

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

ESTUDIO DE LOS SISTEMAS DE EXCITACION DE
MAQUINAS SINCRONICAS Y SU INFLUENCIA
EN LA ESTABILIDAD TRANSITORIA DE
SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Tesis Previa a la Obtención del título de Ingeniero Eléctrico en la
Especialización Sistemas Eléctricos de Potencia

JOSE ANTONIO OSCULLO LALA

Quito, Julio de 1996

Certifico que el presente trabajo ha sido realizado en su totalidad por el Sr. José Antonio Oscullo Lala.

A handwritten signature in black ink, reading "JESUS JATIVA", with a horizontal line underneath it.

Dr. Jesús Játiva I.
DIRECTOR DE TESIS

AGRADECIMIENTO

Al señor Dr. Jesús Játiva I. que por medio de sus consejos y dirección ha hecho posible la culminación del presente trabajo.

A mis padres por su abnegado amor y apoyo en la obtención de mis metas e ideales.

DEDICATORIA:

*A mis padres y hermanos por
su confianza y estímulo diario*

INDICE

Resumen

Capitulo I: Introducción

1.1	Generalidades	1
1.2	Objetivo	2
1.3	Alcance	2
1.4	Descripción del Trabajo de la Tesis	3

Capitulo II: Configuración de los Sistemas de Excitación

2.1	Descripción Funcional	4
2.2	Modelo del Transductor de Voltaje Terminal y Compensador de Carga	5
2.3	Excitador de Excitación Independiente	5
2.4	Excitador Autoexcitado	8
2.5	Sistemas de Excitación de Corriente Continua	10
2.5.1	Introducción	10
2.5.2	Modelo del Sistema de Excitación de Corriente Continua Tipo DC1 ..	10
2.5.3	Modelo del Sistema de Excitación de Corriente Continua Tipo DC2 ..	12
2.6	Sistemas de Excitación de Corriente Alterna	13
2.6.1	Introducción	13
2.6.2	Modelo del Sistema de Excitación de Corriente Alterna Tipo AC1 ...	14
2.6.3	Modelo del Sistema de Excitación de Corriente Alterna Tipo AC2 ...	15
2.7	Sistemas de Excitación Estáticos	17
2.7.1	Introducción	17
2.7.2	Modelo del Sistema de Excitación Estáticos Tipo ST1	17
2.7.3	Modelo del Sistema de Excitación Estáticos Tipo ST2	19

Capitulo III: Modelación y Simulación de los Sistemas de Excitación

3.1	Ecuaciones Diferenciales	21
3.1.1	Sistemas de Excitación de Corriente Continua	21
3.1.1.1	Modelo del Sistema de Excitación de Corriente Continua Tipo DC1	21
3.1.1.2	Modelo del Sistema de Excitación de Corriente Continua Tipo DC2	23
3.1.2	Sistemas de Excitación de Corriente Alterna	24
3.1.2.1	Modelo del Sistema de Excitación de Corriente Alterna Tipo AC1	24
3.1.2.2	Modelo del Sistema de Excitación de Corriente Alterna Tipo AC2	26
3.1.3	Sistemas de Excitación Estáticos	28
3.1.3.1	Modelo del Sistema de Excitación Estático Tipo ST1	28
3.1.3.2	Modelo del Sistema de Excitación Estático Tipo ST2	29

3.2	Funciones de Transferencia	31
3.2.1	Sistemas de Excitación de Corriente Continua	32
3.2.1.1	Modelo del Sistema de Excitación de Corriente Continua Tipo DC1	32
3.2.1.2	Modelo del Sistema de Excitación de Corriente Continua Tipo DC2	32
3.2.2	Sistemas de Excitación de Corriente Alterna	32
3.2.2.1	Modelo del Sistema de Excitación de Corriente Alterna Tipo AC1	32
3.2.2.2	Modelo del Sistema de Excitación de Corriente Alterna Tipo AC2	34
3.2.3	Sistemas de Excitación Estáticos	36
3.2.3.1	Modelo del Sistema de Excitación Estático Tipo ST1	36
3.2.3.2	Modelo del Sistema de Excitación Estático Tipo ST2	36
3.3	Algoritmo de Simulación de los Sistemas de Excitación	37
3.4	Análisis Dinámico en el Dominio del Tiempo	38
3.4.1	Sistemas de Excitación de Corriente Continua	38
3.4.2	Sistemas de Excitación de Corriente Alterna	41
3.4.3	Sistemas de Excitación Estáticos	45
3.5	Función de Saturación	48
3.6	Estabilización del Sistema de Control	49
3.7	Regulación de Componentes Rectificadores	50

Capítulo IV: Incorporación de los Modelos de Sistemas de Excitación en un Programa de Estabilidad Transitoria

4.1	Características del Programa de Estabilidad Transitoria	52
4.1.1	Descripción del Programa Principal y las Subrutinas	52
4.1.2	Criterios de Estabilidad	54
4.2	Condiciones Iniciales e Ingreso de Datos	55
4.2.1	Sistemas de Excitación de Corriente Continua	56
4.2.2	Sistemas de Excitación de Corriente Alterna	56
4.2.3	Sistemas de Excitación Estáticos	58
4.2.4	Ingreso de Datos	59
4.2.4.1	Datos para el Programa de Flujos de Potencia	59
4.2.4.2	Datos para el Programa de Estabilidad	61
4.3	Algoritmo de Incorporación de los Sistemas de Excitación	64
4.4	Diagrama Funcional y de Bloques	64
	Diagrama de la Estructuración de las Subrutinas en el Programa de Estabilidad Transitoria	65
	Diagrama Funcional del programa de Estabilidad Transitoria	66
	Subrutina de los Sistemas de Excitación DC	67
	Subrutina de los Sistemas de Excitación AC	68
	Subrutina de los Sistemas de Excitación ST	70
	Subrutina de Datos de los Sistemas de Excitación	72
	Subrutina de Condiciones Iniciales	74
	Subrutina de Límites de los Sistemas de Excitación	75
	Subrutina de los Componentes Rectificadores	76
	Subrutina del Método de Runge Kutta de Cuarto Orden	76

4.5	Aplicaciones	77
4.5.1	Preparación de datos	77
4.5.2	Análisis de Estabilidad de un Sistema de Cinco Barras	78
	Sin Sistema de Excitación	78
	Con Sistemas de Excitación de Corriente Continua	79
	Con Sistemas de Excitación de Corriente Alterna	80
	Con Sistemas de Excitación Estáticos	81
4.5.3	Análisis de Estabilidad de un Sistema de Nueve Barras	96
	Sin Sistema de Excitación	97
	Con Sistema de Excitación de Corriente Continua	97
	Con Sistema de Excitación de Corriente Alterna	98
	Con Sistema de Excitación Estáticos	99
4.6	Comparación de los Sistemas de Excitación	109

Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones

5.1	Conclusiones	111
5.2	Recomendaciones	112

Anexos:

Anexo A:	Manual de Usuario	113
Anexo B:	Manual del Programador	120
Anexo C:	Listado de Resultados	124
	Sistema de Cinco Barras	124
	Sistema de Nueve Barras	146

Bibliografía	163
--------------------	-----

RESUMEN

El presente trabajo parte de un programa computacional que modela la máquina sincrónica con sus parámetros dinámicos, la potencia mecánica constante y las perturbaciones más comunes a las que está sujeto un sistema de potencia.

Se realiza una interface entre los programas de flujos de potencia y estabilidad transitoria mediante un archivo que almacena los resultados provenientes de una corrida de flujos de potencia, el cual es parte de los datos del programa de estabilidad. En otro archivo de datos se ingresan los parámetros requeridos en la simulación de los sistemas de excitación.

En el programa se incluyen la modelación de los siguientes sistemas de excitación: Corriente continua (DC) y corriente alterna (con generador (AC) o transformador (ST) de excitación), mediante ecuaciones diferenciales y algebraicas. Con esta modelación se puede realizar estudios de perturbaciones de poca duración.

La simulación de los sistemas de excitación se realiza mediante el método de Runge-Kutta de cuarto orden, que garantiza la característica de respuesta rápida a variaciones de voltaje.

El programa de estabilidad transitoria con los sistemas de excitación incluidos se prueba con respecto a estudios de sistemas referenciales de IEEE, tesis de grado y textos de estudios transitorios.

CAPITULO I

INTRODUCCION

1.1 GENERALIDADES

Debido a que la máquina sincrónica es la parte fundamental de un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP), es de gran importancia el análisis y la comprensión de los sistemas de excitación; y por su intermedio, llevar adelante un estudio más detallado de la estabilidad transitoria de SEP.

Uno de los sistemas más importantes en el funcionamiento dinámico de la máquina sincrónica constituyen los sistemas de excitación. En estudios anteriores de estabilidad transitoria se analiza a la máquina sincrónica considerando al sistema de excitación como una fuente de voltaje constante. En el presente trabajo se realiza la inclusión de la modelación de los sistemas de excitación en la máquina sincrónica para estudios de estabilidad transitoria.

Debido a que el sistema de excitación se caracteriza por una respuesta rápida a las desviaciones de voltaje, su incorporación permitirá analizar la respuesta del SEP en períodos transitorios y determinar el comportamiento del sistema ante perturbaciones de rápida variación y peligrosas consecuencias.

Estudios más detallados de los fenómenos dinámicos en períodos de corta duración facilitarán una mejor información para la disposición y dimensionamiento de las protecciones requeridas durante condiciones emergentes SEP.

1.2 OBJETIVO

Realizar el estudio dinámico de los sistemas de excitación de las máquinas sincrónicas, incorporarlos a un programa básico de estabilidad transitoria; y evaluar su influencia en el comportamiento dinámico de Sistemas Eléctricos de Potencia.

1.3 ALCANCE

El alcance de la presente tesis consiste de lo siguiente:

Un análisis de los diferentes tipos de sistemas de excitación: corriente continua, corriente alterna y de estado sólido, que serán incluidos en la simulación de las máquinas sincrónicas para el estudio de la estabilidad transitoria de SEP.

Determinación de las funciones de transferencia que representen de mejor manera los sistemas de excitación a ser estudiados.

Determinación de las ecuaciones, incluyendo las no linealidades para obtener un modelo que represente de mejor manera, los sistemas de excitación a ser estudiados.

Un análisis dinámico de los sistemas de excitación.

Un análisis de las componentes rectificadores, así como de la estabilización del control en los sistemas de excitación alterna y de estado sólido.

La incorporación de los algoritmos de simulación de los sistemas de excitación a un programa básico de estabilidad transitoria.

La aplicación del programa computacional a la resolución de casos de estabilidad transitoria en sistemas eléctricos referenciales.

1.4 DESCRIPCION DEL TRABAJO DE LA TESIS

La presente tesis, para llevar adelante el estudio y la influencia de los sistemas de excitación de las máquinas sincrónicas en la estabilidad transitoria de un SEP, ha dedicado el capítulo II para dar una explicación general de la constitución de los sistemas de excitación, así como un análisis y descripción detallada de los distintos tipos de sistemas de excitación a estudiarse: corriente continua, corriente alterna y estáticos.

En el capítulo III, se determina el sistema de ecuaciones diferenciales con las respectivas no linealidades, así como las distintas funciones de transferencia que representan los diferentes modelos de los sistemas de excitación. Presentar un análisis de las componentes rectificadores, y de la estabilización del control en los sistemas de excitación alterna y de estado sólido.

El capítulo IV, se presenta la forma de incorporación de la información obtenida en el capítulo anterior dentro del programa básico de Estabilidad Transitoria. La aplicación del programa computacional a la resolución de la estabilidad transitoria en sistemas eléctricos referenciales, para presentar al usuario la rutina de preparación e ingreso de datos y el análisis de los resultados obtenidos.

Información adicional se proporciona por medio de tres anexos. En el anexo A, se indica de manera detallada la estructura de los archivos de datos, y la manera de ejecutar el programa computacional. En el anexo B se muestra la forma de realizar la compilación de los programas fuentes para obtener el programa ejecutable, así como una breve explicación de las diferentes subrutinas del programa. En el anexo C se presenta las tablas de los resultados obtenidos en los ejemplos analizados.

CAPITULO II

CONFIGURACION DE LOS SISTEMAS DE EXCITACION | 10 |

2.1 DESCRIPCION FUNCIONAL

En la figura 2.1 se presenta un diagrama funcional de los varios subsistemas de la excitación de un generador. En el mismo se encuentra incluido un transductor (filtro de ruido) de voltaje terminal, un regulador de voltaje, una excitatriz, elementos estabilizadores del sistema de excitación, y el estabilizador del sistema de potencia.

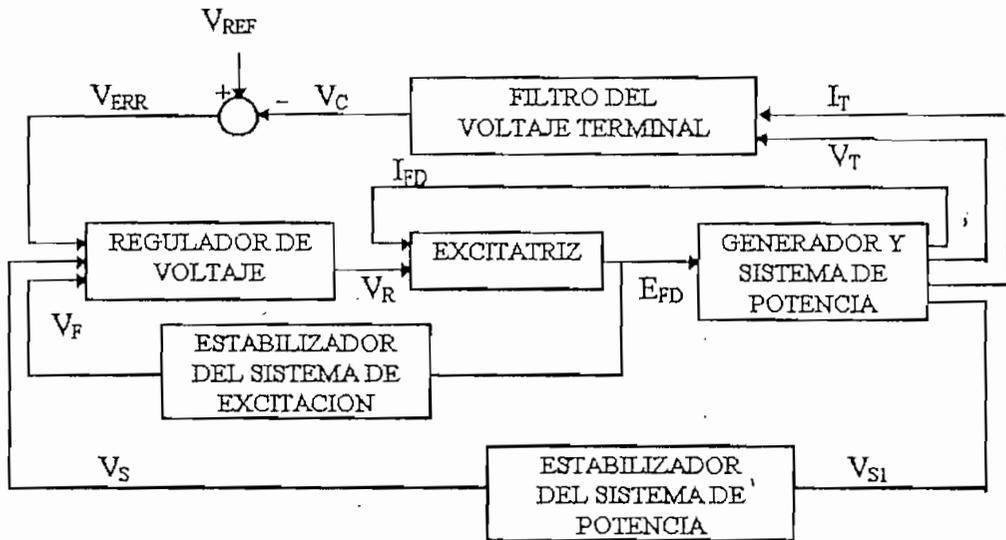


Figura 2.1 Diagrama Funcional del Sistema de Control de Excitación del Generador

Los modelos de todas estas funciones se analizan en el presente trabajo, en tres distintos tipos de sistemas de excitación, basados en la fuente de potencia de la excitación:

Tipo DC: Utiliza un generador de corriente continua con un conmutador como fuente del sistema de excitación.

Tipo AC: Utiliza un alternador y rectificadores estacionarios o rotativos para producir la corriente continua para el campo del generador.

Tipo ST: La excitación es suministrado a través de transformadores y rectificadores.

2.2 MODELO DEL TRANSDUCTOR DE VOLTAJE TERMINAL Y COMPENSADOR DE CARGA

El modelo del transductor de voltaje terminal y compensador de carga de la máquina síncrona de la figura 2.2, es común para los modelos de sistemas de excitación que se analizan en el presente trabajo.

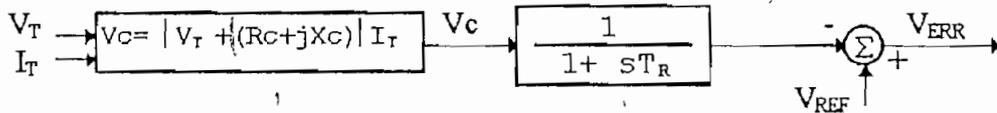


Figura 2.2 Compensador de Carga y filtro de Voltaje

En la figura 2.2 se puede analizar que el voltaje de salida del compensador V_C , es señal de entrada del transductor de voltaje (filtro de ruido) cuyo modelo puede ser muy complejo; pero para los propósitos de modelación, puede reducirse a una constante de tiempo T_R , la cual se la considera muy pequeña y generalmente se asume un valor de cero.

La salida del transductor de voltaje se compara con un voltaje de referencia V_{REF} , el cual representa el nivel del voltaje terminal deseado. La señal resultante es la de error V_{ERR} , la cual es amplificada en los diferentes modelos de los sistemas de excitación que suministran el voltaje al devanado de campo, para modificar el voltaje terminal.

Debido a que los valores de resistencia del compensador R_C y reactancia del compensador X_C son despreciables, el modelo del compensador de carga, no se considera en la simulación de los distintos sistemas de excitación con lo que el diagrama de bloques de la figura 2.2, se reduce sólo al filtro de voltaje en el cual la señal de entrada es el voltaje terminal V_T de la máquina síncrona.

2.3 EXCITADOR DE EXCITACION INDEPENDIENTE

El modelo del excitador independiente es el que se indica en la figura 2.3.

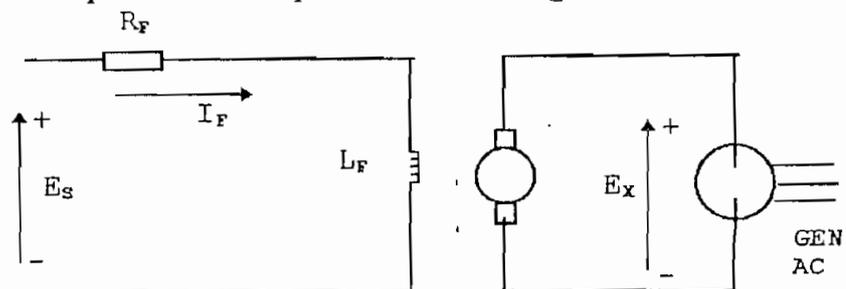


Figura 2.3 Excitador de Excitación Independiente

Resolviendo el circuito del excitador piloto se tiene que el voltaje de campo E_s es:

$$E_s = I_f \cdot R_f + \frac{dI_f}{dt} L_f \quad (2.1)$$

en donde : R_f = Resistencia del devanado de campo

L_f = Inductancia del circuito de campo

I_f = Corriente del campo del excitador

El voltaje de salida del excitador E_x es una función no lineal de la corriente de campo I_f como la curva de saturación con carga del excitador en la figura 2.4.

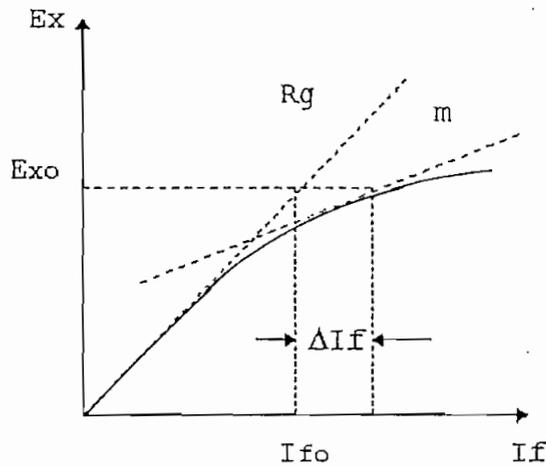


Figura 2.4 Curva de Saturación con Carga del Excitador

La relación entre E_x e I_f está dada por la siguiente ecuación:

$$I_f = \Delta I_f + \frac{E_x}{R_g} \quad (2.2)$$

Donde; R_g es la pendiente de la curva de saturación con carga del excitador cerca de $E_x = 0$.

ΔI_f da el incremento de la corriente debido a la saturación S_E [Amp / Volt]; por medio de la siguiente función:

$$\Delta I_f = S_E \cdot E_x \quad (2.3)$$

Si se reemplaza 2.3 en 2.2 se tiene:

$$I_f = S_E \cdot E_x + \frac{E_x}{R_g} \quad (2.4)$$

Utilizando el sistema por unidad (pu) se tiene:

E_{xb} = voltaje base del excitador, es el voltaje que genera el porcentaje de voltaje terminal en el generador en vacío sin saturación.

R_{gb} = Resistencia base del excitador.

I_{fb} = E_{xb} / R_{gb} = Corriente base del excitador.

$$I_{fpu} = E_{xpu} + R_{gb} \cdot S_E \cdot E_{xpu} \quad (2.5)$$

La ecuación 2.1 en pu es :

$$E_{spu} = I_{fpu} \cdot \frac{R_f}{R_g} + \frac{L_f}{R_{gb}} \frac{dI_{fpu}}{dt} \quad (2.6)$$

La función de saturación se puede definir en pu :

$$S_E = \frac{\Delta I_{fpu}}{E_{xpu}} = R_{gb} \cdot S_E \quad (2.7)$$

Ahora;

$$\frac{dI_{fpu}}{dt} = \frac{dI_{fpu}}{dE_{xpu}} \frac{dE_{xpu}}{dt} \quad (2.8)$$

Sustituyendo 2.5, 2.7 y 2.8 en 2.6 se tiene:

$$E_{spu} = (E_{xpu} + R_{gb} \cdot \frac{S_E}{R_{gb}} \cdot E_{xpu}) \frac{R_f}{R_g} + \frac{L_f}{R_{gb}} \frac{dI_{fpu}}{dE_{xpu}} \frac{dE_{xpu}}{dt}$$

$$E_{spu} = (E_{xpu} + S_E \cdot E_{xpu}) \frac{R_f}{R_g} + \frac{L_f}{R_{gb}} \frac{dI_{fpu}}{dE_{xpu}} \frac{dE_{xpu}}{dt} \quad (2.9)$$

Sea;

$$L_{fpu} = L_f \cdot \left. \frac{dI_{fpu}}{dE_{xpu}} \right|_{E_x = E_{xo}} \quad (2.10)$$

Donde E_{xo} es el valor de E_x para el punto de operación, reemplazando 2.10 en 2.9 se tiene:

$$E_{spu} = (E_{xpu} + S_E \cdot E_{xpu}) \frac{R_f}{R_g} + \frac{L_{fpu}}{R_{gb}} \frac{dE_{xpu}}{dt} \quad (2.11)$$

Representando la ecuación 2.11 en un diagrama de bloques se tiene:

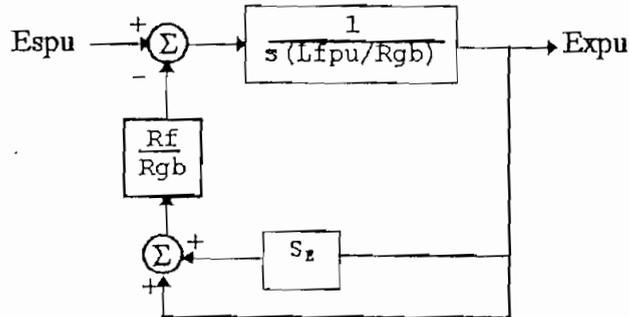


Figura 2.5 Diagrama de Bloques del Excitador Independiente

El diagrama reducido se utiliza en los modelos de los sistemas de excitación tipo DC.

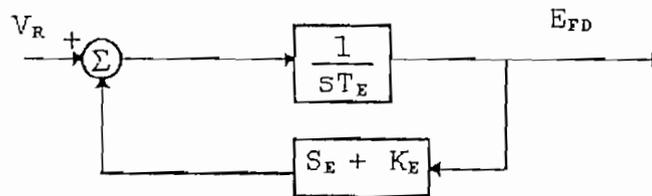


Figura 2.6 Diagrama de Bloques Reducido del Excitador Independiente

Donde: $K_E = R_f/R_{gb}$
 $T_E = L_{fpu}/R_{gb}$
 $V_R = E_{spu}$
 $E_{FD} = E_{xpu}$

2.4 EXCITADOR AUTOEXCITADO

El modelo del excitador autoexcitado se muestra en la figura 2.7.

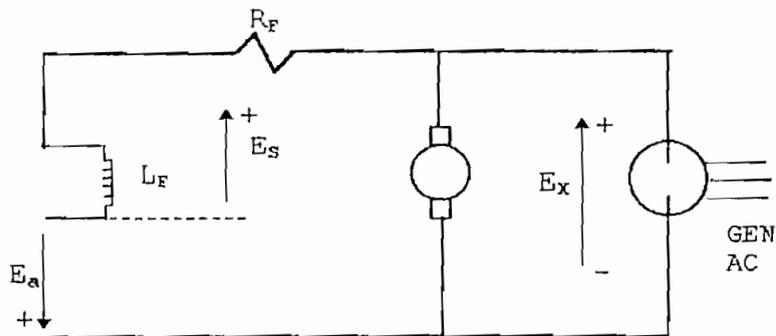


Figura 2.7 Excitador Autoexcitado

Si E_a es el voltaje de un amplificador en serie con el campo shunt del excitador o un equivalente serie de un excitador multidevanado .

El voltaje de campo del e excitador es:

$$E_{spu} = E_{xpu} + E_{apu} \quad (2.12)$$

De acuerdo a las figuras 2.3 y 2.7 se tiene que el excitador autoexcitado es una derivación directa del excitador independiente. Donde su diagrama de bloques es:

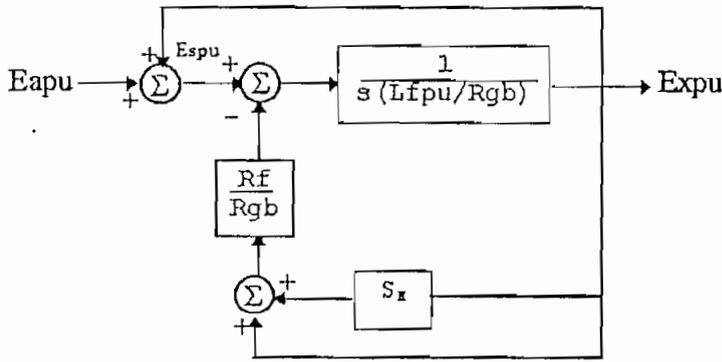


Figura 2.8 Diagrama de Bloques del Excitador Autoexcitado

Al igual que en el numeral anterior el diagrama reducido se tiene:

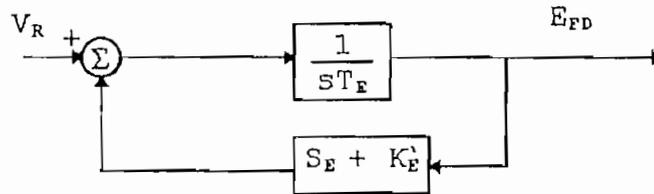


Figura 2.9 Diagrama de Bloques Reducido del Excitador Autoexcitado

Donde: $K'_E = Rf/R_{gb} - 1$
 $T_E = Lf_{pu}/R_{gb}$
 $V_R = E_{apu}$
 $E_{FD} = E_{xpu}$

2.5 SISTEMAS DE EXITACION DE CORRIENTE CONTINUA

2.5.1 INTRODUCCION

Los sistemas de excitación de corriente continua, están formados por un excitador con conmutador de corriente continua el mismo que constituye la fuente de excitación de la máquina sincrónica.

Entre los modelos de excitadores de corriente continua son de interés los excitadores de: Excitación independiente y autoexcitados.

Los sistemas de excitación que se estudiarán presentan las siguientes características en común : Conmutador de corriente continua controlados por campo y Reguladores de voltaje de acción continua.

Estos tipos de sistemas de excitación se caracterizan por poseer, una alta ganancia y rápida acción comparados con los sistemas primitivos, debido a que, esos sistemas de excitación la acción de los reguladores de voltaje no es continua.

2.5.2 MODELO DEL SISTEMA DE EXITACION DE CORRIENTE CONTINUA TIPO DC1

Este modelo se describe en el diagrama de bloques de la figura 2.10, en la cual se puede observar que este sistema de excitación posee un regulador con límites de voltaje específicos, el mismo que representa a los excitadores controlados por campo con conmutador de corriente continua con la constante acción de los reguladores de voltaje, en especial por la acción directa de reóstatos.

La IEEE , para permitir un conocimiento rápido de estos sistemas les ha denominan sistemas de excitación tipo DC1.

A continuación se cita algunos ejemplos de este tipo de sistemas de excitación:

General Electric.- Regulador Amplidina
 Westinghouse .- Regulador Mag - A - Stat
 Regulador Silverstat

La entrada principal en este modelo que se representa en la figura 2.10, es la señal de error del voltaje terminal (V_{ERR}).

La realimentación del estabilizador del sistema de excitación V_F es restada y la señal V_S del estabilizador del sistema de potencia añadiéndose a la señal V_{ERR} .

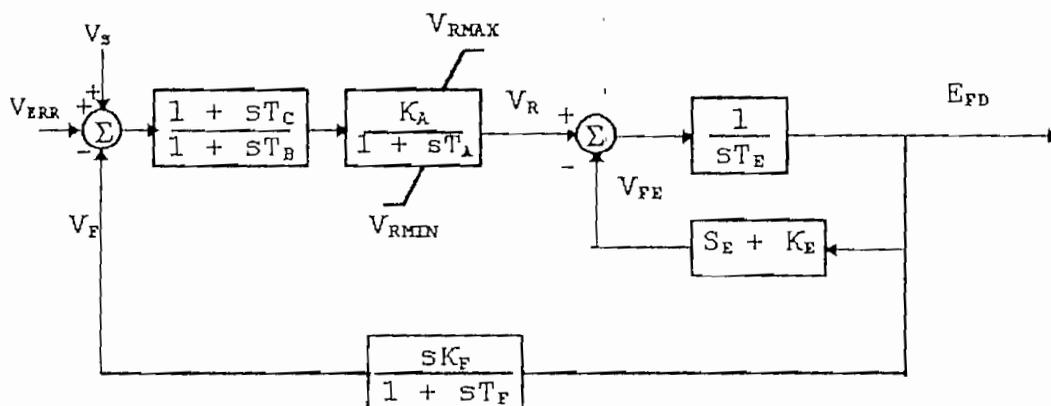


Figura 2.10 Sistema de excitación con Conmutador de Corriente Continua Tipo DC1

En estado estable V_S y V_F son cero, quedando solamente la señal de error de voltaje terminal.

La señal resultante es amplificada en el regulador de voltaje. La mayor constante de tiempo T_A y ganancia K_A , asociadas con el regulador de voltaje son incorporadas en los límites "non-windup" de saturación.

Estos reguladores de voltaje utilizan fuentes de potencia que no son afectadas por oscilaciones cortas y pequeñas en la máquina síncrona o en entradas auxiliares.

Las constantes de tiempo T_C y T_B pueden ser usadas en un modelo equivalente que afectan directamente sólo al regulador, pero estas constantes de tiempo son de pequeño valor, que para efectos de la modelación se desprecian.

La salida del regulador de voltaje (V_R), se utiliza en el control del excitador, el cual puede ser de excitación independiente o autoexcitado.

Si el sistema de excitación a utilizarse es un excitador autoexcitado la constante K_E representa el ajuste del reóstato del campo shunt.

En trabajos anteriores se indicó que la mayoría de los excitadores utiliza campos shunt autoexcitados con el regulador del voltaje operando en el modo "Buck-Boost" (excitador autoexcitado con amplificador rotórico), donde el regulador de voltaje se opera manualmente hasta que el voltaje de salida del regulador sea cero. Esto puede ser simulado por la selección del valor de la constante K_E tal que satisfaga las condiciones iniciales con V_R en el valor cero.

La saturación del excitador representado con S_E , que se describe en el Capítulo III, es un valor que se obtiene en función del voltaje de salida del excitador E_{FD} .

La señal V_F que se deriva de la señal de voltaje E_{FD} es utilizado para alimentar a la estabilización del sistema de excitación. Esta señal de realimentación es utilizada para mejorar la constante de tiempo del excitador y permitir una operación estable del sistema de control de excitación con altas ganancias del regulador en estado estable.

2.5.3 MODELO DEL SISTEMA DE EXCITACION DE CORRIENTE CONTINUA TIPO DC2

Estos sistemas de excitación son similares al tipo DC1, la única diferencia es en el cambio de los límites del regulador de voltaje, que son proporcionales al voltaje terminal de la máquina sincrónica por lo que la IEEE los denomina sistemas de excitación tipo DC2.

El modelo indicado en la figura 2.11, representa a los excitadores con conmutador de corriente continua controlados por campo con los reguladores de voltaje actuando continuamente al sensar el voltaje terminal de la máquina sincrónica.

Esta variación de los límites al ser proporcionales al voltaje terminal de la máquina sincrónica, son de utilidad con elementos de estado sólido pues por medio de rectificadores controlados permite el reemplazo de varios equipos viejos de amplificadores rotativos y mecánicos.

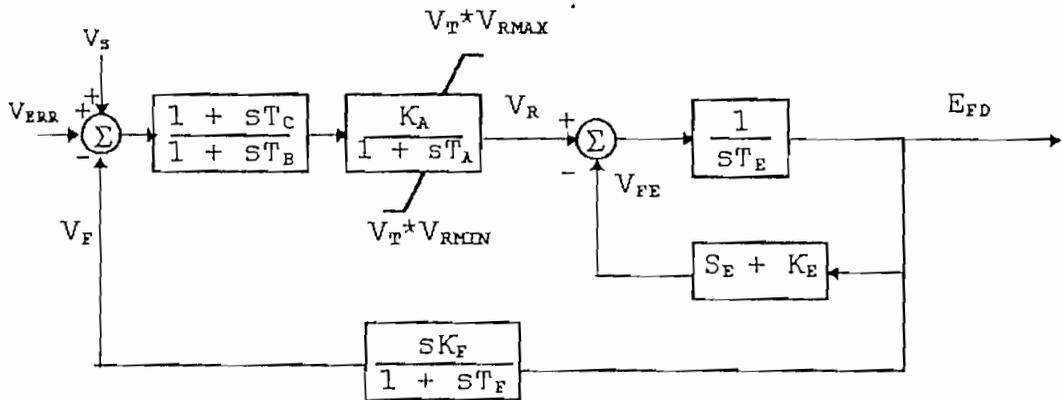


Figura 2.11 Sistema de excitación con Conmutador de Corriente Continua Tipo DC2

2.6 SISTEMAS DE EXCITACION DE CORRIENTE ALTERNA

2.6.1 INTRODUCCION

Con el desarrollo de la tecnología en estado sólido y el manejo de altas corrientes en estos elementos; ha sido posible la construcción de los sistemas de excitación de corriente alterna.

Estos sistemas de excitación el excitador utiliza un alternador cuyo voltaje de salida es rectificadora para proveer la excitación requerida por el campo de la máquina sincrónica, por medio de rectificadores que suministran el voltaje continuo necesario los mismos que pueden ser rotativos o estáticos.

Por lo que los circuitos de control deben ser de respuesta rápida, y se hace necesario la utilización de elementos de estado sólido.

2.6.2 MODELO DEL SISTEMA DE EXCITACION DE CORRIENTE ALTERNA
TIPO AC1

Este modelo de sistema de excitación que se indica en la figura 2.12, es sin realimentación de corriente de campo en el excitador y representa los sistemas de excitación alternador-rectificador, al mismo que la IEEE lo denomina tipo AC1, por lo que este modelo se puede utilizar para la simulación de los sistemas de excitación sin escobillas "Brushless".

Los sistemas de excitación de este tipo están formados de un alternador principal en el excitador con rectificadores no controlados.

El excitador no es autoexcitado y la potencia del regulador de voltaje es suministrada desde una fuente externa, la misma que no es afectada por transitorios externos.

De acuerdo a la figura 2.12, la salida de voltaje del excitador posee un límite inferior de valor cero el mismo que es impuesto por la característica de los diodos.

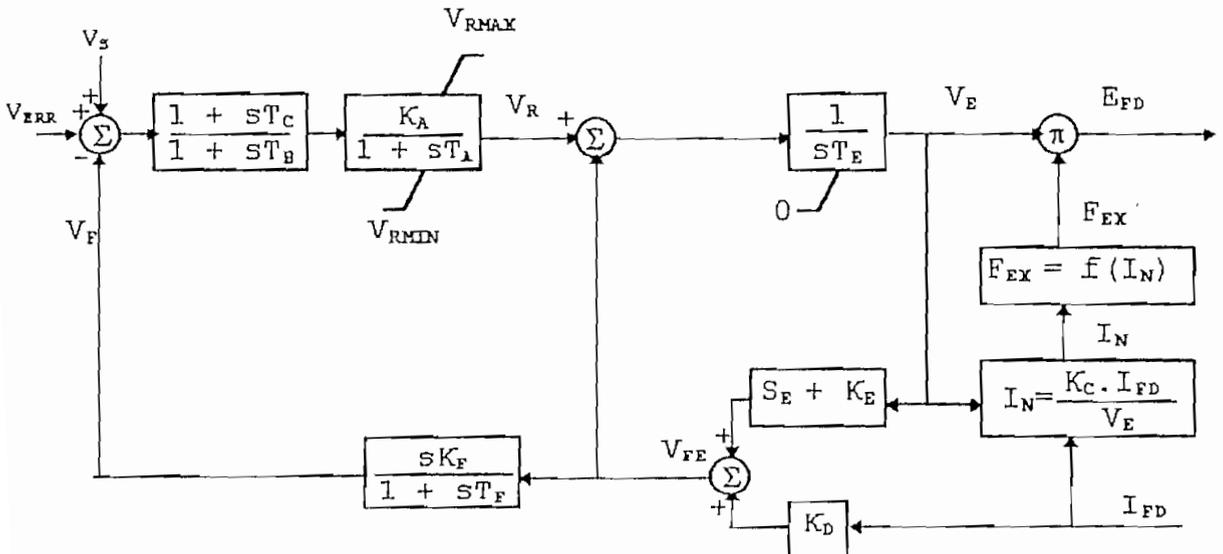


Figura 2.12 Sistemas de Excitación con Rectificadores no Controlados Tipo AC1

En el estudio de estabilidad de grandes SEP, el alternador del excitador se puede representar por un modelo simplificado al que se analizó en el presente trabajo.

Como lo indica la figura 2.12, permite observar que estos sistemas si poseen realimentación de corriente de campo por medio de a la inclusión del efecto desmagnetizante de la corriente de carga (I_{FD}).

Esta realimentación afecta a la dinámica del voltaje de salida del alternador del excitador por medio de la constante K_D esta constante es función del alternador del excitador y de la reactancia transitoria.

La caída de voltaje en la salida del excitador debido a la regulación del rectificador (se analiza en el capítulo III), la cual es simulada por la constante K_C la misma que es función de la reactancia de conmutación.

En el modelo la señal V_{FE} es proporcional a la suma de las señales del voltaje de salida del excitador y la corriente de campo con sus respectivos factores.

2.6.3 MODELO DEL SISTEMA DE EXCITACION DE CORRIENTE ALTERNA TIPO AC2

En la figura 2.13, se observa el modelo que representa a los sistemas de excitación controlados por la corriente de campo, lo que permite una alta respuesta inicial, se encuentran formados por un grupo alternador-rectificador este tipo de sistemas de excitación la IEEE los denomina tipo AC2, que se caracterizan por utilizar rectificadores no controlados en el alternador principal.

El modelo de sistema de excitación tipo AC2 es similar al tipo AC1 se diferencian en dos lazos de realimentación de la corriente de campo que modela la constante de tiempo de compensación del excitador y los elementos limitadores de la corriente de campo. Este modelo es útil para simular sistemas de excitación sin escobillas de alta respuesta inicial

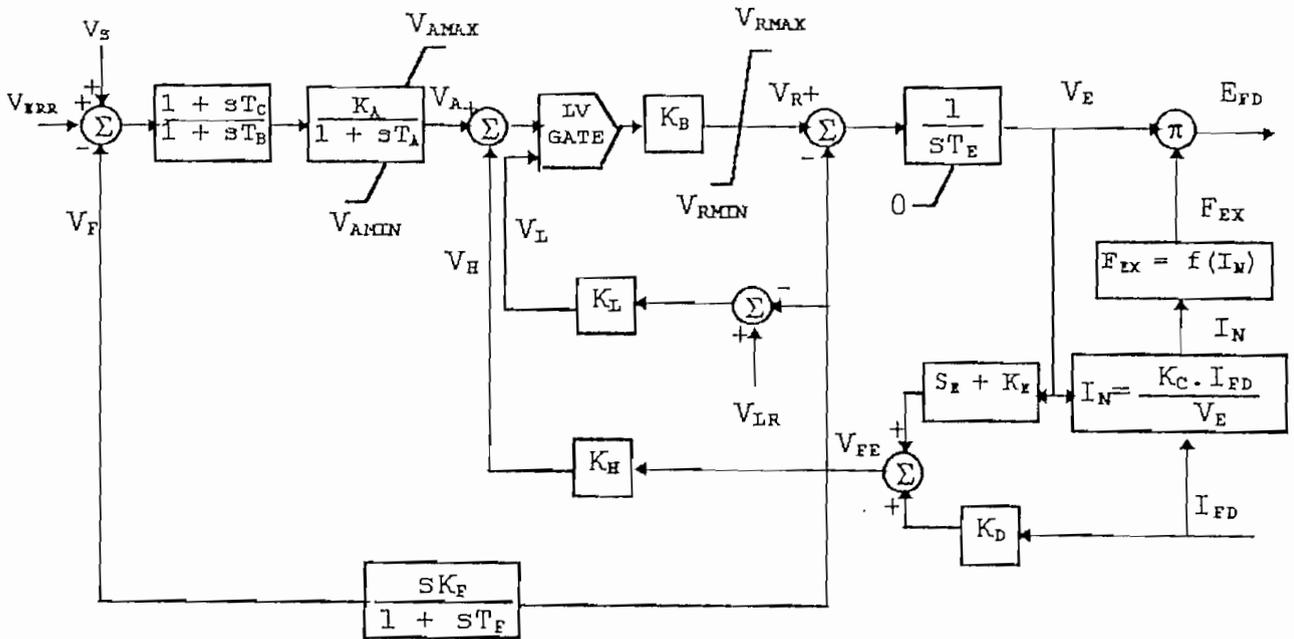


Figura 2.13 Sistemas de Excitación con Rectificadores no Controlados Tipo Ac2

La compensación del excitador por medio de la constante de tiempo se realiza con una realimentación negativa (V_H) la cual reduce la influencia de la constante de tiempo del campo del excitador, a un valor efectivo y así permite un incremento en el ancho de banda de la pequeña señal del sistema de excitación.

Una respuesta inicial alta se logra cuando se aplica al sistema un voltaje forzador (V_{RMAX}) al campo del excitador. La corriente de campo del excitador es sensada por medio de límites los cuales hacen posible gobernar el voltaje de salida del excitador (V_E) de acuerdo a un valor seleccionado de V_{LR} el mismo que determina el rango de respuesta del sistema de excitación.

Con la señal de voltaje de salida del regulador V_A y la señal V_H debido a la constante de tiempo dado por K_H las cuales son comparadas con la señal V_L en una compuerta lógica (LV) permite conocer la transición desde el control del regulador al control de los límites en el excitador; debido a que la compuerta (LV) se caracteriza en que la excitación es controlada por la señal más negativa entre V_L y V_H .

2.7 SISTEMAS DE EXCITACION ESTATICOS

2.7.1 INTRODUCCION

Los sistemas de excitación de este tipo utilizan transformadores, para convertir el voltaje a un nivel apropiado así como también la corriente en sistemas compuestos .

Los rectificadores presentes pueden ser controlados o no controlados produciendo la corriente directa necesaria para el campo de la máquina síncrona.

En muchos sistemas de excitación estáticos, el máximo voltaje del excitador es muy elevado por lo que, debe existir circuitos adicionales que limiten la corriente de campo con lo ,que se logra proteger el excitador y el generador síncronico.

2.7.2 MODELO DEL SISTEMA DE EXCITACION ESTATICOS TIPO ST1

En la figura 2.14, se observa el modelo que representa a los sistemas de excitación estáticos a este tipo de sistemas de excitación la IEEE los denomina tipo ST1, el mismo que posee una acción continua del regulador de voltaje.

Este modelo representa a todos los sistemas en los cuales por medio de un transformador desde los terminales de la máquina síncrona (o líneas auxiliares) abastece el voltaje para la excitación ; el mismo que es regulado por medio de un rectificador controlado.

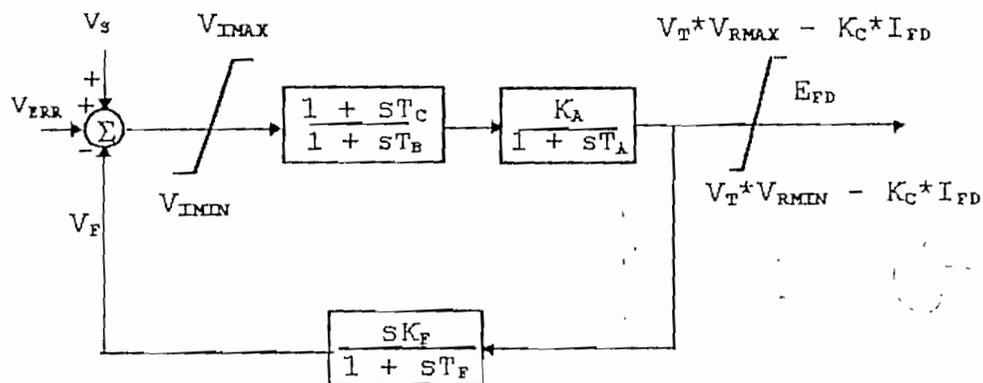


Figura 2.14 Sistema de Excitación Estático con Fuente de Voltaje y Rectificador Controlado tipo ST1

En tales sistemas de excitación el máximo voltaje del excitador se encuentra directamente relacionado con el voltaje terminal de la máquina síncrona. Las constantes de tiempo propias de estos sistemas son muy pequeñas y la estabilización del excitador como tal no es necesaria.

A cambio es necesario tener cuidado en escoger adecuadamente la reducción de la ganancia de los transitorios de dichos sistemas de excitación. Así el modelo de la figura 2.14 es suficientemente adecuado para representar la reducción de la ganancia de los transitorios, presentes en el lazo directo por medio de las constantes de tiempo T_B y T_C (en este caso K_F debe valer cero), o en el lazo de realimentación por medio de escoger valores adecuados de K_F y T_F .

Las constantes de tiempo propias del sistema de excitación y la ganancia del regulador se hallan representados en los valores de K_A y T_A .

En la mayoría de los casos el limitador interno del modelo, puede no ser considerado pero los límites del voltaje de campo los mismos que son función del voltaje terminal de la máquina síncrona (excepto cuando es alimentado por medio de líneas auxiliares) y la corriente de campo de la máquina se deben modelar. La constante K_C representa las características de los transformadores de alimentación la misma que es de valor despreciable, lo que permite despreciar el término $K_C \cdot I_{FD}$ no se considere en la modelación matemática de los sistemas de excitación ST1.

La configuración de los rectificadores puede ser tipo puente aunque el modelo aún es aplicable cuando se trate de un sistema de rectificadores semi-controlados, en los cuales el máximo valor negativo en el voltaje de campo debe ser cero.

Varios ejemplos de sistemas de excitación tipo ST1 son:

- General Electric Excitadores SILCOMATIC
- Westinghouse Sistemas de excitación estáticos tipo Ps con regulador tipo WTA y WHS
En Canada Excitador con tiristor de estado sólido.

2.7.3 MODELO DEL SISTEMA DE EXCITACION ESTATICOS TIPO ST2

Varios sistemas de excitación estáticos utilizan, fuentes de poder a base de la corriente y el voltaje terminal de la máquina sincrónica. Estos sistemas de excitación son de fuente compuesta y rectificadores la IEEE los ha denominado tipo ST2 y su modelo se indica en la figura 2.15.

En este tipo de sistemas de excitación aparece como fuente de poder del excitador una combinación de los fasores del voltaje terminal V_T y de la corriente terminal I_T .

La carga del rectificador y los efectos de conmutación se analiza en el capítulo III. E_{FDMAX} es el límite máximo del voltaje del excitador debido a la saturación de los componentes magnéticos.

