X4+1/X5+1/X)
3500 X8=1/(1/X2+1/X4+1/X)
3510 M9=R5*(X7/X-1)
3520 M8=R1*X7*X7*Y5/(X3*X3*X)
3530 P(1)=V2*R*(X7/X-1)/X
3540 P(2)=V2*R*X7/(X3*X)
3550 P(3)=-V2*R/X
3560 P(4)=V2*R1*X7/(X3*X)
3570 P(5)=V2*R1*(X7/X3-1)/X3
3580 P(6)=-V2*R2/X4
3590 P(7)=-V2*R3/X5
3600 P(10)=R/X
3610 P(11)=R2/X4
3620 P(12)=R3/X5
3630 REM COEFICIENTES DE LA CORRIENTE IQ
3640 P(8)=(1-X7/X)/X
3650 P(9)=-X7/(X3*X)
3660 REM COEFICIENTES DEL VOLTAJE TERMINAL DE LA MAQUINA
3670 P(13)=Y5*X6/(X*X5)
3680 P(14)=1+Y5/X*(X7/X-1)
3690 P(15)=1+Y5/X*(X6/X-1)
3700 REM COEFICIENTES DEL VOLTAJE TERMINAL DE LA MAQUINA
3710 M1(1)=Y5*R/X*(X7/X-1)*(X7/X-1)+M8+M9
3720 M1(2)=(X6-X7)*Y5/X
3730 D5=Y5*R*X7/(X*X3)*(X7/X-1)
3740 M1(3)=D5+Y5*R1*X7/(X3*X3)*(X7/X3-1)+R5*X7/X3
3750 M1(4)=Y5*X6/X4
3760 M1(5)=Y5*X6/X5
3770 M1(6)=Y5*(X6-X7)/X
3780 M1(7)=(X6/X-1)*(R5-Y5*R/X)
3790 M1(8)=-X7*Y5/X3
3800 M1(9)=X6/X4*(R5-Y5*R2/X4)
3810 M1(10)=X6/X5*(R5-Y5*R3/X5)
3820 REM CONDICIONES INICIALES
3830 Z2=R
3840 Z3=X+X1
3850 B1=3.141592+A5
3860 I5=K*COS(B1)/V3
3870 I9=K*SIN(B1)/V3
3880 I1=SQR(I5*I5+I9*I9)
3890 REM PARTE REAL DEL VOLTAJE E
3900 Y1=V3
3910 Z1=0
3920 E1=Y1-Z2*I5+Z3*I9
3930 REM PARTE IMAGINARIA DEL VOLTAJE E
3940 E2=Z1-Z2*I9-Z3*I5
3950 E=SQR(E1*E1+E2*E2)
3960 D=ATN(E2/E1)
3970 I2=I1*SIN(B1-D+1.570796)
3980 I3=I1*COS(B1-D+1.570796)
3990 I4=(E-(X2-X1)*I3)/X2
4000 F1=(X1+X)*I2
4010 F3=X1*I2
4020 F0=X2*(I3+I4)
4030 F2=X*I3+F0

```

```

4040 F4=F0
4050 REM LLAMADA A SUBROUTINA DE SATURACION
4060 GOSUB 4660
4070 I4=(F0+D1)/X2-I3
4080 F5=X5*I4+F0
4090 T1=F2*(P(8)*F1+P(9)*F3)-F1*(F2-F0)/X
4100 V5=R3*I4
4110 REM CALCULO DEL VOLTAJE INICIAL DE LA MAQUINA
4120 V7=V3*COS(D)
4130 V8=V3*SIN(D)
4140 U2=P(14)*V7+1/X*(M1(1)*F1+M1(2)*F2*V1+M1(3)*F3)
4150 U4=U2+1/X*(M1(4)*F4*V1+M1(5)*F5*V1)
4160 U3=P(15)*V8+P(13)*V5+1/X*(M1(6)*F1*V1+M1(7)*F2)
4170 U5=U3+1/X*(M1(8)*F3*V1+M1(9)*F4+M1(10)*F5)
4180 U6=U5+Y5*(F0/X)*(P(10)*(X6/X-1)+P(11)*X6/X4+P(12)*X6/X5)
4190 U7=SQR(U4*U4+U6*U6)
4200 REM CALCULO DE LA POTENCIA ACTIVA
4210 PW=-T1*V1
4220 REM CONDICIONES INICIALES DEL SISTEMA DE EXCITACION
4230 E6=V5*X2/R3
4240 VR=-E6/K3
4250 U71=U7
4260 R7=U7
4270 PW1=PW
4280 RETURN
4290 REM *****METODO DE RUNGE KUTTA*****
4300 M=M+1
4310 ON M GOTO 4320,4350,4440,4510,4590
4320 REM PASO 1
4330 R0=1
4340 RETURN
4350 REM PASO 2
4360 FOR J=1 TO 15
4370 S1(J)=V(J)
4380 P9(J)=F(J)
4390 V(J)=S1(J)+.5*H0*F(J)
4400 NEXT J
4410 T2=T2+.5*H0
4420 R0=1
4430 RETURN
4440 REM PASO 3
4450 FOR J=1 TO 15
4460 P9(J)=P9(J)+2*F(J)
4470 V(J)=S1(J)+.5*H0*F(J)
4480 NEXT J
4490 R0=1
4500 RETURN
4510 REM PASO 4
4520 FOR J=1 TO 15