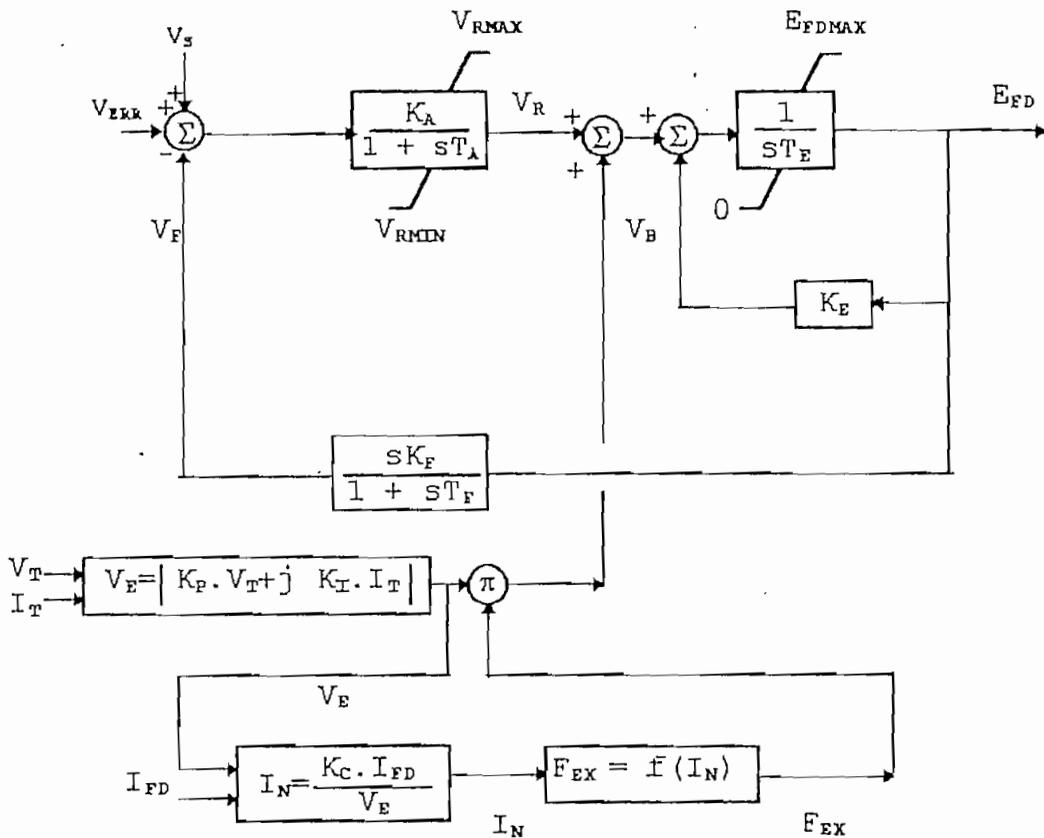


Figura 2.15 Sistema de Excitación con Fuente Compuesta Rectificada Tipo ST2

El regulador controla la salida del excitador por medio de un control de la saturación de los componentes de un transformador de potencia.

La constante de tiempo T_E representa el paso de integración asociado con la inductancia de los bobinados de control.

Este tipo de sistema de excitación combinan la señal de salida del regulador con la señal que representa la autoexcitación desde los terminales del generador, así K_p es el coeficiente de la fuente de excitación proporcional al voltaje terminal, K_i es el coeficiente de la fuente de corriente que se obtiene desde los terminales del transformador de corriente .

Un ejemplo de estos sistemas de excitación es de la General Electric SCT-PPT o SCPT.

CAPITULO III

MODELACION Y SIMULACION DE LOS SISTEMAS DE EXCITACION

3.1 ECUACIONES DIFERENCIALES

En base a los diagramas de bloques presentados en el capítulo anterior se realiza la modelación matemática mediante ecuaciones diferenciales para cada uno de los componentes de los modelos de los sistemas de excitación.

3.1.1 SISTEMA DE EXCITACION DE CORRIENTE CONTINUA

3.1.1.1 Modelo del Sistema de Excitación tipo DC1

De la representación en bloques de la figura 2.10 se tiene que la función de transferencia de la excitatriz esta dada por :

$$G(s) = \frac{1}{sT_E} \quad (3.1)$$

$$H(s) = S_E + K_E \quad (3.2)$$

De las ecuaciones (3.1) y (3.2) se obtiene la función transferencia de la excitatriz para el sistema de excitación de corriente continua tipo DC1.

$$\frac{E_{FD}}{V_R} = \frac{1}{sT_E + S_E + K_E} \quad (3.3)$$

donde s es el operador matemático d/dt , $sx = dx / dt = \dot{x}$; así la ecuación (3.3) puede escribirse en forma de variables de estado como:

$$\begin{aligned} V_R &= \dot{E}_{FD} \cdot T_E + E_{FD} \cdot S_E + E_{FD} \cdot K_E \\ \dot{E}_{FD} &= \frac{V_R}{T_E} - \frac{E_{FD}}{T_E} (S_E + K_E) \end{aligned} \quad (3.4)$$

La ecuación (3.4) representa a la excitatriz.

De la figura 2.2 se obtiene la relación entre el voltaje terminal y la señal que sirve para la comparación con el voltaje de referencia.

$$\frac{V_1}{V_T} = \frac{1}{1 + sT_R} \quad (3.5)$$

Tomando en consideración lo expuesto en el numeral 2.2 y si la constante T_R vale cero se tiene:

$$V_1 = V_T \quad (3.6)$$

$$V_{ERR} = V_{REF} - V_1 \quad (3.7)$$

Para analizar el regulador de voltaje se parte del modelo de la figura 2.10, considerando que las constantes de tiempo T_C y T_B son cero y que la señal V_S no está disponible debido a que no se simulará el estabilizador del sistema de potencia la función de transferencia del regulador es la siguiente:

$$\frac{V_R}{V_{ER}} = \frac{K_A}{1 + sT_A} \quad (3.8)$$

En variables de estado se tiene:

$$V_{ER} = V_{ERR} + V_S - V_F \quad (3.9)$$

$$K_A \cdot V_{ER} = \dot{V}_R \cdot T_A + V_R \quad (3.10)$$

$$\dot{V}_R = \frac{K_A}{T_A} V_{ER} - \frac{V_R}{T_A} \quad (3.11)$$

Reemplazando las ecuaciones (3.7) en (3.9) y con $V_S = 0$, se obtiene la ecuación de estado que representa al regulador.

$$\dot{V}_R = \frac{K_A}{T_A} (V_{REF} - V_T - V_F) - \frac{V_R}{T_A} \quad (3.12)$$

Para considerar los límites del regulador tenemos con $\dot{V}_R = f$, se tiene que:

$$f = \begin{cases} 0 & \text{Si } V_R = V_{RMAX} \text{ y } f > 0 \\ 0 & \text{Si } V_R = V_{RMIN} \text{ y } f < 0 \\ V_R & \text{Si } V_{RMIN} < V_R < V_{RMAX} \end{cases}$$

Para el análisis del estabilizador del sistema de excitación y haciendo referencia al modelo de la figura 2.10, la función de transferencia de este componente esta dada por :

$$\frac{V_F}{E_{FD}} = \frac{s K_F}{1 + sT_F} \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} V_F + \dot{V}_F \cdot T_F &= K_F \cdot \dot{E}_{FD} \\ \dot{V}_F &= \frac{K_F}{T_F} \dot{E}_{FD} - \frac{V_F}{T_F} \end{aligned} \quad (3.14)$$

Sustituyendo la ecuación (3.4) en la ecuación (3.14), la ecuación de estado del estabilizador es:

$$\begin{aligned} \dot{V}_F &= \frac{K_F}{T_F} \left(\frac{V_R}{T_E} - \frac{E_{FD}}{T_E} (S_E + K_E) \right) - \frac{V_F}{T_F} \\ \dot{V}_F &= \frac{K_F}{T_F} \frac{V_R}{T_E} - \frac{K_F}{T_F} \frac{E_{FD}}{T_E} (S_E + K_E) - \frac{V_F}{T_F} \end{aligned} \quad (3.15)$$

En resumen el sistema de ecuaciones de estado para la modelación de los sistemas de excitación tipo DC1 es:

$$\begin{aligned} \dot{V}_R &= \frac{K_A}{T_A} (V_{REF} - V_T - V_F) - \frac{V_R}{T_A} \\ \dot{V}_F &= \frac{K_F}{T_F} \frac{V_R}{T_E} - \frac{K_F}{T_F} \frac{E_{FD}}{T_E} (S_E + K_E) - \frac{V_F}{T_F} \\ \dot{E}_{FD} &= \frac{V_R}{T_E} - \frac{E_{FD}}{T_E} (S_E + K_E) \end{aligned} \quad (3.16)$$

3.1.1.2 Modelo del Sistema de Excitación tipo DC2

Considerando que este sistema es similar al tipo DC1, como lo indica el modelo de la figura 2.11, el sistema de ecuaciones que modelan el sistema de excitación tipo DC2 es el mismo que el obtenido para el tipo DC1 (3.16), tomando en cuenta el cambio de los límites en el regulador de voltaje, con $\dot{V}_R = f$ son:

$$f = \begin{cases} 0 & \text{Si } V_R = V_T * V_{RMAX} \text{ y } f > 0 \\ 0 & \text{Si } V_R = V_T * V_{RMIN} \text{ y } f < 0 \\ V_R & \text{Si } V_T * V_{RMIN} < V_R < V_T * V_{RMAX} \end{cases} \quad (3.17)$$

3.1.2 SISTEMA DE EXCITACION DE CORRIENTE ALTERNA

3.1.2.1 Modelo del Sistema de Excitación tipo AC1

Utilizando el modelo de la figura 2.12, en el que se considera las constantes de tiempo T_B y T_C iguales a cero debido, a que estas constantes son muy pequeñas, y que la señal V_S no está disponible, la función de transferencia y la ecuación de estado del regulador está dado por:

$$\frac{V_R}{V_{ER}} = \frac{K_A}{1 + sT_A} \quad (3.18)$$

$$K_A \cdot V_{ER} = V_R + T_A \cdot \dot{V}_R$$

$$\dot{V}_R = \frac{K_A}{T_A} V_{ER} - \frac{V_R}{T_A} \quad (3.19)$$

Al igual que para los sistemas de excitación tipo DC, se cumple el grupo de ecuaciones (3.6), (3.7) y (3.9) con lo cual la ecuación de estado que representa el regulador del sistema de excitación tipo AC1 es:

$$\dot{V}_R = \frac{K_A}{T_A} (V_{REF} - V_T - V_F) - \frac{V_R}{T_A} \quad (3.20)$$

Los límites del regulador de voltaje, con $\dot{V}_R = f$, deben satisfacer :

$$f = \begin{cases} 0 & \text{Si } V_R \geq V_{RMAX} \text{ y } f > 0 \\ 0 & \text{Si } V_R \leq V_{RMIN} \text{ y } f < 0 \\ V_R & \text{Si } V_{RMIN} < V_R < V_{RMAX} \end{cases} \quad (3.21)$$

La función de transferencia y la ecuación de estado del estabilizador del sistema de excitación están dadas por:

$$\frac{V_F}{V_{FE}} = \frac{s K_F}{1 + sT_F}$$

$$K_F \cdot \dot{V}_{FE} = V_F + \dot{V}_F \cdot T_F \quad (3.22)$$

Mientras que el modelo de la excitatriz de la figura 2.12 está representado por:

$$\frac{V_E}{V_{SR}} = \frac{1}{sT_E} \quad (3.23)$$

$$\dot{V}_E = \frac{1}{T_E} V_{SR} \quad (3.24)$$

Si $V_E \leq 0$ y $\dot{V}_E < 0$, entonces $\dot{V}_E = 0$. La señal V_{FE} y V_{SR} están definidas como:

$$V_{FE} = V_E \cdot (S_E + K_E) + K_D \cdot I_{FD} \quad (3.25)$$

$$V_{SR} = V_R - V_{FE} \quad (3.26)$$

Reemplazando (3.25) en (3.26) y el resultado en (3.24) se obtiene la ecuación de estado de la señal V_E :

$$\dot{V}_E = \frac{V_R}{T_E} - \frac{V_E}{T_E} (S_E + K_E) - \frac{K_D}{T_E} I_{FD} \quad (3.27)$$

Sustituyendo (3.27) en la derivada de (3.25) se tiene:

$$\dot{V}_{FE} = (S_E + K_E) \cdot \left[\frac{V_R}{T_E} - \frac{V_E}{T_E} (S_E + K_E) - \frac{K_D}{T_E} I_{FD} \right] + K_D \cdot \dot{I}_{FD} \quad (3.28)$$

Reemplazando (3.28) en (3.22), se obtiene la ecuación de estado de la salida del estabilizador, está dada por:

$$\dot{V}_F = (S_E + K_E) \cdot \frac{K_F}{T_F} \left[\frac{V_R}{T_E} - \frac{V_E}{T_E} (S_E + K_E) - \frac{K_D}{T_E} I_{FD} \right] + K_D \cdot \dot{I}_{FD} - \frac{V_F}{T_F} \quad (3.29)$$

Del diagrama de bloques de la figura 2.12, el voltaje de salida al circuito de campo del generador se obtiene como el producto de V_E y F_{EX}

$$E_{FD} = V_E \cdot F_{EX}$$

F_{EX} es función de la corriente I_N , la cual está definida como:

$$I_N = \frac{K_C \cdot I_{FD}}{V_E}$$

La función de regulación del rectificador F_{EX} tratada con detalle en el numeral 3.7, debe cumplir las siguientes condiciones:

$$F_{EX} = \begin{cases} 1 - 0.58 I_N & \text{Si } I_N \leq 0.433 \\ \sqrt{(0.75 - I_N^2)} & \text{Si } 0.433 < I_N < 0.75 \\ 1.732 \cdot (1 - I_N) & \text{Si } I_N \geq 0.75 \end{cases} \quad (3.30)$$

Por lo tanto, el sistema de ecuaciones que permite modelar los sistemas de excitación tipo

AC1 es:

$$\begin{aligned}\dot{V}_R &= \frac{K_A}{T_A} (V_{REF} - V_T - V_F) - \frac{V_R}{T_A} \\ \dot{V}_F &= (S_E + K_E) \cdot \frac{K_F}{T_F} \left(\frac{V_R}{T_E} - \frac{V_E}{T_E} (S_E + K_E) - \frac{K_D}{T_E} \cdot I_{FD} \right) + K_D \cdot \dot{I}_{FD} - \frac{V_F}{T_F} \\ \dot{V}_E &= \frac{V_R}{T_E} - \frac{V_E}{T_E} (S_E + K_E) - \frac{K_D}{T_E} I_{FD}\end{aligned}\quad (3.31)$$

3.1.2.2 Modelo del Sistema de Excitación tipo AC2

Realizando las mismas consideraciones que en el sistema de excitación tipo AC1, de la figura 2.13 se tiene que se cumplen las ecuaciones (3.6), (3.7) y (3.9). Si $V_s = 0$ y sustituyendo (3.7) en (3.9), el error de voltaje es:

$$V_{ER} = V_{REF} + V_T - V_F \quad (3.32)$$

$$\frac{V_A}{V_{ER}} = \frac{K_A}{1 + sT_A} \quad (3.33)$$

$$\begin{aligned}K_A \cdot V_{ER} &= V_A + T_A \cdot \dot{V}_A \\ \dot{V}_A &= \frac{K_A}{T_A} V_{ER} - \frac{V_A}{T_A}\end{aligned}\quad (3.34)$$

Así, la ecuación de estado del amplificador del regulador se obtiene reemplazando la ecuación (3.32) en (3.34).

$$\dot{V}_A = \frac{K_A}{T_A} (V_{REF} - V_T - V_F) - \frac{V_A}{T_A} \quad (3.35)$$

Sin embargo la salida del amplificador, con $\dot{V}_A = f$, está limitada por:

$$f = \begin{cases} 0 & \text{Si } V_A \geq V_{AMAX} \text{ y } f > 0 \\ 0 & \text{Si } V_A \leq V_{AMIN} \text{ y } f < 0 \\ V_A & \text{Si } V_{AMIN} < V_A < V_{AMAX} \end{cases}$$

Considerando que f existe, es decir que se encuentra entre los límites.

$$V_{A1} = V_A - V_H \quad (3.36)$$

La señal que alimenta la compuerta lógica de bajo valor (LV) de la figura 2.13, está determinada por:

$$S_G = V_{A1} \quad \text{Si } V_{A1} \leq V_L \quad (3.37)$$

$$S_G = V_L \quad \text{Si } V_{A1} > V_L \quad (3.38)$$

$$V_H = K_H \cdot V_{FE} \quad (3.39)$$

$$V_L = K_L \cdot (V_{LR} - V_{FE}) \quad (3.40)$$

Por lo tanto, las ecuaciones (3.32) a (3.40) determinan la señal de salida del regulador la cual está sujeta a los límites siguientes:

$$V_R = \begin{cases} V_{RMAX} & \text{Si } S_G \cdot K_B > V_{RMAX} \\ V_{RMIN} & \text{Si } S_G \cdot K_B < V_{RMIN} \\ S_G \cdot K_B & \text{Si } V_{RMIN} \leq S_G \cdot K_B \leq V_{RMAX} \end{cases} \quad (3.41)$$

Si se compara los diagramas de los modelos AC1 y AC2, se puede determinar que tanto la excitatriz como el estabilizador se encuentran modelados de la misma manera, por lo que, las ecuaciones de la salida del estabilizador V_F y el voltaje de la excitatriz V_E son las mismas.

Luego, las ecuaciones de estado que representan el modelo del sistema de excitación tipo AC2 son:

$$\begin{aligned} \dot{V}_A &= \frac{K_A}{T_A} (V_{REF} - V_T - V_F) - \frac{V_A}{T_A} \\ \dot{V}_F &= (S_E + K_E) \cdot \frac{K_F}{T_F} \left(\frac{V_R}{T_E} - \frac{V_E}{T_E} (S_E + K_E) - \frac{K_D}{T_E} \cdot I_{FD} \right) + K_D \cdot \dot{I}_{FD} - \frac{V_F}{T_F} \\ \dot{V}_E &= \frac{V_R}{T_E} - \frac{V_E}{T_E} (S_E + K_E) - \frac{K_D}{T_E} I_{FD} \end{aligned} \quad (3.42)$$

El voltaje E_{FD} de alimentación al circuito de campo tiene idéntica modelación que en el caso del sistema de excitación tipo AC1.

3.1.3 SISTEMA DE EXCITACION ESTATICOS

3.1.3.1 Modelo del Sistema de Excitación tipo ST1

Del modelo de la figura 2.14, considerando que las constantes de tiempo T_B y T_C son insignificantes, la reducción de la ganancia de transitorios se representa por medio de K_F y T_F .

De manera similar que en los otros casos, se cumple las ecuaciones (3.6), (3.7) y (3.9) para el voltaje de error:

$$V_{ER} = V_{REF} - V_T - V_F + V_S \quad (3.43)$$

De acuerdo a los límites internos la señal V_{ER} , puede tomar los siguientes valores :

$$V_{ER} = \begin{cases} V_{IMAX} & \text{Si } V_{ER} > V_{IMAX} \\ V_{IMIN} & \text{Si } V_{ER} < V_{IMIN} \\ V_{ER} & \text{Si } V_{IMIN} < V_{ER} < V_{IMAX} \end{cases} \quad (3.44)$$

De igual manera, la salida del regulador de voltaje puede deducirse como:

$$\frac{V_R}{V_{ER}} = \frac{K_A}{1 + sT_A} \quad (3.45)$$

$$K_A \cdot V_{ER} = V_R + T_A \cdot \dot{V}_R$$

$$\dot{V}_R = \frac{K_A}{T_A} V_{ER} - \frac{V_R}{T_A} \quad (3.46)$$

$$\dot{V}_R = \frac{K_A}{T_A} (V_{REF} - V_T - V_F + V_S) - \frac{V_R}{T_A} \quad (3.47)$$

La reducción de la ganancia de los transitorios viene dada por:

$$\frac{V_F}{V_R} = \frac{s K_F}{1 + sT_F} \quad (3.48)$$

$$K_F \cdot \dot{V}_R = V_F + \dot{V}_F \cdot T_F$$

$$\dot{V}_F = \frac{K_F}{T_F} \dot{V}_R - \frac{V_F}{T_F} \quad (3.49)$$

Reemplazando las ecuaciones (3.47) en la (3.49) se obtiene :

$$\dot{V}_F = \frac{K_F}{T_F} \left(\frac{K_A}{T_A} V_{ER} - \frac{V_R}{T_A} \right) - \frac{V_F}{T_F} \quad (3.50)$$

Esta señal está limitada por las condiciones impuestas por la ecuación (3.44).

Considerando que $K_C = 0$, el voltaje E_{FD} satisface las siguientes restricciones:

$$E_{FD} = \begin{cases} V_T * V_{RMAX} & \text{Si } V_R > V_T * V_{RMAX} \\ V_T * V_{RMIN} & \text{Si } V_R < V_T * V_{RMIN} \\ V_R & \text{Si } V_T * V_{RMIN} \leq V_R \leq V_T * V_{RMAX} \end{cases} \quad (3.51)$$

Por lo tanto, las ecuaciones de estado que modelan los sistemas de excitación tipo ST1 son :

$$\begin{aligned} \dot{V}_R &= \frac{K_A}{T_A} V_{ER} - \frac{V_R}{T_A} \\ \dot{V}_F &= \frac{K_F}{T_F} \left(\frac{K_A}{T_A} V_{ER} - \frac{V_R}{T_A} \right) - \frac{V_F}{T_F} \end{aligned} \quad (3.52)$$

Con los límites dados en (3.44) y (3.51).

3.1.3.2 Modelo del Sistema de Excitación tipo ST2

Del modelo de la figura 2.15, la función de transferencia y la ecuación de estado para el voltaje de salida al campo del generador E_{FD} satisface la restricción $0 \leq E_{FD} \leq E_{FDMAX}$:

$$\begin{aligned} \frac{E_{FD}}{V_{RI}} &= \frac{1}{K_E + sT_E} \\ V_{RI} &= E_{FD} \cdot K_E + T_E \cdot \dot{E}_{FD} \\ \dot{E}_{FD} &= \frac{V_{RI}}{T_E} - \frac{K_E}{T_E} E_{FD} \end{aligned} \quad (3.53)$$

Del diagrama de bloques de la figura 2.15 se tiene:

$$V_{RI} = V_B + V_R \quad (3.54)$$

$$V_B = V_E \cdot F_{EX} \quad (3.55)$$

$$V_E = | K_P \cdot \bar{V}_T + j K_I \cdot \bar{I}_T | \quad (3.56)$$

De acuerdo con la referencia [16] los fasores de voltaje y corriente son:

$$\bar{V}_T = V_T \angle 0^\circ \quad ; \quad \bar{I}_T = I_T \angle \beta$$

La función de regulación del rectificador F_{EX} tratada con detalle en el numeral 3.7, cumple con (3.30).

Sustituyendo (3.55) en (3.54) y este resultado en la ecuación (3.53) se tiene:

$$\dot{E}_{FD} = \frac{V_R}{T_E} + \frac{V_E}{T_E} \cdot F_{EX} - \frac{K_E}{T_E} E_{FD} \quad (3.57)$$

Sin embargo, con $\dot{E}_{FD} = h$, debe satisfacer:

$$h = \begin{cases} 0 & \text{Si } E_{FD} \geq E_{FDMAX} \text{ y } h > 0 \\ 0 & \text{Si } E_{FD} \leq 0 \text{ y } h < 0 \\ -E_{FD} & \text{Si } 0 < E_{FD} < E_{FDMAX} \end{cases} \quad (3.58)$$

De manera similar, que el caso del tipo ST1, se considera las ecuaciones (3.6), (3.7) y (3.9) para el voltaje de error; así la función de transferencia y la ecuación de estado del regulador es:

$$\begin{aligned} \frac{V_R}{V_{ER}} &= \frac{K_A}{1 + sT_A} \\ K_A \cdot V_{ER} &= V_R + T_A \cdot \dot{V}_R \\ \dot{V}_R &= \frac{K_A}{T_A} V_{ER} - \frac{V_R}{T_A} \end{aligned} \quad (3.59)$$

Con $V_s = 0$, reemplazando la ecuación (3.9) en (3.59) se tiene:

$$\dot{V}_R = \frac{K_A}{T_A} (V_{REF} - V_T - V_F) - \frac{V_R}{T_A} \quad (3.60)$$

Para considerar los límites del regulador, con $\dot{V}_R = f$, se tiene que:

$$f = \begin{cases} 0 & \text{Si } V_R = V_{RMAX} \text{ y } f > 0 \\ 0 & \text{Si } V_R = V_{RMIN} \text{ y } f < 0 \\ V_R & \text{Si } V_{RMIN} < V_R < V_{RMAX} \end{cases} \quad (3.61)$$

La función de transferencia y la ecuación de estado para el estabilizador del sistema de excitación están dadas por:

$$\begin{aligned} \frac{V_F}{E_{FD}} &= \frac{s K_F}{1 + sT_F} \\ K_F \cdot E_{FD} &= V_F + T_F \cdot \dot{V}_F \\ \dot{V}_F &= \frac{K_F}{T_F} E_{FD} - \frac{V_F}{T_F} \end{aligned} \quad (3.62)$$

Reemplazando la ecuación (3.57) en la (3.62) se tiene:

$$\dot{V}_F = \frac{K_F}{T_F} \left(\frac{V_R}{T_E} + \frac{V_E}{T_E} \cdot F_{EX} - \frac{K_E}{T_E} E_{FD} \right) - \frac{V_F}{T_F} \quad (3.63)$$

Por lo tanto, el sistema de ecuaciones de estado que modelan el sistema de excitación tipo ST2 son:

$$\begin{aligned} \dot{V}_R &= \frac{K_A}{T_A} (V_{REF} - V_T - V_F) - \frac{V_R}{T_A} \\ \dot{V}_F &= \frac{K_F}{T_F} \left(\frac{V_R}{T_E} + \frac{V_E}{T_E} \cdot F_{EX} - \frac{K_E}{T_E} E_{FD} \right) - \frac{V_F}{T_F} \\ \dot{E}_{FD} &= \frac{V_R}{T_E} + \frac{V_E}{T_E} \cdot F_{EX} - \frac{K_E}{T_E} E_{FD} \end{aligned} \quad (3.64)$$

3.2 FUNCIONES DE TRANSFERENCIA

De acuerdo con los modelos de los sistemas de excitación descritos en los diagramas de bloques presentados en el capítulo anterior, se obtienen las funciones de transferencia de lazo cerrado.

La función de transferencia de un sistema cualquiera con reglamentación está definida por [7,19]:

$$F_T = \frac{G(s)}{1 + G(s) \cdot H(s)} \quad (3.65)$$

Donde F_T indica la relación entre la señal de salida y la señal de entrada, la misma que puede ser obtenida por medio de la reducción de los diagramas de bloques.

La ecuación $1+G(s)H(s)$ se denomina ecuación característica de la función de transferencia dada, si el sistema posee más de una señal, la ecuación característica es la misma independientemente de cual señal es elegida como entrada [7].

En la determinación de la función de transferencia de los distintos sistemas de excitación presentados en el presente trabajo no se considera la saturación y los límites.

3.2.1 SISTEMA DE EXCITACION DE CORRIENTE CONTINUA

3.2.1.1 Modelo del Sistema de Excitación tipo DC1

Como el modelo presentado en la figura 2.10 y aplicando las consideraciones realizadas en el trayecto directo, la ganancia $G(s)$ es:

$$G(s) = G_R * G_E \quad (3.66)$$

donde G_R y G_E son las ganancias del regulador y la excitatriz, dadas por:

$$G_R(s) = \frac{K_A}{1 + s T_A} \quad (3.67)$$

$$G_E(s) = \frac{1}{K_E + s T_E} \quad (3.68)$$

La ganancia del lazo de estabilización es:

$$H(s) = \frac{s K_F}{1 + s T_F} \quad (3.69)$$

Realizando operaciones matemáticas con las ecuaciones (3.67), (3.68) en (3.66) y esta con (3.69) en la (3.65), se obtiene la función de transferencia del sistema de excitación tipo DC1:

$$F_{TDC1} = \frac{K_A (1+sT_F)}{(1+sT_A)(1+sT_F)(K_E+sT_E) + s K_A K_F} \quad (3.70)$$

3.2.1.2 Modelo del Sistema de Excitación tipo DC2

De acuerdo al modelo del sistema de excitación tipo DC2 indicado en la figura 2.11, realizando las mismas consideraciones que en el sistema de excitación tipo DC1, se obtiene el mismo diagrama de bloques, por lo que el sistema de excitación tipo DC2 se encuentra representado por la misma función de transferencia (3.70).

3.2.2 SISTEMA DE EXCITACION DE CORRIENTE ALTERNA

3.2.2.1 Modelo del Sistema de Excitación tipo AC1

Se observa del diagrama de bloques de la figura 2.12, que el sistema de excitación tipo AC1 tiene dos señales de entrada, por lo que para determinar la función de transferencia es

necesario considerar el efecto de cada una separadamente. Realizando una reducción de los de bloques se tiene:

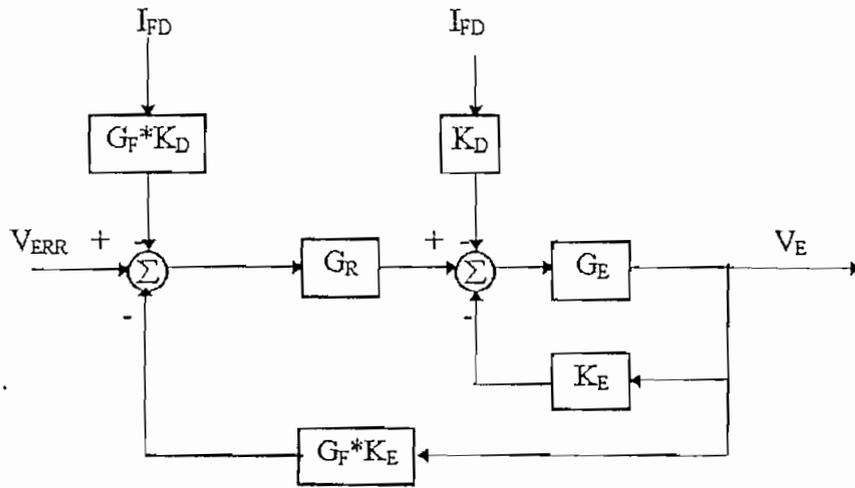


Figura 3.1 Diagrama de Bloques del Sistema de Excitación tipo AC1

donde las funciones de transferencia del regulador de voltaje, de la excitatriz y del estabilizador del sistema de excitación están dadas por:

$$G_R(s) = \frac{K_A}{1 + s T_A} \quad (3.71)$$

$$G_E(s) = \frac{1}{s T_E} \quad (3.72)$$

$$G_F(s) = \frac{s K_F}{1 + s T_F} \quad (3.73)$$

Considerando por separado el efecto de cada señal, de la figura 3.1 se tiene:

Función de transferencia para la señal V_{ERR} :

$$\frac{G_R * \frac{G_E}{1 + K_E * G_E}}{1 + \frac{G_R * \frac{G_E}{1 + K_E * G_E} * G_F * K_E}{1 + K_E * G_E}} = \frac{G_R * G_E}{1 + G_E * K_E + G_R * G_E * G_F * K_E} \quad (3.74)$$

Función de transferencia para la señal I_{FD}

$$\frac{G_R * \frac{G_E}{1 + K_E * G_E} * G_F * K_D + \frac{G_E * K_D}{1 + K_E * G_E}}{1 + \frac{G_R * \frac{G_E}{1 + K_E * G_E} * G_F * K_E}{1 + K_E * G_E}} = \frac{G_R * G_E * G_F * K_D + G_E * K_D}{1 + G_E * K_E + G_R * G_E * G_F * K_E} \quad (3.75)$$

Por lo tanto, la función de transferencia parcial del sistema de excitación AC1 es la suma de las ecuaciones (3.74) y (3.75).

$$F_{TPAC1} = \frac{1}{1 + G_E * K_E + G_F * G_R * G_E * K_E} \{ G_R * G_E * V_{ERR} - [G_E * K_D + G_F * G_R * G_E * K_D] I_{FD} \} \tag{3.76}$$

Reemplazando las ecuaciones (3.71), (3.72) y (3.73) en la ecuación (3.76) se tiene :

$$F_{TPAC1} = \frac{sT_E(1+sT_F)(1+sT_A)}{sT_E(1+sT_F)(1+sT_A) + K_E(1+sT_F)(1+sT_A) + sK_A K_E K_F} \left\{ \frac{K_A}{sT_E(1+sT_A)} V_{ERR} - \left[\frac{K_D}{sT_E} + \frac{sK_F K_A K_D}{sT_E(1+sT_A)(1+sT_F)} \right] I_{FD} \right\} \tag{3.77}$$

Para obtener la función de transferencia total del sistema de excitación AC1, de acuerdo con el modelo de la figura 2.12, se multiplica por la señal F_{EX}:

$$F_{TAC1}(s) = F_{TPAC1} * F_{EX} \tag{3.78}$$

3.2.2.2 Modelo del Sistema de Excitación tipo AC2

De acuerdo al modelo del sistema de excitación tipo AC2 indicado en la figura 2.13, de la misma manera que en los otros casos sin considerar las no-linealidades, se obtiene un diagrama de bloques reducido como se indica en la figura 3.2.

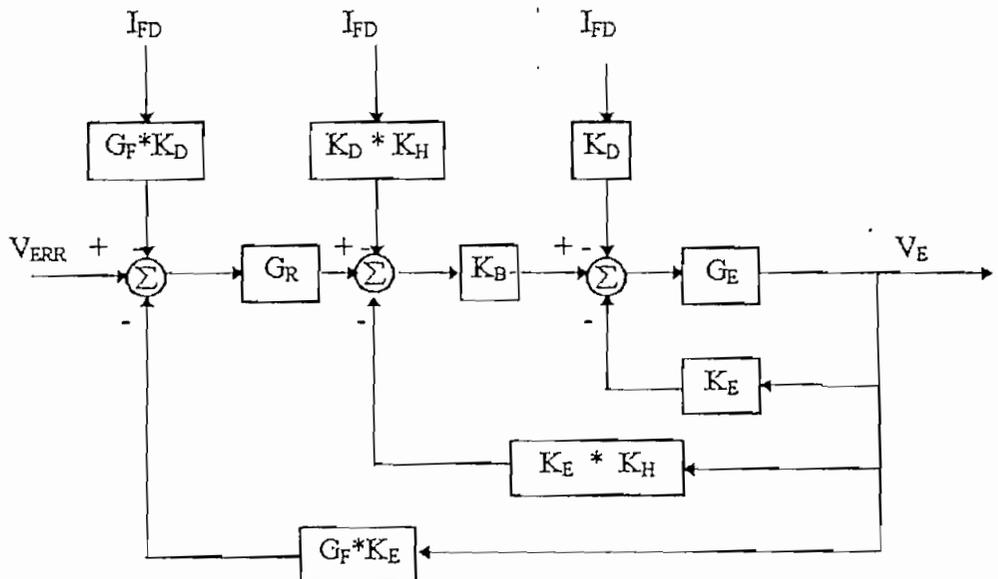


Figura 3.2 Diagrama de Bloques del Sistema de Excitación tipo AC2

donde la función de transferencia del regulador de voltaje, de la excitatriz y del estabilizador están dados por:

$$G_R(s) = \frac{K_A}{1 + s T_A} \quad (3.79)$$

$$G_E(s) = \frac{1}{s T_E} \quad (3.80)$$

$$G_F(s) = \frac{s K_F}{1 + s T_F} \quad (3.81)$$

Considerando por separado el efecto de cada señal, de la figura 3.2 se tiene:

Función de transferencia para la señal V_{ERR} :

Del diagrama de bloques se tiene de los lazos de realimentación internos.

$$\frac{K_B * \frac{G_E}{1 + K_E * G_E}}{1 + \frac{K_B * \frac{G_E}{1 + K_E * G_E} * K_H * K_E}} = \frac{G_E * K_B}{1 + G_E * K_E + K_B * G_E * K_H * K_E} \quad (3.82)$$

Por lo tanto la función de transferencia que permite analizar el efecto de V_{ERR} es :

$$\frac{\frac{G_R * G_E * K_B}{1 + G_E * K_E + K_B * G_E * K_H * K_E}}{1 + \frac{G_R * G_E * K_B}{1 + G_E * K_E + K_B * G_E * K_H * K_E} * G_F * K_E} = \frac{G_R * G_E * K_B}{1 + G_E * K_E + K_B * G_E * K_H * K_E + G_R * G_F * G_E * K_B * K_E} \quad (3.83)$$

Función de transferencia para la señal I_{FD} :

$$\frac{\frac{G_E * K_D + G_E * K_B * K_D * K_H + G_R * G_E * G_F * K_B * K_D}{1 + G_E * K_E + K_B * G_E * K_H * K_E}}{1 + \frac{G_R * G_E * K_B}{1 + G_E * K_E + K_B * G_E * K_H * K_E} * G_F * K_E} = \frac{G_E * K_D + G_E * K_B * K_D * K_H + G_R * G_E * G_F * K_B * K_D}{1 + G_E * K_E + K_B * G_E * K_H * K_E + G_R * G_F * G_E * K_B * K_E} \quad (3.84)$$

Por lo tanto, la función de transferencia parcial del sistema de excitación AC2 es la suma de las ecuaciones (3.83) y (3.84).

$$F_{TPAC2} = \frac{1}{1 + G_E * K_E + K_H * K_B * G_E * K_E + G_F * G_R * G_E * K_B * K_E} \{ G_R * G_E * K_B V_{ERR} - [G_E * K_D + G_F * G_R * G_E * K_D * K_B + K_D * K_H * K_B * G_E] I_{FD} \} \quad (3.85)$$

Reemplazando las ecuaciones (3.79), (3.80) y (3.81) en la ecuación (3.85) se tiene :

$$F_{TPAC2} = \left\{ \frac{K_A K_B}{s T_E (1+s T_A)} V_{ER} - \left[\frac{K_D}{s T_E} + \frac{s K_F K_A K_D K_B}{s T_E (1+s T_A) (1+s T_F)} + \frac{K_H K_B K_D}{s T_E} \right] I_{FD} \right\} \frac{s T_E (1+s T_F) (1+s T_A)}{s T_E (1+s T_F) (1+s T_A) + K_E (1+s T_F) (1+s T_A) + K_H K_B K_E (1+s T_F) (1+s T_A) + s K_A K_F K_B K_E} \quad (3.86)$$

Al igual que para obtener la función de transferencia total del tipo AC1, para el sistema de excitación AC2 como lo indica la figura 2.13 se tiene:

$$F_{TAC2}(s) = F_{TPAC2} * F_{EX} \quad (3.87)$$

3.2.3 SISTEMA DE EXCITACION ESTATICOS

3.2.3.1 Modelo del Sistema de Excitación tipo ST1

Con referencia al modelo de la figura 2.14 y considerando las constantes de tiempo T_B y T_C cero; la función de transferencia del regulador de voltaje sin considerar los límites está dada por:

$$G(s) = \frac{K_A}{1 + s T_A} \quad (3.88)$$

La ganancia del lazo estabilización es:

$$H(s) = \frac{s K_F}{1 + s T_F} \quad (3.89)$$

Luego, la función de transferencia que representa el sistema de excitación ST1 es:

$$F_{TST1} = \frac{K_A (1 + s T_F)}{(1 + s T_A) (1 + s T_F) + s K_A K_F} \quad (3.90)$$

3.2.3.2 MODELO DEL SISTEMA DE EXCITACION TIPO ST2

Con referencia al diagrama de bloques del sistema de excitación tipo ST2 de la figura 2.15 y considerando los efectos de cada una de señales de manera individual, la función de transferencia se obtiene a continuación:

Para la señal V_{ERR} :

$$G(s) = \frac{K_A}{1 + s T_A} \frac{1}{K_E + s T_E} \quad (3.91)$$

Y con el lazo de estabilización del sistema de excitación se tiene:

$$F_{T1} = \frac{K_A (1+s T_F)}{(1+s T_A)(1+s T_F)(K_E+s T_E) + s K_A K_F} \quad (3.92)$$

Para la señal V_B :

$$G(s) = \frac{1}{K_E + sT_E} \quad (3.93)$$

En este caso la ganancia del lazo de estabilización es:

$$H(s) = \frac{sK_F}{1 + sT_F} \frac{K_A}{(1+sT_A)} \quad (3.94)$$

Con lo cual se tiene:

$$F_{T2} = \frac{(1+sT_F)(1+sT_A)}{(1+sT_A)(1+sT_F)(K_E+sT_E) + sK_AK_F} \quad (3.95)$$

Luego, la función de transferencia del sistema de excitación tipo ST2 es la suma de las ecuaciones (3.92) y (3.95)

$$F_{TST2} = \frac{1}{(1+sT_A)(1+sT_F)(K_E+sT_E) + sK_AK_F} \{K_A(1+sT_F)V_{ERR} + (1+sT_A)(1+sT_F)V_B\} \quad (3.96)$$

La señal V_B se calcula como:

$$V_B(s) = V_E(s) * F_{EX}$$

donde : $V_E(s) = |K_P V_T + j K_I I_T|$

y F_{EX} es la regulación de las componentes rectificadores, definida en (3.30)

3.3 ALGORITMO DE SIMULACION DE LOS SISTEMAS DE EXCITACION

En base a los sistemas de ecuaciones que representan los diferentes modelos de los sistemas de excitación, para insertarlos en un programa computacional se utilizo el siguiente algoritmo:

- a) Lectura-almacenamiento de los parámetros, de los diferentes sistemas de excitación.
- b) Determinar las condiciones iniciales (analizadas con detalle en el capítulo IV), de acuerdo al tipo de sistema de excitación.
- c) Resolver las diferentes ecuaciones diferenciales de los sistemas de excitación analizadas en el numeral 3.1, por medio del método de Runge-Kutta, con la consideración de los límites de la modelación.
- d) Cálculo de la función de regulación F_{EX} para los sistemas de excitación alternos (AC o ST2).
- e) Calcular el nuevo valor de voltaje interno del generador.
- f) Calcular la saturación de la excitatriz para el paso $n+1$.
- g) El proceso continua desde el literal c, luego de calcular los valores de voltajes y corrientes del sistema y generadores.

3.4 ANALISIS DINAMICO EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

El comportamiento dinámico de los sistemas de excitación se analiza para una señal de entrada de prueba, se escoge, la función escalón, debido a que las condiciones frecuentes de operación de los sistemas de excitación a las que se hallan sometidos son perturbaciones bruscas que la carga demanda a las máquinas sincrónicas.

Existen paquetes computacionales para análisis dinámico del sistema de control que permiten obtener la respuesta de un sistema a las funciones escalón, impulso y aleatorias. Estos utilizan las funciones de transferencia como representación de planta debido a que ellas representan la relación existente entre las señales de salida y entrada. Además, estos programas permiten obtener el lugar geométrico de las raíces (LGR), por la graficación de las raíces (polos) de la ecuación característica.

La utilidad más importante del LGR es el análisis de la estabilidad del sistema por medio de la ubicación de los polos y ceros en el plano complejo.

Para llevar adelante un análisis el análisis dinámico de los sistemas de excitación se utiliza el paquete computacional "CAD CONTROL (CC)". De la referencia [2,16] se obtienen las constantes necesarias de cada uno de los sistemas de excitación.

3.4.1 SISTEMAS DE EXCITACION DE CORRIENTE CONTINUA

Como se determinó en el numeral 3.2; los sistemas de excitación tipo DC1 y DC2 se encuentran representados por la misma función de transferencia. El LGR y la respuesta a la función escalón se presenta en las figuras 3.3 y 3.4 para las constantes siguientes:

$$\begin{array}{ll} K_A = 65.2 & T_A = 0.1 \\ K_E = -0.11 & T_E = 1.93 \\ K_F = 0.12 & T_F = 1 \end{array}$$

Con lo que la función de transferencia de lazo abierto para los sistemas de excitación de corriente continua está dada por:

$$G(s) \cdot H(s) = \frac{7.824 s}{\underbrace{(0.1s + 1)}_{\text{Regulador}} \underbrace{(s + 1)}_{\text{Estabilizador}} \underbrace{(1.93s - 0.11)}_{\text{Excitador}}} \quad (3.97)$$

Del LGR, puede verse que la estabilidad del sistema de excitación tipo DC se ve directamente afectada por el polo del excitatriz, así como por el cero generado del estabilizador.

Para que un sistema sea estable es necesario que todos los polos queden a la izquierda del eje imaginario; es decir, en el semiplano izquierdo del plano complejo, caso contrario el sistema es inestable.

Reemplazando los valores indicados en la función de transferencia de lazo cerrado los sistemas de excitación de corriente continua se tiene :

$$F_{TDC} = \frac{65.2 (s + 1)}{(0.1s + 1)(s + 1)(1.93s - 0.11) + 7.824 s} \quad (3.98)$$

Se observa que la ecuación característica de (3.98), representa un sistema de tercer orden, y debido a que existe un polo muy cercano del eje imaginario, de acuerdo a la figura 3.3; la respuesta a la función escalón es lenta. Por lo tanto, estos sistemas de excitación poseen una respuesta lenta perturbaciones externas.

Como se puede comprobar en la figura 3.4, el tiempo para alcanzar el valor de la entrada de la función escalón unitario es de 1.3 segundos, aproximadamente.

La forma de las oscilaciones depende de los ceros de la función de transferencia en este caso está proporcionado por el estabilizador.

Ya que si no existiera aún para valores pequeños de ganancia del regulador el sistema sería inestable debido al polo de la excitatriz y la señal seguiría creciendo indefinidamente.

Por medio del estabilizador se logra reducir el error existente entre la señal de entrada y salida, el mismo que es proporcional a la ganancia del regulador.

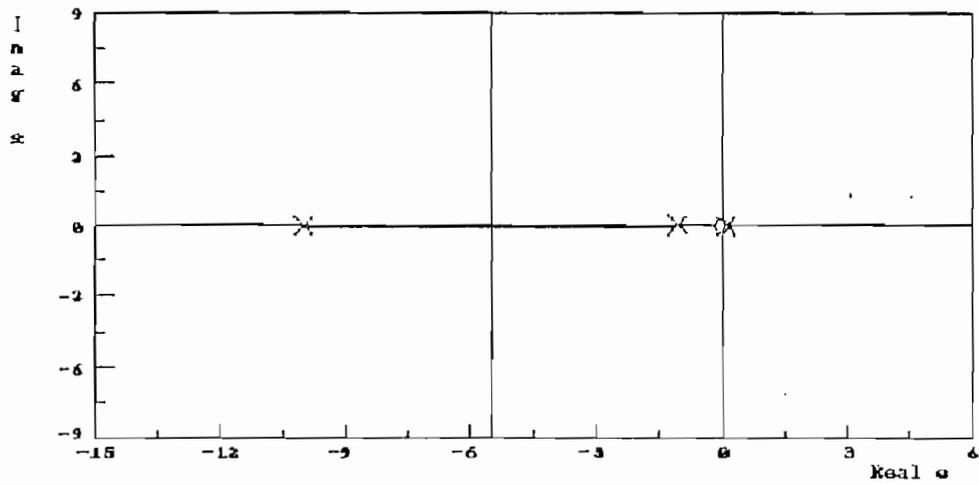


Figura 3.3 Lugar Geometrico de las Raices de los Sistemas de Excitación DC1 - DC2

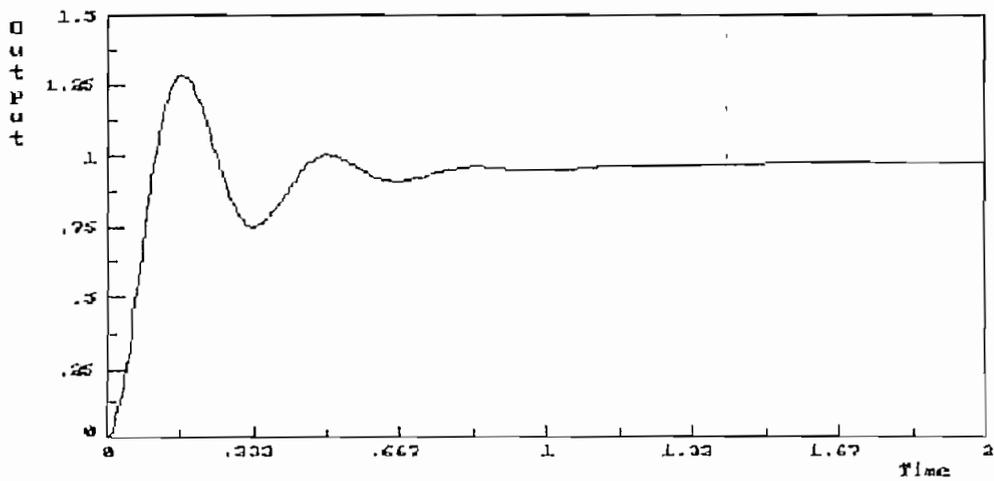


Figura 3.4 Respuesta al Escalon de los Sistemas de Excitación DC1 - DC2

3.4.2 SISTEMAS DE EXCITACION DE CORRIENTE ALTERNA

La respuesta de este tipo de sistemas de excitación es más rápida que lo sistemas de excitación de corriente continua; debido a que la excitación es obtenida a través de un grupo alternador rectificador. Por medio de la función de transferencia del sistema de excitación tipo AC1 se tiene que la ecuación característica, con las constantes siguientes es:

$$G(s) \cdot H(s) = \frac{12 s}{\underbrace{(0.02s + 1)}_{\text{Regulador}} \underbrace{(s + 1)}_{\text{Estabilizador}} \underbrace{(1.3s + 1)}_{\text{Excitador}}} \quad (3.99)$$

En la figura 3.5, en el LGR se observa que la estabilidad depende directamente de la excitatriz y el estabilizador, al igual que en el caso de los sistemas de excitación de corriente continua, pero con la característica de que todos los polos se encuentran ubicados en el semiplano izquierdo del plano complejo.

El polo de la excitatriz cercano al eje imaginario, determina que la respuesta en el tiempo presente oscilaciones más bruscas, pero que se amortiguan más rápidamente. Además debido a que la función de transferencia del sistema de excitación tipo AC1 depende directamente de las componentes rectificadoras F_{EX} , se presentan tres modos de operación.