4530 P9(J)=P9(J)+2*F(J)
4540 V(J)=S1(J)+H0*F(J)
4550 NEXT J
4560 T2=T2+.5*H0
4570 R0=1
4580 RETURN

```

```
4590 REM PASO 5
4600 FOR J=1 TO 15
4610 V(J)=S1(J)+(P9(J)+F(J))*H0/6
4620 NEXT J
4630 M=0
4640 R0=0
4650 RETURN
4660 REM SUBROUTINA DE SATURACION
4670 F8=ABS(F0)
4680 IF F8<F9 THEN 4700
4690 GOTO 4720
4700 D1=0
4710 RETURN
4720 D1=P1*F8-P2
4730 IF F0 < 0 THEN 4760
4740 D1=D1
4750 RETURN
4760 D1=-D1
4770 RETURN
```

M A C R O S

\O	\B	\C	\D	\E
{HOME}	A	A	A	A
/	{ESCAPE}	{ESCAPE}	{ESCAPE}	{ESCAPE}
F	{HOME}	{HOME}	{HOME}	{HOME}
I	{RIGHT}	{RIGHT}	{RIGHT}	{RIGHT}
N	{DOWN}	{RIGHT}	{RIGHT}	{RIGHT}
~	.	{DOWN}	{RIGHT}	{RIGHT}
/	{END}	.	{DOWN}	{RIGHT}
G	{DOWN}	{END}	.	{DOWN}
T	~	{DOWN}	{END}	.
X	O	~	{DOWN}	{END}
X	T	O	~	{DOWN}
{DOWN}	Y	T	O	~
.	{ESCAPE}	Y	T	O
{END}	Voltaje	{ESCAPE}	Y	T
{DOWN}	~	Voltaje	{ESCAPE}	Y
~	S	~	Potencia	{ESCAPE}
O	Y	S	~	Salida d
F	A	Y	S	~
~	Q	A	Y	S
~	Q	Q	A	Y
Q	V	Q	Q	A
C		V	Q	Q
G			V	Q
V				V
T				
F				
Simulación del Paute				
~				
T				
X				
T i e m p o [seg.]				
~				
T				
Y				
Voltaje de Campo [pu]				
~				
Q				
A				
{RIGHT}				
{DOWN}				
.				
{END}				
{DOWN}				
~				
V				

IV.3 VARIANTES AL PROGRAMA PRINCIPAL

En el proceso de validación del modelo matemático, y también para las aplicaciones se utilizaron algunas variaciones del programa anterior:

- Modelación en Vacío.- Con el objeto de comprobar la modelación del generador aislado se dedujeron las expresiones que debían asignarse al Voltaje en el eje directo del generador V_d y al Voltaje en el eje en cuadratura V_q para conseguir que la corriente de fase sea igual a cero, para el cálculo de las ecuaciones diferenciales del generador.

- Rechazo de carga del Generador.- Con el mismo objeto y en base al caso anterior. Adicionalmente se recalculaban las condiciones iniciales en el instante de la salida de sincronismo y se tenía que corregir la variación de la velocidad por la ausencia del regulador.

- Obtención de Respuesta de Frecuencia desde el Modelo Digital .- Imponiendo las condiciones nominales de operación se introdujo una señal sinusoidal al Regulador de Voltaje, y para diferentes períodos (frecuencias) de la señal de entrada se registraron Torque, Voltaje Terminal, Voltaje de Salida del Estabilizador y la perturbación, funcionando el programa en estado estable. Con esto fue posible construir las diagramas de fase del Capítulo IV.

- Rechazo de Carga en Agoyán, 1987.- Con una simple modificación en las ecuaciones del Estabilizador se simuló muy aproximadamente lo que realmente ocurrió en aquella ocasión.