De la figura 3.6 se observan las tres curvas obtenidas considerando la función de transferencia (3.78). Donde F_{EX} , posee valores representativos de acuerdo al modo de operación (Cuadro 3.1).

Cuadro 3.1 Valores representativos de F_{EX}

Modo	F_{EX}
I	0.9
II	0.45
III	0.2

En la figura 3.6 se observa la influencia que regulación de las componentes rectificadores F_{EX} posee en la respuesta de sistema tipo AC1 a la función escalón. De las curvas se observa que el mejor tiempo de respuesta se en el modo I, aunque presenta el mayor número de oscilaciones. En el modo de operación III se obtiene un sistema más lento pero con menor número de oscilaciones y en el modo II se obtiene un caso intermedio. Para cualquiera de los casos el tiempo en que la señal de salida se estabiliza es inferior a 1segundo.

Los sistemas de excitación tipo AC2 presentan un LGR similar al del tipo AC1, como se observa en la figura 3.7. Sin embargo debido a los lazos de realimentación de la corriente de campo, se observa que los polos que afectan la estabilidad del sistema se encuentran en el estabilizador. Con los datos siguientes, la función de transferencia de lazo abierto es:

$$\begin{array}{ll} K_A = 400 & T_A = 0.02 \\ K_E = 1 & T_E = 1.3 \\ K_F = 0.03 & T_F = 1 \\ K_B = 400 & K_H = 0.2 \end{array}$$

$$G(s) \cdot H(s) = \frac{4800 s}{\underbrace{(0.02s + 1)}_{\text{Regulador}} \underbrace{(s + 1)}_{\text{Estabilizador}} \underbrace{(1.3s + 81)}_{\text{Excitador}}} \quad (3.100)$$

El cero introducido por el estabilizador hace que el sistema, a pesar de poseer una elevada ganancia, no sea inestable. Además se ha logrado que el polo del estabilizador se aleje del eje imaginario mejorando la estabilidad con respecto a la del sistema tipo AC1.

La respuesta en el tiempo es similar a aquella del sistema tipo AC1 con iguales condiciones para F_{EX} (Cuadro 3.1).

En la figura 3.8 se observa que el sistema AC2 es de respuesta rápida. Se estabiliza en cualquiera de los tres modos de operación en menos de 1 segundo. Sin embargo posee un elevado número de oscilaciones causadas por los lazos de realimentación de la corriente de campo a través de las ganancias de dichos lazos.

En cualesquiera de los modos de operación, los sistemas de excitación de corriente alterna presentan oscilaciones que se amortiguan debido a la respuesta rápida del estabilizador.

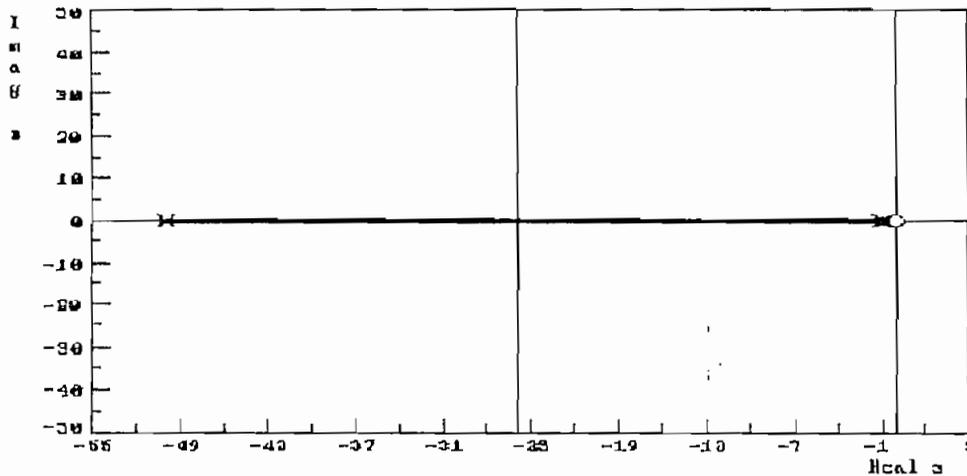


Figura 3.5 a) Lugar Geometrico de las Raíces del Sistema de Excitación ACI

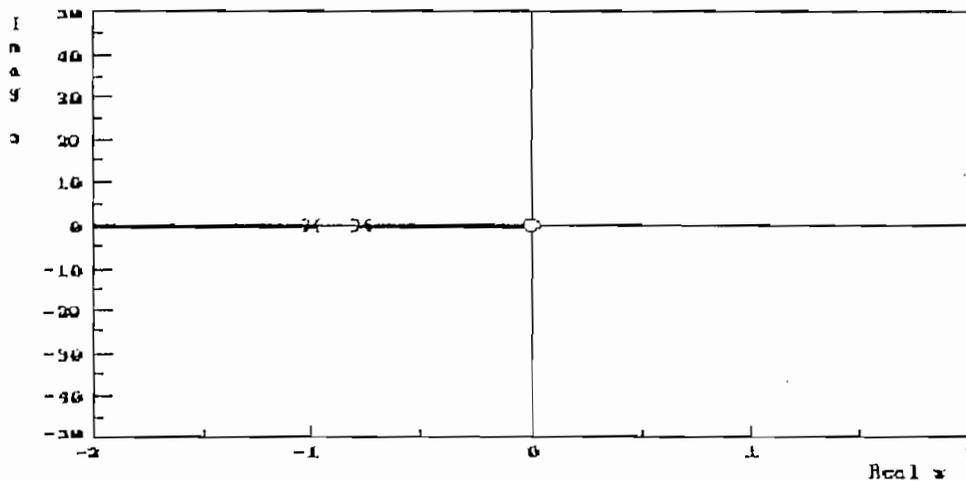


Figura 3.5 b) Acercamiento del LOR del Sistema de Excitación ACI

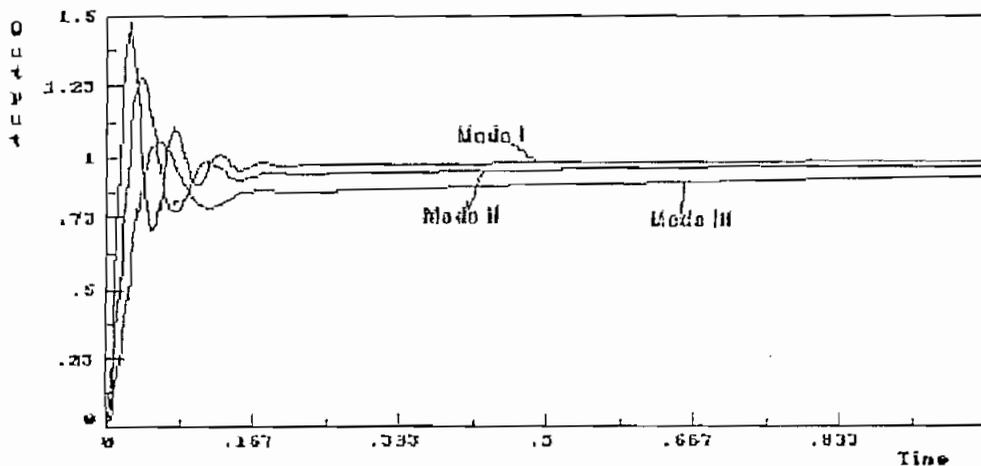


Figura 3.6 Respuesta al Escalon del Sistema de Excitación ACI

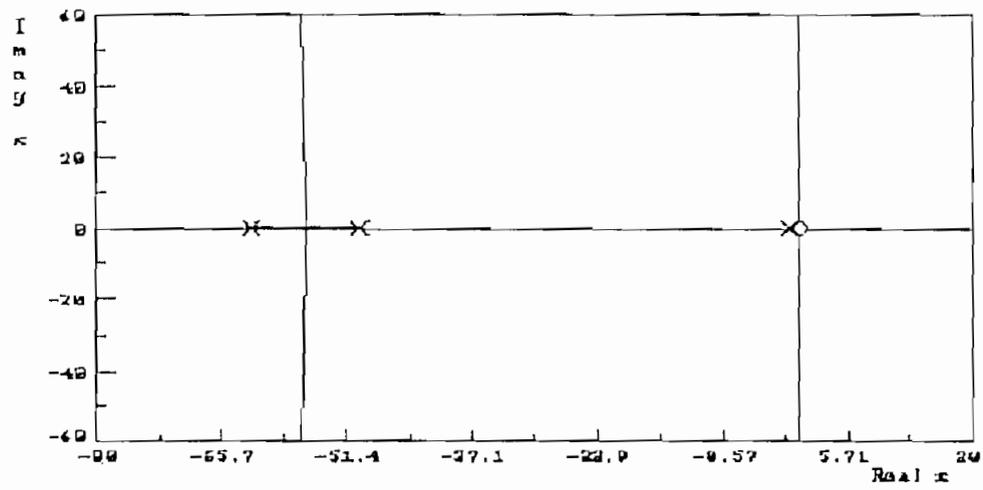


Figura 3.7 a) Lugar Geometrico de Las Raices del Sistema de Excitacion AC2

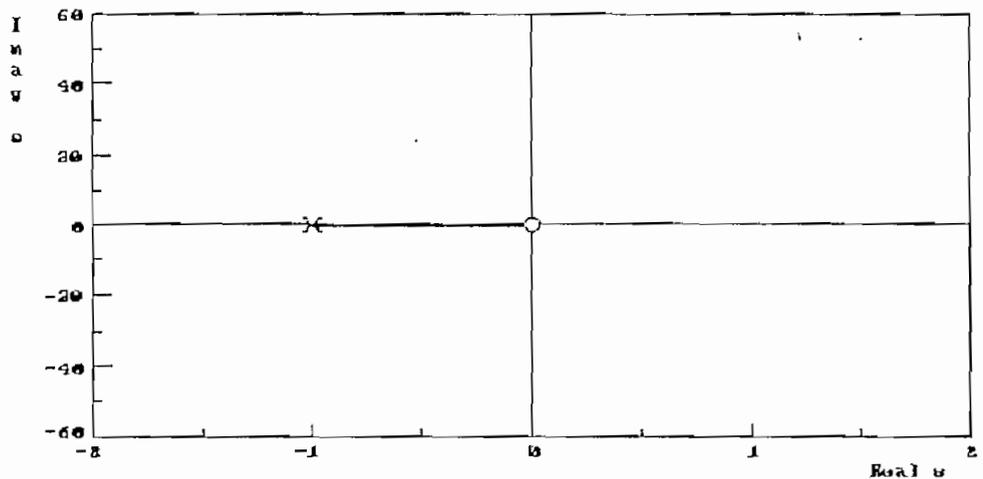


Figura 3.7 b) Acercamiento del LGR del Sistema de Excitacion AC2

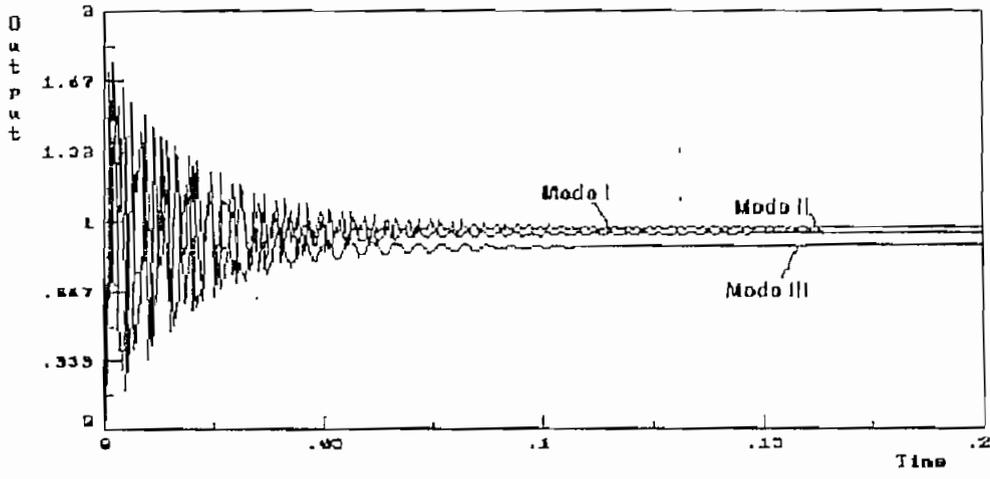


Figura 3.8 Respuesta al Escalon del Sistema de Excitacion AC2

3.4.3 SISTEMAS DE EXCITACION ESTATICOS

Los sistemas de excitación estáticos se diferencian de los otros por que la potencia eléctrica necesaria es tomada directamente de los terminales del generador a través de un transformador, haciendo que su velocidad de respuesta sea mayor.

Analizando los sistemas de excitación tipo ST1; en la figura 3.9 considerando valores típicos la ecuación $G(s)H(s)$ es:

$$G(s) \cdot H(s) = \frac{K_A = 400 \quad T_A = 0.02}{K_F = 0.03 \quad T_F = 1} \frac{12 \text{ s}}{\underbrace{(0.02s + 1)}_{\text{Regulador}} \underbrace{(s + 1)}_{\text{Estabilizador}}} \quad (3.101)$$

En la cual se puede apreciar que la estabilidad depende directamente de las constantes del estabilizador. En la figura 3.10 se presenta la respuesta en el tiempo, la misma que es una exponencial. La estabilización del sistema se encuentra en el orden de los ms, que para el caso en estudio es de 4 ms.

Para los sistemas de excitación tipo ST2, la función de transferencia se encuentra formada por una parte similar a la de los sistemas de excitación de corriente continua más otra parte similar a la de los sistemas de excitación de corriente alterna, por lo que su LGR tiene las mismas características de estos sistemas. La ecuación $G(s)H(s)$, considerando los valores típicos indicados, es:

$$G(s) \cdot H(s) = \frac{K_A = 400 \quad T_A = 0.02}{K_E = 1 \quad T_E = 1.3} \frac{K_F = 0.03 \quad T_F = 1}{K_p = 1.19 \quad K_i = 2.116} \frac{12 \text{ s}}{\underbrace{(0.02s + 1)}_{\text{Regulador}} \underbrace{(s + 1)}_{\text{Estabilizador}} \underbrace{(1.3s + 1)}_{\text{Excitador}}} \quad (3.102)$$

De la figura 3.11, se puede apreciar que la estabilidad está afectada por la excitatriz y el estabilizador, debido a la cercanía de los polos y ceros de estos componentes al eje imaginario.

Así la respuesta en el tiempo de los sistemas de excitación tipo ST2 es una “suma” de las correspondientes a los sistemas DC y AC.

En la figura 3.12 se observa que la señal de salida se estabiliza a 0.22 s. Sin embargo las oscilaciones no son muy excesivas ni de picos elevados, por lo que las curvas de respuesta en los diferentes modos de operación de las componentes rectificadores F_{EX} no se diferencian mayormente, como en el caso de los sistema de excitación AC, sino que las oscilaciones antes de estabilizarse tienen una forma semejante a la de los sistemas de excitación DC que se amortiguan de una manera “lenta” y no poseen picos elevados.

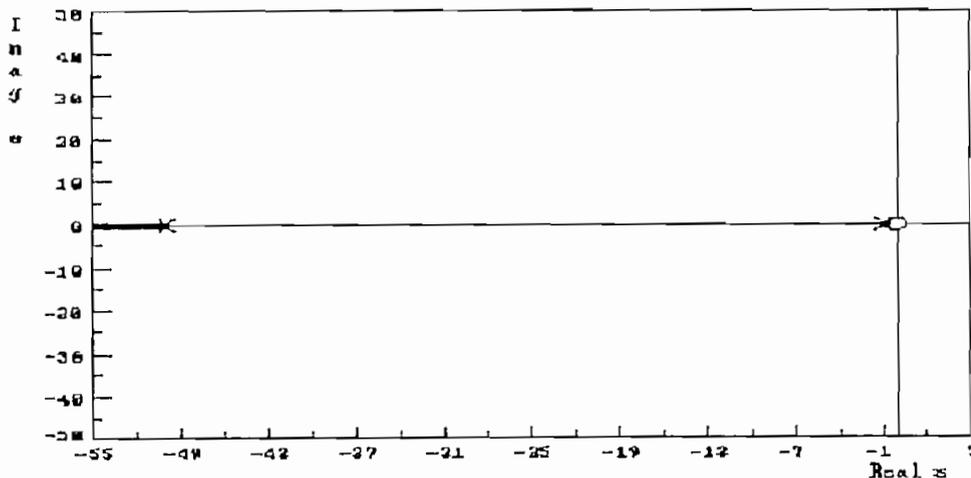


Figura 3.9 Lugar Geométrico de las Raíces del Sistema de Excitación ST1

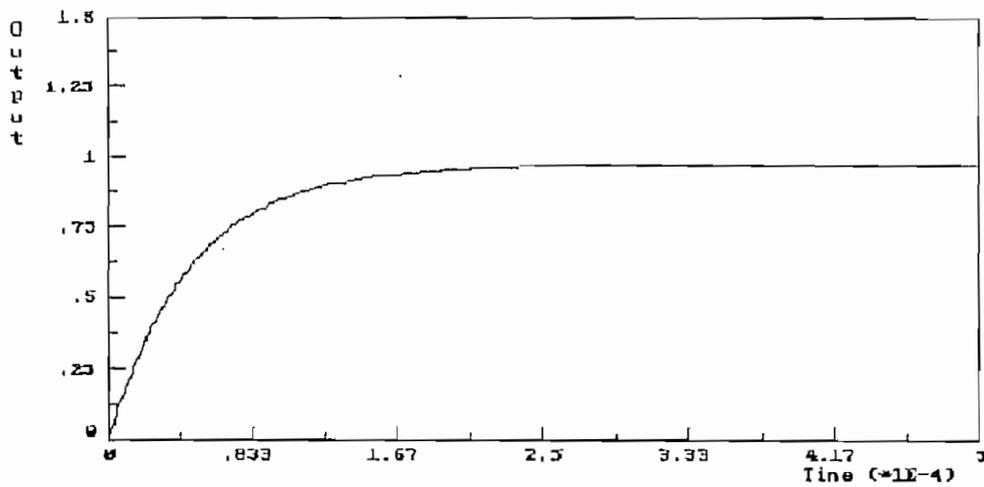


Figura 3.10 Respuesta al Escalon del Sistema de Excitación ST1

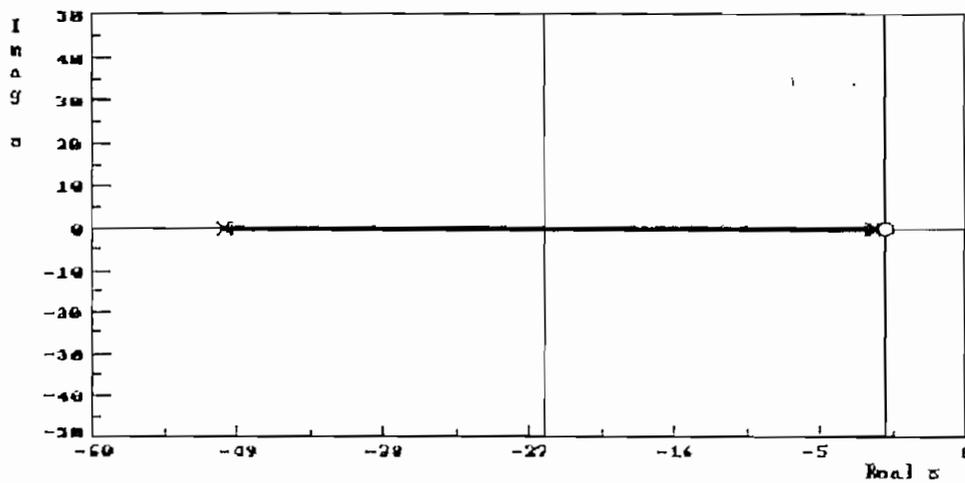


Figura 3.11 Lugar Geometrico de las Raices del Sistema de Excitación ST2

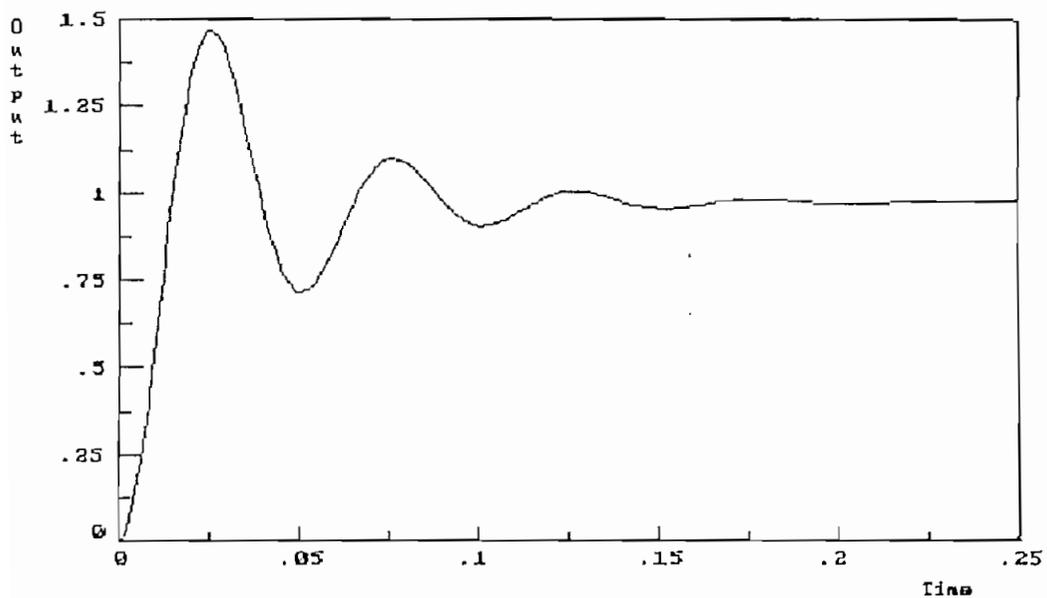


Figura 3.12 Respuesta al Escalon del Sistema de Excitación ST2

3.5 FUNCION DE SATURACION

La función de saturación de la excitatriz S_E está dada como un múltiplo en pu del voltaje de salida. Representa el incremento de la señal de entrada a la excitatriz requerido a causa de la saturación. En la figura 3.13 se ilustra el cálculo de un valor en particular de S_E .

Las cantidades A, B y C están definidas como la excitación de la excitatriz para producir un voltaje de salida en las curvas de saturación con carga resistiva constante, en la curva de vacío y en la línea de entrehierro respectivamente. En excitatrices formadas por un conmutador de corriente continua, S_E está definida por la relación siguiente:

$$S_E = \frac{A - B}{B} \quad (3.103)$$

Para excitatrices formadas por un grupo alternador-rectificador la curva de saturación sin carga se usa para definir S_E . De la figura 3.13 se puede notar que:

$$S_E = \frac{C - B}{B} \quad (3.104)$$

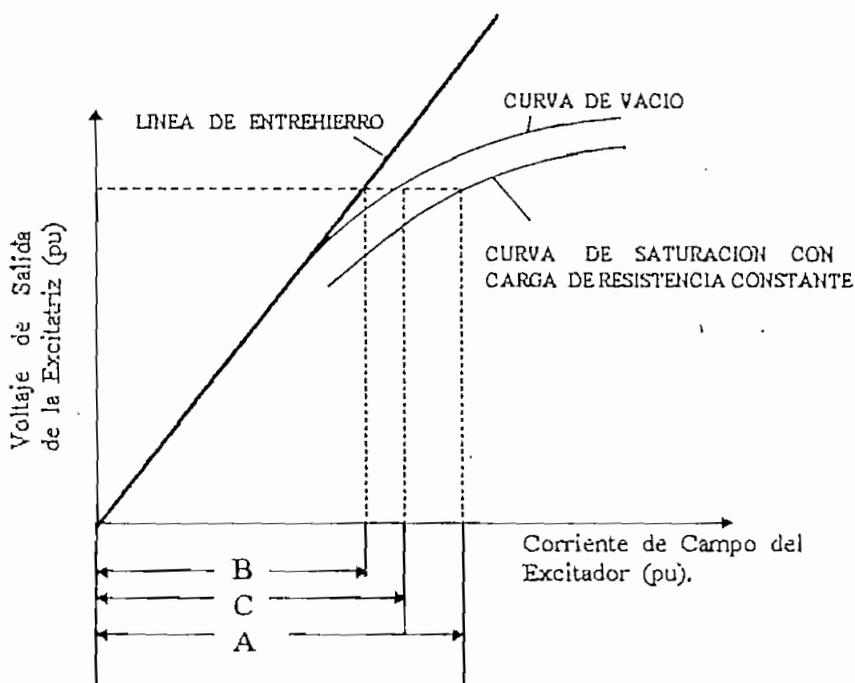


Figura 3.13 Características de Saturación de la Excitatriz

La razón de utilizar la curva de saturación sin carga en los sistemas de excitación tipo alternador-rectificador son los efectos de la regulación de la excitatriz calculados por la inclusión en el modelo de las caídas de voltaje en la reactancia sincrónica y la reactancia de conmutación.

Existen diferentes formas de representar la función de saturación de la excitatriz. Puesto que los efectos de saturación son más significativos en voltajes altos, se especifica S_E mediante dos puntos dados por:

- A voltaje máximo de la excitatriz y ,
- A 75% del voltaje máximo

En el presente trabajo se utilizará la siguiente ecuación para modelar la función de saturación:

$$S_E = A_{EX} e^{(B_{EX} \cdot E_{XPU})} \quad (3.105)$$

Donde A_{EX} y B_{EX} son constantes especificadas por los dos puntos que determinan la curva de saturación.

3.6 ESTABILIZACION DEL SISTEMA DE CONTROL | 10 |

El término “Estabilización del Sistema de Control” se utiliza para describir el circuito que representa el lazo de realimentación de la excitatriz. La señal de realimentación normalmente está derivada del voltaje de campo E_{FD} o su equivalente, como se puede observar en los diferentes modelos de los sistemas de excitación.

El estabilizador se utiliza principalmente para compensar parcialmente las constantes de tiempo de la excitatriz y mantener en operación estable los sistemas de excitación que poseen valores elevados de la ganancia del regulador de voltaje. Durante la operación puede ser deseable reducir la ganancia del voltaje del regulador a altas frecuencias para minimizar la contribución negativa del regulador al amortiguamiento del sistema de potencia. Esto es particularmente aplicable cuando el amortiguamiento no es mejorado por el uso del estabilizador del sistema de potencia.

3.7 REGULACION DE COMPONENTES RECTIFICADORES | 10 |

La curva aproximada que modela el efecto de la regulación de los rectificadores se presenta en la figura 3.15. Todas las fuentes de corriente alterna con circuitos rectificadores sean controladas o no controladas, tienen una impedancia interna predominantemente inductiva.

El efecto de esta impedancia es alterar el proceso de conmutación de corriente entre los rectificadores y producir un decrecimiento del voltaje medio de salida al aumentar la corriente de carga del rectificador. La reactancia de la fuente fase-neutro, la cual se opone a la transferencia de corriente entre los rectificadores se define como reactancia de conmutación.

La reactancia de conmutación tiene el efecto de prevenir la transferencia instantánea de corriente desde un rectificador a otro. Así, la conmutación requiere de un tiempo finito el cual es definido por el ángulo de conmutación (μ) y también dependiendo de la magnitud de la corriente de carga un retardo inherente definido por el ángulo α (debe notarse que este ángulo no es el ángulo de retardo asociado con los rectificadores controlados en el inicio del proceso de conmutación según se indica en la figura 3.14), expresados en grados eléctricos.

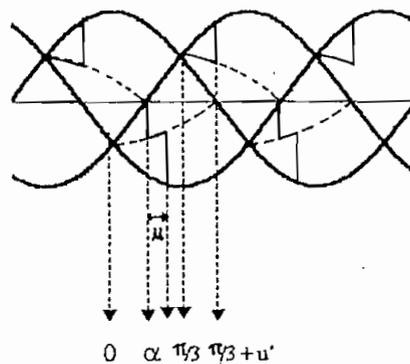
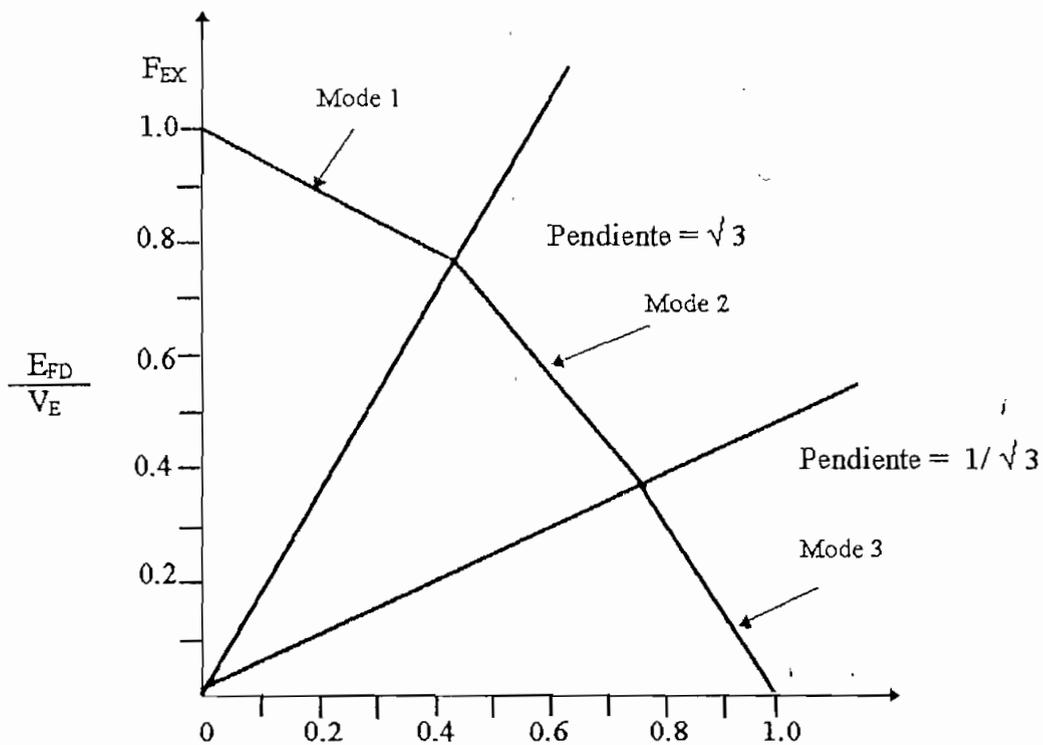


Figura 3.14 Modo de Operación I [16]

La mayoría de los circuitos aplicados en sistemas de excitación son hexafásicos de doble estrella, también llamados circuitos rectificadores de onda completa de tipo puente. Estos tipos de circuitos pueden ser operados en unos de tres modos diferentes, dependiendo de que la corriente de carga varíe desde vacío hasta su valor de cortocircuito.

El modo de operación depende del producto de la reactancia de conmutación y la corriente de carga, es decir, de la caída de voltaje de conmutación. En el modo de operación I, el ángulo de conmutación μ aumenta de 0 a 60° y el ángulo de retardo α es cero a medida que la corriente de carga aumenta. En el modo de operación II el ángulo de conmutación μ es fijado en 60° pero el inicio de la conmutación es retardado por el ángulo de retardo α el cual varía de 0 hasta 30° . En el modo de operación III, el ángulo de retardo α es fijado en 30° y el ángulo de conmutación μ varía desde 60° hasta 120° .

Las ecuaciones que caracterizan a estos tres modos de operación definen la regulación del rectificador como una función de la caída de voltaje de conmutación a medida que la corriente de carga varía desde vacío hasta cortocircuito. Las cantidades de E_{FD} , I_{FD} , V_E y K_C están en pu en base del campo del generador de alterna.



$$I_N = \frac{K_C \cdot I_{FD}}{V_E}$$

Figura 3.15 Características de Regulación del Rectificador

CAPITULO IV

INCORPORACION DE LOS MODELOS DE SISTEMAS DE EXCITACION EN UN PROGRAMA DE ESTABILIDAD TRANSITORIA

4.1 CARACTERISTICAS DEL PROGRAMA DE ESTABILIDAD TRANSITORIA

El programa computacional para el estudio de la estabilidad transitoria utiliza el modelo de la máquina sincrónica basado en la variación de las concatenaciones de flujo, el cual permite incluir los efectos de los sistemas de excitación; además, incluye los efectos de la saturación magnética.

Se utiliza como base un programa de estabilidad transitoria escrito en lenguaje FORTRAN 77, y en base a la teoría expuesta en los capítulos anteriores se ha desarrollado los módulos específicos para simular el efecto del sistema de excitación.

El programa implementado consta de : Programa principal STAX, Subrutinas: BUSDAT, LINDAT, YBUS, GENDAT, DATEX, HBASE, VAIN, DATEXIN, STABCK, KUTTAG, KUTTAC, KUTTADC, KUTTST, RUNGE, LOADCOMP, LIMITT, RECTIF, FACTOR, INJCT, SOLVE.

Tiene una capacidad de 200 barras, 300 líneas de transmisión y 60 generadores. Las cargas se encuentran representadas por medio del modelo de admitancia constante. El programa permite simular las siguientes perturbaciones: Falla trifásica en las barras, Salida de líneas de Transmisión, Salida de unidades de operación, Variaciones de carga. Además permite simular las siguientes maniobras: Despeje de fallas en barras, Desconexión de líneas de transmisión, Reconexión de líneas de transmisión

4.1.1 DESCRIPCION DEL PROGRAMA PRINCIPAL Y LAS SUBRUTINAS

Básicamente la función del programa principal es la de supervisar el proceso de cálculo de la estabilidad transitoria, para lo cual consta de los siguientes bloques:

- Bloque 1: Lectura-almacenamiento de los parámetros y características de la red en estado estable por medio de las subrutinas:
 BUSDAT: Datos de: magnitud de voltaje, ángulo, demanda en MW y MVAR, generación en MW y MVAR, límites de potencia reactiva en MVAR.
 LINDAT: Datos de la líneas y transformadores: barras "FROM" y "TO", resistencia, reactancia, susceptancia, tap.
 Adicionalmente se debe dar el título del ejemplo de estabilidad a estudiarse.
- Bloque 2: Lectura-almacenamiento de los resultados del flujo de potencia antes de la falla por medio de un archivo obtenido al correr el programa de flujos de potencia PFRED.
- Bloque 3: Lectura-almacenamiento de los datos de los generadores por medio de la subrutina GENDAT la cual utiliza la subrutinas :
 HBASE: Transforma la inercia de los generadores a la base de 100MVA.
 VAIN: Lectura de los parámetros de la máquina sincrónica de las condiciones iniciales de los generadores de acuerdo al tipo de generador (con excitatriz o sin excitatriz) se escoge de acuerdo a si se considera o no la saturación.
 DATEX: Lectura-almacenamiento de los datos de acuerdo al tipo de sistema de excitación.
- Bloque 4: Lectura de los indicadores para determinar el tipo de perturbación por medio de STABCK: Datos de tiempo de estudio, tiempos de fallas-maniobras. En la cual se realiza el estudio de estabilidad, para lo cual se modifican los parámetros de la red con las subrutinas YBUS, y FACTOR así como las condiciones iniciales del sistema por medio de INJCT y SOLVE.
- Bloque 5: Realiza el estudio de estabilidad transitoria con la información de la red y su estado inicial, se procede a estudiar la falla a partir de las condiciones obtenidas de los generadores y la red, luego se sigue con el cálculo de las condiciones iniciales de los sistemas de excitación en DATEXIN para aquellos generadores que poseen excitatriz .

En el estudio propio de estabilidad se ejecutan las subrutinas: PELEC en la cual se calculan las potencias entregadas por los generadores y el voltaje con los efectos de la saturación. A continuación se llama a la subrutina KUTTAG que resuelve las ecuaciones dinámicas de los generadores; en conjunto con las subrutinas que representan a los diferentes sistemas de excitación a saber : KUTTADC para los sistemas de excitación de corriente continua; KUTTAC para los sistemas de excitación de corriente alterna; KUTTST para los

sistemas de excitación estáticos. Se utiliza la subrutina `LIMITT` que dependiendo del tipo de sistema de excitación verifica si las variables se encuentran en los límites y genera el valor adecuado de acuerdo a las condiciones expuestas en el capítulo III y/o la subrutina `RECTIF`, que determina la variable F_{EX} de las componentes rectificadores. Todas estas subrutinas se escogen en la subrutina `GENEX` y las ecuaciones diferenciales se resuelven en la subrutina `RUNGE`.

Por último la subrutina `EQGEN` reinicializa las variables de estado de los generadores y calcula la saturación de los sistemas de excitación para la siguiente iteración.

En este bloque, además, se controla el avance de tiempo, para determinar si el tiempo de la maniobra o el tiempo final del estudio ha concluido. En cada subrutina se encuentra un conjunto de instrucciones que permiten detectar errores que serán impresos en el archivo de resultados y de esa manera el usuario se entere en que error ha incurrido.

4.1.2 CRITERIOS DE ESTABILIDAD

Este programa de estabilidad transitoria controla el comportamiento dinámico de un sistema considerando los siguientes criterios:

a) Criterios de estado estable: Desbalance entre demanda y generación; y, diferencia angular entre las barras de las máquinas.

Dependiendo del sistema eléctrico de potencia se establecen límites mínimo y máximo para estos dos criterios. Respecto a la relación $u = \text{Demanda/Generación}$, si se encuentra sobre el máximo el sistema es estable, si en cambio está debajo del mínimo el sistema es inestable, y mientras se halle dentro de estos límites la estabilidad del sistema es incierta.

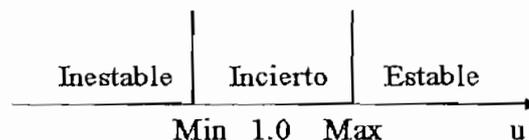


Figura 4.1 Desbalance Demanda / Generación

Con referencia a la diferencia angular entre las barras externas de los generadores, $\Delta\theta = \theta_{MAX} - \theta_{MIN}$, si se encuentra sobre el máximo se produce la salida sistema si en cambio está debajo del mínimo el sistema es seguro, y mientras se halle dentro de estos límites la estabilidad del sistema es incierta.

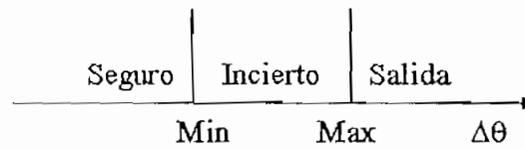


Figura 4.2 Diferencia Angular entre las Barras Externas

b) Criterios de estado transitorio: Diferencia angular entre los rotores de las máquinas y tiempo umbral para supervisar la estabilidad. Por medio de las cuales se establece la condición de estabilidad del sistema durante el tiempo de estudio. Basados en la diferencia angular entre cualquier par de generadores, $\Delta\delta = \delta_{MAX} - \delta_{MIN}$, para un tiempo inferior al tiempo dado A es incierta la estabilidad del sistema. Mientras que si $\Delta\delta$ se encuentra decreciendo entre los tiempos A y B el sistema es estable, en cambio si está creciendo es incierta su estabilidad. En el caso de un tiempo mayor al tiempo B, si $\Delta\delta$ está decreciendo el sistema es estable, pero si se halla creciendo el sistema es inestable.

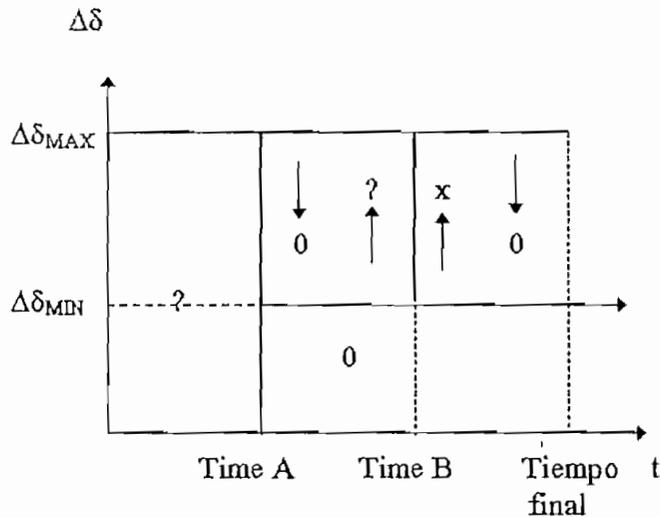


Figura 4.3 Criterio de Estado Transitorio

donde: ? Condición de estabilidad desconocida, análisis debe continuar
 x Sistema inestabilidad
 0 Sistema estable

4.2 CONDICIONES INICIALES E INGRESO DE DATOS

Las condiciones iniciales para la máquina sincrónica, se obtienen del archivo de resultados de flujos de potencia que da la información del estado de la red antes de la falla.

Dependiendo del tipo del sistema de excitación, sus condiciones iniciales antes de la falla se calculan para satisfacer las condiciones de funcionamiento del sistema.

4.2.1 SISTEMAS DE EXCITACION DE CORRIENTE CONTINUA

Considerando las figuras 2.10 y 2.11, los dos modelos de sistemas de excitación de corriente continua estudiados básicamente tienen las mismas características, diferenciándose únicamente en los límites del regulador. Así, para determinar las condiciones iniciales de estos sistemas se supone que las señales de salida del estabilizador V_F y la del regulador V_R son cero, con lo cual en la ecuación (3.4) se tiene :

$$0 = \frac{(S_E + K_E)}{T_E} E_{FD} \quad (4.1)$$

El valor inicial de E_{FD} se obtiene para satisfacer las condiciones iniciales de la máquina sincrónica.

$$E_{FD}(0) = EI(0) \quad (4.2)$$

Resolviendo la ecuación (4.1) se tiene:

$$S_E(0) = -K_E \quad (4.3)$$

donde $S_E(0)$ es el valor inicial de la saturación de acuerdo a la ecuación (3.105) está dada por:

$$S_E = A_{EX} e^{(B_{EX} \cdot E_{FD})} \quad (4.4)$$

donde los valores de A_{EX} y B_{EX} son datos ingresados por el usuario. Con las consideraciones anteriores en la ecuación (3.12) se tiene :

$$V_{REF} = V_T \quad (4.5)$$

4.2.2 SISTEMAS DE EXCITACION DE CORRIENTE ALTERNA

Como la excitación de los sistemas de excitación de corriente alterna es de tipo independiente, se tiene que: $K_E = 1$

Si consideramos que la señal de salida del estabilizador V_F es cero en la ecuación (3.29), en estado estable se tiene :

$$V_R = (S_E + K_E) V_E + K_D I_{FD} \quad (4.6)$$

Ecuación en la cual los valores de K_E y K_D son conocidos; el valor inicial de S_E se calcula como en la ecuación (4.4). El valor de la corriente de campo I_{FD} y el voltaje de campo E_{FD}

se calculan para satisfacer las condiciones iniciales de operación del generador sincrónico. El valor del voltaje del excitatriz V_E se encuentra dado por:

$$V_E = \frac{E_{FD}}{F_{EX}} \quad (4.7)$$

donde F_{EX} es el valor de las componentes rectificadoras debido a la reactancia de conmutación y para determinar su condición inicial se realiza lo siguiente: El proceso sugerido en la referencia [10] indica si son conocidos $I_{FD}(0)$ y $E_{FD}(0)$ en la curva de la figura 3.15 se puede definir una recta que pase por el origen y los puntos $E_{FD}(0)$ e $I_{FD}(0)$.

Con lo que el punto de operación inicial se determina por la intersección de la línea recta y la curva de la figura 3.15, una vez determinado el valor inicial de F_{EX} reemplazándolo en la ecuación (4.7) se obtiene el valor inicial de V_E .

Por medio de las expresiones anteriores se dispone de las condiciones iniciales de los sistemas de excitación tipo AC1. Para el caso de los sistemas de excitación tipo AC2, la ecuación (4.6) se cumple y además de acuerdo a la figura 2.13 se tiene que:

$$V_{FE} = (S_E + K_E) V_E + K_D I_{FD} \quad (4.8)$$

Comparando las ecuaciones (4.6) y (4.8) se determina que: $V_R = V_{FE}$

De la ecuación (3.36) se tiene:

$$V_{A1} = V_A - V_H \quad (4.9)$$

La señal que alimenta la compuerta lógica de bajo valor (LV) indica que:

$$\begin{aligned} \text{Si } V_{A1} \leq V_L & \quad S_G = V_{A1} \\ \text{Si } V_{A1} > V_L & \quad S_G = V_L \end{aligned} \quad (4.10)$$

Las condiciones iniciales se calculan para que se cumpla la primera condición de la ecuación (4.10) obteniéndose:

$$S_G = V_{A1} \quad (4.11)$$

Sustituyendo la ecuación (4.9) en la (4.11) se tiene:

$$S_G = V_A - V_H \quad (4.12)$$

Suponiendo que la señal de salida de la compuerta LV multiplicada por la ganancia K_B se encuentra dentro de los límites de la ecuación (3.41) se tiene :

$$V_R = S_G * K_B \quad (4.13)$$

Reemplazando la ecuación (4.11) en (4.12) se obtiene:

$$V_R = (V_A - V_H) * K_B \quad (4.14)$$

De las ecuaciones (4.6) y (4.8) se tiene:

$$V_{FE} = (V_A - V_H) * K_B \quad (4.15)$$

De la figura 2.13 que representa el modelo del sistema de excitación tipo AC2 se tiene que:

$$V_H = K_H V_{FE} \quad (4.16)$$

Con la ecuación (4.15) y ordenando los términos se tiene:

$$V_A = \frac{V_{FE}}{K_B} + V_H \quad (4.17)$$

Considerando el estado estable, V_F cero y la ecuación (3.35) se obtiene que:

$$V_{REF} = V_T + \frac{V_A}{K_A} \quad (4.18)$$

4.2.3 SISTEMAS DE EXCITACION ESTATICOS

Las condiciones iniciales de los sistemas de excitación tipo ST1 se calculan, considerando que la señal V_{ER} en estado estable es cero, por lo que con las ecuaciones (3.47) se obtiene:

$$V_{REF} = V_T \quad (4.19)$$

$$V_R = K_A V_S \quad (4.20)$$

De la ecuación (3.50) y considerando además que se encuentra dentro de los límites:

$$E_{FD} = V_R \quad (4.21)$$

Reemplazando la ecuación (4.21) en la ecuación (4.20) se tiene:

$$V_S = \frac{E_{FD}}{K_A} \quad (4.22)$$

Para los sistemas de excitación tipo ST2, se asume que las señales V_F y V_R son cero y se reemplaza en la ecuación (3.63) se tiene :

$$\begin{aligned} K_E E_{FD} &= V_E F_{EX} \\ F_{EX} &= \frac{K_E E_{FD}}{V_E} \end{aligned} \quad (4.23)$$

Se conoce además que el factor F_{EX} se encuentra definido por:

$$I_N = \frac{K_C \cdot I_{FD}}{V_E}$$

$$F_{EX} = \begin{cases} 1 - 0.58 I_N & \text{Si } I_N \leq 0.433 \\ \sqrt{(0.75 - I_N^2)} & \text{Si } 0.433 < I_N < 0.75 \\ 1.732 \cdot (1 - I_N) & \text{Si } I_N > 0.75 \end{cases} \quad (4.24)$$

Con lo que para cumplir las ecuaciones (4.23) y (4.24) es necesario que K_C tome los siguientes valores:

$$K_C = \begin{cases} \frac{V_E (1 - F_{EX})}{0.58 I_{FD}} & \text{Si } F_{EX} \geq 0.75 \\ \frac{V_E}{I_{FD}} \sqrt{(0.75 - F_{EX}^2)} & \text{Si } 0.433 < F_{EX} < 0.75 \\ \frac{V_E (1 - F_{EX})}{1.732 I_{FD}} & \text{Si } F_{EX} \leq 0.433 \end{cases} \quad (4.25)$$

Al igual que en los sistemas de excitación de corriente alterna se tiene que la constante $K_E = 1$; y que los valores de E_{FD} y V_E se calculan para satisfacer las condiciones iniciales de operación del generador sincrónico.

La señal V_E se obtiene de los valores terminales del generador por medio de la relación:

$$V_E = | K_P \cdot \bar{V}_T + j K_I \cdot \bar{I}_T | \quad (4.26)$$

donde K_P es el Coeficiente de ganancia del circuito potencial, K_I es el Coeficiente de ganancia del circuito corriente.

Los valores de estas constantes según la referencia [2] están dados por:

$$K_P = 1.19 \quad (4.27)$$

$$K_I = 1.19 [-\sin(\cos^{-1} fp) + \sqrt{(E_{FDL}^2 - fp^2)}] \frac{\text{MVA estudio}}{\text{MVA generador}} \quad (4.28)$$

donde: fp = factor de potencia = $\text{atan}(\text{Potencia reactiva } Q / \text{Potencia activa } P)$

E_{FDL} = Voltaje de excitación a plena carga

MVA = Potencia aparente

4.2.4 INGRESO DE DATOS

Primer paso para realizar un estudio de estabilidad es preparar los datos requeridos por el programa a utilizarse. Los datos se dividen en dos grupos: datos del flujo de potencia y datos de estabilidad.

4.2.4.1 DATOS PARA EL PROGRAMA DE FLUJO DE POTENCIA

El archivo de datos de flujos de potencia debe poseer la siguiente información, de acuerdo al código de control (OCC):

- (OCC 1) Lee e imprime el título del ejemplo que se encuentra analizando.

- (OCC 4) Datos de Líneas y Transformadores

Número de barras: From Bus, To Bus. Siendo el nodo de origen y llegada, respectivamente, de la línea o transformador. Se finaliza la lectura de datos de las líneas ingresando a continuación de el último nodo el entero 9999.

Resistencia: Resistencia de cada línea y transformador en pu en una base de 100 MVA.

Reactancia: Reactancia de la línea y transformador en pu en base de 100 MVA.

Suceptancia de la línea: Suceptancia de la línea o transformador en pu 100 MVA.

Tap: Tap de cada transformador, si este campo esta en blanco se asume uno.

- (OCC 5) Datos de las Barras

Número de barra: Número asignado a la barra de acuerdo al diagrama, unifilar debe ser mayor a 0. Para finalizar la lectura de los datos de barras se ingresa a continuación de la última barra el entero 9999.

Tipo de barra: Entero por medio del cual se identifica el tipo barra de la siguiente manera: 2 Barra Oscilante, 1 Barra de voltaje y 0 Barra de carga.

Nombre de la Barra: Nombre asignado a la barra en estudio es un literal de máximo 12 caracteres.

Voltaje de la barra: Magnitud del voltaje de la barra en pu, real con dos decimales.

Ángulo de la barra: Ángulo del voltaje de la barra en grados.

Potencia activa: MW de generación entregados al sistema.

Potencia reactiva: MVAR de generación entregado al sistema.

Límites de la potencia reactiva: Mínimo, Máximo. Este campo es leído para las barras tipo 1, es decir, las de voltaje controlado.

Carga: MW, MVAR. Carga conectada a la barra en su parte activa y reactiva respectivamente.

Capacitores y reactores: En este campo se coloca compensación paralela a la barra respectiva; si es un capacitor es un número positivo, mientras que si es un reactor es un número negativo.

- (OCC 11) Indica que debe ejecutarse el programa de flujos de potencia PFRED.

- (OCC30) Indica que se ha terminado de correr el flujo de potencia, creándose el archivo de resultados.

4.2.4.2 DATOS PARA EL PROGRAMA DE ESTABILIDAD

El archivo de datos para estabilidad debe poseer la siguiente información de acuerdo al código de control (OCC):

El programa de estabilidad primero da lectura al archivo de resultados del programa de flujos de potencia; el mismo que posee las variables del sistema y la potencia activa y reactiva de generación y carga.

- (OCC 6) Criterio de estabilidad

Criterios de estado estable : El mínimo y máximo de la relación $u = \text{Demanda} / \text{Generación}$ y de la diferencia angular entre las barras de las máquinas.

Criterios de estado transitorio: El mínimo y máximo de la diferencia angular entre los rotores de las máquinas y el tiempo umbral de supervisión de la estabilidad.

- (OCC 8) Datos de estabilidad de la máquina sincrónica

Número de barra: Número de la barra en la cual está conectada la máquina sincrónica . Un valor de 999 indica que se ha terminado el ingreso de estos datos.

Constante de Inercia: Constante de inercia en segundos y en las propias bases del generador.

Parámetros de la máquina sincrónica: Reactancia transitoria en eje directo, Reactancia en eje directo, Reactancia en el eje de cuadratura, Reactancia de dispersión, Constante de tiempo de circuito abierto, AG y BG constante de saturación del generador, Base MVA en la cual se ingresa la constante de inercia. Todos los valores de las reactancia están dados en pu de 100 MVA.

- (OCC 9) Datos de los sistemas de excitación

Número de barra: Número de la máquina sincrónica al que pertenece el sistema de excitación.

Un valor de 999 indica que ha finalizado el ingreso de estos datos.

Tipo de sistema de excitación:

Sistemas de excitación de corriente continua: 1 Tipo DC1, 2 Tipo DC2,

Sistemas de excitación de corriente alterna: 3 Tipo AC1, 4 Tipo AC2, y

Sistemas de excitación estáticos: 5 Tipo ST1, 6 Tipo ST2.

Parámetros de los sistemas de excitación :

Para el caso de los sistemas de excitación de corriente continua tipo DC1 y DC2 los datos a ingresar son: Ganancia del regulador de voltaje, Constante de tiempo del regulador, Límites del regulador Máximo y Mínimo, Ganancia del circuito estabilizador, Constante de tiempo de estabilizador, Ganancia del excitador, Constante de tiempo del excitador, Constante de saturación de la excitatriz AX y BX.

En los sistemas de excitación de corriente alterna se debe ingresar:

En el caso del sistema de excitación tipo AC1: Ganancia del regulador de voltaje, Constante de tiempo del regulador, Límites del regulador máximo y mínimo, Ganancia del circuito estabilizador, Constante de tiempo de estabilizador, Ganancia del excitador, Constante de tiempo del excitador, Constante de saturación de la excitatriz AX y BX, Factor de carga del rectificador, Factor de desmagnetización.

En el caso de los sistemas de excitación tipo AC2: Ganancia del regulador de voltaje interno, Constante de tiempo del regulador interno, Límites del regulador interno máximo y mínimo, Límites del regulador externo máximo y mínimo, Ganancia del circuito estabilizador, Constante de tiempo de estabilizador, Ganancia del excitador, Constante de tiempo del excitador, Constante de saturación de la excitatriz AX y BX, Factor de carga del rectificador, Factor de desmagnetización, Ganancia del campo del excitador, Ganancia del límite de campo del excitador, Referencia del límite del campo del excitador, Ganancia del regulador externo.

En los sistemas de excitación estático se debe ingresar:

Para los sistemas tipo ST1: Ganancia del regulador de voltaje, Constante de tiempo del regulador, Límites del regulador externo máximo y mínimo, Ganancia del circuito estabilizador, Constante de tiempo de estabilizador, Ganancia del excitador, Constante de tiempo del excitador, Límites del regulador interno máximo y mínimo.

Para los sistemas tipo ST2: Ganancia del regulador de voltaje, Constante de tiempo del regulador, Límites del regulador máximo y mínimo, Ganancia del circuito estabilizador, Constante de tiempo de estabilizador, Ganancia del excitador, Constante de tiempo del excitador, Coeficiente de ganancia del circuito de potencia, Voltaje de Excitación máximo, Voltaje de excitación a plena carga.

- (OCC 11) Indica la ejecución del programa para lo cual es necesario indicar las siguientes condiciones de análisis de la estabilidad transitoria:

Número de caso: Indica el número del caso de estudio, Número de maniobra: Indica el número de falla o maniobra, Tiempo final: Tiempo final de estudio en segundos, Incremento de tiempo: El incremento de tiempo de cálculo; es decir, el paso de integración de las ecuaciones diferenciales.

Tiempo de la próxima condición: Tiempo en el cual se produce el cambio de condición en la falla o maniobra analizada; si su valor es cero se asume el tiempo final.

Tiempo de respuesta: Intervalo de presentación de los resultados en el archivo de salida.

Barra I: De acuerdo al flujo es el número de la barra en la cual se produce la falla trifásica, o el número de la barra "FROM" de la línea a ser abierta o cerrada.

Código de falla de la barra I: 0 No existe falla en la barra, 1 Existe falla trifásica, 2 Se remueve la falla trifásica de la barra.

Barra J: De acuerdo al flujo es el número de la barra "TO" de la línea a ser abierta o cerrada.

Código de maniobra: Campo para indicar el tipo de maniobra en la línea o transformador, 0 No existe maniobra, 1 Línea abierta entre la barra I y J, 2 Línea cerrada entre la barra I y J.

Código del generador: Número de generador sale del sistema.

Cambio de carga: Valor en MW y MVAR del cambio de carga en adición (+) o pérdida (-) que sufre la barra I.

- (OCC12) Indica la finalización del estudio.

4.3 ALGORITMO DE INCORPORACION DE LOS SISTEMAS DE EXCITACION

El algoritmo básico para la incorporación de los sistemas de excitación asociados a la máquina sincrónica en un programa de estabilidad transitoria es el siguiente :

- a) Determinar las condiciones iniciales de cada una de las máquinas sincrónicas, de los datos proporcionados por la corrida de flujos de potencia.
- b) Determinar el voltaje de campo inicial de los sistemas de excitación.
- c) Determinar las condiciones iniciales por medio de las expresiones del numeral 4.2 de acuerdo al tipo de sistema de excitación.
- d) Formación del vector de condiciones iniciales para las ecuaciones diferenciales de las máquinas sincrónicas y los sistemas de excitación, calculado para el paso n .
- e) Determinar los voltajes, corrientes del sistema y generadores. Así, como obtener la potencia eléctrica de la ecuación de oscilación de los generadores.
- f) Resolver las ecuaciones diferenciales por el método de Runge - Kutta de cuarto orden, se obtiene el vector solución de las ecuaciones de la máquina sincrónica para el paso $(n+1)$.
- g) Resolver las ecuaciones diferenciales por el método de Runge - Kutta de cuarto orden, se obtiene el vector solución de las ecuaciones de los sistemas de excitación para el paso $(n+1)$.
- h) Calcular los voltajes internos y la saturación de la excitatriz para el paso $(n+1)$.
- i) Evaluar los tiempos de estudio, cambio de perturbación y de criterio transitorio de estabilidad.
- j) El proceso continua desde el literal e, hasta que se termine el tiempo de estudio.

4.4 DIAGRAMAS FUNCIONAL Y DE BLOQUES

A continuación se presentan los diagramas de bloques de las subrutinas de los sistemas de los sistemas de excitación incluidos en el programa de estabilidad transitoria.

DIAGRAMA DE LA ESTRUCTURA DE LAS SUBROUTINAS
EN EL PROGRAMA DE ESTABILIDAD TRANSITORIA

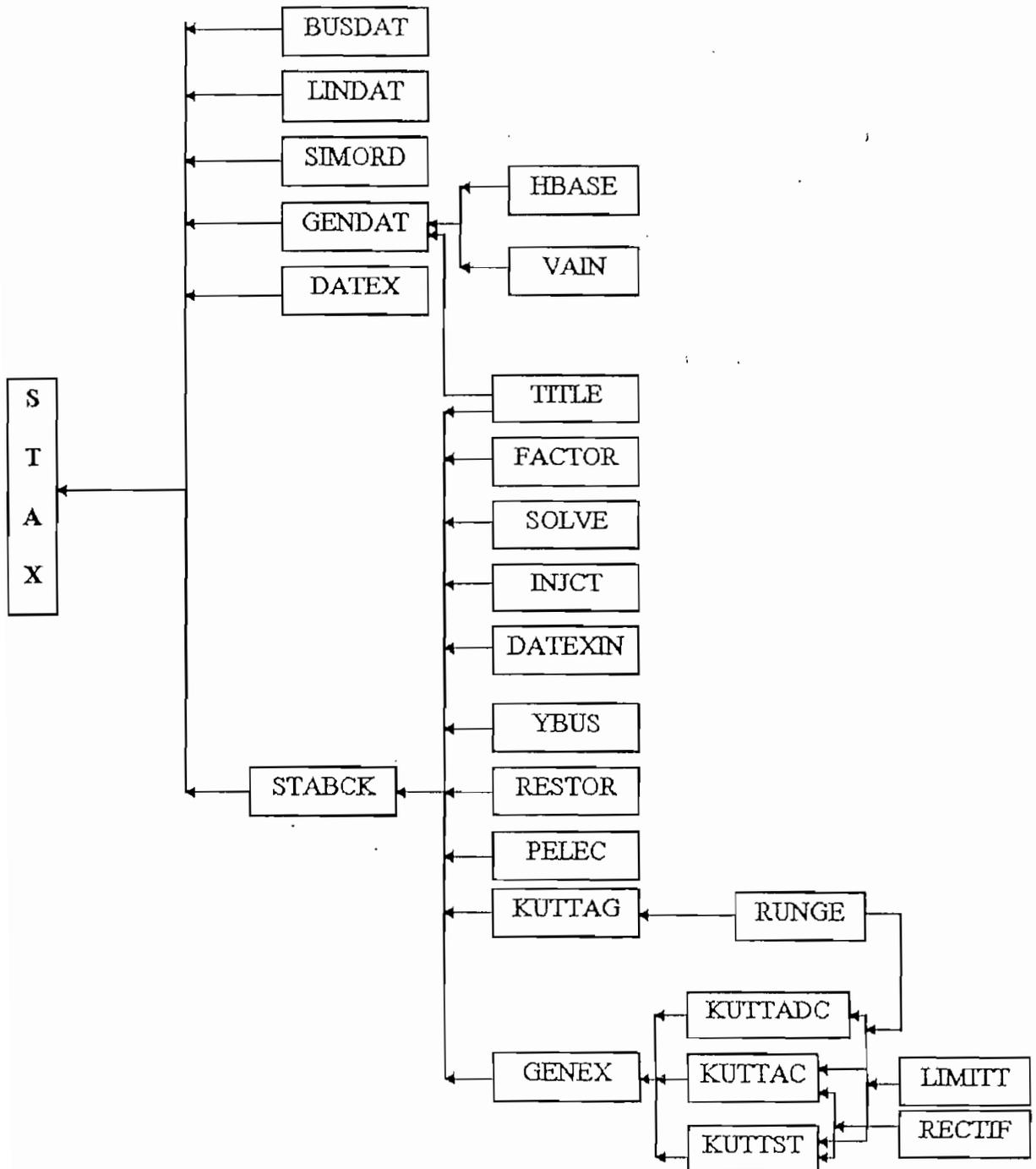
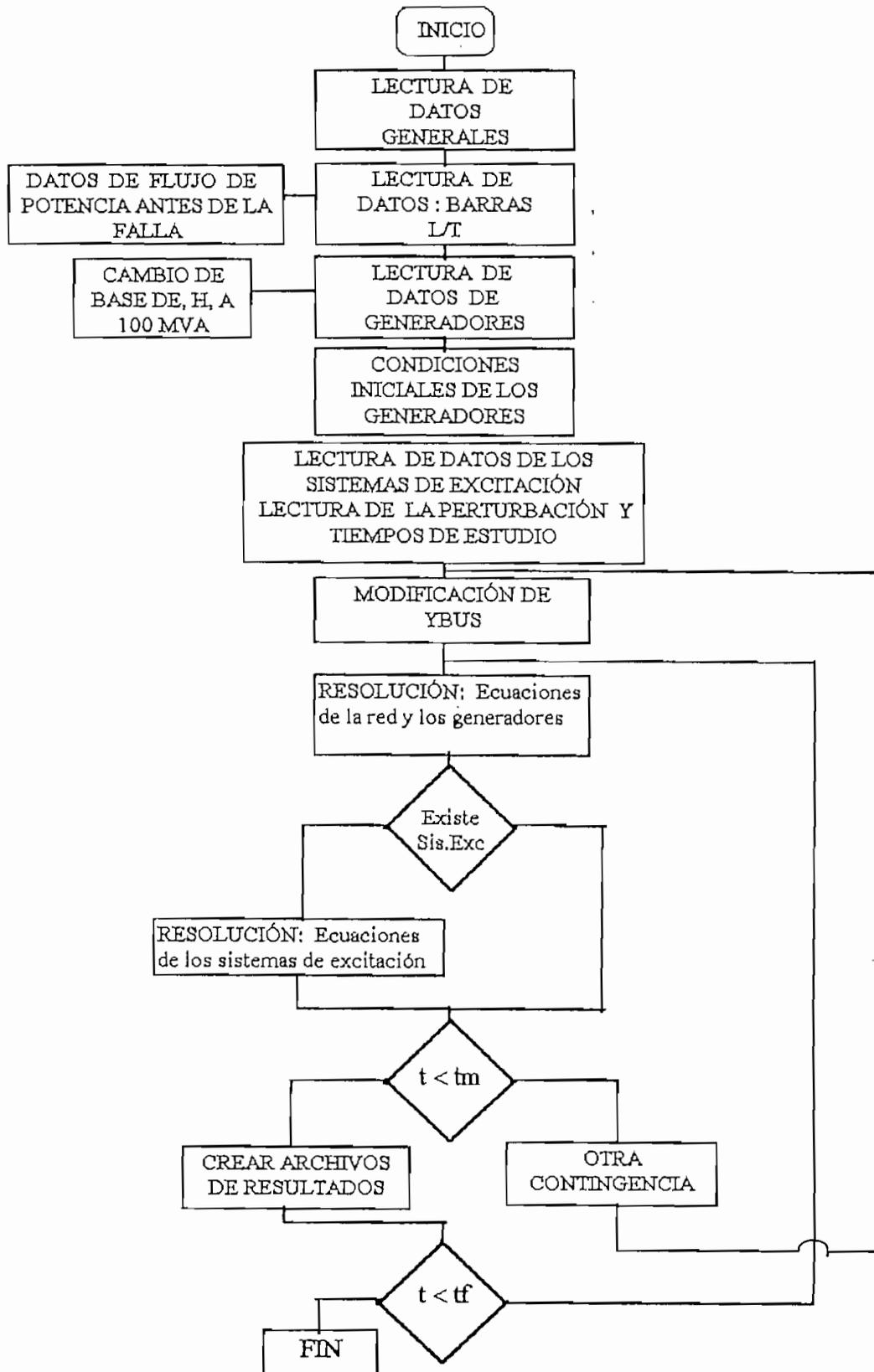
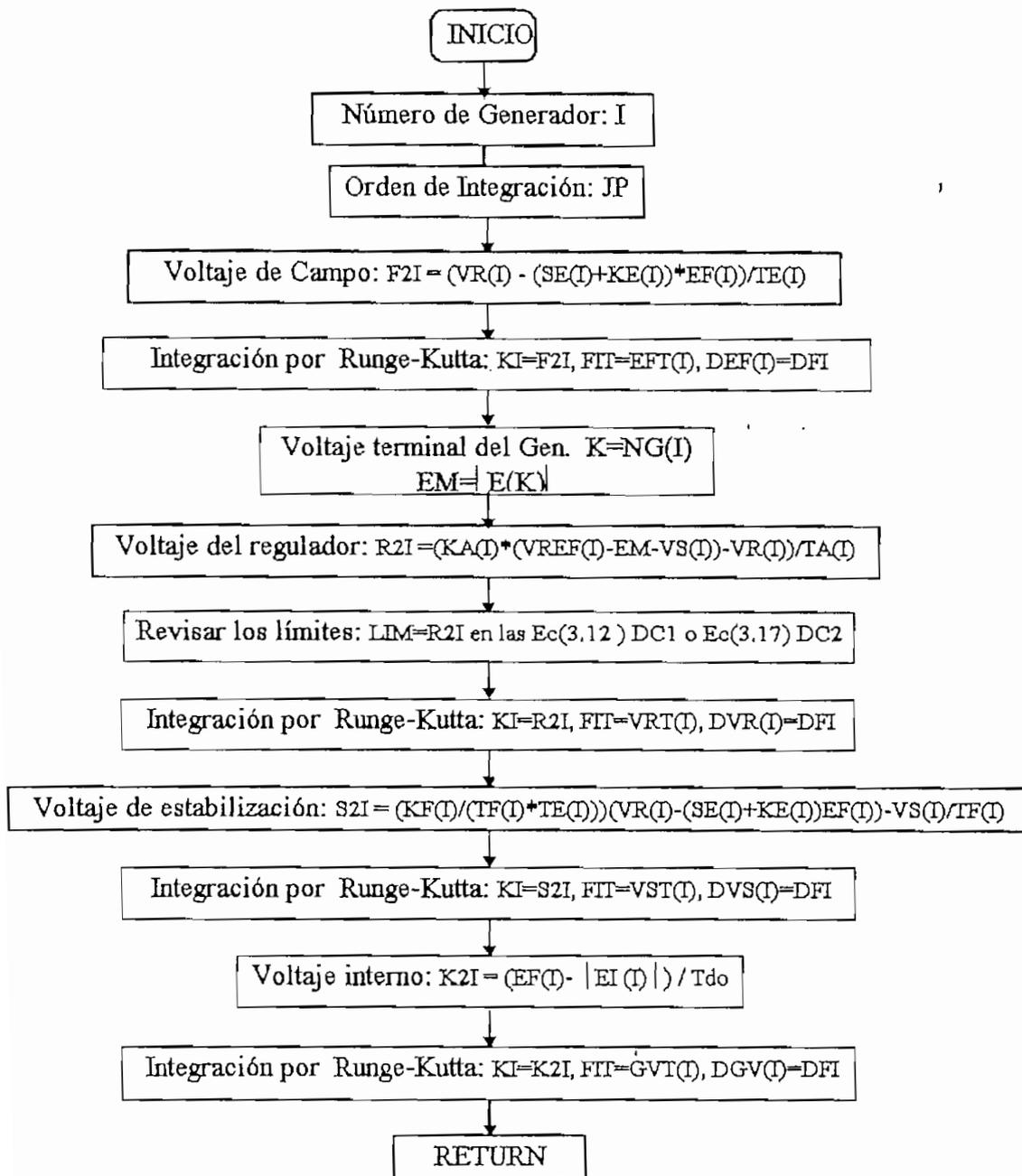


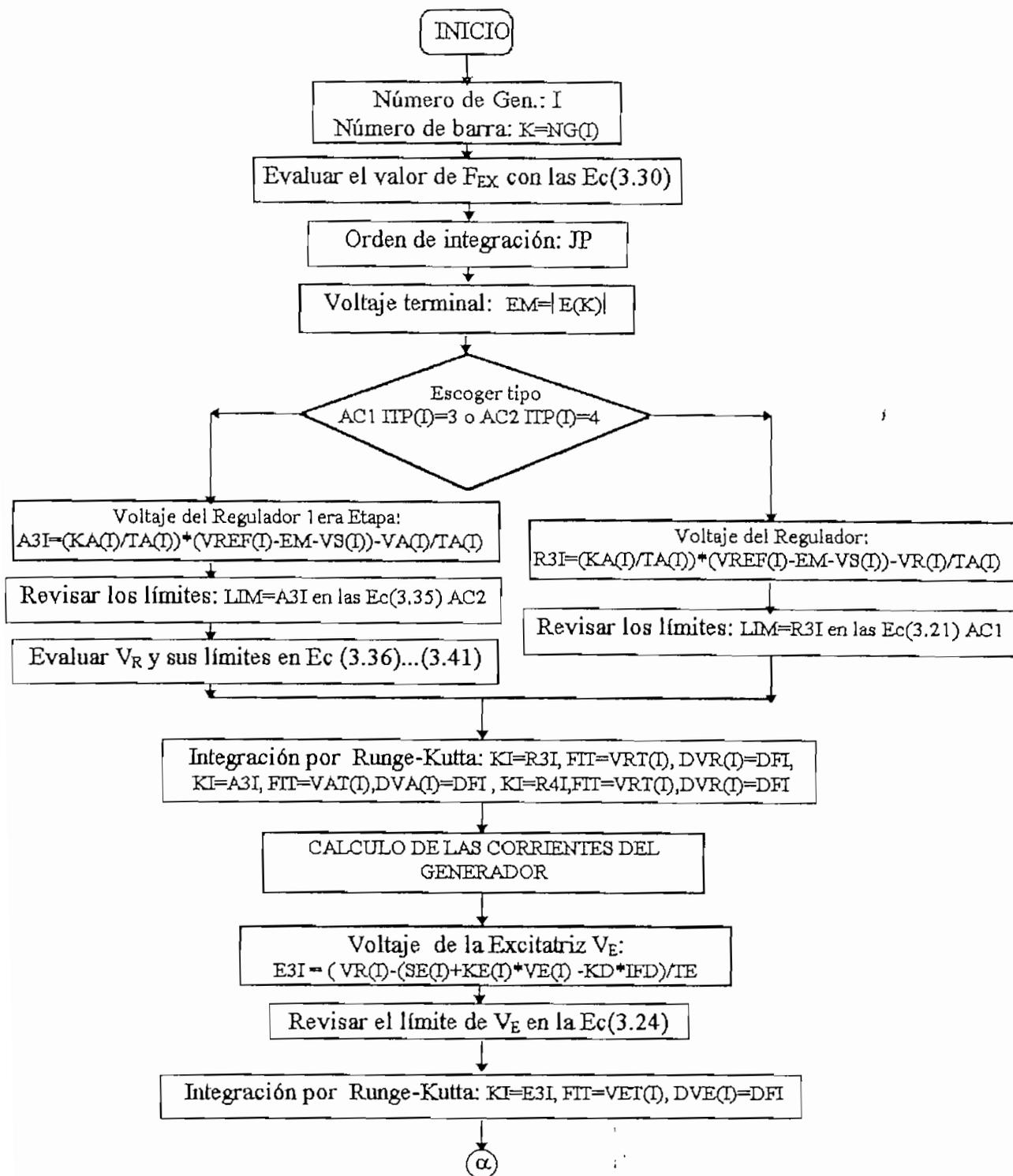
DIAGRAMA FUNCIONAL DEL PROGRAMA DE ESTABILIDAD TRANSITORIA

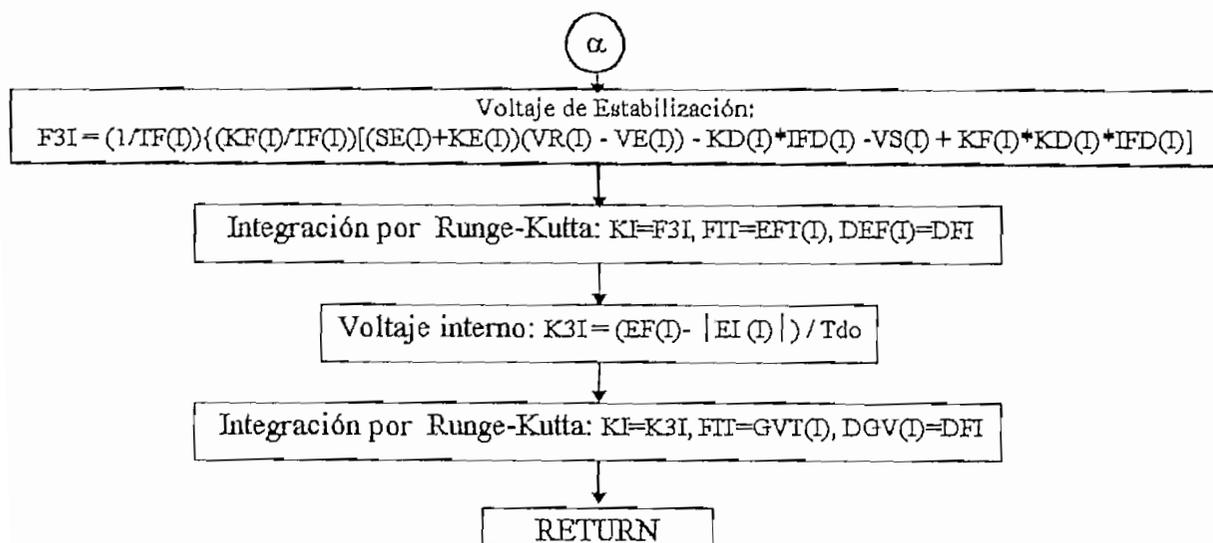


SUBROUTINA DE LOS SISTEMAS DE EXCITACION DC

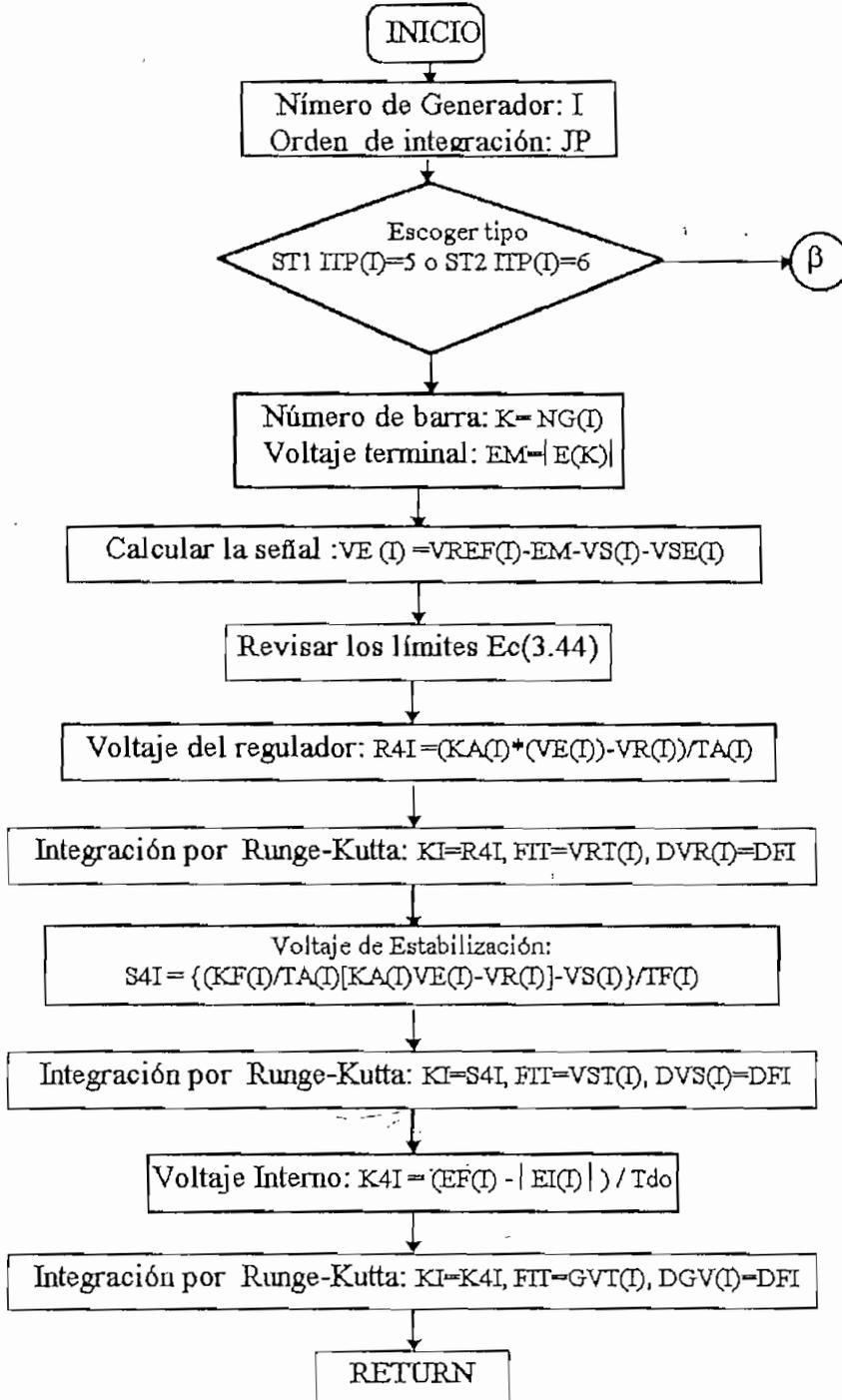


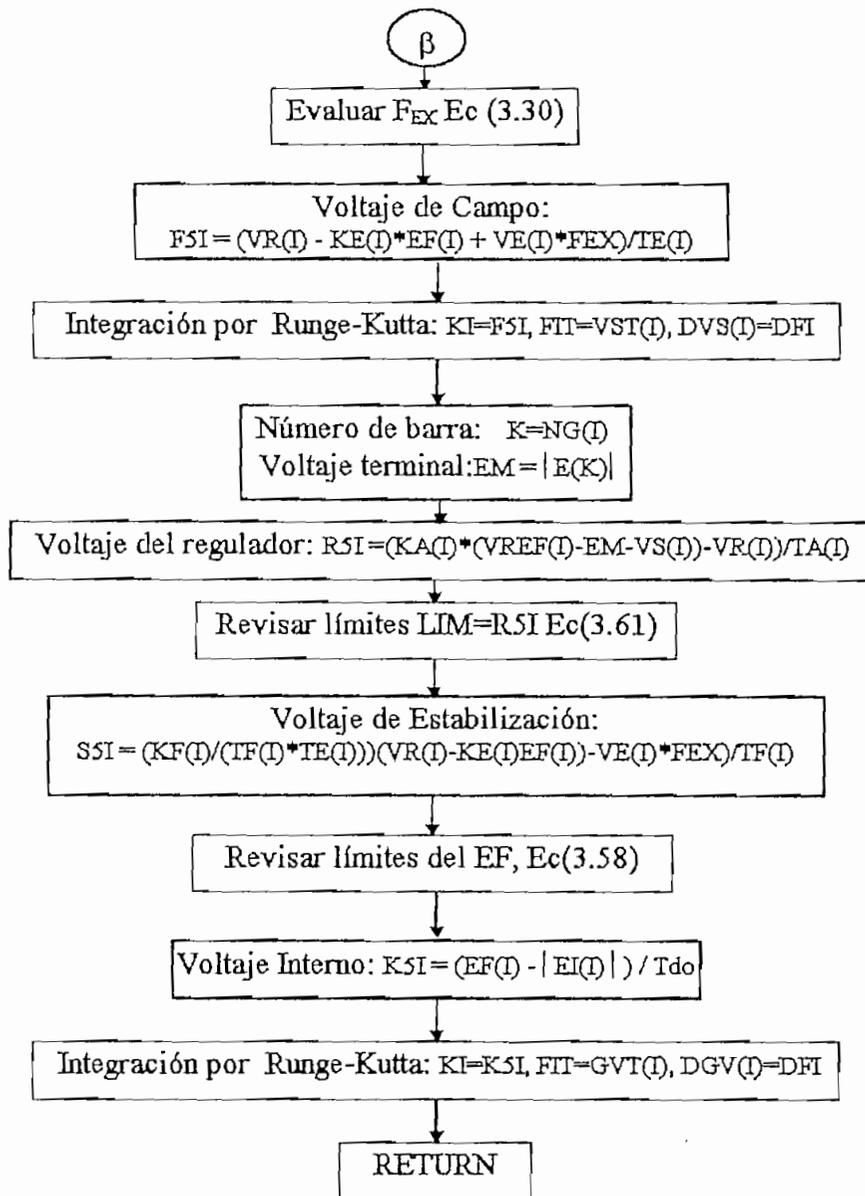
SUBROUTINA DE LOS SISTEMAS DE EXCITACION AC



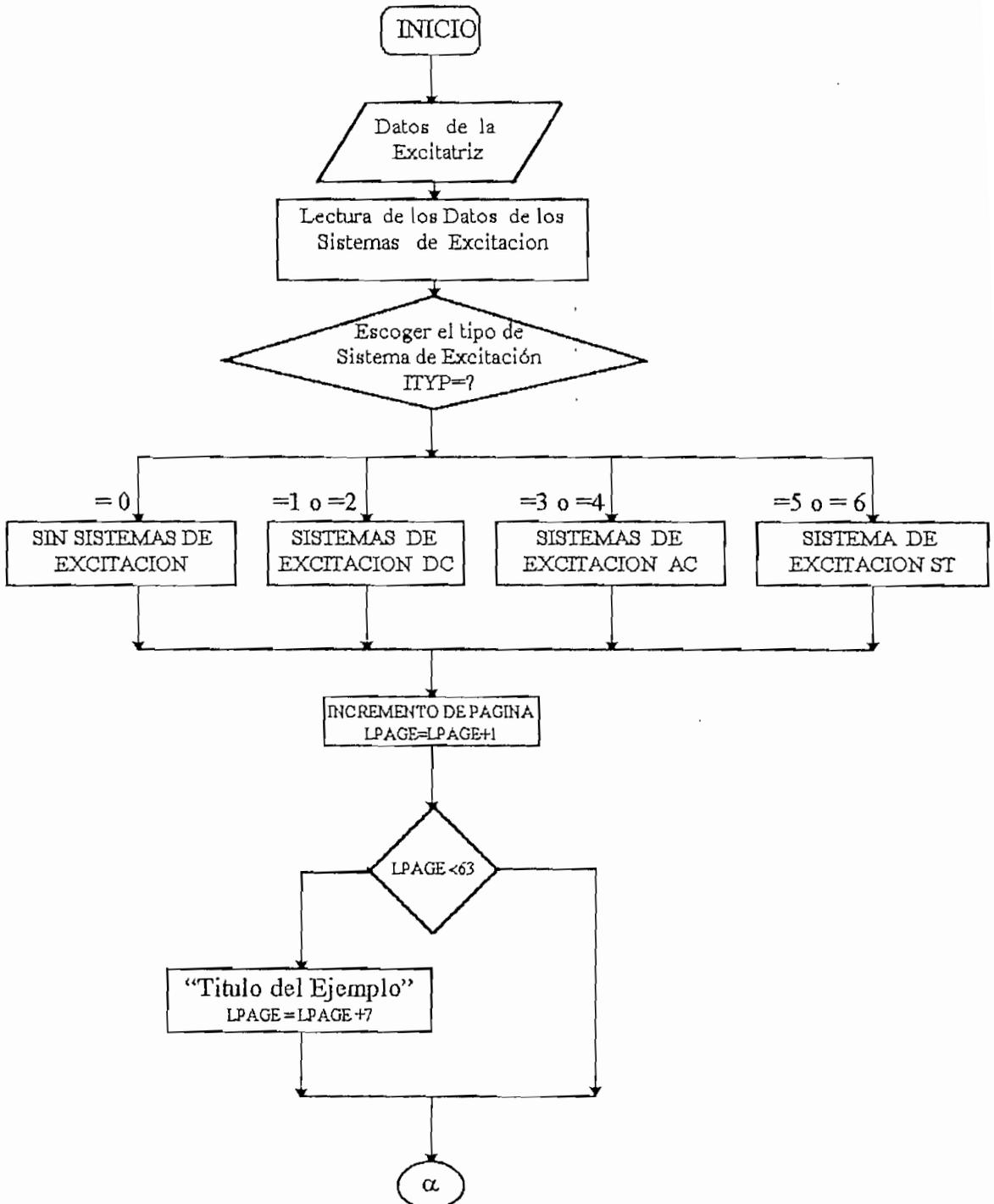


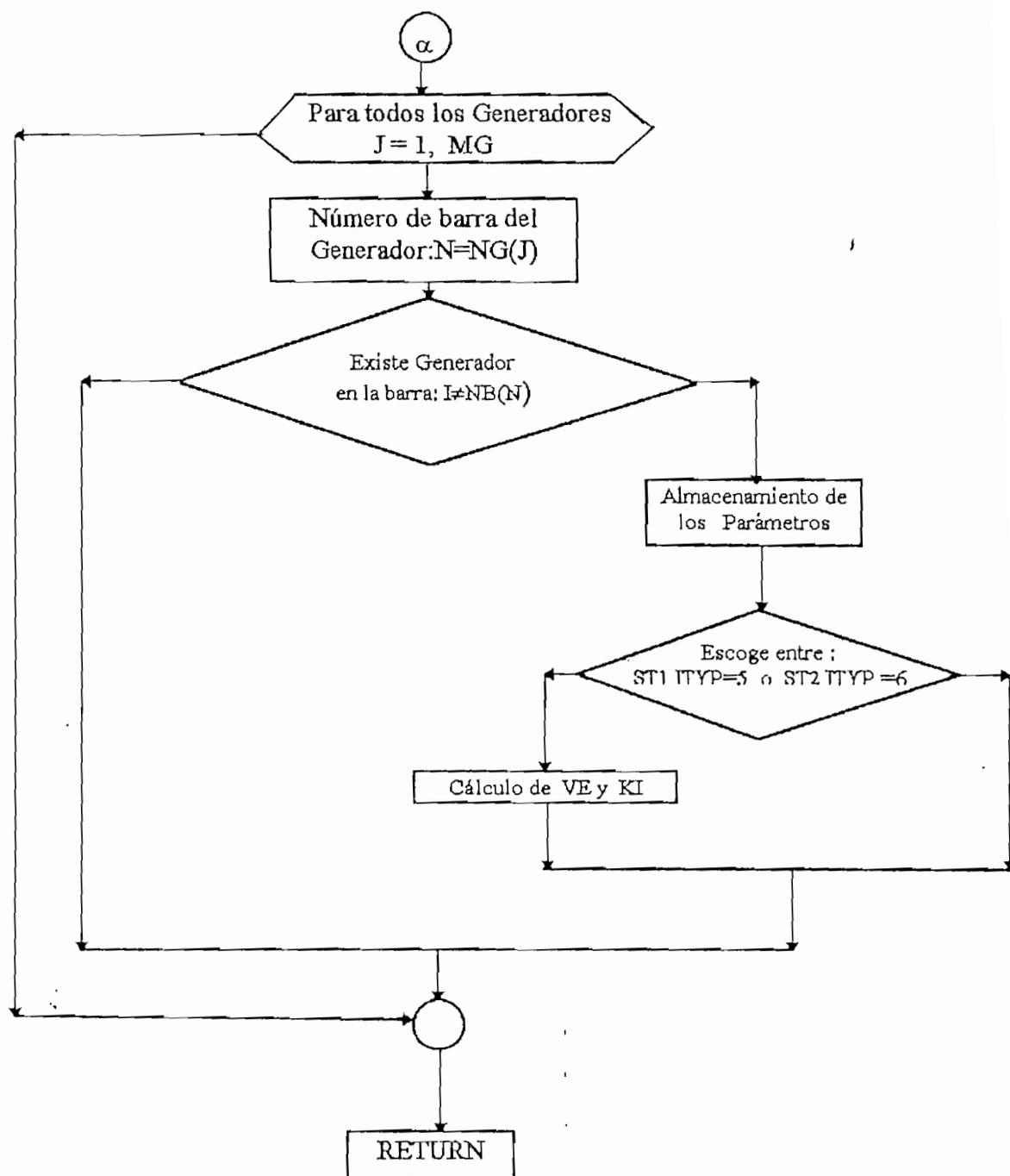
SUBROUTINA DE LOS SISTEMAS DE EXCITACION ST



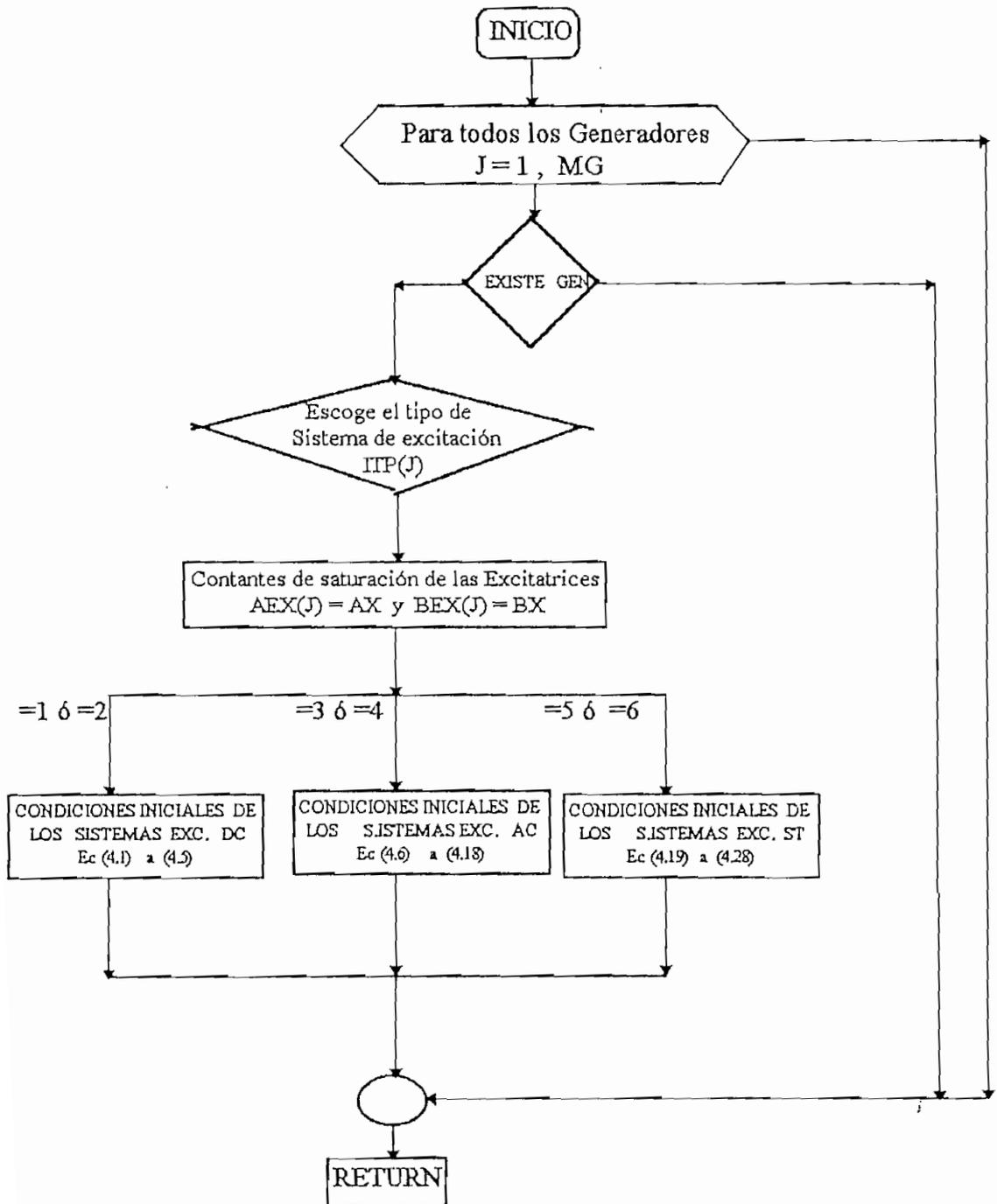


SUBROUTINA DE DATOS DE LOS SISTEMAS DE EXCITACION

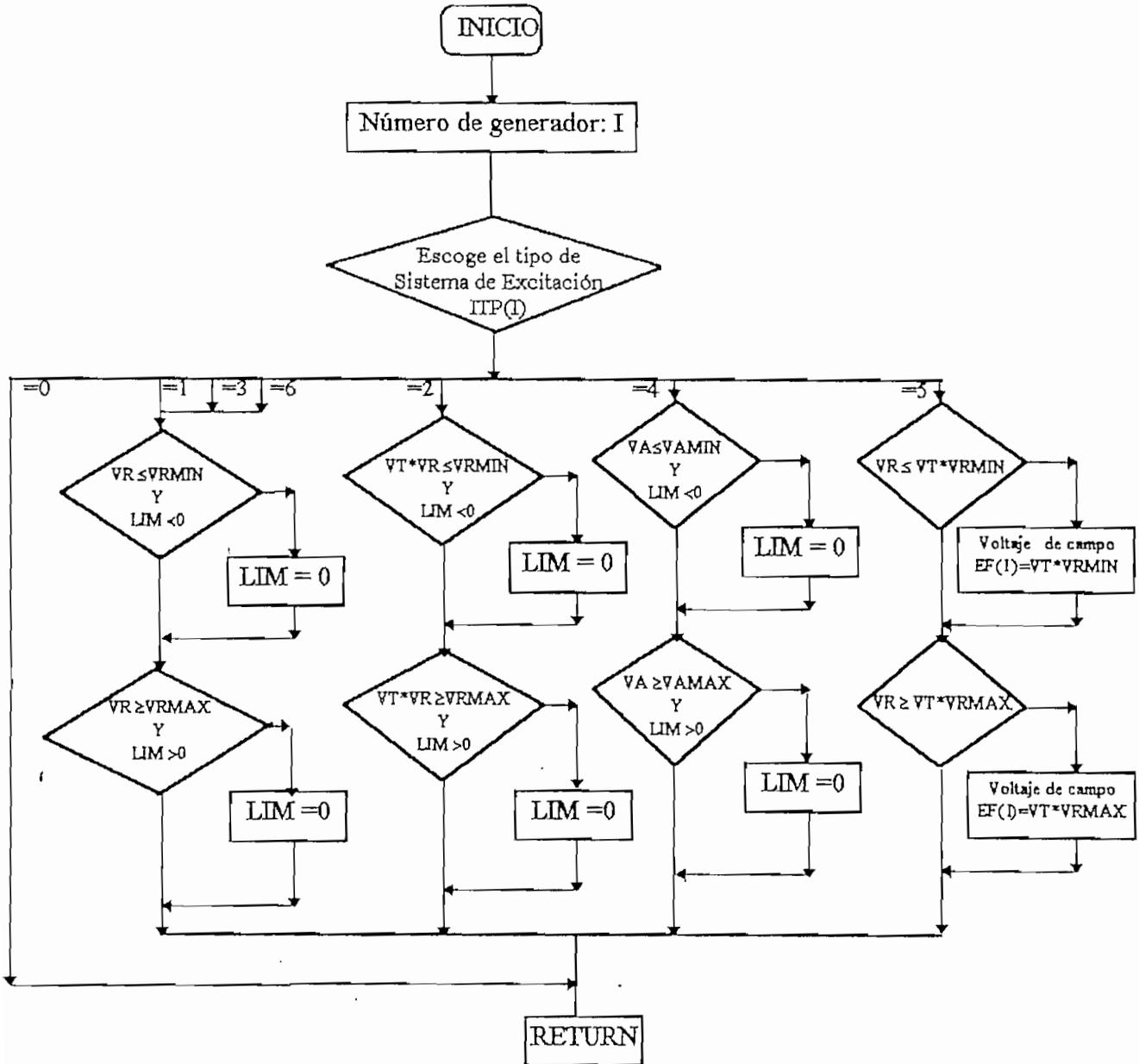




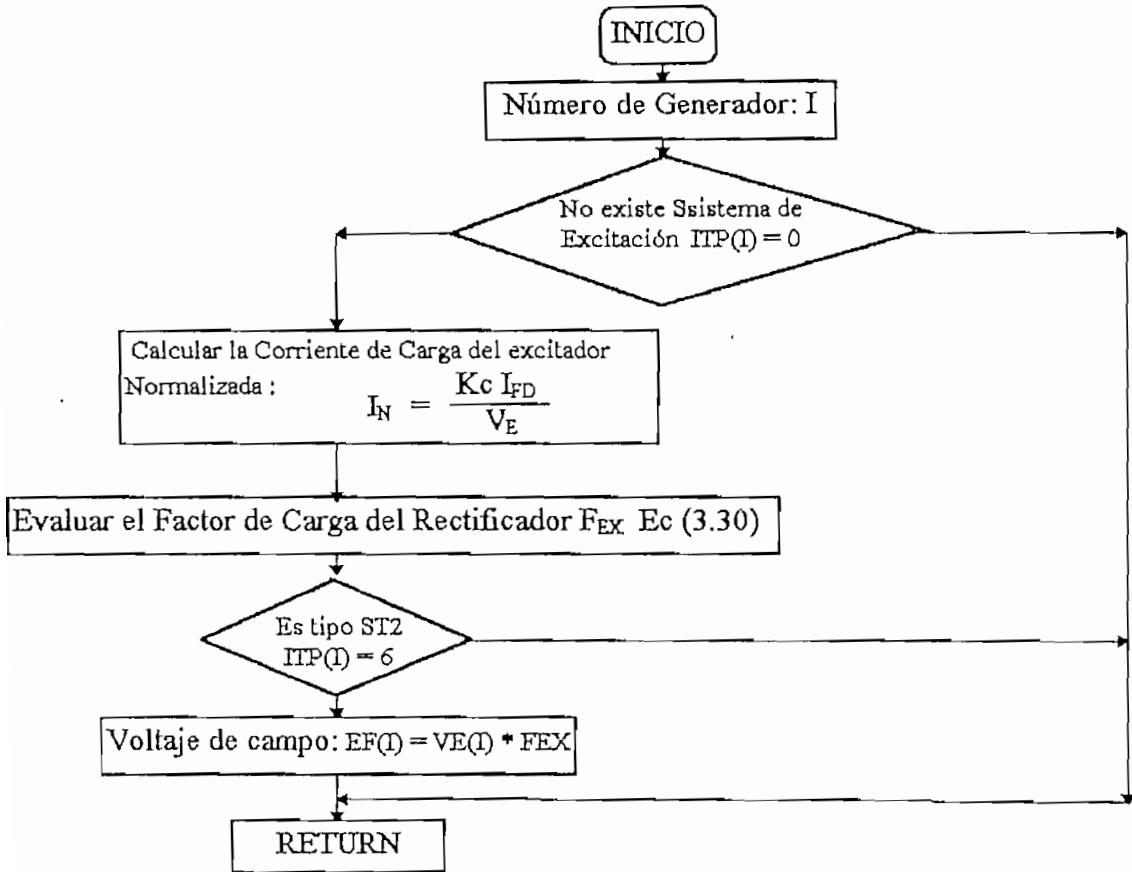
SUBROUTINA DE CONDICIONES INICIALES



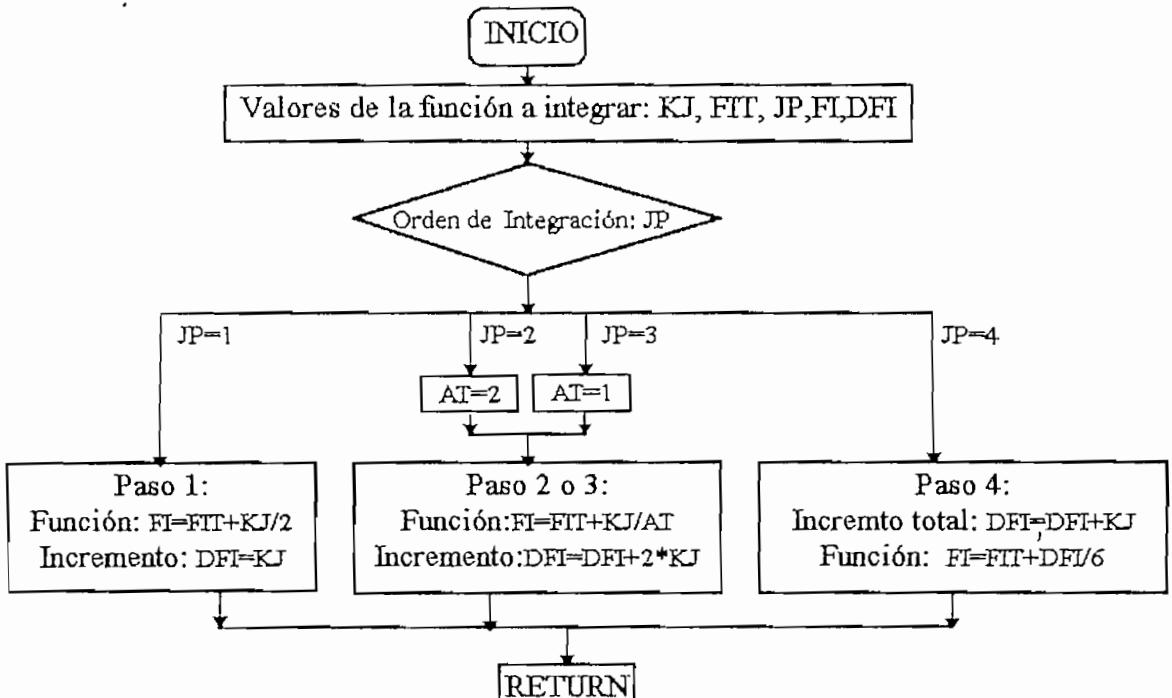
SUBROUTINA DE LOS LIMITES



SUBROUTINA DE LAS COMPONENTES RECTIFICADORES



SUBROUTINA RUNGE-KUTTA



4.5 APLICACIONES

Las metas principales de los ejemplos de aplicación del programa computacional desarrollado son:

- Determinar la correcta modelación matemática de los sistemas excitación ,
- Comprobar el adecuado funcionamiento de los algoritmos implementados y,
- Presentar al usuario el modo de uso del programa.