A P E N D I C E V

M A N U A L D E U S O D E L P R O G R A M A

El programa fue desarrollado principalmente en un microcomputador IBM PS/2 modelo: 8560.041 equipado con: Coprocesador Matemático 80287, monitor a colores IBM modelo 8512-001 e impresora Epson modelo EX-1000.

Puede funcionar en cualquier otro microcomputador compatible con los tipos XT, AT o PS/2 de IBM, pero el tiempo de ejecución dependerá del microprocesador implementado. En el equipo utilizado una simulación de 10 segundos demora aproximadamente 5 minutos registrando 11 magnitudes del sistema simulado (solamente la obtención del archivo de cálculos).

El usuario deberá tener un conocimiento elemental en el manejo del programa LOTUS - 123 sobretodo en la parte concerniente a la generación e impresión de gráficos.

Se suministra una versión del programa en BASIC, TESISFD.BAS para ser utilizada en QBASIC preferiblemente (* 10:1 de velocidad respecto al BASIC) con el subdirectorío QB.EXE y otra versión compilada por el QBASIC para ser ejecutada desde el sistema operativo, TESISFD.EXE, en este caso se requiere la presencia del subdirectorío BRUN30.EXE .

Tanto los archivos de datos GENERAD.DAT y PSS.DAT así como el de salida CALCULOS.PRN se direccionan hacia el drive A: .

INSTRUCCIONES PARA UTILIZAR EL PROGRAMA TESISFD.EXE

- 1.- Iniciar el computador.
- 2.- Introducir el diskette en el drive A: .
- 3.- Seleccionar el drive A: como el vigente.
- 4.- Teclear TESISFD.
- 5.- Escoger la opción O3 para el ingreso de parámetros del Generador y Sistema:
 - O3= 1 Datos desde el teclado
 - O3= 2 Datos desde el archivo GENERAD.DAT
- 6.- Ingresar las condiciones de funcionamiento:
 - Angulo del factor de potencia
 - Potencia Aparente monofásica
 - Constante de inercia equivalente
- 7.- Escoger la opción P0 según el tipo de perturbación deseada:
 - P0= 1 Prueba de respuesta transitoria de la Excitación
 - P0= 2 Variación brusca de la carga
 - P0= 3 Estado estable
- 8.- Escoger las condiciones de simulación:
 - Tiempo máximo de simulación
 - Paso de integración
 - Instante de inicio de la perturbación
 - Magnitud relativa de la perturbación
- 9.- Escoger la opción Con/Sin Estabilizador de Potencia
 - P01= 1 Con PSS
 - P01= 0 Sin PSS

- 10.- Decidir si desea impresión de los parámetros del Generador y Sistema "SI" o "S" y prepare la impresora.
- 11.- Escoger la opción O3 para el ingreso de parámetros del Estabilizador:
O3= 1 Datos desde el teclado
O3= 2 Datos desde el archivo PSS.DAT
- 12.- Decidir si desea impresión de los parámetros del Sistema de Excitación "SI" o "S" y prepare la impresora.
- 13.- Si no ha imprimido antes prepare la impresora para el registro de las condiciones iniciales, de operación y de simulación.
- 14.- Durante la simulación aparece un mensaje en la pantalla.
- 15.- El final del procesamiento es advertido con dos BEEP.
- 16.- (Opcional) Cambiar al directorio PIZAZZ para habilitar la impresión de pantalla - gráficos.
CD\PIAZZ
PZ
CD\
17.- Cargar el subprograma 123 del LOTUS.
123
- 18.- Ejecutar los comandos:
/
File (F)
Retrieve (R)
- 19.- Recuperar el archivo AMACRO.WK1 que contiene el macro de

ejecución automática \0.

Enter

El macro importa el archivo CALCULOS.PRN y genera el gráfico del Voltaje de Campo.

20.- Pulsando cualquier tecla de ejecución individual se retorna al menú de gráficos desde el gráfico en curso.

21.- Ejecutar los siguientes macros existentes en la hoja para producir los gráficos respectivos:

Alt B Voltaje de Campo

Alt C Voltaje Terminal

Alt D Potencia Activa

Alt E Salida del Estabilizador

22.- En cada gráfico se puede escoger la escala más conveniente con las instrucciones siguientes desde el menú de gráficos:

Options (O)

Scale (S)

Y Scale (Y)

Manual (M)

Lower (L) Valor escogido Enter

Upper (U) Valor escogido Enter

Quit (Q)

Quit (Q)

View (V)

23.- (Opcional) Para imprimir basta utilizar la tecla Print Screen mientras el gráfico luce en la pantalla, y a continuación los comandos del programa PIZAZZ:

Print (P)

Printer (P)

Asegurarse que la región que aparece oscura en la pantalla corresponda a White y la que aparece iluminada en la pantalla corresponda a Black en el menú de impresión, de lo contrario corregirlo utilizando la función Color (C).