Debido a las características de los parámetros necesitados y con la finalidad de obtener resultados comparables, se analizan los sistemas de potencia de las referencias [1], [2] y [11].

En el anexo C se presentan las tablas de resultados de los ejemplos analizados en los cuales se listan las variables: velocidad del rotor, voltaje interno del generador, ángulo del rotor, potencia eléctrica de salida, voltaje terminal, y ángulo de barras.

4.5.1 PREPARACION DE DATOS

Para realizar el estudio de la estabilidad se debe preparar los siguientes datos de acuerdo a las especificaciones sobre el ingreso de datos del numeral 4.2.4 y el anexo A:

- a) Resultados del flujo de potencia antes de la perturbación,
- b) Datos de generadores,
- c) Datos de sistemas de excitación, y,
- d) Tipo y localización de la falla, tiempo de maniobra y tiempo máximo de estudio.

Para realizar el estudio de estabilidad sin considerar el efecto de los sistemas de excitación sólo son necesarios los datos de los literales: a), b) y d).

4.5.2 ANALISIS DE ESTABILIDAD DE UN SISTEMA DE CINCO BARRAS

El primer caso, indicado en la figura 4.4, consta de: cinco barras, siete líneas de transmisión, dos generadores con sistemas de excitación, y, cuatro cargas modeladas como impedancia constante tomado de las referencias $|1|$ y $|11|$.

Se provoca una falla trifásica en la barra 2, la misma se inicia en $t=0s$ y permanece hasta $0.1s$, y se estudia sin sistemas de excitación así como con los seis sistemas de excitación implementados.

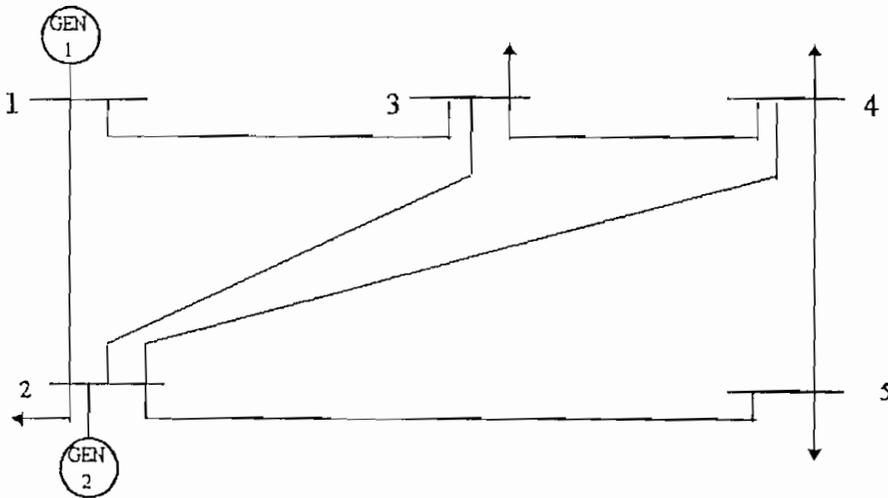


Figura 4.4 Diagrama Unifilar del Sistema de Cinco Barras

Se analizan las curvas de ángulos de rotores de generadores, diferencias angulares de los rotores, frecuencia, voltajes internos, voltajes terminales de los generadores, y potencias eléctricas de salida.

a) Sin Sistema de Excitación

Para comprobar el funcionamiento adecuado de los modelos matemáticos de los diferentes elementos del SEP, sin considerar a los sistemas de excitación, se compara con los resultados de ángulos de rotores y de frecuencia obtenidos en la referencia $|1|$. En las figuras 4.5a y 4.5d se puede comprobar la concordancia del comportamiento de estas dos variables.

De acuerdo a los resultados obtenidos se determina que el sistema tiene un comportamiento oscilatorio para esta perturbación, como se aprecia de la diferencia angular entre los dos rotores presentada en la figura 4.5c.

De la figura 4.5f se concluye que los voltajes internos $E_{q'1}$ y $E_{q'2}$ permanecen constantes, debido a que se considera a la excitación como una fuente de voltaje constante, y no influye en el voltaje terminal.

En la figura 4.5g se puede observar el comportamiento de la potencia eléctrica de salida de las máquinas, con la consideración de que la potencia mecánica constante, las oscilaciones en los dos generadores son bastante grandes e inclusive la curva del generador 2 indica motorización de esta unidad.

b) Con Sistemas de Excitación de Corriente Continua

En las figuras 4.6a y 4.6b se comparan los ángulos rotóricos de los generadores obtenidos en esta tesis y los de la referencia [11] considerando sistemas de excitación de corriente continua.

Se puede observar los resultados presentan un comportamiento similar. La figura 4.6c se observa un aumento del margen de estabilidad, debido a que las diferencias máximas de los ángulos de los rotores son menores con respecto a la modelación sin sistemas de excitación.

De la figura 4.6d se observa una reducción de los picos de las frecuencias de los generadores respecto al caso de no considerar sistemas de excitación.

En la figura 4.6e se indican los voltajes terminales, como era de esperarse, por la influencia la variación de los voltajes internos $E_{q'1}$ y $E_{q'2}$ realizada por los sistemas de excitación, se produce una mayor variación de estos.

De acuerdo a la figura 4.6f la potencia eléctrica de salida presenta un mejor comportamiento del proporcionado en el caso de no considerar los sistemas de excitación, las oscilaciones son menores y el generador 2 ya no se motoriza.

Los resultados obtenidos para el caso de los sistemas de excitación tipo DC2 no se diferencian mayormente del tipo DC1, debido a que estos sistemas difieren solamente en los límites del regulador de voltaje, como se observa en las figuras 4.7

c) Con Sistemas de Excitación de Corriente Alterna

En la figuras 4.8a se puede observar que el ángulo del rotor de los generadores presenta una variación más severa que con los sistemas DC, pero manteniendo una forma de oscilación similar .

La diferencia de los ángulos de los rotores se reduce más que en los otros casos, como se muestra en la figura 4.8b indicando un mejor margen de estabilidad del SEP.

En cuanto a la frecuencia mostrada en la figura 4.8c, no se observa una diferencia apreciable con respecto a la obtenida en los sistemas tipo DC.

En la figura 4.8d se indica la variación en los voltajes internos $E_{q'1}$ y $E_{q'2}$ influyendo de igual manera sobre el voltaje terminal, pero con variaciones más rápidas que las provocadas por los sistemas de excitación de corriente continua.

La potencia eléctrica de salida, posee una variación mayor, de acuerdo a la figura 4.8e pero conserva una similar forma de oscilación que con los sistemas DC.

Para el caso de los sistemas tipo AC2, los resultados presentan un comportamiento similar al tipo AC1, como se indica en las figuras 4.9.

d) Con Sistemas de Excitación Estáticos

El sistema tipo ST1 se diferencia de los otros debido a que la potencia eléctrica necesaria para la excitación se toma directamente de los terminales del generador, a través de un transformador y se rectifica en puentes semi-controlados o controlados, lo cual hace que su velocidad de respuesta sea mayor que la de los otros sistemas antes indicados.

En la figura 4.10a se presenta el ángulo del rotor, en el que se muestra que el sistema de potencia varía con menores oscilaciones mejorando su margen de estabilidad como se indica con la diferencia angular de los rotores en la figura 4.10b.

La frecuencia presenta una oscilación similar a la de los otros sistemas de excitación según se observa en la figura 4.10c.

Como se muestra en la figura 4.10d, la variación de los voltajes internos $E_{q'1}$ y $E_{q'2}$ es más grande, lo que afecta directamente sobre el voltaje terminal.

En cuanto a la potencia eléctrica de salida, la figura 4.10e muestra una variación mayor que con los sistemas AC, especialmente en la máquina que puede proporcionar más potencia, y el generador 2 tampoco se motoriza.

Con los sistemas tipo ST2 se tienen curvas similares a los sistemas de excitación de corriente continua y alterna pero se observa una mayor influencia de la variación de los voltajes internos hacia el voltaje terminal de los generadores, de manera más rápida de acuerdo a la figuras 4.11.

RESULTADOS DEL SISTEMA DE CINCO BARRAS PARA UNA FALLA TRIFASICA EN LA BARRA 2, DE 0.1 s DE DURACION, SIN SISTEMAS DE EXCITACION

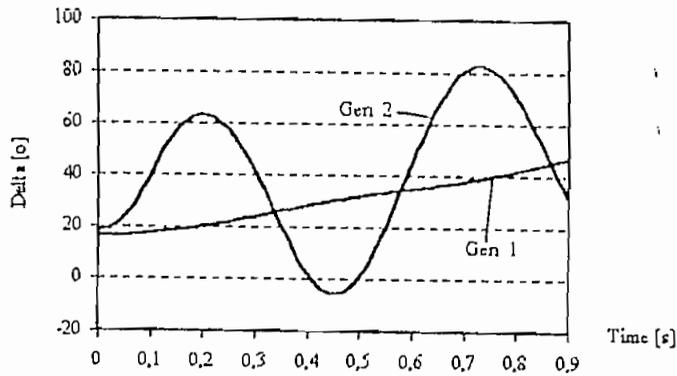


Figura 4.5a Angulo del Rotor

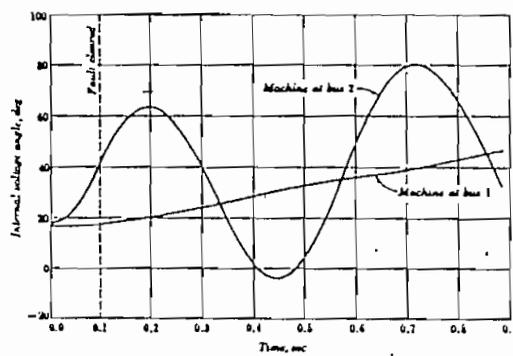


Figura 4.5b Angulo del Rotor Referencia [1]

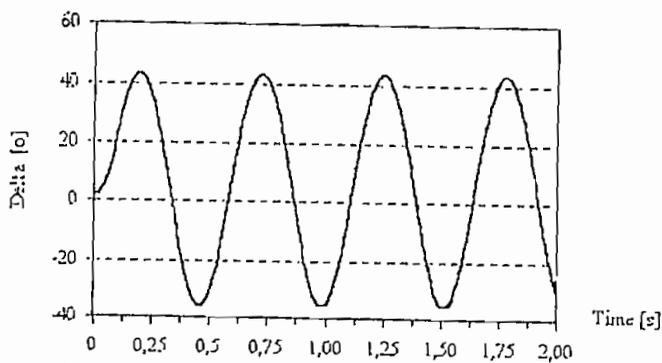


Figura 4.5c Diferencia Angular del Rotor Gen 2-1

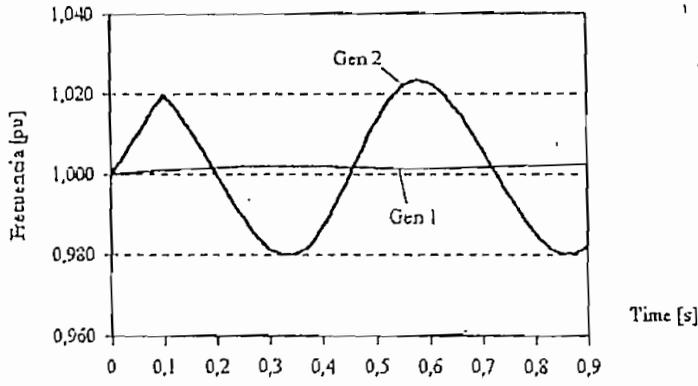


Figura 4.5d Frecuencia

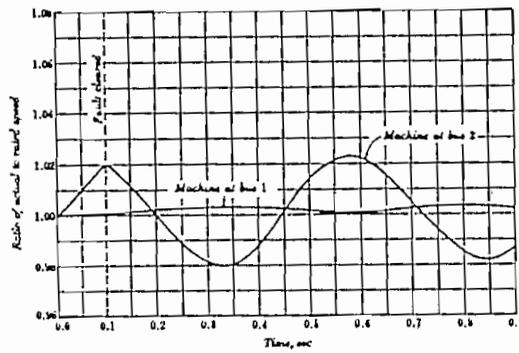


Figura 4.5e Frecuencia Referencia [1]

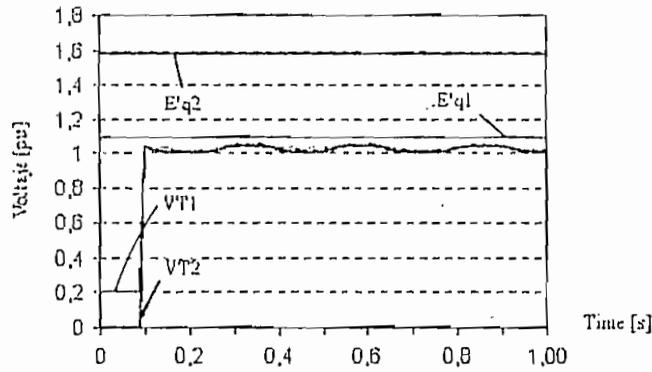


Figura 4.5f Voltaje terminal VT y.Voltaje interno E'q

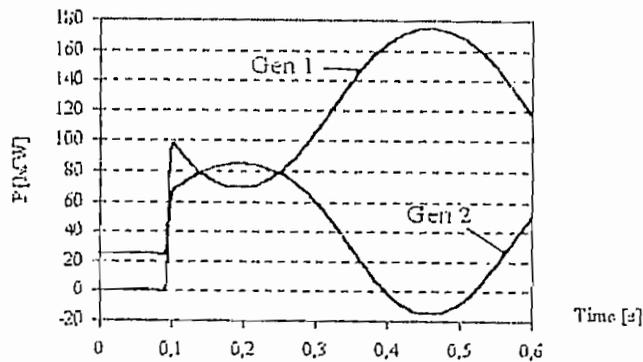


Figura 4.5g Potencia Electrica de Salida

RESULTADOS DEL SISTEMA DE CINCO BARRAS PARA UNA FALLA TRIFASICA EN LA BARRA 2, DE 0.1 s DE DURACION, CON SISTEMAS DE EXCITACION DC1

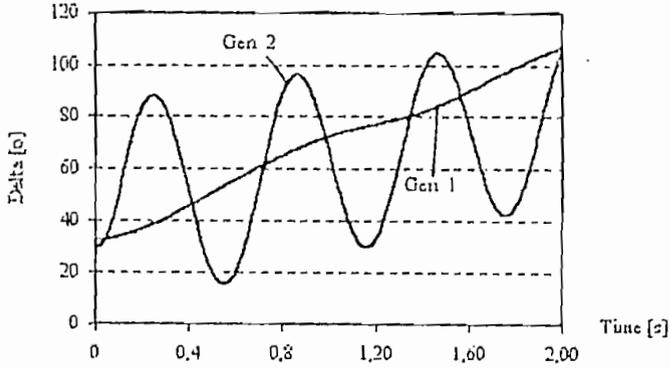


Figura 4.6a Angulo del Rotor

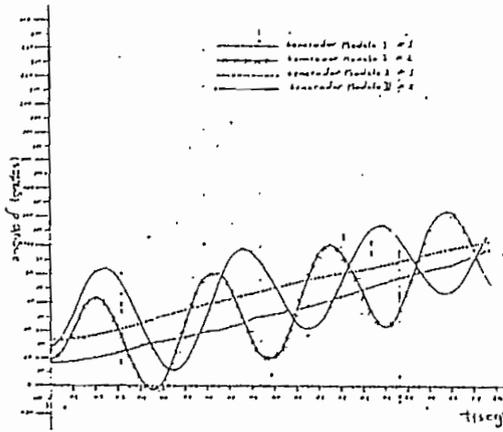


Figura 4.6b Angulo del Rotor Referencia [11]

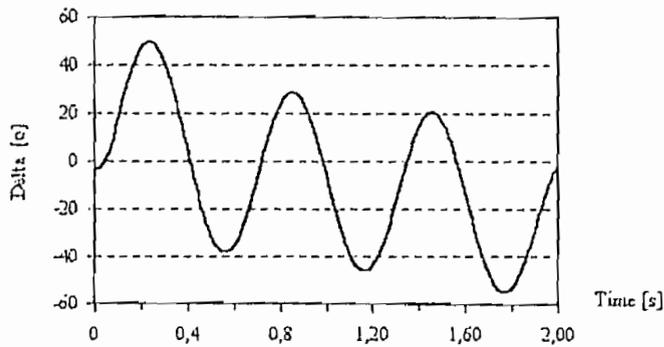


Figura 4.6c Diferencia Angular del Rotor Gen 2-1

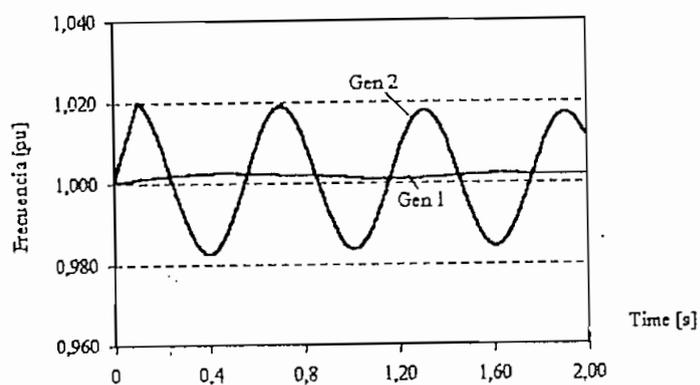


Figura 4.6d Frecuencia

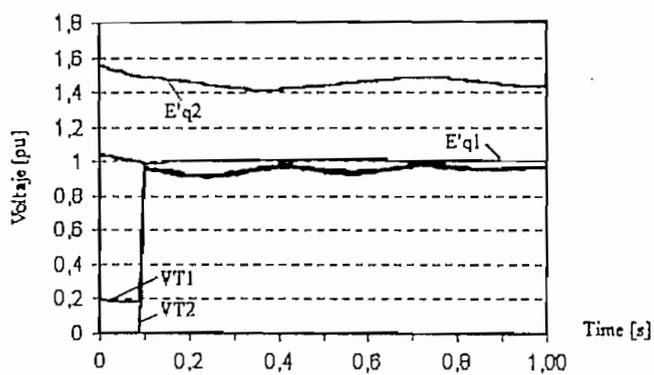


Figura 4.6e Voltaje terminal VT y Voltaje interno E'q

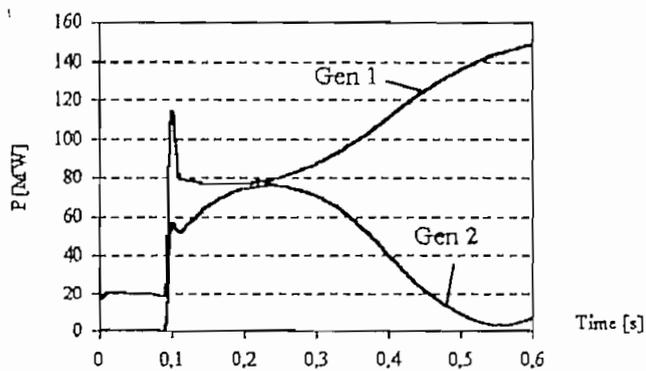


Figura 4.6f Potencia Electrica de Salida

RESULTADOS DEL SISTEMA DE CINCO BARRAS PARA UNA FALLA TRIFASICA EN LA BARRA 2, DE 0.1 s DE DURACION, CON SISTEMAS DE EXCITACION DC2

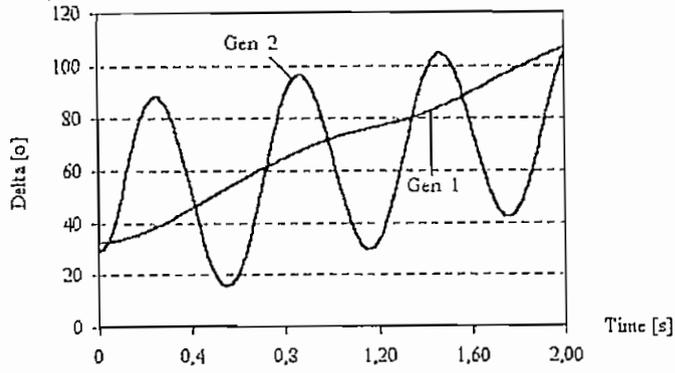


Figura 4.7a Angulo del Rotor

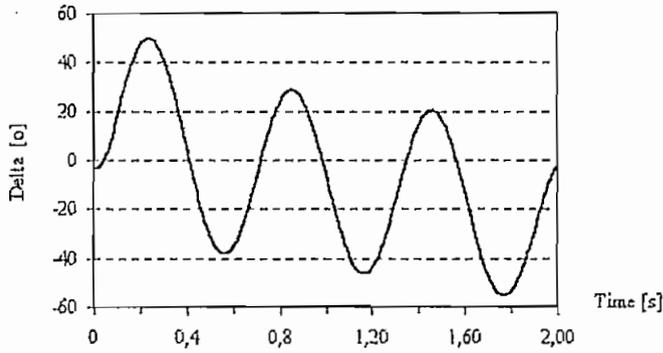


Figura 4.7b Diferencia Angular del Rotor Gen 2-1

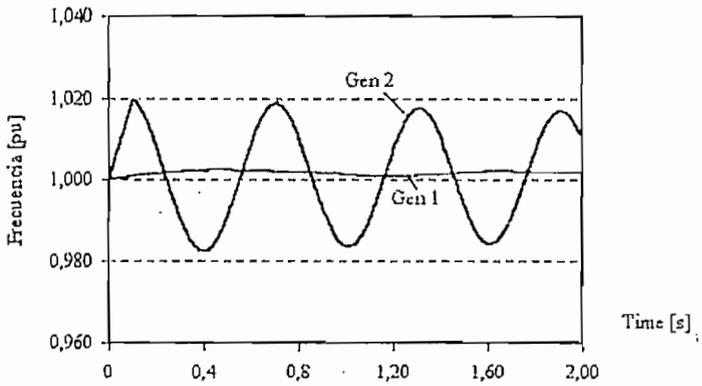


Figura 4.7c Frecuencia

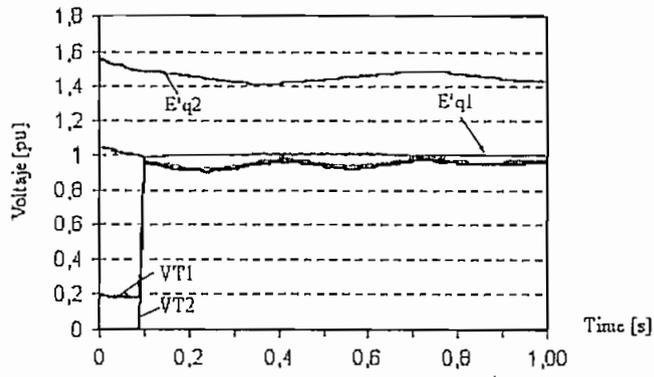


Figura 4.7d Voltaje terminal VT y Voltaje interno E'q

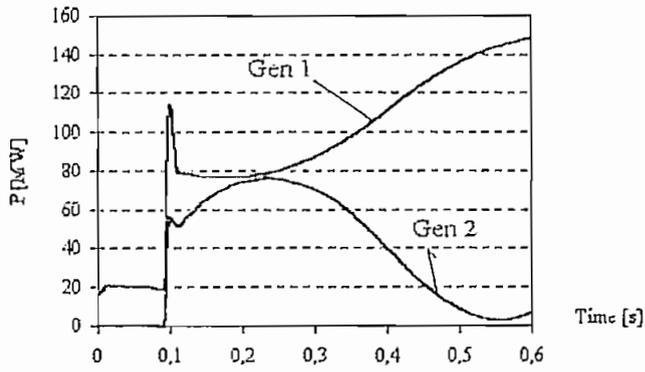


Figura 4.7e Potencia Electrica de Salida

RESULTADOS DEL SISTEMA DE CINCO BARRAS PARA UNA FALLA TRIFASICA EN LA BARRA 2, DE 0.1 s DE DURACION, CON SISTEMAS DE EXCITACION AC1

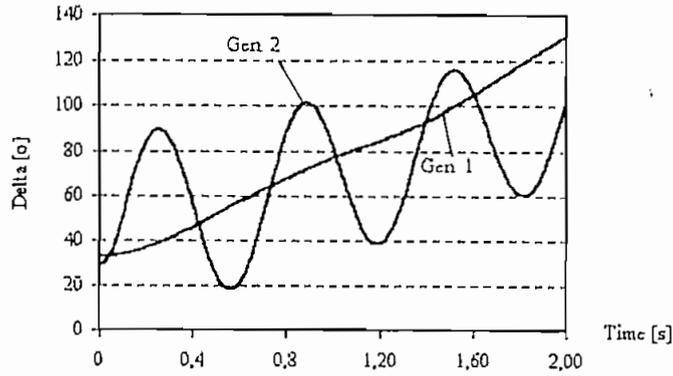


Figura 4.8a Angulo del Rotor

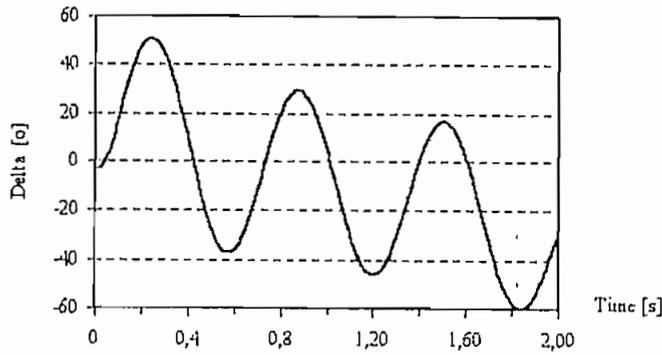


Figura 4.8b Diferencia Angular del Rotor Gen 2-1

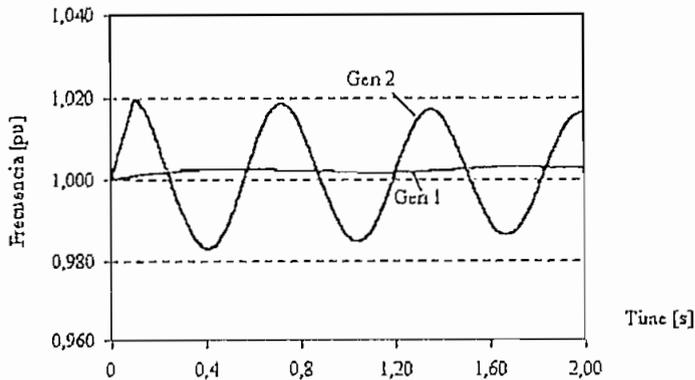


Figura 4.8c Frecuencia

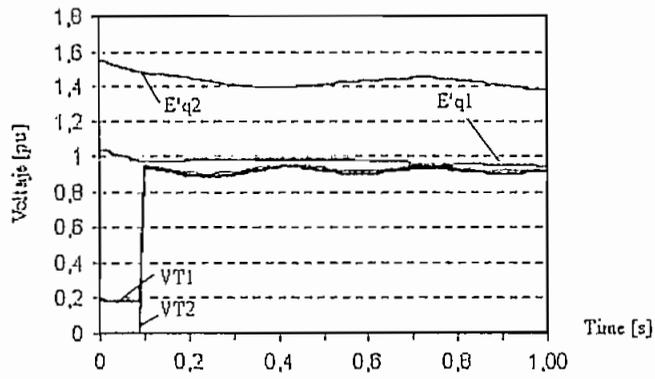


Figura 4.8d Voltaje terminal VT y Voltaje interno E'q

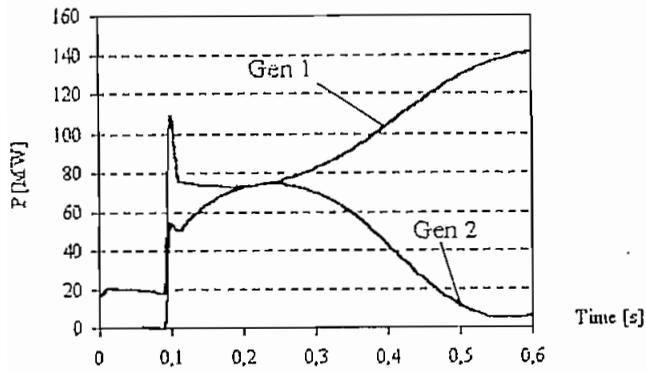


Figura 4.8e Potencia Electrica de Salida

RESULTADOS DEL SISTEMA DE CINCO BARRAS PARA UNA FALLA TRIFASICA EN LA BARRA 2, DE 0.1 s DE DURACION, CON SISTEMAS DE EXCITACION AC2

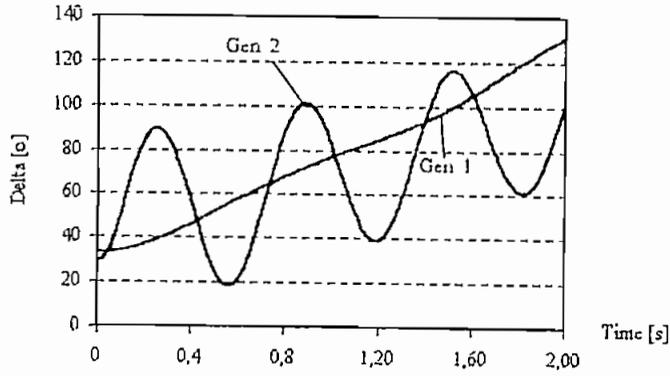


Figura 4.9a Angulo del Rotor

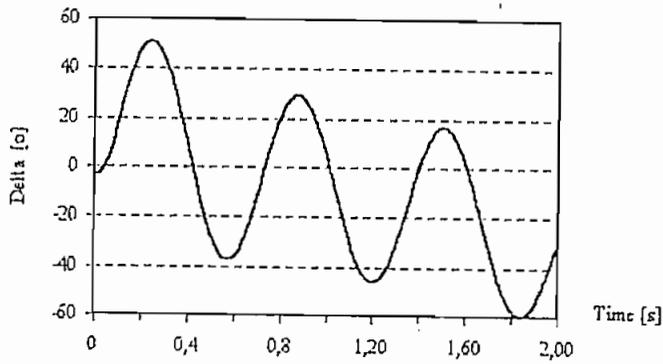


Figura 4.9b Diferencia Angular del Rotor Gen 2-1

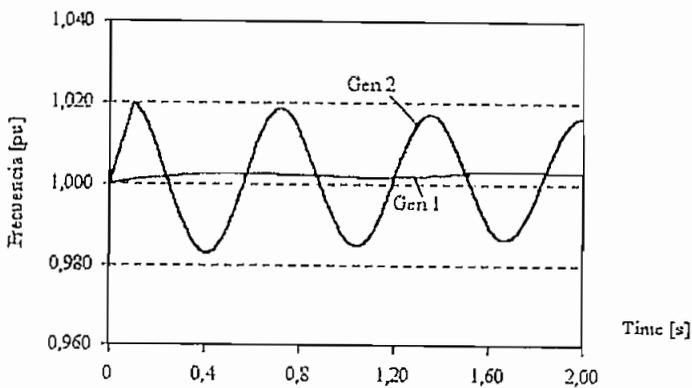


Figura 4.9c Frecuencia

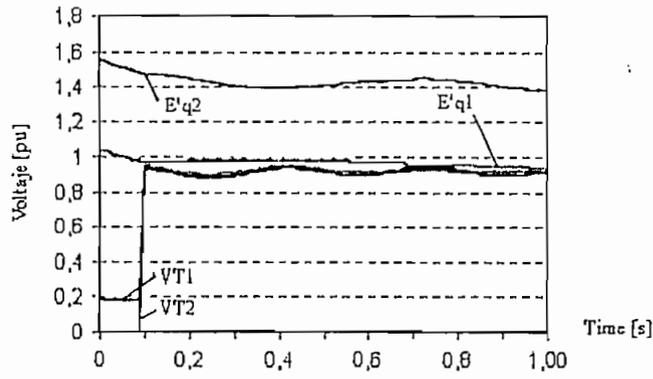


Figura 4.9d Voltaje terminal VT y Voltaje interno E'q

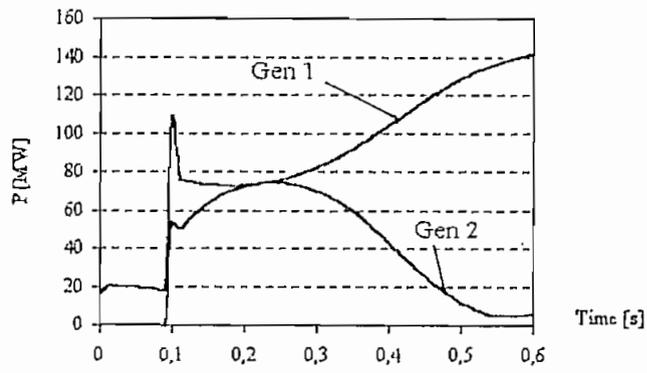


Figura 4.9e Potencia Electrica de Salida

RESULTADOS DEL SISTEMA DE CINCO BARRAS PARA UNA FALLA TRIFASICA EN LA BARRA 2, DE 0.1 s DE DURACION, CON SISTEMAS DE EXCITACION ST1

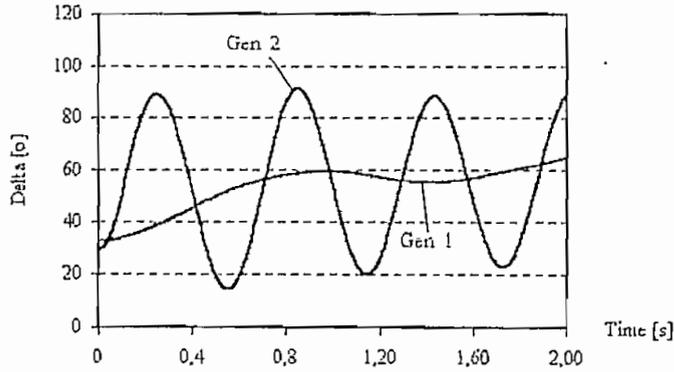


Figura 4.10a Angulo del Rotor

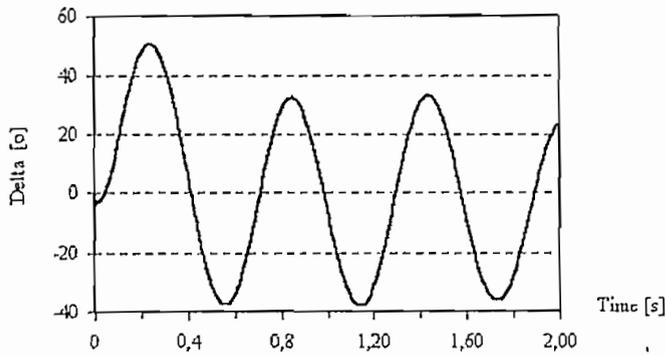


Figura 4.10b Diferencia Angular del Rotor Gen 2-1

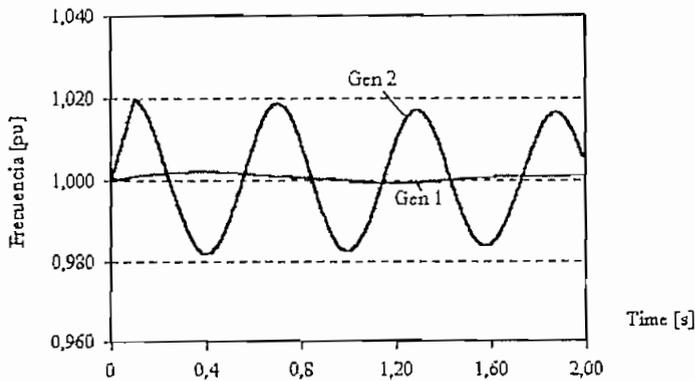


Figura 4.10c Frecuencia

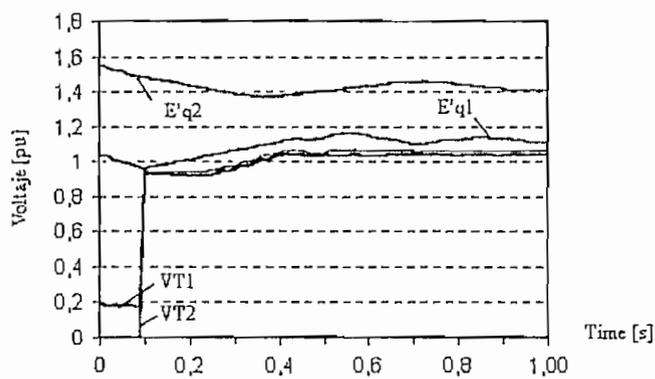


Figura 4.10d Voltaje terminal VT y Voltaje interno E'q

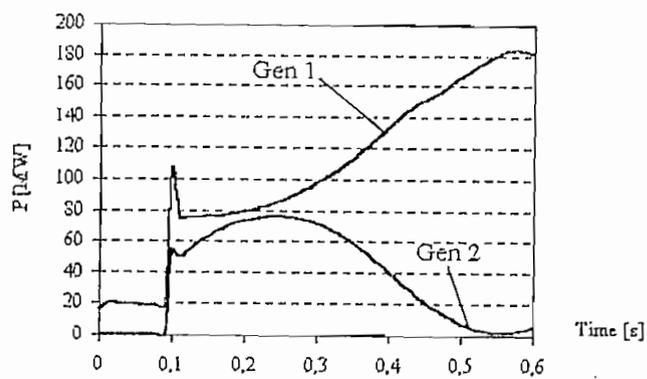


Figura 4.10e Potencia Electrica de Salida

RESULTADOS DEL SISTEMA DE CINCO BARRAS PARA UNA FALLA TRIFASICA EN LA BARRA 2, DE 0.1 s DE DURACION, CON SISTEMAS DE EXCITACION ST2

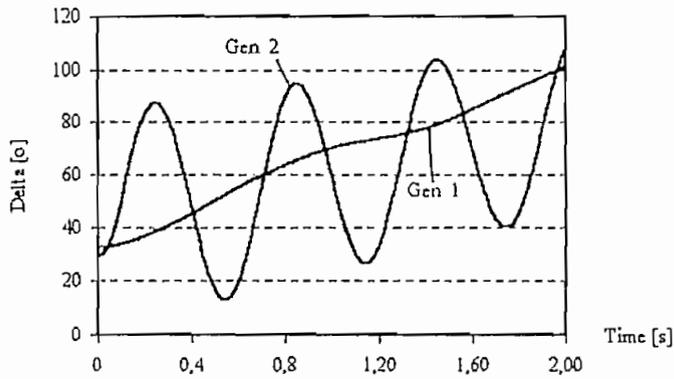


Figura 4.11a Angulo del Rotor

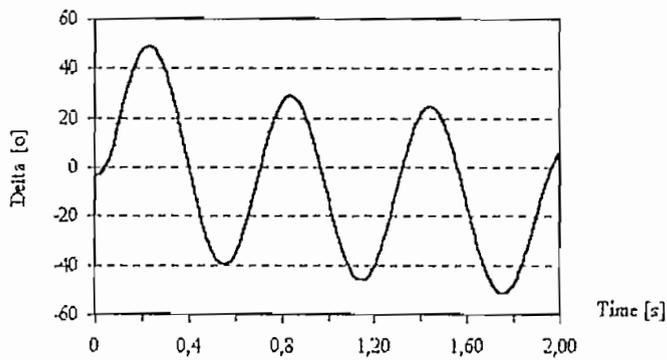


Figura 4.11b Diferencia Angular del Rotor Gen 2-1

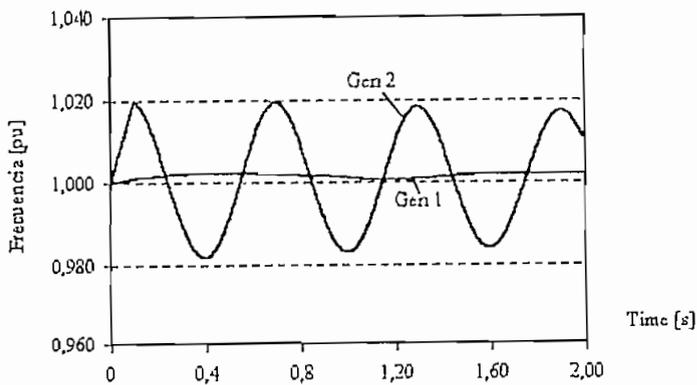


Figura 4.11c Frecuencia

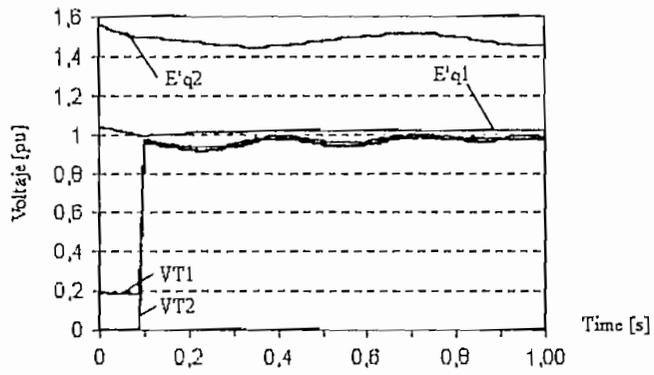


Figura 4.11d Voltaje terminal VT y Voltaje interno E'q

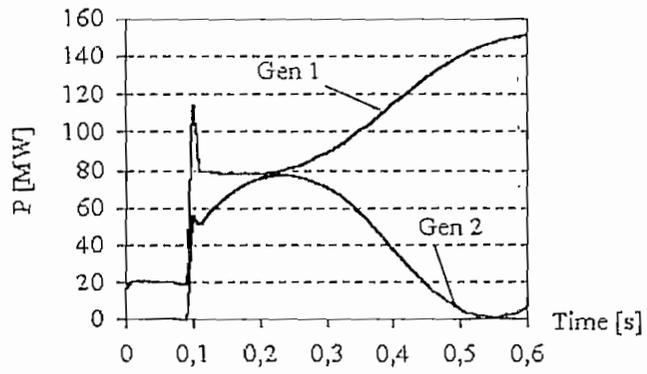


Figura 4.11e Potencia Eléctrica de Salida

4.5.3 ANALISIS DE ESTABILIDAD DE UN SISTEMA DE NUEVE BARRAS

El segundo sistema, analizado se indica en la figura 4.12, consta de: nueve barras, seis líneas de transmisión, tres transformadores, tres generadores, de los cuales solamente el generador 2 incluye el sistema de excitación, de acuerdo a la referencia [2] y, cuatro cargas modeladas como impedancia constante.

Para efectos de comparación de resultados se estudia al sistema con y sin el modelo de la excitación en el primer caso se provoca una falla trifásica en la barra 7, la misma que permanece por cinco ciclos y se la despeja por medio de la apertura de los disyuntores de la línea 7-5. Mientras que en el segundo caso, se provoca una falla trifásica en la barra 7 por 3 ciclos y se la despeja igual que el caso anterior.

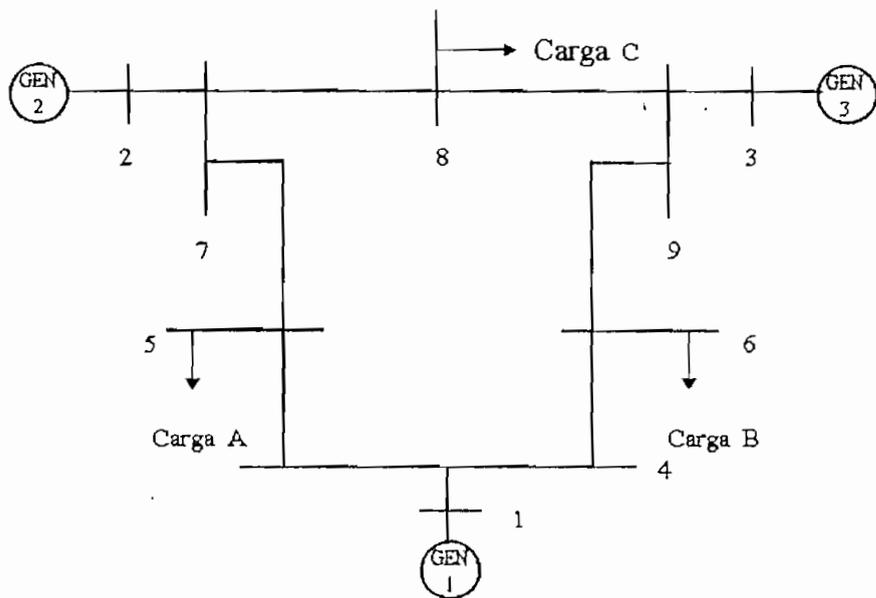


Figura 4.12 Diagrama Unifilar del Sistema de Nueve Barras

Al igual que en 4.5.2 se analizan las curvas de ángulos de los rotores de generadores, diferencias angulares de los rotores, frecuencia, voltajes internos, voltajes terminales de los generadores y potencias eléctricas de salida sin y con modelación del sistema de excitación del generador 2.

a) Sin Sistema de Excitación

Se comparan los resultados de ángulos de rotores de las figuras 4.13a y b, las diferencias angulares de los rotores de las figuras 4.13c y d, obtenidos con esta tesis y los de la referencia [2]. Se puede comprobar la concordancia de estas variables ante esta perturbación, permitiendo demostrar la correcta implementación del programa de estabilidad transitoria.

En la figura 4.13e se muestra que la frecuencia del sistema aumenta continuamente en forma oscilatoria lo que permite predecir la salida de las unidades.

De la figura 4.13f se concluye que los voltajes internos $E_{q'1}$, $E_{q'2}$ y $E_{q'3}$ permanecen constantes debido a que se consideración la excitación como una fuente de voltaje constante. Los voltajes terminales después de soportar la depresión del cortocircuito, se recuperan rápidamente en alrededor de 0.1s.

En la figura 4.13g se puede observar el comportamiento de la potencia eléctrica de salida de las máquinas, con la consideración de que la potencia mecánica constante, las oscilaciones de los generadores son elevadas así la curva del generador 1 indica motorización de está unidad.

b) Con Sistema de Excitación de Corriente Continua

En la figura 4.14a se muestran los ángulos de los rotores de los tres generadores, los que oscilan conjuntamente, indicando que para esta perturbación el sistema es estable. La diferencia angular de los rotores 2 y 1 se comparan entre las figuras 4.14b y c, de la referencia [2]. Se puede comprobar la similitud de la oscilación. Se observa un aumento del margen de estabilidad debido a una menor diferencia angular respecto a la modelación sin sistemas de excitación.

En cuanto a la frecuencia mostrada en la figura 4.14d se ve significativamente afectada por la presencia de la modelación del sistema de excitación. Esta muestra una tendencia a recuperar su valor nominal más rápido que en el caso sin sistema de excitación.

En la figura 4.14e se indica una variación del voltaje terminal del generador 2 debido a que se está modelando la excitación con un sistema de corriente continua y por lo tanto se produce una oscilación en el voltaje interno E'_{q2} , mientras que los voltajes internos E'_{q1} y E'_{q3} permanecen constantes y sus voltajes terminales oscilan de similar manera, con picos más bajos que en el caso de no considerar la excitación.

De la figura 4.14f, las potencias eléctricas de salida, presentan una variación más grande debido a la inclusión de la excitación en el generador 2, además presenta un valor pico mayor al caso sin excitación. Los otros dos generadores se ven empujados respecto al caso sin sistemas de excitación a picos más altos, aquí el generador 1 y 3 se motorizan.

c) Con Sistema de Excitación de Corriente Alterna

En la figura 4.15a se observa que los ángulos de los rotores de los generadores presentan variaciones más severas que con los sistemas DC, pero manteniendo una forma de oscilación similar. Lo que se puede apreciar de mejor manera en la diferencia de los ángulos de los rotores indicada en la figura 4.15b.

En cuanto a la frecuencia en la figura 4.15c no se observa una diferencia considerable con los sistemas tipo DC, ya que presentan curvas similares.

En la figura 4.15d se observa la variación del voltaje interno E'_{q2} su respuesta más rápida influye de similar manera en el voltaje terminal del generador 2, que la obtenida con el sistema tipo DC, mientras que los otros voltajes internos permanecen constantes debido a que no se considera un modelo de la excitación y sus voltajes terminales tienen una forma semejante de oscilar que los anteriores casos.

Las potencias eléctricas de salida, se encuentran en la figura 4.15e, la oscilación del generador 2 un valor máximo, menor que en el caso DC. Para luego tomar una similar forma de oscilación a la obtenida con el sistema tipo DC. Los otros generadores oscilan de igual forma, en este caso el generador 3 no se motoriza.

d) Con Sistema de Excitación Estáticos

En la figura 4.16a se muestra que los ángulos rotóricos de los generadores oscilan con menores valores que para los otros casos, mejorando así su estabilidad, como se observa en la diferencia de los ángulos de los rotores indicada en la figura 4.16b.

La frecuencia presenta una oscilación similar a la obtenida con los demás sistemas de excitación, según se observa en la figura 4.16c.

Como se indica en la figura 4.16d la variación del voltaje interno $E_{q'2}$ afecta el voltaje terminal del generador de manera más rápida que con los otros sistemas, mejorando el nivel del mismo, lo que determina también una influencia en los voltajes terminales de los otros dos generadores a pesar de que sus voltajes internos no presentan variación debido a no considerar el efecto de la excitación.

De acuerdo a la figura 4.16e, las potencias eléctricas de salida son similares a las de los sistemas AC, pero con valores máximos más elevados que con los otros dos tipos de sistemas de excitación, en este caso los generadores 1 y 3 también se motorizan.

RESULTADOS DEL SISTEMA DE NUEVE BARRAS PARA UNA FALLA TRIFASICA EN LA BARRA 7, DE 5 CICLOS DE DURACION, SE DESPEJA POR LA APERTURA DE LA LINEA 7-5, SIN SISTEMAS DE EXCITACION

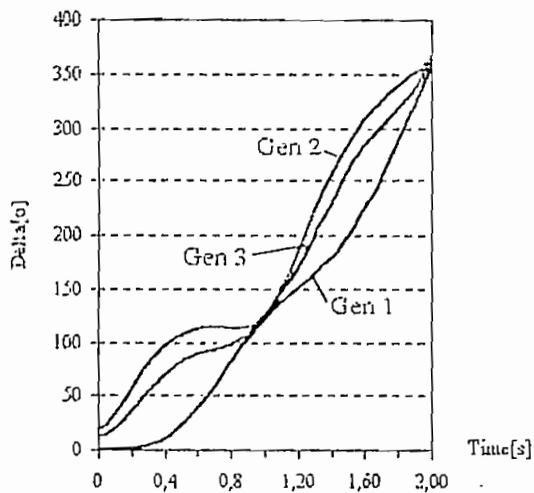


Figura 4.13a Angulo del Rotor

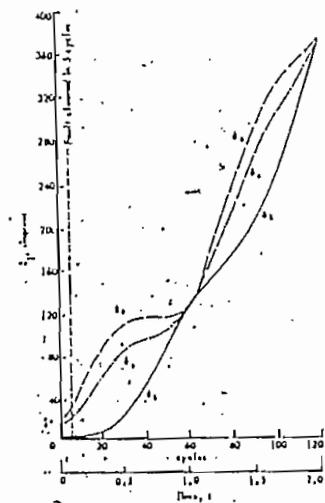


Figura 4.13 b Angulo del Rotor Referencia [2]

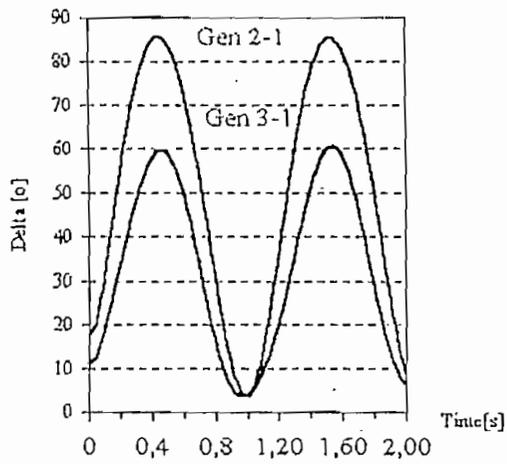


Figura 4.13c Diferencia Angular del Rotor

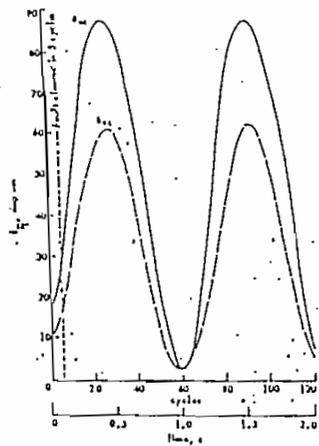


Figura 4.13d Diferencia Angular del Rotor Referencia [2]

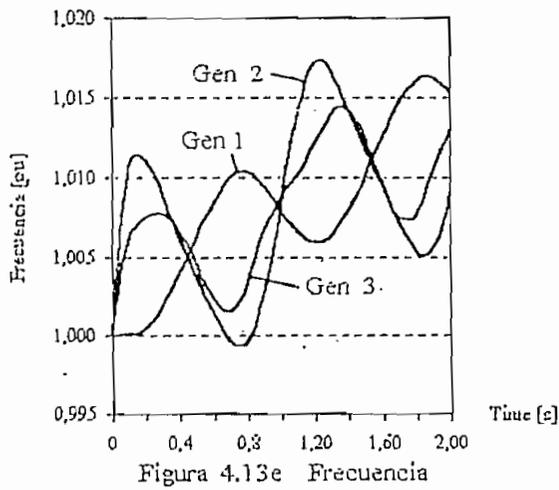


Figura 4.13e Frecuencia

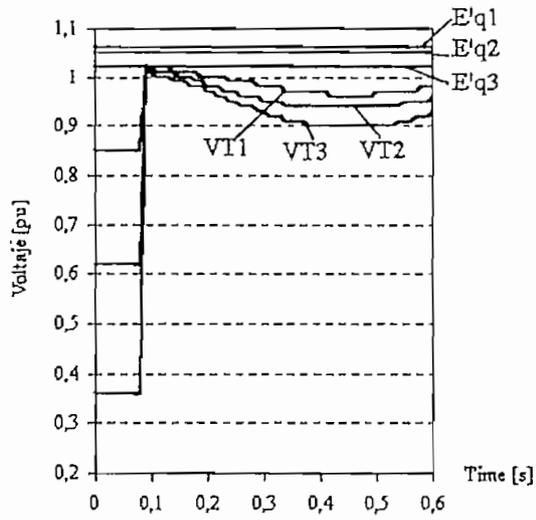


Figura 4.13f Voltaje Terminal VT y Voltaje Interno E'q

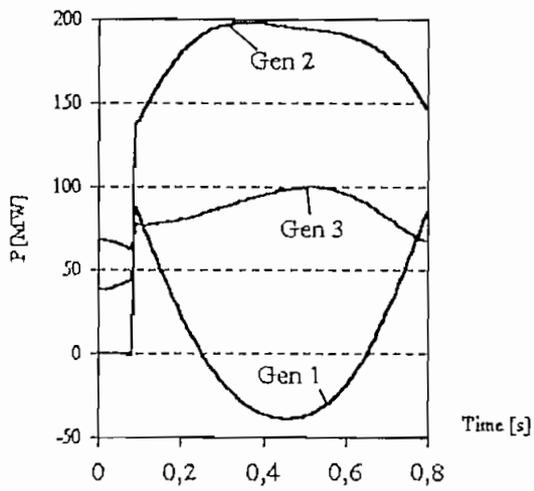


Figura 4.13g Potencia Electrica de Salida

RESULTADOS DEL SISTEMA DE NUEVE BARRAS PARA UNA FALLA TRIFASICA EN LA BARRA 7, DE 3 CICLOS DE DURACION, DESPEJADA POR LA APERTURA DE LA LINEA 7-5, CON SISTEMAS DE EXCITACION DC

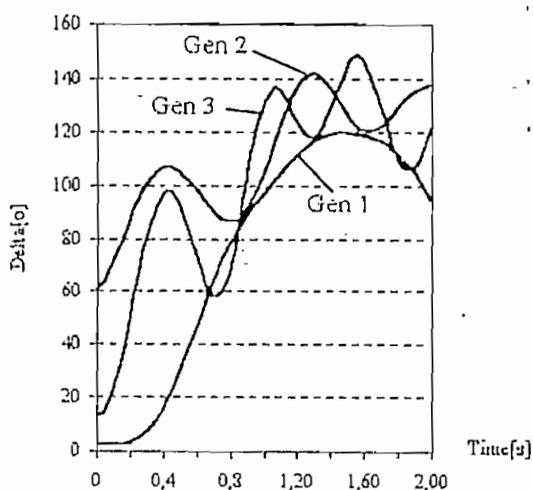


Figura 4.14a Angulo del Rotor

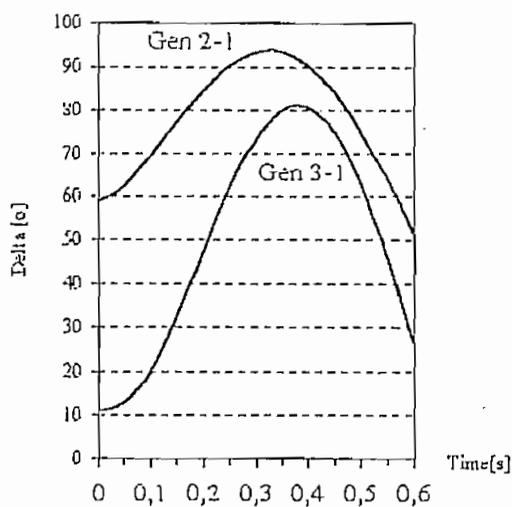


Figura 4.14b Diferencia Angular del Rotor

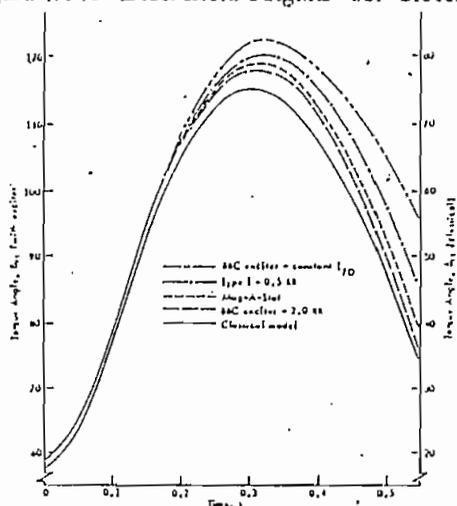


Figura 4.14 c Diferencia Angular del Rotor Referenciá [2]

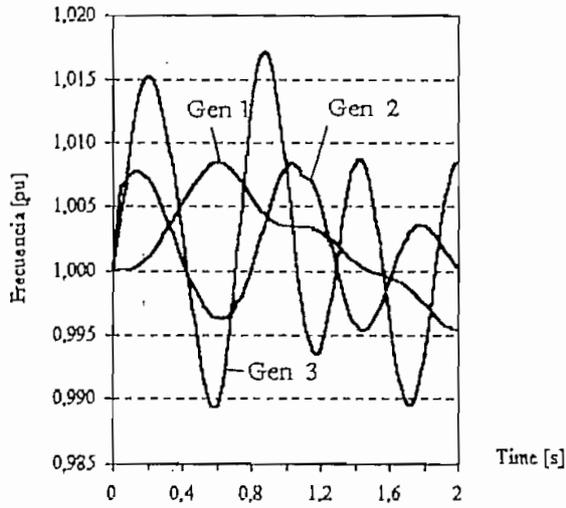


Figura 4.14d Frecuencia

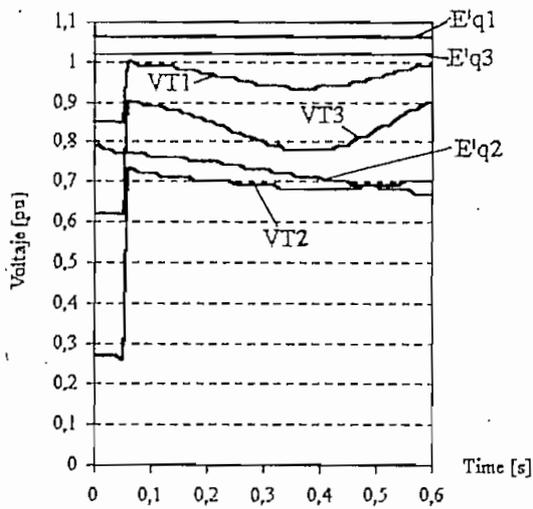


Figura 4.14e Voltaje Terminal VT y Voltaje Interno E'q

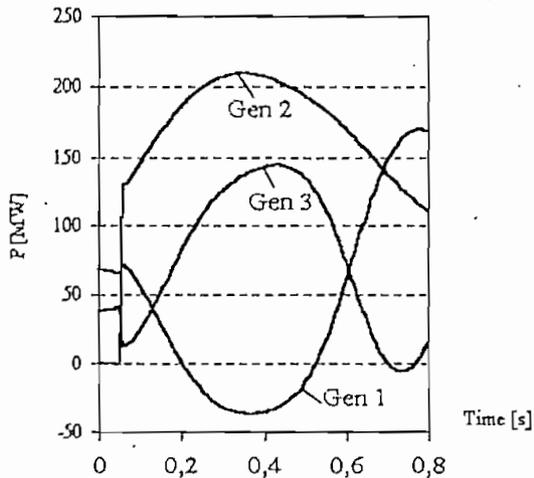


Figura 4.14f Potencia Electrica de Salida

RESULTADOS DEL SISTEMA DE NUEVE BARRAS PARA UNA FALLA TRIFASICA EN LA BARRA 7, DE 3 CICLOS DE DURACION, DESPEJADA POR LA APERTURA DE LA LINEA 7-5, CON SISTEMAS DE EXCITACION AC

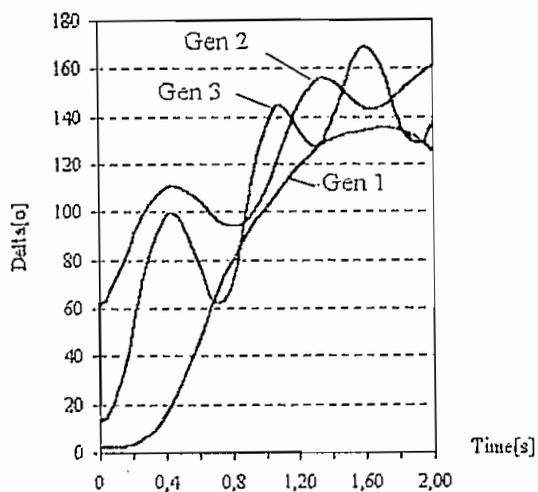


Figura 4.15a Angulo del Rotor

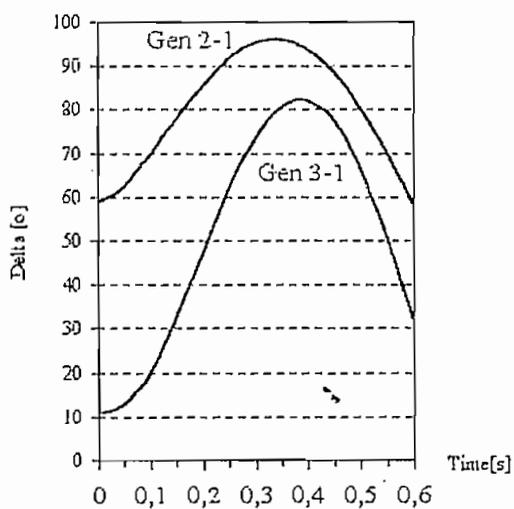


Figura 4.15b Diferencia Angular del Rotor

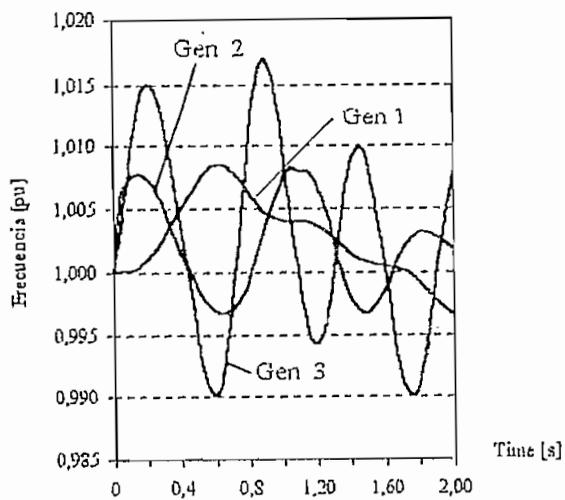


Figura 4.15c Frecuencia

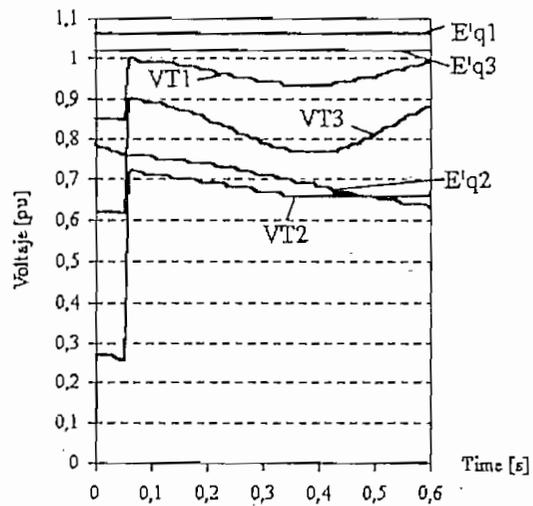


Figura 4.15d Voltaje Terminal VT y Voltaje Interno $E'q$

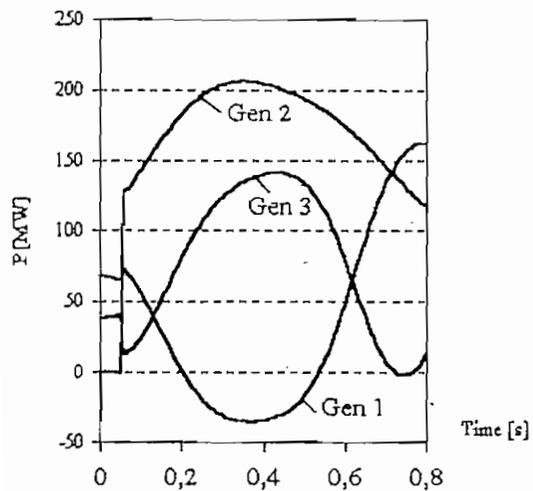


Figura 4.15e Potencia Electrica de Salida

RESULTADOS DEL SISTEMA DE NUEVE BARRAS PARA UNA FALLA TRIFASICA EN LA BARRA 7, DE 3 CICLOS DE DURACION, DESPEJADA POR LA APERTURA DE LA LINEA 7-5, CON SISTEMAS DE EXCITACION ST

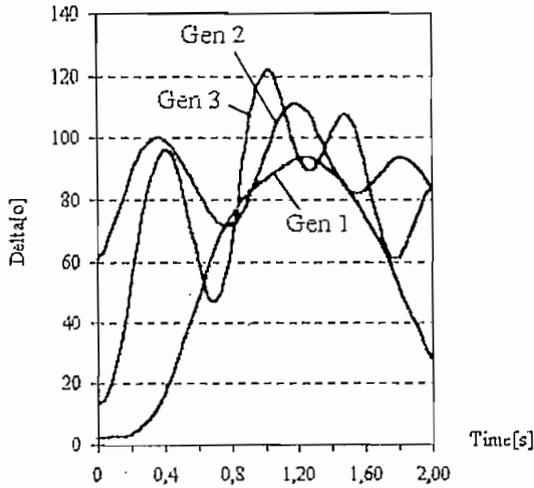


Figura 4.16a Angulo del Rotor

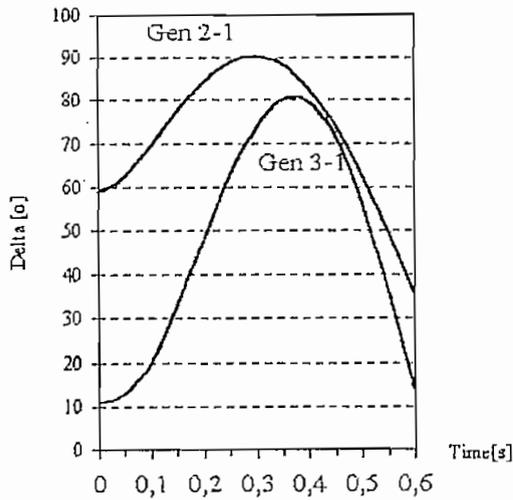


Figura 4.16b Diferencia Angular del Rotor

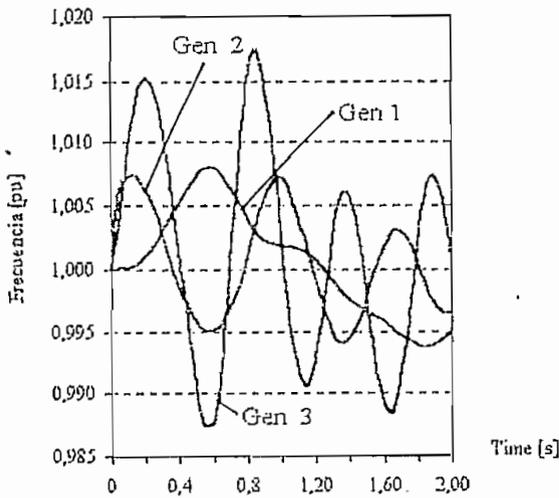


Figura 4.16c Frecuencia

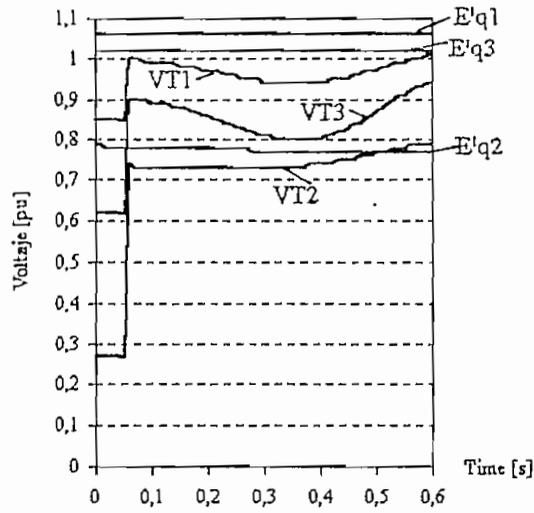


Figura 4.16d Voltaje Terminal VT y Voltaje Interno $E'q$

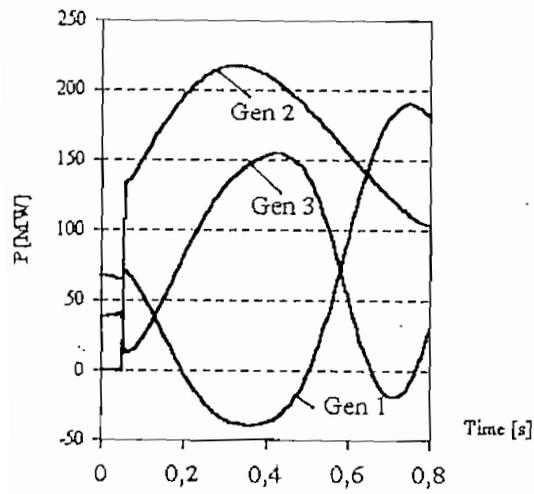


Figura 4.16e Potencia Electrica de Salida

4.6 COMPARACION DE LOS SISTEMAS DE EXCITACION

Con el objeto de comparar la respuesta dinámica de los tres tipos de sistemas de excitación implementados, se analiza una falla trifásica en la barra 2 de 0.1s de duración, en el sistema de cinco barras por medio de sus curvas más representativas: diferencias angulares de los rotores, voltajes internos, voltajes terminales y potencias eléctricas de salida. En cada caso se utiliza el mismo modelo de sistema de excitación para los dos generadores.

Al producirse la perturbación con cualquiera de los sistemas de excitación comienza a oscilar de similar manera, luego de corto tiempo se ve el efecto de los diferentes modelos de la excitación. La diferencia angular entre los generadores se indica en la figura 4.17a, en la cual se observa que el tiempo de respuesta del modelo ST es menor que el AC y este es menor que el DC.

En la figura 4.17b se muestra la variación del voltaje interno de acuerdo a los tres tipos de sistemas de excitación. Puede deducirse que el modelo ST actúa más rápidamente y con mayor variación que los otros dos modelos. Este comportamiento influye directamente en el voltaje terminal según se indica en la figura 4.17c, en donde se ve una más rápida estabilización con los modelos ST, y a valores más altos que con los otros dos modelos DC y AC.

En cuanto a la variación en el tiempo de la potencia eléctrica de salida, se indica en la figura 4.17d, en la cual de acuerdo a la velocidad de respuesta de los distintos modelos de excitación, esta presenta una variación mayor con el modelo ST, lo que posibilita al sistema adecuarse y lograr estabilizarse más rápidamente. Esta diferencia es más notoria en la máquina que posee una capacidad mayor.

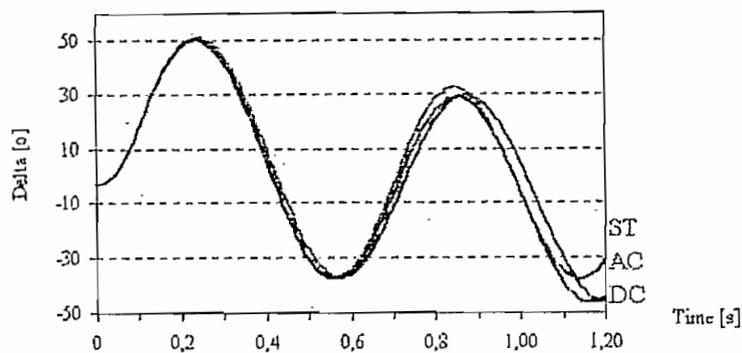


Figura 4.17a Diferencia Angular del Rotor Gen 2-1

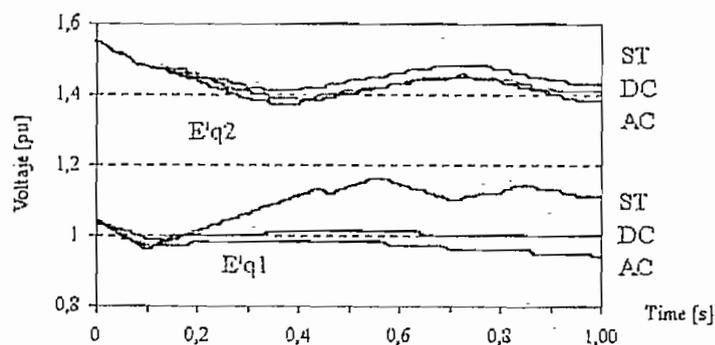
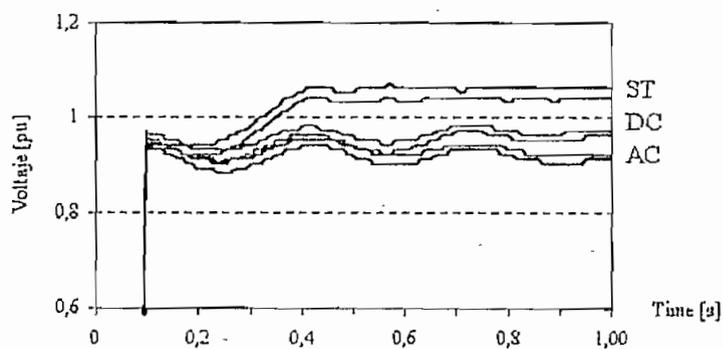
Figura 4.17b Voltajes Internos $E'q$ 

Figura 4.17c Voltajes Terminales VT1 y VT2

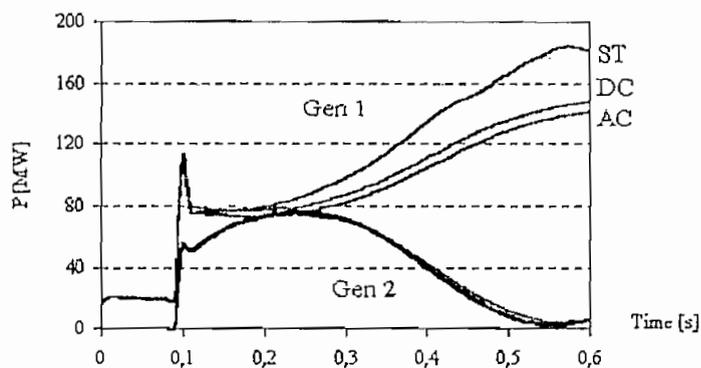


Figura 4.17d Potencia Electrica de Salida

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al terminar la presente tesis que permite analizar la influencia de los sistemas de excitación en la estabilidad transitoria de sistemas eléctricos de potencia, se han obtenido las conclusiones y recomendaciones siguientes:

5.1 CONCLUSIONES

- Se ha implementado modelos de sistemas de excitación en un programa básico de estabilidad transitoria por medio del cual se pueden realizar estudios de fenómenos de corta duración en el orden de segundos en sistemas de potencia de hasta 200 barras, 300 líneas de transmisión, y 60 generadores con sus respectivos sistemas de excitación.
- Las condiciones iniciales de un sistema de potencia previas a una perturbación pueden obtenerse de un archivo de flujos de potencia, el mismo que representa el acoplamiento de la condición de estado estable con la respuesta dinámica.
- El programa se ha desarrollado de manera modular, lo que posibilita la adición de otros componentes dinámicos o estáticos del sistema de potencia, de acuerdo a las necesidades del usuario.
- Los sistemas de ecuaciones diferenciales que se obtienen al considerar los sistemas de excitación obliga a utilizar un método de resolución de mayor precisión, como es el de Runge Kutta de cuarto orden.
- La inclusión de modelos de sistemas de excitación en estudios de estabilidad transitoria demanda un conjunto de parámetros dependientes del tipo de excitación del generador.

- La consideración de los sistemas de excitación como parte importante de los componentes dinámicos permite obtener resultados más cercanos al comportamiento real del sistema de potencia.
- La ganancia K_A , las constantes de tiempo T_A y T_E influyen en la velocidad de respuesta de los diferentes sistemas de excitación, así se tiene que en los sistemas de excitación de alterna y estáticos la ganancia es alta y las constantes de tiempo son de menor valor comparadas con los sistemas de excitación de corriente continua, por lo que su respuesta es más rápida.
- Frente a una perturbación los sistemas de excitación de respuesta lenta influye en menor grado en la variación del voltaje terminal, que aquellos de respuesta rápida.
- De la observación de los ángulos del rotor de los generadores, la recuperación del equilibrio de un sistema después de una perturbación es más rápida con los sistemas de excitación que sin ellos.

5.2 RECOMENDACIONES

Por medio de la investigación realizada para llevar adelante el presente trabajo y lo expuesto anteriormente se hace necesario indicar las siguientes recomendaciones:

- Realizar un estudio analítico de la estabilidad en el dominio de la frecuencia con el fin de obtener una base de datos de los parámetros de los distintos sistemas de excitación.
- Los ejemplos desarrollados se recomienda utilizar un paso de integración del orden de 0.001 s, debido a que éste deberá ser más pequeño al menor valor de las constantes de tiempo.
- Con la finalidad de profundizar aún más el estudio de la estabilidad de sistemas de potencia se hace necesario implementar modelos de generadores más sofisticados, modelos dinámicos de carga, modelos de reguladores de velocidad y turbinas.

ANEXO A

MANUAL DE USUARIO

Para utilizar de mejor manera el programa computacional para estudios de estabilidad transitoria en un SEP con la influencia de los sistemas de excitación es necesario contar con :

A1 DATOS DEL PROGRAMA DE FLUJOS DE POTENCIA

El archivo de datos flujos de potencia debe disponer de la siguiente información:

- Datos de Líneas y Transformadores:

Descripción	Columnas	Formato	Unidades
From Bus	3-5	I3	pu
To Bus	10-12	I3	pu
Resistencia	18-23	F6.2	pu
Reactancia	24-29	F6.2	pu
Suceptancia de la línea	30-33	F4.1	pu
Tap	34-38	F5.3	pu

- Datos de las Barras:

Descripción	Columnas	Formato	Unidades
Número de barra	3-5	I3	Entero
Tipo de barra	8	I1	Entero
Nombre de la Barra	10-22	A12	Caracter
Voltaje de la barra	23-26	F4.2	pu
Angulo de la barra	27-30	F4.1	grados
Potencia activa	31-35	F5.1	MW
Potencia reactiva	36-40	F5.1	MVAR
Límites de la potencia reactiva			
Mínimo	41-45	F5.1	MVAR
Máximo	46-50	F5.1	MVAR
Carga			
Activa	56-60	F5.1	MW
Reactiva	61-65	F5.1	MVAR
Capacitores y reactores	66-70	F5.1	MVAR

A2 DATOS DEL PROGRAMA DE ESTABILIDAD

A continuación se indicara la información necesaria en el archivo de datos de estabilidad y la nomenclatura utilizada para la inclusión de los sistemas de excitación en un programa de estabilidad transitoria:

- Criterios de estabilidad:

Descripción	Columnas	Formato	Unidades
u = Demanda / Generación:			
Mínimo	2-7	F6.5	pu
Máximo	9-14	F6.5	pu
Diferencia angular entre las barras de las máquinas:			
Mínimo	16 - 21	F6.3	grados
Máximo	23 - 28	F6.3	grados
Diferencia angular entre los rotores de las máquinas:			
Mínimo	30 - 35	F6.3	grados
Máximo	37 - 42	F6.3	grados
Tiempo final de estudio en segundos:			
Tiempo A	44 - 51	F8.6	s
Tiempo B	53 - 60	F8.6	s

- Variables de la máquina sincrónica:

Descripción	Variable	Columnas	Formato	Unidades
Número de barra	I	4-6	I3	Entero
Constante de Inercia	H	8-12	F5.1	s
Parámetros de la máquina sincrónica:				
Reactancia transitoria en eje directo	XDS	20-26	F6.4	pu
Reactancia en eje directo	XD	27-33	F6.4	pu
Reactancia en el eje de cuadratura	ZQ	34-40	F6.4	pu
Reactancia de dispersión	XI	42-47	F6.4	pu
Constante de tiempo de circuito abierto	TDO	48-54	F5.2	s
Constante de saturación del generador	SGA	55-61	F6.4	pu
	SGB	62-68	F6.4	pu
Base MVA en la cual se ingresa la constante de inercia	MVA-G	70-74	F5.2	MVA

- Variables de los sistemas de excitación:

Descripción	Variable	Columnas	Formato	Unidades
Número de barra	I	4-6	I3	Entero
Tipo de sistema de excitación	ITYP	8	I1	Entero

Parámetros de los sistemas de excitación :

Para el caso de los sistemas de excitación de corriente continua tipo DC1 y DC2 los datos necesarios son :

Descripción	Variable	Columnas	Formato	Unidades
Ganancia del regulador de voltaje	HA	10-15	F6.3	pu
Constante de tiempo del regulador	TA	16-21	F6.3	s
Límites del regulador Máximo	VRMAX	22-27	F6.3	pu
Mínimo	VRMIN	28-33	F6.3	pu
Ganancia del circuito estabilizador	HF	34-39	F6.3	pu
Constante de tiempo de estabilizador	TF	40-45	F6.3	s
Ganancia del excitador	HE	46-51	F6.3	pu
Constante de tiempo del excitador	TE	52-57	F6.3	s
Constante de saturación de la excitatriz	AX	58-64	F6.4	pu
	BX	65-71	F6.3	pu

En los sistemas de excitación de corriente alterna se tiene:

En el caso del sistema de excitación tipo AC1:

Descripción	Variable	Columnas	Formato	Unidades
Ganancia del regulador de voltaje	HA	10-15	F6.3	pu
Constante de tiempo del regulador	TA	16-21	F6.3	s
Límites del regulador Máximo	VRMAX	22-27	F6.3	pu
Mínimo	VRMIN	28-33	F6.3	pu
Ganancia del circuito estabilizador	HF	34-39	F6.3	pu
Constante de tiempo de estabilizador	TF	40-45	F6.3	s
Ganancia del excitador	HE	46-51	F6.3	pu
Constante de tiempo del excitador	TE	52-57	F6.3	s
Constante de saturación de la excitatriz	AX	58-64	F6.4	pu
	BX	65-71	F6.3	pu
Factor de carga del rectificador	HC	72-77	F6.3	pu
Factor de desmagnetización	HD	78-83	F6.3	pu

En el caso de los sistemas de excitación tipo AC2 :

Descripción	Variable	Columnas	Formato	Unidades	
Ganancia del regulador de voltaje interno	HA	10-15	F6.3	pu	
Constante de tiempo del regulador interno	TA	16-21	F6.3	s	
Límites del regulador interno	Máximo	VAMAX	84-89	F6.3	pu
	Mínimo	VAMIN	90-95	F6.3	pu
Límites del regulador externo	Máximo	VRMAX	22-27	F6.3	pu
	Mínimo	VRMIN	28-33	F6.3	pu
Ganancia del circuito estabilizador	HF	34-39	F6.3	pu	
Constante de tiempo de estabilizador	TF	40-45	F6.3	s	
Ganancia del excitador	HE	46-51	F6.3	pu	
Constante de tiempo del excitador	TE	52-57	F6.3	s	
Constante de saturación de la excitatriz	AX	58-64	F6.4	pu	
	BX	65-71	F6.3	pu	
Factor de carga del rectificador	HC	72-77	F6.3	pu	
Factor de desmagnetización	HD	78-83	F6.3	pu	
Ganancia del campo del excitador	HH	96-101	F6.3	pu	
Ganancia del límite de campo del excitador	HL	102-107	F6.3	pu	
Referencia del límite del campo del excitador	VLR	108-113	F6.3	pu	
Ganancia del regulador externo	HB	114-119	F6.3	pu	

En los sistemas de excitación estático se tiene :

Para los sistemas tipo ST1:

Descripción	Variable	Columnas	Formato	Unidades	
Ganancia del regulador de voltaje	HA	10-15	F6.3	pu	
Constante de tiempo del regulador	TA	16-21	F6.3	s	
Límites del regulador externo	Máximo	VRMAX	22-27	F6.3	pu
	Mínimo	VRMIN	28-33	F6.3	pu
Ganancia del circuito estabilizador	HF	34-39	F6.3	pu	
Constante de tiempo de estabilizador	TF	40-45	F6.3	s	
Ganancia del excitador	HE	46-51	F6.3	pu	
Constante de tiempo del excitador	TE	52-57	F6.3	s	
Límites del regulador interno	Máximo	VIMAX	138-143	F6.3	pu
	Mínimo	VIMIN	144-149	F6.3	pu

En los sistemas tipo ST2 :

Descripción	Variable	Columnas	Formato	Unidades
Ganancia del regulador de voltaje	HA	10-15	F6.3	pu
Constante de tiempo del regulador	TA	16-21	F6.3	s
Límites del regulador Máximo	VRMAX	22-27	F6.3	pu
Mínimo	VRMIN	28-33	F6.3	pu
Ganancia del circuito estabilizador	HF	34-49	F6.3	pu
Constante de tiempo de estabilizador	TF	40-45	F6.3	s
Ganancia del excitador	HE	46-51	F6.3	pu
Constante de tiempo del excitador	TE	52-57	F6.3	s
Coefficiente de ganancia del circuito de potencia	HP	120-125	F6.3	pu
Coefficiente de ganancia del circuito corriente	HI	163-168	F6.4	pu
si este campo esta en blanco o es cero se calcula por medio de los siguientes valores:				
Voltaje de Excitación máximo	EFMX	126-131	F6.3	pu
Voltaje de excitación a plena carga	EFDL	132-137	F6.3	pu

- Compensador de Carga:

Descripción	Variable	Columnas	Formato	Unidades
Resistencia del compensador	RC	151-156	F6.4	pu
Reactancia del compensador	XC	157-162	F6.4	pu

- Tiempos y tipo de perturbación:

Descripción	Columnas	Formato	Unidades
Número de caso	1-2	I2	Entero
Número de maniobra	4	I1	Entero
Tiempo final	6-10	F5.0	s
Paso de integración	11-16	F6.0	s
Tiempo de la próxima condición	17-21	F5.0	s
Tiempo de respuesta	22-26	F5.0	s
Barra I	27-29	I3	Entero
Código de falla	31	I1	Entero
Barra J	32-34	I3	Entero

Código de maniobra	36	II	Entero
Código del generador	38	II	Entero
Descripción	Columnas	Formato	Unidades
Cambio de carga			
Activa	39-44	F6.1	MW
Reactiva	45-50	F6.1	MVAR

A3 ARCHIVOS

Debido a que el programa que estudia la estabilidad transitoria, necesita el flujo de potencia del sistema analizado; requiere de un archivo de resultados que genere un programa de flujos de potencia.

Es necesario que los dos archivos de datos tanto el de flujo de potencia como el de estabilidad se encuentren en el mismo directorio o subdirectorio de los archivos ejecutables.

- Archivo de Flujos de Potencia:

Este archivo debe poseer un nombre que indique al usuario el ejemplo que se encuentra analizando con la terminación .DAT siendo su estructura la siguiente :

```

1 2345678901 2345678901 2345678901 2345678901 2345678901 2345678901 2345678901 2345678901
1
EJEMPLO STAGG & ELABIAD. PAG.386
4(DATOS DE LINEAS Y TRANSFORMADORES)
FROM      TO      R%      X%      Y%      TAP
1         2         3.30    6.00    6.0
1         3         8.00    24.00   5.0
2         3         6.00    18.00   4.0
2         4         6.00    18.00   4.0
2         5         4.00    12.00   3.0
3         4         1.00    3.00    2.0
4         5         8.00    24.00   5.0
9999
5(DATOS DE BARRAS):
#      T      NOMBRE      V      A      Po      Qo      Qo      Qo      Pc      Qc      C/L
Bus   T      (PU)      (°)      (MW)      (MVAR)  MIN  MAX      (MW)      (MVAR)  (MVAR)
1     2     BARRA OSCILA  1.06    0
3     0     CENTRAL      1.00    0      0.0    0.00  0.0  0.0    45.0  15.0  0.00
4     0     CEN-NORT     1.00    0      0.0    0.00  0.0  0.0    40.0   5.0  0.00
5     0     CEN-SUR     1.00    0      0.0    0.00  0.0  0.0    60.0  10.0  0.00
2     1     SUR          1.00    0     40.0   30.0  30.0  35.0   20.0  10.0  0.00
9999
11
30
    
```

- Archivo de Estabilidad:

Este archivo debe poseer un nombre que indique al usuario el ejemplo que se encuentra analizando con la terminación .DAT, siendo su estructura la siguiente :

```

1 2345678901 2345678901 2345678901 2345678901 2345678901 2345678901 2345678901 2345678901
6      STABILITY CRITERIA CARD
8      GENERATOR DATA CARDS
999
9      EXCITER DATA CARDS
999
11     PERFORM STABILITY STUDY
11     2.1 0.001 1 0.05 2:1
12     2.1 0.001 2:1 0.05 2:2
12

```

A4 EJECUCION

Para obtener el archivo de resultados de flujos de potencia se sigue los siguientes pasos:

- 1.- Verificar por medio del sistema operativo del computador a utilizar si existe en el mismo sitio del programa PFRED.EXE el archivo de datos con la terminación .DAT.
- 2.- Ejecutar el programa por medio de la siguiente sentencia:

```
PFRED.EXE [Enter]
```

Con lo cual en el computador se despliega:

```
Archivo de Datos: {nombre}.DAT [Enter]
```

```
Archivo de Resultados de Flujos: {nombre}.OUT [Enter]
```

Para obtener el archivo de resultado del estudio de estabilidad se sigue los siguientes pasos:

- 1.- Verificar por medio del sistema operativo del computador a utilizar si existe en el mismo sitio del programa STAX.EXE el archivo de datos con la terminación .DAT.
- 2.- Ejecutar el programa por medio de la siguiente sentencia:

```
STAX.EXE [Enter]
```

Con lo cual en el computador se despliega:

```
Archivo de Datos de Estabilidad: {nombre}.DAT [Enter]
```

```
Archivo de Resultados de Flujos: {nombre}.OUT [Enter]
```

```
Archivo de Resultados de Estabilidad: {nombre}.OUT [Enter]
```

ANEXO B

MANUAL DEL PROGRAMADOR

B1 ESTRUCTURACION Y COMPILACIÓN

Para llevar adelante un estudio de la estabilidad transitoria en el presente trabajo se ha dividido al programa en dos subprogramas:

- Subprograma que analiza el flujo de potencia antes de la falla; al cual se le denomina PFRED
- Subprograma que analiza la estabilidad con la influencia de los sistemas de excitación; al cual se lo denomina STAX.