Para salir a la hoja electrónica digitar:

Quit (Q)

Yes (Y)

24.- Salir al DOS utilizando los menús del 123, por ejemplo, desde el menú de gráficos:

Tecla Esc

Quit (Q)

Yes (Y)

La instrucción 16 y desde la 21 constituyen sugerencias pues el usuario experimentado puede escoger las opciones de su preferencia para generar e imprimir los gráficos en base a la hoja electrónica disponible.

Se ha encontrado conveniente la utilización de la impresión directa del gráfico desde la pantalla pues es más rápida y para gráficos reducidos la distorsión es menor que usando el PGRAPH del LOTUS.

A continuación se presenta un ejemplo de corrida del programa TESISFD.EXE, correspondiente al Rechazo de Carga Externo a la

Central con el Estabilizador reajustado.

A>A:TESISFD

PROGRAMA PARA EL ESTUDIO DEL PSS DE LOS GENERADORES DE LA CENTRAL MOLINO

Fernando Dávila S.

INGRESE LOS PARAMETROS DEL GENERADOR SINCRONICO Y SISTEMA DE POTENCIA

SELECCION PARA EL INGRESO DE DATOS

O3=1 ---> INGRESO DE DATOS DESDE EL OPERADOR

O3=2 ---> INGRESO DE DATOS DESDE EL ARCHIVO GENERAD.DAT

ESCOJA OPCION: O3= ? 2

INGRESE CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO

ANGULO DEL FACTOR DE POTENCIA EN radianes

A5= ? -.349

POTENCIA APARENTE MONOFASICA EN por unidad

K= ? .527

CONSTANTE DE INERCIA EQUIVALENTE EN segundos

H= ? 5.775

INGRESE PERTURBACIONES

PO= 1 ---> PRUEBA DE RESPUESTA TRANSITORIA

PO= 2 ---> VARIACION BRUSCA DE CARGA

PO= 3 ---> ESTADO ESTABLE

ESCOJA OPCION PO= ? 2

TIEMPO MAXIMO DE LA SIMULACION EN Seg.

T9= ? 6

PASO DE INTEGRACION EN Seg.

H0= ? 0.006

INGRESE INICIO DE LA PERTURBACION EN Seg.

T0= ? 0.01

INGRESE MAGNITUD DE LA PERTURBACION EN pu

R8= ? 1.21

PO1= 1 ---> CON PSS

PO1= 0 ---> SIN PSS

ESCOJA OPCION PO1= ? 1

¿DESEA IMPRESION EN PAPEL (SI O NO): ? N

INGRESE PARAMETROS DEL SISTEMA DE EXCITACION

ELECCION PARA EL INGRESO DE DATOS

3=1 ---> INGRESO DE DATOS DESDE EL OPERADOR

3=2 ---> INGRESO DE DATOS DESDE EL ARCHIVO

ESCOJA OPCION: 03= ? 2

¿DESEA IMPRESION EN PAPEL (SI O NO): ? N

ESTUDIO DEL ESTABILIZADOR DE POTENCIA DE LOS GENERADORES DE LA CENTRAL

***** !!!!! PROGRAMAS DE SIMULACION EN EJECUCION !!!!! **

M. Fernando Dávila S.

1988

Tesis de Grad

A1:

Worksheet Range Copy Move File Print Graph Data System Quit
Global, Insert, Delete, Column, Erase, Titles, Window, Status, Page

A B C D E F G H

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20

27-Dec-88 08:03 PM

NUM CAPS

A1:

Retrieve Save Combine Xtract Erase List Import Directory
Erase the current worksheet and display the selected worksheet

A B C D E F G H

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20

27-Dec-88 08:04 PM

NUM CAPS

:
me of file to retrieve: A:*.wk?

ACRO.WK1

PIAZZA\

A B C D E F G H

-Dec-88 08:06 PM

NUM CAPS

:
ter name of file to import: A:\CALCULOS.PRN

A B C D E F G H