Estos programas pueden ser ejecutados desde: Diskette o Disco duro, en cualquiera de los dos casos el PC debe disponer de coprocesador matemático por los cálculos a realizarse.

Debido a que los dos programas están desarrollados en lenguaje Fortran 77; por lo que para obtener los archivos ejecutables es necesario poseer el compilador de F77L.

La compilación del programa de flujos de potencia sigue los siguientes pasos:

1.- Los archivos necesarios y suficientes son: PFRED.FOR, DCMILPRO.FOR

2.- Escribir la sentencia: F77L PFRED.FOR

Con la cual se obtienen el archivo PFRED.OBJ

3. Con la sentencia: PLINK FILE PFRED.OBJ;

La cual genera el archivo ejecutable: PFRED.EXE

La compilación del programa de estabilidad se sigue los siguientes pasos:

1.- Los archivos necesarios y suficientes son: STAX.FOR, NDPEX.OBJ

2.- Escribir la sentencia: F77L STAX.FOR

Con la cual se obtienen el archivo STAX.OBJ

3. Con la sentencia: PLINK FILE STAX.OBJ, NDPEXC.OBJ;

La cual genera el archivo ejecutable: STAX.EXE

B2 EXPLICACION DE LAS SUBROUTINAS

A continuación se indica una explicación de las funciones que realiza cada subrutina que constituyen el programa de estabilidad transitoria STAX:

BUSDAT

Básicamente en esta subrutina se lee los datos de las barras como son: número de la barra, nombre, tipo, voltaje en pu, ángulo en grados, carga en MW y MVAR, generación en MW y MVAR, límites de la potencia reactiva en MVAR.

LINDAT

Al igual que la subrutina anterior, sirve para leer los datos de la red como es: barras from y to, resistencia(%), reactancia(%), admitancia(%), tap

SIMORD

Permite obtener la ordenación óptima de las barras de la red.

GENDAT

Esta subrutina consta de:

Subrutina HBASE en donde se da lectura de los datos de los generadores y se coloca la inercia de cada uno de ellos en una base de 100 MVA.

Subrutina VAIN en la cual se da las condiciones iniciales de funcionamiento de los generadores de la siguiente manera:

La saturación magnética del generador está considerada para el caso en que se incorpora los sistemas de excitación al estudio de estabilidad transitoria.

STABCK

En esta subrutina se realiza el estudio de la estabilidad, es decir, se da lectura de los tiempos y se establece el tipo de perturbación a analizarse.

YBUS

Permite modificar la red de acuerdo a la perturbación que se analiza.

FACTOR

Computa los términos para formar la red.

SOLVE

Obtiene el vector solución por medio del algoritmo de sustitución.

INJCT

Calcula los voltajes de inyección de los generadores a la red.

DATEX

Permite recoger los datos necesarios de acuerdo al tipo de sistema de excitación, además imprime los parámetros de los mismos.

DATEXIN

Calcula las condiciones iniciales para la integración del sistema de ecuaciones diferenciales de acuerdo al tipo de sistema de excitación. Así como evalúa la función de saturación del excitador en el caso de los sistemas de excitación de corriente continua y corriente alterna.

PELEC

En este programa se evalúa los coeficientes de las ecuaciones diferenciales, resuelve las ecuaciones algebraicas del modelo de la máquina sincrónica

KUTTAG

Resuelve el sistema de ecuaciones diferenciales que representan a la máquina sincrónica.

GENEX

Aquí se escoge el tipo de sistema de excitación, para resolver el respectivo sistema de ecuaciones diferenciales.

KUTTADC

En este programa se simulan los modelos de los sistemas de excitación de corriente continua, con la verificación de los límites existentes por intermedio de la subrutina LIMITT.

KUTTAC

En este programa se simulan los modelos de los sistemas de excitación de corriente alterna, incluyendo el efecto de los límites con la subrutina LIMITT. Así, como la regulación del rectificador por medio de la subrutina RECTIF.

KUTTST

En este programa se simulan los modelos de los sistemas de excitación estáticos, incluyendo el efecto de los límites con la subrutina LIMITT. Así como la regulación del rectificador por medio de la subrutina RECTIF en el caso de los sistemas tipo ST2.

RUNGE

Resuelve el sistema de ecuaciones diferenciales por medio del método de Runge-Kutta; con los valores transferidos desde las subrutinas de los distintos sistemas de excitación y el generador.

LIMITT

Evalúa los límites de las no-linealidades de acuerdo al tipo de modelo de sistema de excitación.

RECTIF

Obtiene el valor de la regulación del rectificador para el caso de los sistemas de excitación de corriente alterna y estáticos.

EQGEN

Evalúa la saturación de la excitariz de acuerdo al tipo de sistema de excitación, y resuelve la ecuación algebraica del voltaje interno de la máquina sincrónica.

ANEXO C

TABLAS DE RESULTADOS DE LOS EJEMPLOS ANALIZADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos de los ejemplos analizados en el capítulo IV, tanto los archivos de datos como de respuesta del flujo de potencia y de estabilidad.

Los resultados se listan utilizando un paso de integración de 0.001 y con un tiempo de presentación de 0.05s, en 2s de estudio. Mientras que para la obtención de las curvas del capítulo IV el tiempo de presentación fue de 0.005s.

C1 SISTEMA DE CINCO BARRAS

C1.1 Resultado de Flujos de Potencia:

En este ejemplo se presenta al usuario la estructura de los archivos de datos de entrada del flujo de potencia:

- Archivo de datos:

```
1
EJEMPLO STAGG & ELABIAD. PAG,386
4{DATOS DE LINEAS Y TRANSFORMADORES}
```

FROM	TO	R(%)	X(%)	Y(%)	TAP
1	2	2.30	6.00	6.0	
1	3	8.00	24.00	5.0	
2	3	6.00	18.00	4.0	
2	4	6.00	18.00	4.0	
2	5	4.00	12.00	3.0	
3	4	1.00	3.00	2.0	
4	5	8.00	24.00	5.0	

9999

5 {DATOS DE BARRAS}

#	T	NOMBRE	V	A	P _G	Q _G	Q _G	Q _G	P _C	Q _C	C/L
BARRA	I		(PU)	(o)	(MW)	(MVAR)	MIN	MAX	(MW)	(MVAR)	(MVAR)
O	P						(MVAR)				
1	2	BARRA OSCILA	1.06	0							
3	0	CENTRAL	1.00	0	0.0	0.0	0.0	0.0	45.0	15.0	0.00
4	0	CEN-NORT	1.00	0	0.0	0.0	0.0	0.0	40.0	5.0	0.00
5	0	CEN-SUR	1.00	0	0.0	0.0	0.0	0.0	60.0	10.0	0.00
2	1	SUR	1.00	0	40.0	30.0	30.0	35.0	20.0	10.0	0.00

9999

11

30

- Archivo de resultados:

```

1
EJEMPLO STAGG & ELABIAD. PAG,386
5          DATOS DE BARRA
  1 BARRA OSCILA 2  1.060 0.0  0.0  0.0 128.92  -7.13  0.0  0.0
  2 SUR              1  1.045 -2.8 20.0 10.0  40.0  30.00 30.0 35.0
  3 CENTRAL         0  1.022 -5.0 45.0 15.0  0.00  0.00  0.0  0.0
  4 CEN-NORT       0  1.022 -5.4 40.0  5.0  0.00  0.00  0.0  0.0
  5 CEN-SUR        0  1.016 -6.2 60.0 10.0  0.00  0.00  0.0  0.0
999
4          DATOS LINEA/TRAFOS & BUS/GEN DE LA RED
  1      2          2.300 6.000 6.000  0.000
  1      3          8.000 24.000 5.000  0.000
  2      3          6.000 18.000 4.000  0.000
  2      4          6.000 18.000 4.000  0.000
  2      5          4.000 12.000 3.000  0.000
  3      4          1.000  3.000  2.000  0.000
  4      5          8.000 24.000 5.000  0.000
999
  1 1.060  0.0 128.92 -7.13
  2 1.045 -2.8 40.00 30.00
  3 1.022 -5.0  0.00  0.00
  4 1.022 -5.4  0.00  0.00
  5 1.016 -6.2  0.00  0.00
999
6

```

C1.2 Resultados de Estabilidad:

Si el flujo de potencia del sistema converge, se procede a cargar los datos necesarios para realizar el estudio de estabilidad, sin o con los diferentes modelos de sistemas de excitación implementados de acuerdo a las condiciones indicadas en el numeral 4.2.4 y el anexo A. Se listan las siguientes variables: tiempo, número de generador, velocidad del rotor, voltaje interno, ángulo del rotor, potencia eléctrica de salida, voltaje terminal y ángulo de la barra.

a) Sin Sistemas de Excitación

- Archivo de datos:

```

6          STABILITY CRITERIA CARD
-1.  10.  -1.5 99999.  -1. 99999.  2.0  2.01
8          GENERATOR DATA CARDS
  1  50. 0.0000 0.2500 0.8300 0.5400 0.0640 3.0000 0.0000 0.0000 100.
  2  1. 0.0000 1.5000 5.0000 3.2500 0.3820 2.5000 0.0000 0.0000 100.
999
9          EXCITER DATA CARDS
  1 0
  2 0
999
11         PERFORM STABILITY STUDY
1 1  2,10,0010  .10,050 2  1
1 2  2,10,0010  2,10,050 2  2
12

```

• Archivo de Resultados:

1EJEMPLO STAGG & ELABIAD. PAG,386

0 GENERATOR ACTIVE AND REACTIVE OUTPUTS

BUS NO.	MW	MVAR
1	128.920	-7.130
2	40.000	30.000

OSTABILITY CRITERIA DATA:

MINIMUM ACCEPTABLE DEMAND/GENERATOR RATIO-----	-1.000
MAXIMUM ACCEPTABLE DEMAND/GENERATOR RATIO-----	10.000
MINIMUM STEADY STATE ANG. DIFF. BETWEEN PAIR OF GEN. BUSES -----	-0.500
MAXIMUM STEADY STATE ANG. DIFF. BETWEEN PAIR OF GEN. BUSES -----	#####
MINIMUM TRANSIENT STATE ANG. DIFF. BETWEEN PAIR OF MACHINE ROTORS-----	-1.000
MAXIMUM TRANSIENT STATE ANG. DIFF. BETWEEN PAIR OF MACHINE ROTORS-----	#####
MINIMUM THRESHOLD TIME FOR TRANSIENT STABILITY CHECK -----	2.000
MAXIMUM THRESHOLD TIME FOR TRANSIENT STABILITY CHECK -----	2.010

1EJEMPLO STAGG & ELABIAD. PAG,386

SYNCHRONOUS MACHINE DATA

BUS HBASE

No.	100 MVA	RA(PU)	XDS(PU)	XD(PU)	XQ(PU)	XL(PU)	TDO(sec)	MVA-G
1	50.0	0.0000	0.2500	0.8300	0.5400	0.0640	3.0000	100.0
2	1.0	0.0000	1.5000	5.0000	3.2500	0.3820	2.5000	100.0

EXCITER DATA

BUS

No. =>GENERADOR SIN SISTEMA DE EXCITACION<=

1

BUS

No. =>GENERADOR SIN SISTEMA DE EXCITACION<=

2

1EJEMPLO STAGG & ELABIAD. PAG,386

OSTABILITY SEGMENT CARD NO. 1 ,CASE NO. 1 READ -

AMAX= 0.015 STANGL=-0.009 STANGH=1745.312

OSTEADY STATE ANGULAR SEPARATION BETWEEN EACH PAIR OF MACHINE NETWORK BUSES LIES WITHIN INCONCLUSIVE BAND - CASE STUDY CONTINUING.

0	TIME (SEC)	BUS NO.	ROTOR SPEED	V BEHIND T. REACT	ROTOR ANGLE (DEGR)	GEN. OUTPUT (MW)	BUS VOLTAGE	BUS ANGLE (DEGR)
	0.000	1	376.99	1.09	16.25	24.95	0.20	-0.85
	0.000	2	376.99	1.58	18.45	0.00	0.00	0.00
	0.050	1	377.19	1.09	16.53	24.95	0.20	-0.57
	0.050	2	380.76	1.58	23.86	0.00	0.00	0.00

OSTABILITY SEGMENT CARD NO. 2 ,CASE NO. 1 READ -

0.100	1	377.38	1.09	17.37	99.42	1.05	4.79
0.100	2	384.53	1.58	40.06	66.06	1.03	2.83
0.150	1	377.46	1.09	18.59	76.17	1.03	8.78
0.150	2	381.24	1.58	57.29	81.43	1.01	7.49
0.200	1	377.57	1.09	20.09	69.54	1.02	11.07
0.200	2	377.09	1.58	63.60	85.00	1.00	9.98
0.250	1	377.67	1.09	21.90	79.91	1.03	11.65
0.250	2	373.04	1.58	57.96	79.25	1.01	10.25
0.300	1	377.74	1.09	23.97	106.35	1.05	10.55
0.300	2	370.10	1.58	42.02	60.71	1.04	8.40

0.350	1	377.75	1.09	26.16	140.12	1.06	8.42
0.350	2	369.56	1.58	20.78	29.41	1.04	5.29
0.400	1	377.71	1.09	28.30	165.13	1.04	6.87
0.400	2	372.07	1.58	2.39	-0.92	1.02	2.88
0.450	1	377.63	1.09	30.24	174.42	1.02	7.18
0.450	2	376.75	1.58	-5.33	-14.99	1.00	2.80
0.500	1	377.54	1.09	31.94	169.91	1.03	9.71
0.500	2	381.76	1.58	1.31	-7.87	1.01	5.52
0.550	1	377.48	1.09	33.43	150.12	1.05	14.30
0.550	2	385.16	1.58	20.43	18.24	1.04	10.85
0.600	1	377.47	1.09	34.81	117.59	1.06	20.00
0.600	2	385.64	1.58	45.27	51.27	1.04	17.53
0.650	1	377.52	1.09	36.26	87.13	1.04	25.15
0.650	2	383.36	1.58	67.30	74.71	1.02	23.54
0.700	1	377.62	1.09	37.92	71.11	1.02	28.71
0.700	2	379.54	1.58	80.28	84.19	1.00	27.57
0.750	1	377.73	1.09	39.88	72.06	1.02	30.56
0.750	2	375.33	1.58	81.55	83.69	1.00	29.39
0.800	1	377.82	1.09	42.15	89.97	1.04	30.70
0.800	2	371.63	1.58	71.24	72.81	1.03	29.01
0.850	1	377.87	1.09	44.61	121.48	1.06	29.31
0.850	2	369.60	1.58	52.41	47.78	1.04	26.73
0.900	1	377.85	1.09	47.12	153.15	1.05	27.55
0.900	2	370.43	1.58	31.68	14.62	1.04	23.99
0.950	1	377.79	1.09	49.51	171.12	1.03	27.06
0.950	2	374.10	1.58	17.59	-9.73	1.01	22.82
1.000	1	377.70	1.09	51.67	174.09	1.03	28.68
1.000	2	379.18	1.58	16.48	-14.45	1.01	24.30
1.050	1	377.63	1.09	53.59	163.10	1.04	32.50
1.050	2	383.70	1.58	29.58	1.88	1.02	28.59
1.100	1	377.58	1.09	55.34	136.47	1.06	38.10

IEJEMPLO STAGG & ELABIAD. PAG,386

0	TIME	BUS	ROTOR	V BEHIND	ROTOR	GEN.	BUS	BUS
	(SEC)	NO.	SPEED	T. REACT	ANGLE	OUTPUT	VOLTAGE	ANGLE
					(DEGR)	(MW)		(DEGR)
1.100	2	385.88	1.58	52.63	33.24	1.04	35.07	
1.150	1	377.60	1.09	57.05	102.73	1.05	44.07	
1.150	2	385.01	1.58	77.52	63.55	1.04	42.02	
1.200	1	377.68	1.09	58.90	77.88	1.03	48.89	
1.200	2	381.88	1.58	96.39	80.45	1.01	47.55	
1.250	1	377.78	1.09	61.02	69.44	1.02	52.01	
1.250	2	377.77	1.58	104.60	85.05	1.00	50.92	
1.300	1	377.89	1.09	63.45	77.99	1.03	53.42	
1.300	2	373.67	1.58	100.86	80.39	1.01	52.08	
1.350	1	377.97	1.09	66.14	102.92	1.05	53.14	
1.350	2	370.55	1.58	86.49	63.40	1.04	51.08	
1.400	1	377.98	1.09	68.98	136.67	1.06	51.70	
1.400	2	369.70	1.58	66.12	33.04	1.04	48.67	
1.450	1	377.94	1.09	71.77	163.21	1.04	50.66	
1.450	2	371.89	1.58	47.65	1.72	1.02	46.74	
1.500	1	377.86	1.09	74.39	174.11	1.03	51.39	
1.500	2	376.42	1.58	39.17	-14.49	1.00	47.02	
1.550	1	377.78	1.09	76.77	171.06	1.03	54.33	
1.550	2	381.50	1.58	44.92	-9.63	1.01	50.09	
1.600	1	377.71	1.09	78.92	152.99	1.05	59.37	
1.600	2	385.15	1.58	63.61	14.82	1.04	55.83	
1.650	1	377.70	1.09	80.96	121.27	1.06	65.68	
1.650	2	385.96	1.58	88.90	47.97	1.04	63.11	
1.700	1	377.74	1.09	83.04	89.81	1.04	71.61	

1.700	2	383.92	1.58	112.24	72.92	1.03	69.92
1.750	1	377.84	1.09	85.32	72.01	1.02	76.00
1.750	2	380.21	1.58	127.02	83.72	1.00	74.84
1.800	1	377.95	1.09	87.90	71.15	1.02	78.68
1.800	2	378.00	1.58	130.22	84.17	1.00	77.54
1.850	1	378.04	1.09	90.78	87.28	1.04	79.65
1.850	2	372.19	1.58	121.72	74.61	1.02	78.04
1.900	1	378.09	1.09	93.88	117.80	1.06	79.04
1.900	2	369.93	1.58	104.19	51.08	1.04	76.57
1.950	1	378.08	1.09	97.04	150.28	1.05	77.89
1.950	2	370.42	1.58	83.91	18.04	1.04	74.43
2.000	1	378.02	1.09	100.10	169.98	1.03	77.85
2.000	2	373.84	1.58	69.39	-7.98	1.01	73.66

TRANSIENT STABILITY CHECK INDICATES CASE STABLE. ADVANCE TO NEXT CASE.
 END OF JOB

b) Con Sistema de Excitación de Corriente Continua Tipo DC1

• Archivo de datos:

```

6      STABILITY CRITERIA CARD
-1.   10.   -5.99999.   -1.99999.   2.0   2.10
8      GENERATOR DATA CARDS
  1   50.  0.0000  0.2500  0.8300  0.5400  0.0640  3.0000  0.0012  8.8100  100.
  2   1.  0.0000  1.5000  5.0000  3.2500  0.3820  2.5000  0.0002  7.3500  100.
999
9      EXCITER DATA CARDS
  1  1   50.  0.060  1.000-1.000  0.007  1.000  0.000  0.500  0.0016  1.465
      0.0000  0.000
  2  1   50.  0.060  1.000-1.000  0.008  1.000  0.000  0.500  0.0016  1.465
      0.0000  0.000
999
11     PERFORM STABILITY STUDY
1  1   2.10.0010  .1  0.05  2  1
1  2   2.10.0010  2.1  0.05  2  2
12

```

• Archivo de Resultados:

```

1EJEMPLO STAGG & ELABIAD. PAG,386
0      GENERATOR ACTIVE AND REACTIVE OUTPUTS
  BUS NO.   MW      MVAR
    1      128.920   -7.130
    2       40.000    30.000
OSTABILITY CRITERIA DATA:
MINIMUM ACCEPTABLE DEMAND/GENERATOR RATIO----- -1.000
MAXIMUM ACCEPTABLE DEMAND/GENERATOR RATIO----- 10.000
MINIMUM STEADY STATE ANG. DIFF. BETWEEN PAIR OF GEN. BUSES ----- -0.500
MAXIMUM STEADY STATE ANG. DIFF. BETWEEN PAIR OF GEN. BUSES -----#####
MINIMUM TRANSIENT STATE ANG. DIFF. BETWEEN PAIR OF MACHINE ROTORS- -1.000
MAXIMUM TRANSIENT STATE ANG. DIFF. BETWEEN PAIR OF MACHINE ROTORS-#####
MINIMUM THRESHOLD TIME FOR TRANSIENT STABILITY CHECK ----- 3.000
MAXIMUM THRESHOLD TIME FOR TRANSIENT STABILITY CHECK ----- 3.500

```

SYNCHRONOUS MACHINE DATA

BUS HBASE

No.	100 MVA	RA(PU)	XDS(PU)	XD(PU)	XQ(PU)	XL(PU)	TDD(sec)	MVA-G
1	50.0	0.0000	0.2500	0.8300	0.5400	0.0640	3.0000	100.0
2	1.0	0.0000	1.5000	5.0000	3.2500	0.3820	2.5000	100.0

EXCITER DATA

BUS

No.	TIPD	KA	TA	VRMAX	VRMIN	KF	TF	TE	AEX	BEX
1	1	50.00	0.06	1.00	-1.00	0.007	1.00	0.50	0.0016	1.465

BUS

No.	TIPD	KA	TA	VRMAX	VRMIN	KF	TF	TE	AEX	BEX
2	1	50.00	0.06	1.00	-1.00	0.008	1.00	0.50	0.0016	1.465

1EJEMPLD STAGG & ELABIAD. PAG,386

OSTABILITY SEGMENT CARD NO. 1 ,CASE NO. 1 READ -

AMAX= 0.272 STANGL=-0.009 STANGH=1745.312

OSTEADY STATE ANGULAR SEPARATION BETWEEN EACH PAIR OF MACHINE NETWORK BUSES
LIES WITHIN INCONCLUSIVE BAND - CASE STUDY CONTINUING.

0	TIME (SEC)	BUS NO.	ROTOR SPEED	V BEHIND T. REACT	ROTOR ANGLE (DEGR)	GEN. OUTPUT (MW)	BUS VOLTAGE	BUS ANGLE (DEGR)
	0.000	1	376.99	1.04	32.68	16.31	0.19	15.58
	0.000	2	376.99	1.55	29.37	0.00	0.00	0.00
	0.050	1	377.20	1.02	32.98	19.80	0.18	15.87
	0.050	2	380.76	1.52	34.77	0.00	0.00	0.00

OSTABILITY SEGMENT CARD NO. 2 ,CASE NO. 1 READ -

	0.100	1	377.40	0.99	33.86	112.22	0.97	10.16
	0.100	2	384.53	1.48	50.97	55.34	0.95	9.07
	0.150	1	377.50	1.00	35.17	76.92	0.95	12.46
	0.150	2	382.99	1.47	70.76	64.77	0.93	11.76
	0.200	1	377.60	1.00	36.76	76.74	0.93	14.18
	0.200	2	380.15	1.46	84.08	74.02	0.91	13.72
	0.250	1	377.69	1.00	38.64	80.06	0.93	15.25
	0.250	2	376.83	1.44	88.40	75.38	0.91	14.82
	0.300	1	377.78	1.00	40.77	86.96	0.94	15.71
	0.300	2	373.67	1.42	83.29	70.55	0.92	15.13
	0.350	1	377.85	1.01	43.13	97.47	0.96	15.59
	0.350	2	371.30	1.41	70.10	58.38	0.95	14.69
	0.400	1	377.89	1.01	45.66	110.77	0.98	15.04
	0.400	2	370.40	1.41	52.10	40.16	0.96	13.72
	0.450	1	377.92	1.01	48.28	124.46	0.97	14.50
	0.450	2	371.27	1.42	34.04	21.86	0.96	12.76
	0.500	1	377.91	1.01	50.94	135.74	0.96	14.45
	0.500	2	373.66	1.44	20.77	8.56	0.94	12.38
	0.550	1	377.89	1.01	53.55	143.55	0.95	15.11
	0.550	2	376.95	1.45	15.81	3.00	0.93	12.88
	0.600	1	377.86	1.01	56.09	148.32	0.95	16.54
	0.600	2	380.34	1.46	20.63	6.54	0.93	14.35
	0.650	1	377.82	1.00	58.53	150.12	0.96	18.68
	0.650	2	382.98	1.47	34.29	18.80	0.95	16.72
	0.700	1	377.78	1.00	60.85	148.96	0.98	21.37
	0.700	2	384.14	1.48	53.53	37.46	0.97	19.76
	0.750	1	377.75	1.00	63.06	146.41	0.98	24.12
	0.750	2	383.43	1.48	73.43	57.14	0.97	22.89

0.800	1	377.72	1.00	65.18	145.17	0.97	26.40
0.800	2	381.11	1.47	88.85	70.66	0.96	25.44
0.850	1	377.68	1.00	67.21	147.20	0.96	27.87
0.850	2	377.93	1.46	96.19	75.25	0.95	27.02
0.900	1	377.64	1.00	69.14	153.11	0.95	28.47
0.900	2	374.70	1.44	94.19	72.02	0.95	27.54
0.950	1	377.59	1.00	70.94	162.46	0.97	28.27
0.950	2	372.13	1.43	83.72	61.27	0.96	27.08
1.000	1	377.52	1.00	72.56	173.32	0.97	27.46
1.000	2	370.89	1.43	67.64	44.50	0.96	25.91
1.050	1	377.42	1.00	73.94	182.48	0.95	26.47
1.050	2	371.31	1.44	50.36	26.87	0.94	24.53
1.100	1	377.32	0.99	75.02	187.58	0.93	25.73

LEJENPLO STAGG & ELABIAAD. PAG.386

0

TIME (SEC)	BUS NO.	ROTOR SPEED	V BEHIND T. REACT	ROTOR ANGLE (DEGR)	GEN. OUTPUT (MW)	BUS VOLTAGE	BUS ANGLE (DEGR)
1.100	2	373.23	1.45	36.54	13.35	0.91	23.48
1.150	1	377.34	0.99	75.99	116.97	0.92	42.70
1.150	2	376.35	1.46	30.08	4.39	0.90	25.79
1.200	1	377.36	0.99	77.02	117.30	0.92	43.77
1.200	2	379.66	1.47	33.05	6.75	0.90	26.54
1.250	1	377.39	1.00	78.12	113.37	0.95	46.10
1.250	2	382.35	1.48	44.80	17.59	0.93	28.34
1.300	1	377.42	1.00	79.30	105.49	0.97	49.50
1.300	2	383.68	1.49	62.45	34.94	0.96	30.99
1.350	1	377.48	1.00	80.61	96.29	0.98	53.34
1.350	2	383.24	1.49	81.41	54.22	0.97	33.96
1.400	1	377.54	1.01	82.10	89.57	0.98	56.72
1.400	2	381.16	1.49	96.66	68.67	0.97	35.53
1.450	1	377.62	1.01	83.79	88.15	0.98	59.02
1.450	2	378.11	1.47	104.36	74.50	0.97	38.21
1.500	1	377.69	1.02	85.71	92.46	0.99	60.09
1.500	2	374.92	1.46	102.94	71.88	0.97	39.84
1.550	1	377.75	1.02	87.81	102.31	0.99	60.03
1.550	2	372.36	1.45	93.09	61.13	0.98	38.53
1.600	1	377.79	1.03	90.06	115.95	0.99	59.26
1.600	2	371.14	1.46	77.68	44.14	0.98	37.61
1.650	1	377.80	1.03	92.38	129.60	0.97	59.48
1.650	2	371.60	1.46	61.17	26.30	0.96	36.66
1.700	1	377.79	1.03	94.70	139.39	0.95	58.40
1.700	2	373.58	1.47	48.26	12.65	0.93	36.27
1.750	1	377.77	1.03	96.96	144.39	0.93	59.31
1.750	2	376.53	1.49	42.57	6.19	0.91	36.69
1.800	1	377.74	1.03	99.14	145.62	0.93	61.19
1.800	2	379.68	1.50	45.82	8.36	0.91	37.96
1.850	1	377.71	1.03	101.23	143.26	0.96	64.04
1.850	2	382.22	1.50	57.41	19.01	0.93	40.07
1.900	1	377.68	1.03	103.25	135.98	0.98	67.75
1.900	2	383.44	1.51	74.52	36.09	0.97	42.88
1.950	1	377.68	1.03	105.22	128.73	1.00	71.79
1.950	2	382.90	1.51	92.65	55.02	0.99	45.95
2.000	1	377.68	1.04	107.19	122.61	1.01	75.32
2.000	2	380.76	1.51	106.83	69.17	1.00	48.59

OTRANSIENT STABILITY CHECK INDICATES CASE STABLE, ADVANCE TO NEXT CASE.
LEND OF JOB

c) Con Sistema de Excitación de Corriente Continua Tipo DC2

• Archivo de datos:

```

6          STABILITY CRITERIA CARD
-1.  10.  -1.5 99999.  -1. 99999.  2.0   2.10
8          GENERATOR DATA CARDS
  1  50. 0.0000 0.2500 0.8300 0.5400 0.0640 3.0000 0.0012 8.8100 100.
  2  1. 0.0000 1.5000 5.0000 3.2500 0.3820 2.5000 0.0002 7.3500 100.
999
9          EXCITER DATA CARDS
 1 2  60. 0.060 1.000-1.000 0.007 1.000 0.000 0.500 0.0016 1.465
      0.0000 0.000
 2 2  50. 0.060 1.000-1.000 0.008 1.000 0.000 0.500 0.0016 1.465
      0.0000 0.000
999
11         PERFORM STABILITY STUDY
1 1  2.10.0010  .1 0.05 2  1
1 2  2.10.0010  2.1 0.05 2  2
12

```

• Archivo de Resultados:

IEJEMPLD STAGG & ELABIAD. PAG,386

0 GENERATOR ACTIVE AND REACTIVE OUTPUTS

BUS NO.	MW	MVAR
1	128.920	-7.130
2	40.000	30.000

OSTABILITY CRITERIA DATA:

```

MINIMUM ACCEPTABLE DEMAND/GENERATOR RATIO----- -1.000
MAXIMUM ACCEPTABLE DEMAND/GENERATOR RATIO----- 10.000
MINIMUM STEADY STATE ANG. DIFF. BETWEEN PAIR OF GEN. BUSES ----- -0.500
MAXIMUM STEADY STATE ANG. DIFF. BETWEEN PAIR OF GEN. BUSES -----#####
MINIMUM TRANSIENT STATE ANG. DIFF. BETWEEN PAIR OF MACHINE ROTORS- -1.000
MAXIMUM TRANSIENT STATE ANG. DIFF. BETWEEN PAIR OF MACHINE ROTORS-#####
MINIMUM THRESHOLD TIME FOR TRANSIENT STABILITY CHECK ----- 3.000
MAXIMUM THRESHOLD TIME FOR TRANSIENT STABILITY CHECK ----- 3.500

```

IEJEMPLD STAGG & ELABIAD. PAG,386

SYNCHRONOUS MACHINE DATA

BUS HBASE

No.	100 MVA	RA(PU)	XOS(PU)	XD(PU)	XQ(PU)	XL(PU)	TDD(sec)	MVA-S
1	50.0	0.0000	0.2500	0.8300	0.5400	0.0640	3.0000	100.0
2	1.0	0.0000	1.5000	5.0000	3.2500	0.3820	2.5000	100.0

EXCITER DATA

BUS

No.	TIPO	KA	TA	VRMAX	VRMIN	KF	TF	TE	AEX	BEX
1	2	60.00	0.06	1.00	-1.00	0.007	1.00	0.50	0.0016	1.465

BUS

No.	TIPD	KA	TA	VRMAX	VRMIN	KF	TF	TE	AEX	BEX
2	2	50.00	0.06	1.00	-1.00	0.008	1.00	0.50	0.0016	1.465

IEJEMPLD STAGG & ELABIAD. PAG,386

OSTABILITY SEGMENT CARD NO. 1 ,CASE NO. 1 READ -

AMAX= 0.272 STANGL=-0.009 STANGH=1745.312

OSTEADY STATE ANGULAR SEPARATION BETWEEN EACH PAIR OF MACHINE NETWORK BUSES
LIES WITHIN INCONCLUSIVE BAND - CASE STUDY CONTINUING.

0	TIME (SEC)	BUS NO.	ROTOR SPEED	V BEHIND T. REACT	ROTOR ANGLE (DEGR)	GEN. OUTPUT (MW)	BUS VOLTAGE	BUS ANGLE (DEGR)
	0.000	1	376.99	1.04	32.68	16.31	0.19	15.58
	0.000	2	376.99	1.55	29.37	0.00	0.00	0.00
	0.050	1	377.20	1.02	32.98	19.80	0.18	15.87
	0.050	2	380.76	1.52	34.77	0.00	0.00	0.00

OSTABILITY SEGMENT CARD NO. 2 ,CASE NO. 1 READ -

	0.100	1	377.40	0.99	33.86	112.22	0.97	10.16
	0.100	2	384.53	1.48	50.97	55.34	0.95	9.07
	0.150	1	377.50	1.00	35.17	76.92	0.95	12.46
	0.150	2	382.99	1.47	70.76	64.77	0.93	11.76
	0.200	1	377.60	1.00	36.76	76.74	0.93	14.18
	0.200	2	380.15	1.46	84.08	74.02	0.91	13.72
	0.250	1	377.69	1.00	38.64	80.06	0.93	15.25
	0.250	2	376.83	1.44	88.40	75.38	0.91	14.82
	0.300	1	377.78	1.00	40.77	86.96	0.94	15.71
	0.300	2	373.67	1.42	83.29	70.55	0.92	15.13
	0.350	1	377.85	1.01	43.13	97.47	0.96	15.59
	0.350	2	371.30	1.41	70.10	58.38	0.95	14.69
	0.400	1	377.89	1.01	45.66	110.77	0.98	15.04
	0.400	2	370.40	1.41	52.10	40.16	0.96	13.72
	0.450	1	377.92	1.01	48.28	124.46	0.97	14.50
	0.450	2	371.27	1.42	34.04	21.86	0.96	12.76
	0.500	1	377.91	1.01	50.94	135.74	0.96	14.45
	0.500	2	373.66	1.44	20.77	8.56	0.94	12.38
	0.550	1	377.89	1.01	53.55	143.55	0.95	15.11
	0.550	2	376.95	1.45	15.81	3.00	0.93	12.88
	0.600	1	377.86	1.01	56.09	148.32	0.95	16.54
	0.600	2	380.34	1.46	20.63	6.54	0.93	14.35
	0.650	1	377.82	1.00	58.53	150.12	0.96	18.68
	0.650	2	382.98	1.47	34.29	18.80	0.95	16.72
	0.700	1	377.78	1.00	60.85	148.96	0.98	21.37
	0.700	2	384.14	1.48	53.53	37.46	0.97	19.76
	0.750	1	377.75	1.00	63.06	146.41	0.98	24.12
	0.750	2	383.43	1.48	73.43	57.14	0.97	22.89
	0.800	1	377.72	1.00	65.18	145.17	0.97	26.40
	0.800	2	381.11	1.47	88.85	70.66	0.96	25.44
	0.850	1	377.68	1.00	67.21	147.20	0.96	27.87
	0.850	2	377.93	1.46	96.19	75.25	0.95	27.02
	0.900	1	377.64	1.00	69.14	153.11	0.96	28.47
	0.900	2	374.70	1.44	94.19	72.02	0.95	27.54
	0.950	1	377.59	1.00	70.94	162.46	0.97	28.27
	0.950	2	372.13	1.43	83.72	61.27	0.96	27.08
	1.000	1	377.52	1.00	72.56	173.32	0.97	27.46
	1.000	2	370.89	1.43	67.64	44.50	0.96	25.91
	1.050	1	377.42	1.00	73.94	182.48	0.95	26.47
	1.050	2	371.31	1.44	50.36	26.87	0.94	24.53
	1.100	1	377.32	0.99	75.02	187.58	0.93	25.73

0	TIME (SEC)	BUS NO.	ROTOR SPEED	V BEHIND T. REACT	ROTOR ANGLE (DEGR)	GEN. OUTPUT (MW)	BUS VOLTAGE	BUS ANGLE (DEGR)
	1.100	2	373.23	1.45	36.54	13.35	0.91	23.48
	1.150	1	377.34	0.99	75.99	116.97	0.92	42.70
	1.150	2	376.35	1.46	30.08	4.39	0.90	25.79
	1.200	1	377.36	0.99	77.02	117.30	0.92	43.77
	1.200	2	379.66	1.47	33.05	6.75	0.90	26.54
	1.250	1	377.39	1.00	78.12	113.37	0.95	46.10
	1.250	2	382.35	1.48	44.80	17.59	0.93	28.34
	1.300	1	377.42	1.00	79.30	105.49	0.97	49.50
	1.300	2	383.68	1.49	62.45	34.94	0.96	30.99
	1.350	1	377.48	1.00	80.61	96.29	0.98	53.34
	1.350	2	383.24	1.49	81.41	54.22	0.97	33.96
	1.400	1	377.54	1.01	82.10	89.67	0.98	56.72
	1.400	2	381.16	1.49	96.66	68.67	0.97	36.53
	1.450	1	377.62	1.01	83.79	88.15	0.98	59.02
	1.450	2	378.11	1.47	104.36	74.50	0.97	38.21
	1.500	1	377.69	1.02	85.71	92.46	0.99	60.09
	1.500	2	374.92	1.46	102.94	71.88	0.97	38.84
	1.550	1	377.75	1.02	87.81	102.31	0.99	60.03
	1.550	2	372.36	1.45	93.09	61.13	0.98	38.53
	1.600	1	377.79	1.03	90.06	115.95	0.99	59.26
	1.600	2	371.14	1.46	77.68	44.14	0.98	37.61
	1.650	1	377.80	1.03	92.38	129.60	0.97	58.48
	1.650	2	371.60	1.46	61.17	26.30	0.96	36.66
	1.700	1	377.79	1.03	94.70	139.39	0.95	58.40
	1.700	2	373.58	1.47	48.26	12.65	0.93	36.27
	1.750	1	377.77	1.03	96.96	144.39	0.93	59.31
	1.750	2	376.53	1.49	42.57	6.19	0.91	36.69
	1.800	1	377.74	1.03	99.14	145.62	0.93	61.19
	1.800	2	379.68	1.50	45.82	8.36	0.91	37.96
	1.850	1	377.71	1.03	101.23	143.26	0.96	64.04
	1.850	2	382.22	1.50	57.41	19.01	0.93	40.07
	1.900	1	377.68	1.03	103.25	136.98	0.98	67.75
	1.900	2	383.44	1.51	74.52	36.09	0.97	42.88
	1.950	1	377.68	1.03	105.22	128.73	1.00	71.79
	1.950	2	382.90	1.51	92.65	55.02	0.99	45.95
	2.000	1	377.68	1.04	107.19	122.61	1.01	75.32
	2.000	2	380.76	1.51	106.83	69.17	1.00	48.59

OTRANSIENT STABILITY CHECK INDICATES CASE STABLE. ADVANCE TO NEXT CASE.
 IEND OF JOB

d) Con Sistemas de Excitación de Corriente Alterna Tipo AC1

• Archivo de datos:

```

6          STABILITY CRITERIA CARD
-1. 10.      -5.99999, -1.      99999, 2.0      2.01
8          GENERATOR DATA CARDS
1      50. 0.0000 0.2500 0.8300 0.5400 0.0640 3.0000 0.0012 8.8100 100,
2      1. 0.0000 1.5000 5.0000 3.2500 0.3820 2.5000 0.0002 7.3500 100.
999
9          EXCITER DATA CARDS
1 3400. 0.020 2.730 -2.730 0.030 1.000 1.000 1.300 0.0016 1.465 0.200 0.380
2 3400. 0.020 2.730 -2.730 0.030 1.000 1.000 1.300 0.0016 1.465 0.200 0.380
999
11         PERFORM STABILITY STUDY
11 2.1 0.0010 .1 0.05 2 1
12 2.1 0.0010 2.1 0.05 2 2
12

```

• Archivo de resultados:

1EJEMPLD STAGG & ELABIAD, PAG,386

0 GENERATOR ACTIVE AND REACTIVE OUTPUTS

BUS NO.	MW	KVAR
1	128.920	-7.130
2	40.000	30.000

0STABILITY CRITERIA DATA:

MINIMUM ACCEPTABLE DEMAND/GENERATOR RATIO-----	-1.000
MAXIMUM ACCEPTABLE DEMAND/GENERATOR RATIO-----	10.000
MINIMUM STEADY STATE ANG. DIFF. BETWEEN PAIR OF GEN. BUSES -----	-0.500
MAXIMUM STEADY STATE ANG. DIFF. BETWEEN PAIR OF GEN. BUSES -----	#####
MINIMUM TRANSIENT STATE ANG. DIFF. BETWEEN PAIR OF MACHINE ROTORS-	-1.000
MAXIMUM TRANSIENT STATE ANG. DIFF. BETWEEN PAIR OF MACHINE ROTORS-	#####
MINIMUM THRESHOLD TIME FOR TRANSIENT STABILITY CHECK -----	2.000
MAXIMUM THRESHOLD TIME FOR TRANSIENT STABILITY CHECK -----	2.010

1EJEMPLD STAGG & ELABIAD, PAG,386

SYNCHRONOUS MACHINE DATA

BUS HBASE

No.	100 MVA	RA(PU)	XDS(PU)	XD(PU)	XQ(PU)	XL(PU)	TDO(sec)	MVA-G
1	50.0	0.0000	0.2500	0.8300	0.5400	0.0640	3.0000	100.0
2	1.0	0.0000	1.5000	5.0000	3.2500	0.3820	2.5000	100.0

EXCITER DATA

BUS

No.	TIPD	KA	TA	VRMAX	VRMIN	KF	TF	KE	TE	KC	KD	AEX	BEX
1	3	400.00	0.02	2.73	-2.73	0.03	1.00	1.00	1.30	0.20	0.38	0.0016	1.465

BUS

No.	TIPD	KA	TA	VRMAX	VRMIN	KF	TF	KE	TE	KC	KD	AEX	BEX
2	3	400.00	0.02	2.73	-2.73	0.03	1.00	1.00	1.30	0.20	0.38	0.0016	1.465

IEJEMPLO STAGG & ELABIAD. PAG,386

OSTABILITY SEGMENT CARD NO. 1 ,CASE NO. 1 READ -

AMAX= 0.272 STANGL=-0.009 STANGH=1745.312

OSTEADY STATE ANGULAR SEPARATION BETWEEN EACH PAIR OF MACHINE NETWORK BUSES
LIES WITHIN INCONCLUSIVE BAND - CASE STUDY CONTINUING.

0	TIME (SEC)	BUS NO.	ROTOR SPEED	V T.	BEHIND REACT	ROTOR ANGLE (DEGR)	GEN. OUTPUT (MW)	BUS VOLTAGE	BUS ANGLE (DEGR)
	0.000	1	376.99	1.04		32.68	16.31	0.19	15.58
	0.000	2	376.99	1.55		29.37	0.00	0.00	0.00
	0.050	1	377.20	1.00		32.98	19.35	0.18	15.87
	0.050	2	380.76	1.51		34.77	0.00	0.00	0.00

OSTABILITY SEGMENT CARD NO. 2 ,CASE NO. 1 READ -

	0.100	1	377.40	0.97		33.86	107.53	0.95	10.18
	0.100	2	384.53	1.48		50.97	54.27	0.94	9.09
	0.150	1	377.51	0.97		35.19	73.43	0.93	12.52
	0.150	2	383.09	1.47		70.89	63.52	0.92	11.83
	0.200	1	377.61	0.98		36.81	73.09	0.91	14.30
	0.200	2	380.37	1.45		84.67	72.55	0.89	13.86
	0.250	1	377.71	0.98		38.74	76.02	0.90	15.45
	0.250	2	377.19	1.43		89.84	74.05	0.88	15.06
	0.300	1	377.81	0.98		40.95	82.26	0.91	16.03
	0.300	2	374.12	1.41		85.93	70.07	0.90	15.51
	0.350	1	377.89	0.98		43.40	91.86	0.94	16.06
	0.350	2	371.72	1.39		74.04	59.64	0.92	15.24
	0.400	1	377.95	0.98		46.06	104.24	0.95	15.65
	0.400	2	370.62	1.39		56.99	43.10	0.94	14.42
	0.450	1	377.98	0.98		48.85	117.43	0.95	15.18
	0.450	2	371.17	1.40		39.14	25.43	0.94	13.53
	0.500	1	377.99	0.98		51.71	128.71	0.94	15.11
	0.500	2	373.24	1.41		25.12	11.78	0.92	13.11
	0.550	1	377.98	0.98		54.56	136.70	0.92	15.73
	0.550	2	376.28	1.42		18.56	4.94	0.90	13.53
	0.600	1	377.96	0.97		57.38	141.71	0.92	17.09
	0.600	2	379.58	1.43		21.29	6.34	0.90	14.89
	0.650	1	377.94	0.97		60.13	144.05	0.93	19.19
	0.650	2	382.36	1.44		32.91	15.96	0.91	17.16
	0.700	1	377.91	0.96		62.79	143.67	0.94	21.90
	0.700	2	383.91	1.45		50.88	32.08	0.93	20.19
	0.750	1	377.88	0.96		65.38	141.51	0.94	24.84
	0.750	2	383.78	1.45		70.93	50.59	0.93	23.50
	0.800	1	377.86	0.96		67.90	139.78	0.93	27.48
	0.800	2	382.05	1.44		88.21	65.01	0.92	26.46
	0.850	1	377.84	0.96		70.36	140.45	0.92	29.45
	0.850	2	379.32	1.42		98.93	71.58	0.91	28.60
	0.900	1	377.81	0.95		72.76	144.39	0.92	30.63
	0.900	2	376.31	1.40		101.28	71.22	0.90	29.77
	0.950	1	377.78	0.95		75.07	151.55	0.92	31.03
	0.950	2	373.62	1.39		95.33	64.94	0.91	30.00
	1.000	1	377.73	0.94		77.26	160.86	0.92	30.77
	1.000	2	371.80	1.38		82.78	52.80	0.91	29.43
	1.050	1	377.66	0.94		79.28	170.03	0.91	30.11
	1.050	2	371.31	1.38		66.85	37.26	0.90	28.40
	1.100	1	377.57	0.93		81.07	176.71	0.89	29.47

1EJEMPLO STAGE & ELABIAD. PAG,386

0	TIME (SEC)	BUS NO.	ROTOR SPEED	V BEHIND T. REACT	ROTOR ANGLE (DEGR)	GEN. OUTPUT (MW)	BUS VOLTAGE	BUS ANGLE (DEGR)
	1.100	2	372.27	1.39	51.63	22.90	0.87	27.39
	1.150	1	377.62	0.93	82.81	106.05	0.87	48.86
	1.150	2	374.64	1.40	41.29	10.56	0.86	29.98
	1.200	1	377.66	0.93	84.67	109.42	0.87	49.80
	1.200	2	377.61	1.40	38.75	7.73	0.85	30.51
	1.250	1	377.70	0.93	86.64	109.36	0.88	51.94
	1.250	2	380.50	1.41	44.76	12.15	0.86	32.02
	1.300	1	377.74	0.94	88.71	105.90	0.90	55.24
	1.300	2	382.65	1.42	58.14	23.25	0.88	34.48
	1.350	1	377.79	0.94	90.92	99.66	0.92	59.43
	1.350	2	383.51	1.42	75.94	38.94	0.90	37.65
	1.400	1	377.85	0.94	93.28	92.99	0.93	63.88
	1.400	2	382.84	1.42	94.01	54.87	0.92	40.99
	1.450	1	377.92	0.95	95.83	88.81	0.93	67.83
	1.450	2	380.87	1.41	108.19	65.90	0.92	43.89
	1.500	1	378.00	0.95	98.60	88.87	0.93	70.82
	1.500	2	378.18	1.40	115.54	69.99	0.91	45.99
	1.550	1	378.07	0.96	101.58	93.66	0.93	72.74
	1.550	2	375.41	1.38	114.93	67.69	0.92	47.18
	1.600	1	378.13	0.96	104.75	102.87	0.94	73.68
	1.600	2	373.15	1.37	106.98	59.24	0.92	47.56
	1.650	1	378.16	0.97	108.06	115.02	0.93	74.00
	1.650	2	371.95	1.37	93.95	45.69	0.92	47.39
	1.700	1	378.18	0.97	111.44	127.06	0.91	74.25
	1.700	2	372.12	1.37	79.42	30.78	0.89	47.16
	1.750	1	378.17	0.96	114.84	135.87	0.89	75.04
	1.750	2	373.60	1.38	67.31	18.59	0.86	47.33
	1.800	1	378.15	0.96	118.20	140.60	0.86	76.66
	1.800	2	375.99	1.39	60.86	11.66	0.84	48.19
	1.850	1	378.13	0.96	121.50	142.45	0.85	79.09
	1.850	2	378.74	1.40	61.92	11.22	0.83	49.75
	1.900	1	378.10	0.95	124.73	142.23	0.86	82.30
	1.900	2	381.20	1.41	70.59	17.48	0.84	52.00
	1.950	1	378.08	0.95	127.88	139.56	0.89	86.30
	1.950	2	382.80	1.41	85.22	29.44	0.87	54.92
	2.000	1	378.07	0.95	130.98	134.51	0.91	90.85
	2.000	2	383.10	1.41	102.62	44.49	0.89	58.28

0TRANSIENT STABILITY CHECK INDICATES CASE STABLE. ADVANCE TO NEXT CASE.
1END OF JOB

e) Con Sistemas de Excitación de Corriente Alterna Tipo AC2

• Archivo de datos:

```

6          STABILITY CRITERIA CARD
  -1.  10.      -5.99999.  -1.      99999.  2.0      2.01
8          GENERATOR DATA CARDS
  1      50.0000 0.2500 0.8300 0.5400 0.0640 3.0000 0.0012 8.8100 100.
  2      1.00000 1.5000 5.0000 3.2500 0.3820 2.5000 0.0002 7.3500 100.
999
9          EXCITER DATA CARDS
  1 4 400. 0.020 2.730-2.730 0.030 1.000 1.000 1.300 0.0016 1.465 0.200 0.380 1.730-1.730 0.990 1.500 2.500 400.
  2 4 400. 0.020 2.730-2.730 0.030 1.000 1.000 1.300 0.0016 1.465 0.200 0.380 1.730-1.730 0.990 1.500 2.850 400.
999
11         PERFORM STABILITY STUDY
11      2.10.0010 .1 0.05 2 1
12      2.10.0010 2.1 0.05 2 2
12

```

• Archivo de resultados:

IEJEMPLD STAGG & ELABIAD. PAG.386

0 GENERATOR ACTIVE AND REACTIVE OUTPUTS

BUS NO.	MW	MVAR
1	128.920	-7.130
2	40.000	30.000

0STABILITY CRITERIA DATA:

```

MINIMUM ACCEPTABLE DEMAND/GENERATOR RATIO----- -1.000
MAXIMUM ACCEPTABLE DEMAND/GENERATOR RATIO----- 10.000
MINIMUM STEADY STATE ANG. DIFF. BETWEEN PAIR OF GEN. BUSES ----- -0.500
MAXIMUM STEADY STATE ANG. DIFF. BETWEEN PAIR OF GEN. BUSES -----+++++
MINIMUM TRANSIENT STATE ANG. DIFF. BETWEEN PAIR OF MACHINE ROTORS- -1.000
MAXIMUM TRANSIENT STATE ANG. DIFF. BETWEEN PAIR OF MACHINE ROTORS-+++++
MINIMUM THRESHOLD TIME FOR TRANSIENT STABILITY CHECK ----- 2.000
MAXIMUM THRESHOLD TIME FOR TRANSIENT STABILITY CHECK ----- 2.010

```

IEJEMPLD STAGG & ELABIAD. PAG.386

SYNCHRONOUS MACHINE DATA

BUS BASE

No.	100 MVA	RA(PU)	XDS(PU)	XD(PU)	XQ(PU)	XL(PU)	TDD(sec)	MVA-B
1	50.0	0.0000	0.2500	0.8300	0.5400	0.0640	3.0000	100.0
2	1.0	0.0000	1.5000	5.0000	3.2500	0.3820	2.5000	100.0

EXCITER DATA

BUS

No.	TIPO	KA	TA	VRMAX	VRMIN	VAMAX	VAMIN	KF	TF	KE	TE
1	4	400.00	0.02	2.73	-2.73	1.73	-1.73	0.03	1.00	1.00	1.30
		KC	KD	KH	KL	KB	VLR	AEX	BEX		
		0.20	0.38	0.99	1.50	400	2.50	0.0016	1.465		

BUS

No.	TIPO	KA	TA	VRMAX	VRMIN	VAMAX	VAMIN	KF	TF	KE	TE
2	4	400.00	0.02	2.73	-2.73	1.73	-1.73	0.03	1.00	1.00	1.30
		KC	KD	KH	KL	KB	VLR	AEX	BEX		
		0.20	0.38	0.99	1.50	400	2.85	0.0016	1.465		

IEJEMPLD STAGG & ELABIAD. PAG,386
 OSTABILITY SEGMENT CARD NO. 1 ,CASE NO. 1 READ -

AMAX= 0.272 STANGL=-0.009 STANGH=1745.312

OSTEADY STATE ANGULAR SEPARATION BETWEEN EACH PAIR OF MACHINE NETWORK BUSES
 LIES WITHIN INCONCLUSIVE BAND - CASE STUDY CONTINUING.

0	TIME (SEC)	BUS NO.	ROTOR SPEED	V BEHIND T. REACT	ROTOR ANGLE (DEGR)	GEN. OUTPUT (MW)	BUS VOLTAGE	BUS ANGLE (DEGR)
	0.000	1	376.99	1.04	32.68	16.31	0.19	15.58
	0.000	2	376.99	1.55	29.37	0.00	0.00	0.00
	0.050	1	377.20	1.00	32.98	19.35	0.18	15.87
	0.050	2	380.76	1.51	34.77	0.00	0.00	0.00

OSTABILITY SEGMENT CARD NO. 2 ,CASE NO. 1 READ -

	0.100	1	377.40	0.97	33.86	107.49	0.95	10.18
	0.100	2	384.53	1.47	50.97	54.25	0.94	9.09
	0.150	1	377.51	0.97	35.19	73.38	0.93	12.52
	0.150	2	383.09	1.47	70.90	63.50	0.92	11.83
	0.200	1	377.61	0.98	36.81	73.04	0.91	14.30
	0.200	2	380.38	1.45	84.68	72.52	0.89	13.86
	0.250	1	377.71	0.98	38.74	75.95	0.90	15.45
	0.250	2	377.20	1.43	89.86	74.02	0.88	15.07
	0.300	1	377.81	0.98	40.95	82.17	0.91	16.04
	0.300	2	374.13	1.41	85.98	70.05	0.90	15.52
	0.350	1	377.89	0.98	43.41	91.73	0.93	16.07
	0.350	2	371.73	1.39	74.12	59.65	0.92	15.25
	0.400	1	377.95	0.98	46.07	104.09	0.95	15.66
	0.400	2	370.63	1.39	57.10	43.15	0.94	14.44
	0.450	1	377.98	0.98	48.86	117.25	0.95	15.19
	0.450	2	371.17	1.40	39.26	25.51	0.93	13.54
	0.500	1	377.99	0.98	51.72	128.52	0.93	15.13
	0.500	2	373.23	1.41	25.23	11.86	0.92	13.13
	0.550	1	377.98	0.98	54.58	136.51	0.92	15.74
	0.550	2	376.26	1.42	18.64	5.00	0.90	13.54
	0.600	1	377.97	0.97	57.40	141.52	0.92	17.11
	0.600	2	379.57	1.43	21.32	6.36	0.90	14.90
	0.650	1	377.94	0.97	60.16	143.88	0.93	19.20
	0.650	2	382.35	1.44	32.90	15.91	0.91	17.17
	0.700	1	377.91	0.96	62.83	143.52	0.94	21.91
	0.700	2	383.90	1.44	50.83	31.97	0.93	20.20
	0.750	1	377.88	0.96	65.43	141.37	0.94	24.85
	0.750	2	383.78	1.44	70.87	50.44	0.93	23.51
	0.800	1	377.86	0.96	67.96	139.64	0.93	27.50
	0.800	2	382.06	1.44	88.19	64.87	0.92	26.48
	0.850	1	377.84	0.95	70.43	140.28	0.92	29.48
	0.850	2	379.35	1.42	98.99	71.48	0.91	28.63
	0.900	1	377.82	0.95	72.84	144.18	0.92	30.67
	0.900	2	376.35	1.40	101.43	71.18	0.90	29.82
	0.950	1	377.78	0.95	75.16	151.29	0.92	31.09
	0.950	2	373.65	1.39	95.60	64.99	0.90	30.07
	1.000	1	377.73	0.94	77.36	160.56	0.92	30.84
	1.000	2	371.82	1.38	83.14	52.97	0.91	29.51
	1.050	1	377.66	0.94	79.39	169.75	0.91	30.20
	1.050	2	371.32	1.38	67.27	37.50	0.90	28.49
	1.100	1	377.58	0.93	81.21	176.47	0.89	29.56

IEJEMPLD STAGG & ELABIAD. PAG,386

0	TIME (SEC)	BUS NO.	ROTOR SPEED	V BEHIND T. REACT	ROTOR ANGLE (DEGR)	GEN. OUTPUT (MW)	BUS VOLTAGE	BUS ANGLE (DEGR)
	1.100	2	372.26	1.38	52.04	23.14	0.87	27.49
	1.150	1	377.63	0.93	82.96	105.79	0.87	49.01
	1.150	2	374.61	1.39	41.62	10.74	0.85	30.09
	1.200	1	377.67	0.93	84.84	109.22	0.87	49.95
	1.200	2	377.56	1.40	38.96	7.80	0.85	30.60
	1.250	1	377.70	0.93	86.83	109.24	0.88	52.09
	1.250	2	380.45	1.41	44.82	12.08	0.86	32.11
	1.300	1	377.74	0.94	88.93	105.88	0.90	55.38
	1.300	2	382.61	1.42	58.07	23.03	0.88	34.57
	1.350	1	377.79	0.94	91.15	99.73	0.92	59.57
	1.350	2	383.50	1.42	75.80	38.60	0.90	37.73
	1.400	1	377.85	0.94	93.53	93.09	0.93	64.03
	1.400	2	382.86	1.42	93.89	54.51	0.91	41.08
	1.450	1	377.93	0.95	96.10	88.86	0.93	68.02
	1.450	2	380.92	1.41	108.19	65.63	0.91	44.01
	1.500	1	378.00	0.95	98.89	88.84	0.93	71.05
	1.500	2	378.25	1.40	115.72	69.85	0.91	46.14
	1.550	1	378.07	0.96	101.89	93.52	0.93	73.01
	1.550	2	375.49	1.38	115.33	67.72	0.92	47.37
	1.600	1	378.13	0.96	105.08	102.61	0.93	74.00
	1.600	2	373.22	1.37	107.60	59.48	0.92	47.78
	1.650	1	378.17	0.96	108.41	114.67	0.93	74.35
	1.650	2	371.98	1.37	94.72	46.10	0.91	47.64
	1.700	1	378.19	0.96	111.82	126.72	0.91	74.63
	1.700	2	372.11	1.37	80.23	31.24	0.89	47.42
	1.750	1	378.18	0.96	115.24	135.61	0.89	75.42
	1.750	2	373.55	1.38	68.04	18.99	0.86	47.59
	1.800	1	378.16	0.96	118.63	140.43	0.86	77.03
	1.800	2	375.91	1.39	61.41	11.89	0.84	48.44
	1.850	1	378.14	0.96	121.96	142.35	0.85	79.46
	1.850	2	378.65	1.40	62.22	11.24	0.83	49.99
	1.900	1	378.11	0.95	125.21	142.23	0.86	82.66
	1.900	2	381.12	1.40	70.65	17.24	0.84	52.23
	1.950	1	378.09	0.95	128.40	139.70	0.88	86.64
	1.950	2	382.75	1.41	85.09	28.96	0.86	55.13
	2.000	1	378.08	0.95	131.52	134.78	0.90	91.19
	2.000	2	383.10	1.41	102.43	43.89	0.89	58.50

0TRANSIENT STABILITY CHECK INDICATES CASE STABLE. ADVANCE TO NEXT CASE.
1END OF JOB

f) Con Sistema de Excitación Estático Tipo ST1

• Archivo de datos:

```

6          STABILITY CRITERIA CARD
-1. 10.      -5.99999. -1.      99999. 2.0      2.01
8          GENERATOR DATA CARDS
1      50. 0.0000 0.2500 0.8300 0.5400 0.0640 3.0000 0.0012 8.8100 100.
2      1. 0.0000 1.5000 5.0000 3.2500 0.3820 2.5000 0.0002 7.3500 100.
999
9          EXCITER DATA CARDS
1 5 400. 0.020 3.000 -3.000 0.030 1.000 0.000
2 5 400. 0.020 3.000 -3.000 0.030 1.000 0.000
999
11         PERFORM STABILITY STUDY
11  2.10.0010  .1.05 2 1
12  2.10.0010  2.1.05 2 2
12

```

1.200-1.200

1.200-1.200

• Archivo de Resultados:

IEJEMPLD STAGG & ELABIAD. PAG,386

0 GENERATOR ACTIVE AND REACTIVE OUTPUTS

BUS NO.	MW	MVAR
1	128.920	-7.130
2	40.000	30.000

OSTABILITY CRITERIA DATA:

```

MINIMUM ACCEPTABLE DEMAND/GENERATOR RATIO----- -1.000
MAXIMUM ACCEPTABLE DEMAND/GENERATOR RATIO----- 10.000
MINIMUM STEADY STATE ANG. DIFF. BETWEEN PAIR OF GEN. BUSES ----- -0.500
MAXIMUM STEADY STATE ANG. DIFF. BETWEEN PAIR OF GEN. BUSES -----#####
MINIMUM TRANSIENT STATE ANG. DIFF. BETWEEN PAIR OF MACHINE ROTORS- -1.000
MAXIMUM TRANSIENT STATE ANG. DIFF. BETWEEN PAIR OF MACHINE ROTORS-#####
MINIMUM THRESHOLD TIME FOR TRANSIENT STABILITY CHECK ----- 2.000
MAXIMUM THRESHOLD TIME FOR TRANSIENT STABILITY CHECK ----- 2.010

```

IEJEMPLD STAGG & ELABIAD. PAG,386

SYNCHRONOUS MACHINE DATA

BUS BASE

No.	100 MVA	RA(PU)	XDS(PU)	XD(PU)	XQ(PU)	XL(PU)	TDO(sec)	MVA-G
1	50.0	0.0000	0.2500	0.8300	0.5400	0.0640	3.0000	100.0
2	1.0	0.0000	1.5000	5.0000	3.2500	0.3820	2.5000	100.0

EXCITER DATA

BUS

No.	TIPO	KA	TA	VRMAX	VRMIN	VIMAX	VIMIN	KF	TF	KE	TE
1	5	400.00	0.02	3.00	-3.00	1.20	-1.20	0.03	1.00	0.00	0.00

BUS

No.	TIPO	KA	TA	VRMAX	VRMIN	VIMAX	VIMIN	KF	TF	KE	TE
2	5	400.00	0.02	3.00	-3.00	1.20	-1.20	0.03	1.00	0.00	0.00

IEJEMPLD STAGG & ELABIAD. PAG,386

OSTABILITY SEGMENT CARD NO. 1 ,CASE NO. 1 READ -

AMAX= 0.272 STANGL=-0.009 STANGH=1745.312

UNSTEADY STATE ANGULAR SEPARATION BETWEEN EACH PAIR OF MACHINE NETWORK BUSES
LIES WITHIN INCONCLUSIVE BAND - CASE STUDY CONTINUING.

0 TIME (SEC)	BUS NO.	ROTOR SPEED	V BEHIND T. REACT	ROTOR ANGLE (DEGR)	GEN. OUTPUT (MW)	BUS VOLTAGE	BUS ANGLE (DEGR)
0.000	1	376.99	1.04	32.68	16.31	0.19	15.58
0.000	2	376.99	1.55	29.37	0.00	0.00	0.00
0.050	1	377.20	1.00	32.98	19.25	0.18	15.87
0.050	2	380.76	1.52	34.77	0.00	0.00	0.00
UNSTABILITY SEGMENT CARD NO. 2 ,CASE NO. 1 READ -							
0.100	1	377.40	0.96	33.86	106.08	0.94	10.19
0.100	2	384.53	1.48	50.97	54.14	0.93	9.10
0.150	1	377.50	0.99	35.19	76.02	0.94	12.48
0.150	2	383.07	1.46	70.88	63.98	0.93	11.77
0.200	1	377.60	1.01	36.80	79.48	0.94	14.13
0.200	2	380.27	1.44	84.52	73.92	0.92	13.66
0.250	1	377.69	1.04	38.68	86.63	0.95	15.13
0.250	2	376.92	1.41	89.18	76.13	0.93	14.68
0.300	1	377.76	1.06	40.78	97.93	0.98	15.55
0.300	2	373.66	1.39	84.21	71.91	0.96	14.95
0.350	1	377.80	1.09	43.05	113.84	1.02	15.43
0.350	2	371.16	1.37	70.82	59.61	1.00	14.51
0.400	1	377.81	1.11	45.40	133.71	1.05	14.92
0.400	2	370.18	1.37	52.29	40.51	1.03	13.60
0.450	1	377.79	1.13	47.72	151.27	1.06	14.39
0.450	2	371.06	1.39	33.62	21.37	1.04	12.68
0.500	1	377.73	1.14	49.92	166.51	1.05	14.28
0.500	2	373.52	1.40	19.84	7.70	1.03	12.27
0.550	1	377.65	1.16	51.93	180.71	1.06	14.79
0.550	2	376.90	1.42	14.61	2.02	1.03	12.66
0.600	1	377.54	1.15	53.65	181.66	1.06	15.82
0.600	2	380.37	1.43	19.41	5.99	1.03	13.73
0.650	1	377.45	1.13	55.10	175.92	1.06	17.41
0.650	2	383.02	1.45	33.19	19.14	1.04	15.55
0.700	1	377.37	1.10	56.29	164.06	1.06	19.47
0.700	2	384.09	1.45	52.44	38.87	1.04	17.94
0.750	1	377.31	1.11	57.29	161.85	1.06	21.53
0.750	2	383.18	1.45	71.96	60.18	1.04	20.37
0.800	1	377.25	1.12	58.12	160.06	1.06	23.02
0.800	2	380.53	1.44	86.21	74.52	1.03	22.11
0.850	1	377.19	1.14	58.77	164.88	1.06	23.64
0.850	2	376.97	1.43	91.35	79.00	1.04	22.81
0.900	1	377.12	1.13	59.23	164.88	1.06	23.45
0.900	2	373.54	1.42	86.23	72.34	1.04	22.51
0.950	1	377.05	1.12	59.49	169.40	1.06	22.47
0.950	2	371.13	1.41	72.56	57.28	1.04	21.27
1.000	1	376.96	1.11	59.53	176.24	1.06	20.99
1.000	2	370.43	1.41	54.32	37.72	1.04	19.44
1.050	1	376.86	1.13	59.32	187.79	1.06	19.49
1.050	2	371.50	1.42	36.65	20.16	1.04	17.62
1.100	1	376.74	1.15	58.79	196.18	1.06	18.35

IEJEMPLD STAGG & ELABIAD. PAG,386

0	TIME (SEC)	BUS NO.	ROTOR SPEED	V BEHIND T. REACT	ROTOR ANGLE (DEGR)	GEN. OUTPUT (MW)	BUS VOLTAGE	BUS ANGLE (DEGR)
	1.100	2	373.98	1.44	24.20	8.42	1.03	16.25
	1.150	1	376.74	1.16	58.07	132.90	1.06	29.61
	1.150	2	377.36	1.45	20.34	3.21	1.04	17.35
	1.200	1	376.74	1.14	57.33	124.78	1.06	29.69
	1.200	2	380.61	1.46	26.19	9.47	1.04	17.52
	1.250	1	376.75	1.11	56.62	110.35	1.06	30.93
	1.250	2	382.85	1.47	40.09	24.08	1.04	18.65
	1.300	1	376.80	1.10	56.01	95.72	1.06	33.06
	1.300	2	383.44	1.48	58.17	43.89	1.04	20.47
	1.350	1	376.88	1.11	55.57	84.90	1.06	35.18
	1.350	2	382.14	1.48	75.22	62.84	1.04	22.27
	1.400	1	376.97	1.13	55.37	81.58	1.06	36.46
	1.400	2	379.36	1.46	86.27	74.65	1.04	23.36
	1.450	1	377.06	1.13	55.43	80.54	1.06	36.72
	1.450	2	375.97	1.45	88.22	75.55	1.04	23.57
	1.500	1	377.14	1.13	55.74	84.89	1.06	35.96
	1.500	2	372.95	1.44	80.77	67.02	1.04	22.90
	1.550	1	377.22	1.11	56.29	91.63	1.06	34.38
	1.550	2	371.14	1.43	66.22	50.46	1.04	21.53
	1.600	1	377.28	1.11	57.04	104.90	1.06	32.48
	1.600	2	371.03	1.44	48.89	31.94	1.04	19.87
	1.650	1	377.31	1.13	57.92	118.55	1.06	31.05
	1.650	2	372.56	1.45	33.66	16.37	1.04	18.58
	1.700	1	377.32	1.15	58.86	129.51	1.06	30.61
	1.700	2	375.28	1.46	24.67	7.19	1.04	18.08
	1.750	1	377.32	1.15	59.79	131.34	1.06	31.21
	1.750	2	378.48	1.47	24.34	6.51	1.03	18.44
	1.800	1	377.32	1.13	60.72	124.20	1.06	32.85
	1.800	2	381.31	1.48	32.85	14.80	1.04	19.68
	1.850	1	377.34	1.11	61.68	111.81	1.06	35.51
	1.850	2	383.00	1.49	48.00	30.34	1.04	21.76
	1.900	1	377.38	1.10	62.73	99.42	1.06	38.77
	1.900	2	383.03	1.49	65.68	49.22	1.04	24.30
	1.950	1	377.44	1.11	63.93	92.99	1.06	41.79
	1.950	2	381.34	1.49	80.92	65.54	1.04	26.62
	2.000	1	377.51	1.12	65.33	90.63	1.06	43.92
	2.000	2	378.49	1.48	89.48	73.42	1.04	28.20

TRANSIENT STABILITY CHECK INDICATES CASE STABLE. ADVANCE TO NEXT CASE.
 END OF JOB

f) Con Sistemas de Excitación Estáticos Tipo ST2

• Archivo de Datos:

```

6          STABILITY CRITERIA CARD
-1. 10.    -5.99999. -1.      99999. 2.0      2.01
8          GENERATOR DATA CARDS
1      50. 0.0000 0.2500 0.8300 0.5400 0.0640 3.0000 0.0012 8.8100 100.
2      1. 0.0000 1.5000 5.0000 3.2500 0.3820 2.5000 0.0002 7.3500 100.
999
9          EXCITER DATA CARDS
1 6 400. 0.020 1.200-1.2000.030 1.000 1.000 1.300 0.0016 1.465 0.200      1.190 1.60 2.030
2 6 400. 0.020 1.200-1.2000.030 1.000 1.000 1.300 0.0016 1.465 0.200      1.190 3.60 2.000
999

11         PERFORM STABILITY STUDY
11 2.1 0.0010 .1 .05 2 1
12 2.1 0.0010 2.1 .05 2 2
12
    
```

• Archivo de resultados:

```

1EJEMPLO STAGG & ELABIAD, PAG,386
0 GENERATOR ACTIVE AND REACTIVE OUTPUTS
BUS NO. MW MVAR
1 128.920 -7.130
2 40.000 30.000
OSTABILITY CRITERIA DATA:
MINIMUM ACCEPTABLE DEMAND/GENERATOR RATIO----- -1.000
MAXIMUM ACCEPTABLE DEMAND/GENERATOR RATIO----- 10.000
MINIMUM STEADY STATE ANG. DIFF. BETWEEN PAIR OF GEN. BUSES ---- -0.500
MAXIMUM STEADY STATE ANG. DIFF. BETWEEN PAIR OF GEN. BUSES ----#####
MINIMUM TRANSIENT STATE ANG. DIFF. BETWEEN PAIR OF MACHINE ROTORS- -1.000
MAXIMUM TRANSIENT STATE ANG. DIFF. BETWEEN PAIR OF MACHINE ROTORS-#####
MINIMUM THRESHOLD TIME FOR TRANSIENT STABILITY CHECK ----- 2.000
MAXIMUM THRESHOLD TIME FOR TRANSIENT STABILITY CHECK ----- 2.010
    
```

```

1EJEMPLO STAGG & ELABIAD, PAG,386
SYNCHRONOUS MACHINE DATA
BUS HBASE
No. 100 MVA RA(PU) XDS(PU) XD(PU) XQ(PU) XL(PU) TDD(sec) MVA-G
1 50.0 0.0000 0.2500 0.8300 0.5400 0.0640 3.0000 100.0
2 1.0 0.0000 1.5000 5.0000 3.2500 0.3820 2.5000 100.0
    
```

```

EXCITER DATA
BUS
No. TIPO KA TA VRMAX VRMIN KF TF KE TE KP EFDMAX EFDL
1 6 400.00 0.02 1.20 -1.20 0.03 1.00 1.00 1.30 1.19 1.60 2.03
BUS
No. TIPO KA TA VRMAX VRMIN KF TF KE TE KP EFDMAX EFDL
2 6 400.00 0.02 1.20 -1.20 0.03 1.00 1.00 1.30 1.19 3.60 2.00
    
```

1EJEMPLO STAGG & ELABIAD. PAG.386
 OSTABILITY SEGMENT CARD NO. 1 ,CASE NO. 1 READ -

AMAX= 0.272 STANGL=-0.009 STANGH=1745.312

OSTEADY STATE ANGULAR SEPARATION BETWEEN EACH PAIR OF MACHINE NETWORK BUSES
 LIES WITHIN INCONCLUSIVE BAND - CASE STUDY CONTINUING.

0				ROTOR	GEN.		BUS
TIME	BUS	ROTOR	V BEHIND	ANGLE	OUTPUT	BUS	ANGLE
(SEC)	NO.	SPEED	T. REACT	(DEGR)	(MW)	VOLTAGE	(DEGR)
0.000	1	376.99	1.04	32.68	16.31	0.19	15.58
0.000	2	376.99	1.55	29.37	0.00	0.00	0.00
0.050	1	377.20	1.02	32.98	19.85	0.18	15.87
0.050	2	380.76	1.52	34.77	0.00	0.00	0.00

OSTABILITY SEGMENT CARD NO. 2 ,CASE NO. 1 READ -

0.100	1	377.40	0.99	33.86	113.00	0.97	10.16
0.100	2	384.53	1.49	50.97	55.76	0.96	9.07
0.150	1	377.50	1.00	35.17	77.71	0.95	12.46
0.150	2	382.93	1.48	70.69	65.60	0.94	11.76
0.200	1	377.59	1.01	36.75	77.82	0.94	14.16
0.200	2	379.99	1.47	83.72	75.19	0.92	13.69
0.250	1	377.69	1.01	38.61	81.56	0.94	15.19
0.250	2	376.56	1.46	87.44	76.61	0.92	14.75
0.300	1	377.77	1.01	40.73	89.09	0.95	15.57
0.300	2	373.30	1.45	81.41	71.23	0.93	14.96
0.350	1	377.83	1.02	43.05	100.47	0.98	15.32
0.350	2	370.93	1.44	67.14	57.70	0.96	14.36
0.400	1	377.87	1.02	45.53	114.65	0.99	14.64
0.400	2	370.16	1.45	48.23	38.00	0.98	13.25
0.450	1	377.89	1.02	48.09	128.83	0.99	14.04
0.450	2	371.28	1.46	29.85	18.86	0.97	12.21
0.500	1	377.88	1.02	50.65	140.05	0.97	13.99
0.500	2	373.96	1.48	17.03	5.53	0.95	11.84
0.550	1	377.85	1.02	53.15	147.49	0.96	14.71
0.550	2	377.50	1.49	13.33	0.96	0.94	12.43
0.600	1	377.81	1.02	55.55	151.72	0.96	16.23
0.600	2	381.00	1.50	19.94	6.44	0.95	14.03
0.650	1	377.76	1.02	57.83	152.65	0.98	18.48
0.650	2	383.54	1.51	35.40	21.13	0.97	16.55
0.700	1	377.72	1.02	59.99	150.49	1.00	21.23
0.700	2	384.37	1.51	55.81	41.92	0.98	19.68
0.750	1	377.68	1.02	62.02	147.39	1.00	23.92
0.750	2	383.19	1.51	75.72	62.18	0.98	22.75
0.800	1	377.65	1.02	63.96	146.35	0.98	25.98
0.800	2	380.45	1.50	89.83	74.43	0.97	25.07
0.850	1	377.62	1.02	65.80	149.11	0.98	27.16
0.850	2	377.01	1.48	94.86	77.00	0.96	26.31
0.900	1	377.57	1.02	67.53	156.01	0.98	27.44
0.900	2	373.73	1.46	90.09	71.18	0.97	26.45
0.950	1	377.51	1.02	69.12	166.18	0.99	26.91
0.950	2	371.39	1.45	77.09	57.26	0.97	25.63
1.000	1	377.43	1.02	70.50	177.03	0.98	25.89
1.000	2	370.64	1.45	59.54	38.38	0.97	24.21
1.050	1	377.33	1.01	71.62	185.09	0.96	24.84
1.050	2	371.65	1.46	42.40	20.72	0.95	22.78
1.100	1	377.22	1.01	72.44	188.68	0.94	24.18

1EJEMPLO STAGG & ELABIAO. PAG,386

0	TIME (SEC)	BUS NO.	ROTOR SPEED	V BEHIND T. REACT	ROTOR ANGLE (DEGR)	GEN. OUTPUT (MW)	BUS VOLTAGE	BUS ANGLE (DEGR)
	1.100	2	374.09	1.47	30.33	8.82	0.92	21.86
	1.150	1	377.24	1.01	73.13	119.01	0.93	40.32
	1.150	2	377.50	1.47	26.82	2.73	0.91	24.20
	1.200	1	377.26	1.01	73.87	117.28	0.95	41.63
	1.200	2	380.82	1.48	33.16	8.42	0.92	25.20
	1.250	1	377.29	1.01	74.67	110.93	0.97	44.21
	1.250	2	383.19	1.48	47.84	22.45	0.95	27.24
	1.300	1	377.33	1.02	75.57	101.10	0.99	47.72
	1.300	2	383.95	1.49	67.13	41.89	0.98	30.00
	1.350	1	377.39	1.02	76.63	91.48	0.99	51.33
	1.350	2	382.85	1.48	85.92	60.80	0.98	32.82
	1.400	1	377.47	1.03	77.88	85.81	0.99	54.18
	1.400	2	380.27	1.47	99.27	72.46	0.97	34.99
	1.450	1	377.55	1.03	79.36	85.76	0.99	55.85
	1.450	2	377.02	1.45	104.06	75.06	0.97	36.18
	1.500	1	377.63	1.03	81.08	91.49	0.99	56.35
	1.500	2	373.91	1.43	99.57	69.48	0.98	36.37
	1.550	1	377.69	1.04	82.99	102.32	1.00	55.86
	1.550	2	371.71	1.42	87.30	56.16	0.99	35.72
	1.600	1	377.73	1.04	85.05	115.99	1.00	54.88
	1.600	2	371.01	1.42	70.76	38.23	0.98	34.65
	1.650	1	377.74	1.04	87.17	128.54	0.98	54.14
	1.650	2	372.00	1.42	54.68	21.47	0.96	33.76
	1.700	1	377.73	1.04	89.31	136.79	0.96	54.22
	1.700	2	374.34	1.43	43.47	10.04	0.93	33.53
	1.750	1	377.71	1.04	91.40	140.42	0.94	55.32
	1.750	2	377.41	1.44	40.18	6.09	0.92	34.13
	1.800	1	377.69	1.04	93.43	140.26	0.95	57.39
	1.800	2	380.47	1.44	45.86	10.48	0.93	35.59
	1.850	1	377.67	1.04	95.40	136.19	0.97	60.43
	1.850	2	382.73	1.45	59.34	22.52	0.95	37.87
	1.900	1	377.66	1.04	97.33	128.53	0.99	64.25
	1.900	2	383.59	1.45	77.41	39.88	0.98	40.77
	1.950	1	377.67	1.04	99.26	119.98	1.01	68.23
	1.950	2	382.74	1.44	95.50	57.64	0.99	43.79
	2.000	1	377.70	1.04	101.25	114.40	1.01	71.57
	2.000	2	380.46	1.43	108.97	69.55	0.99	46.27

0TRANSIENT STABILITY CHECK INDICATES CASE STABLE. ADVANCE TO NEXT CASE.
1END OF JOB

C2 SISTEMA DE NUEVE BARRAS

C2.1 Resultado de Flujos de Potencia:

- Archivo de datos:

```

1
EJEMPLO ANDERSON & FOUNO. PAG.354
4
4      5      1.00  8.50 17.6
4      6      1.70  9.20 15.8
5      7      3.20 16.10 30.6
6      9      3.90 17.00 35.8
7      8      0.85  7.20 14.9
8      9      1.19 10.08 20.9
1      4      0.00  5.76  0.0 1.000
2      7      0.00  6.25  0.0 1.000
3      9      0.00  5.86  0.0 1.000
9999
5
1  2 GEN 1 SWING 1.04 0.0
2  1 GEN 2      1.00 0.0 163.  6.7  6.7  6.8      0.0  0.0  0.00
3  1 GEN 3      1.00 0.0 85.0-10.9-10.9-10.8      0.0  0.0  0.00
4  0 BUS 4      1.00 0.0 0.00 0.00 0.00 0.00      0.0  0.0  0.00
7  0 BUS 7      1.00 0.0 0.00 0.00 0.00 0.00      0.0  0.0  0.00
9  0 BUS 9      1.00 0.0 0.00 0.00 0.00 0.00      0.0  0.0  0.00
5  0 LOAD A     1.00 0.0 0.00 0.00 0.00 0.00      125. 50.0 0.00
6  0 LOAD B     1.00 0.0 0.00 0.00 0.00 0.00      90.0 30.0 0.00
8  0 LOAD C     1.00 0.0 0.00 0.00 0.00 0.00      100. 35.0 0.00
9999
11
30

```

- Archivo de resultados:

```

1
EJEMPLO ANDERSON & FOUNO. PAG.354
5      DATOS DE BARRA
1 GEN 1 SWING 2 1.040  0.0  0.0  0.0  71.68  27.38  0.0  0.0
2 GEN 2      1 1.025  9.3  0.0  0.0  163.00  6.70  6.7  6.8
3 GEN 3      1 1.025  4.7  0.0  0.0  85.00  -10.90  -10.9  -10.8
4 BUS 4      0 1.026  -2.2  0.0  0.0  0.00  0.00  0.0  0.0
5 LOAD A     0 0.995  -4.0 125.0 50.0  0.00  0.00  0.0  0.0
6 LOAD B     0 1.012  -3.7  90.0 30.0  0.00  0.00  0.0  0.0
7 BUS 7      0 1.026  3.7  0.0  0.0  0.00  0.00  0.0  0.0
8 LOAD C     0 1.016  0.7 100.0 35.0  0.00  0.00  0.0  0.0
9 BUS 9      0 1.032  2.0  0.0  0.0  0.00  0.00  0.0  0.0
999

```

4 DATOS LINEA/TRAFO'S & BUS/GEN DE LA RED

4	5	1.000	8.500	17.600	0.000
4	6	1.700	9.200	15.800	0.000
5	7	3.200	16.100	30.600	0.000
6	9	3.900	17.000	35.800	0.000
7	8	0.850	7.200	14.900	0.000
8	9	1.190	10.080	20.900	0.000
1	4	0.000	5.760	0.000	1.000
2	7	0.000	6.250	0.000	1.000
3	9	0.000	5.860	0.000	1.000

999

1	1.040	0.0	71.68	27.38
2	1.025	9.3	163.00	6.70
3	1.025	4.7	85.00	-10.90
4	1.026	-2.2	0.00	0.00
5	0.995	-4.0	0.00	0.00
6	1.012	-3.7	0.00	0.00
7	1.026	3.7	0.00	0.00
8	1.016	0.7	0.00	0.00
9	1.032	2.0	0.00	0.00

999 .

b

C2.2 Resultados de Estabilidad:

a) Sin Sistema de Excitación

• Archivo de datos:

6 STABILITY CRITERIA CARD

-1. 10. -1.5 99999. -1. 99999. 2.0 2.01

8 GENERATOR DATA CARDS

1	9.55	0.0000	0.0608	0.1460	0.0969	0.0336	8.9600	247.5
2	3.33	0.0000	0.1198	0.8958	0.8645	0.0521	6.0000	192.
3	2.35	0.0000	0.1813	1.3125	1.2578	0.0742	5.8900	128.

999

9 EXCITER DATA CARDS

1 0

2 0

3 0

999

11 PERFORM STABILITY STUDY

1 1 2.1 0.0010 .083 0.05 7 1

1 2 2.1 0.0010 2.1 0.05 7 2 5 1

12

• Archivo de resultados:

1EJEMPLO ANDERSON & FOUND. PAG.354

0 GENERATOR ACTIVE AND REACTIVE OUTPUTS

BUS NO.	MW	MVAR
1	71.680	27.380
2	163.000	6.700
3	85.000	-10.900

OSTABILITY CRITERIA DATA:

MINIMUM ACCEPTABLE DEMAND/GENERATOR RATIO-----	-1.000
MAXIMUM ACCEPTABLE DEMAND/GENERATOR RATIO-----	10.000
MINIMUM STEADY STATE ANG. DIFF. BETWEEN PAIR OF GEN. BUSES -----	-0.500
MAXIMUM STEADY STATE ANG. DIFF. BETWEEN PAIR OF GEN. BUSES -----	#####
MINIMUM TRANSIENT STATE ANG. DIFF. BETWEEN PAIR OF MACHINE ROTORS-	-1.000
MAXIMUM TRANSIENT STATE ANG. DIFF. BETWEEN PAIR OF MACHINE ROTORS-	#####
MINIMUM THRESHOLD TIME FOR TRANSIENT STABILITY CHECK -----	2.000
MAXIMUM THRESHOLD TIME FOR TRANSIENT STABILITY CHECK -----	2.010

1EJEMPLO ANDERSON & FOUND. PAG.386

SYNCHRONOUS MACHINE DATA

BUS HBASE

No.	100 MVA	RA(PU)	XDS(PU)	XD(PU)	XG(PU)	XL(PU)	TDD(sec)	MVA-G
1	23.6	0.0000	0.0608	0.1460	0.0969	0.0336	8.9600	247.0
2	6.4	0.0000	0.1198	0.8958	0.8645	0.0521	6.0000	192.0
3	3.0	0.0000	0.1813	1.3125	1.2578	0.0742	5.8900	128.0

EXCITER DATA

BUS

No. =>GENERADOR SIN SISTEMA DE EXCITACION<=

1

BUS

No. =>GENERADOR SIN SISTEMA DE EXCITACION<=

2

BUS

No. =>GENERADOR SIN SISTEMA DE EXCITACION<=

3

1EJEMPLO ANDERSON & FOUND. PAG.386

OSTABILITY SEGMENT CARD NO. 1 ,CASE NO. 1 READ -

AMAX= 0.351 STANGL=-0.009 STANGH=1745.312

OSTEADY STATE ANGULAR SEPARATION BETWEEN EACH PAIR OF MACHINE NETWORK BUSES LIES WITHIN INCONCLUSIVE BAND - CASE STUDY CONTINUING.

0	TIME (SEC)	BUS NO.	ROTOR SPEED	V BEHIND T. REACT	ROTOR ANGLE (DEGR)	GEN. OUTPUT (MW)	BUS VOLTAGE	BUS ANGLE (DEGR)
	0.000	1	376.99	1.06	2.27	67.95	0.85	-0.36
	0.000	2	376.99	1.05	19.75	0.00	0.36	19.75
	0.000	3	376.99	1.02	13.20	38.25	0.62	6.90
	0.050	1	377.01	1.06	2.30	65.52	0.85	-0.24
	0.050	2	379.39	1.05	23.19	0.00	0.36	23.19
	0.050	3	378.43	1.02	15.28	40.58	0.62	8.59

OSTABILITY SEGMENT CARD NO. 2 ,CASE NO. 1 READ -

	0.100	1	377.01	1.06	2.38	81.12	1.02	-0.25
	0.100	2	381.15	1.05	33.23	140.77	1.02	24.14
	0.100	3	379.43	1.02	21.18	76.40	1.01	13.40
	0.150	1	377.03	1.06	2.45	51.66	1.01	0.76
	0.150	2	381.32	1.05	45.46	162.42	1.00	34.80
	0.150	3	379.68	1.02	28.52	77.78	0.99	20.48

0.200	1	377.17	1.05	2.74	24.08	1.00	1.95
0.200	2	381.19	1.05	57.72	179.50	0.98	45.72
0.200	3	379.87	1.02	36.50	80.14	0.97	28.04
0.250	1	377.41	1.05	3.57	0.92	0.99	3.54
0.250	2	380.86	1.05	69.32	190.59	0.97	56.33
0.250	3	379.97	1.02	44.91	83.49	0.95	35.89
0.300	1	377.73	1.05	5.21	-16.57	0.98	5.77
0.300	2	380.40	1.05	79.77	196.19	0.95	66.18
0.300	3	379.96	1.02	53.45	87.43	0.93	43.79
0.350	1	378.11	1.05	7.85	-28.72	0.97	8.83
0.350	2	379.90	1.05	88.83	197.85	0.94	74.97
0.350	3	379.82	1.02	61.78	91.43	0.91	51.47
0.400	1	378.52	1.05	11.65	-35.87	0.97	12.87
0.400	2	379.39	1.05	95.43	197.27	0.94	82.52
0.400	3	379.56	1.02	69.53	95.06	0.90	58.67
0.450	1	378.96	1.05	16.65	-38.71	0.95	17.99
0.450	2	378.89	1.05	102.59	195.82	0.94	88.76
0.450	3	379.19	1.02	76.38	97.94	0.90	65.13
0.500	1	379.40	1.05	22.94	-37.40	0.97	24.21
0.500	2	378.42	1.05	107.35	194.27	0.94	93.69
0.500	3	378.76	1.02	82.08	99.56	0.90	70.69
0.550	1	379.83	1.05	30.46	-31.43	0.97	31.52
0.550	2	377.97	1.05	110.79	192.73	0.95	97.35
0.550	3	378.30	1.02	86.48	99.24	0.91	75.27
0.600	1	380.22	1.05	39.15	-19.72	0.98	39.81
0.600	2	377.53	1.05	112.98	190.49	0.95	99.86
0.600	3	377.89	1.02	89.53	96.25	0.93	78.97
0.650	1	380.55	1.05	48.89	-1.28	0.99	48.93
0.650	2	377.17	1.05	114.02	186.19	0.97	101.38
0.650	3	377.63	1.02	91.80	90.27	0.95	82.03
0.700	1	380.79	1.05	59.45	23.87	1.00	58.66
0.700	2	376.88	1.05	114.10	178.06	0.99	102.20
0.700	3	377.59	1.02	93.50	81.97	0.97	84.85

LENERPLG ANDERSON & FOLUND, PAG.386

0

TIME (SEC)	BUS NO.	ROTOR SPEED	V BEHIND T. REACT	ROTOR ANGLE (DEGR)	GEN. OUTPUT (MW)	BUS VOLTAGE	BUS ANGLE (DEGR)
0.750	1	380.92	1.05	70.55	53.90	1.01	68.80
0.750	2	376.75	1.05	113.55	164.72	1.00	102.74
0.750	3	377.82	1.02	95.48	73.34	0.99	87.91
0.800	1	380.93	1.05	81.86	85.13	1.02	79.11
0.800	2	375.85	1.05	112.96	146.11	1.02	103.51
0.800	3	378.29	1.02	98.49	67.04	1.01	91.68
0.850	1	380.82	1.05	93.02	113.17	1.02	89.37
0.850	2	377.27	1.05	113.08	124.24	1.03	105.14
0.850	3	378.90	1.02	103.08	64.97	1.02	96.55
0.900	1	380.61	1.05	103.71	134.28	1.02	99.38
0.900	2	378.00	1.05	114.84	103.07	1.03	108.30
0.900	3	379.51	1.02	109.44	67.07	1.02	102.72
0.950	1	380.33	1.05	113.69	146.31	1.02	108.98
0.950	2	379.01	1.05	119.12	87.39	1.04	113.59
0.950	3	380.00	1.02	117.39	71.41	1.02	110.24
1.000	1	380.03	1.05	122.82	148.60	1.02	118.04
1.000	2	380.18	1.05	126.55	81.20	1.04	121.42
1.000	3	380.36	1.02	126.56	75.40	1.02	119.01
1.050	1	379.73	1.05	131.09	141.43	1.02	126.53
1.050	2	381.36	1.05	137.40	86.45	1.04	131.93
1.050	3	380.63	1.02	136.61	77.11	1.02	128.88
1.100	1	379.48	1.05	139.56	125.62	1.02	134.52

1.100	2	382.38	1.05	151.44	102.31	1.03	144.94
1.100	3	380.88	1.02	147.39	76.12	1.02	139.74
1.150	1	379.31	1.06	145.43	102.68	1.02	142.11
1.150	2	383.12	1.05	168.02	125.16	1.02	160.01
1.150	3	381.20	1.02	158.98	73.70	1.01	151.53
1.200	1	379.24	1.06	151.94	75.07	1.02	149.51
1.200	2	383.49	1.05	186.19	149.64	1.01	176.48
1.200	3	381.58	1.02	171.57	72.05	1.00	164.22
1.250	1	379.28	1.06	158.42	46.04	1.01	156.91
1.250	2	383.53	1.05	204.94	170.66	1.00	-166.33
1.250	3	381.98	1.02	185.31	73.07	0.99	177.72
1.300	1	379.44	1.06	165.18	18.87	1.00	164.56
1.300	2	383.30	1.05	223.39	185.28	0.98	-149.08
1.300	3	382.30	1.02	200.10	77.23	0.97	-168.10
1.350	1	379.70	1.06	172.55	-3.93	0.99	172.68
1.350	2	382.90	1.05	240.92	193.18	0.96	-132.31
1.350	3	382.45	1.02	215.56	83.50	0.94	-153.51
1.400	1	380.04	1.06	180.78	-21.09	0.98	-178.51
1.400	2	382.43	1.05	257.19	195.86	0.95	-116.40
1.400	3	382.39	1.02	231.16	90.26	0.92	-138.88
1.450	1	380.43	1.06	190.07	-32.48	0.97	-168.83
1.450	2	381.95	1.05	272.09	195.48	0.94	-101.60
1.450	3	382.13	1.02	246.29	96.14	0.91	-124.60
1.500	1	380.86	1.06	200.54	-38.65	0.96	-158.14
1.500	2	381.48	1.05	285.62	194.03	0.94	-88.03
1.500	3	381.71	1.02	260.44	100.29	0.90	-111.06
1.550	1	381.31	1.06	212.27	-40.19	0.96	-146.36
1.550	2	381.03	1.05	297.84	192.89	0.94	-75.73
1.550	3	381.19	1.02	273.23	102.26	0.89	-98.53
1.600	1	381.75	1.06	225.27	-37.15	0.97	-133.46
1.600	2	380.60	1.05	308.80	192.55	0.94	-64.70
1.600	3	380.65	1.02	284.49	101.71	0.90	-87.13

1EJEMPLD ANDERSON & FOUND. PAG,386

0	TIME (SEC)	BUS NO.	ROTOR SPEED	V BEHIND T. REACT	ROTOR ANGLE (DEGR)	GEN. OUTPUT (MW)	BUS VOLTAGE	BUS ANGLE (DEBR)
	1.650	1	382.17	1.06	239.52	-28.95	0.97	-119.50
	1.650	2	380.16	1.05	318.50	192.58	0.95	-54.90
	1.650	3	380.17	1.02	294.27	98.31	0.91	-76.79
	1.700	1	382.55	1.06	254.92	-14.63	0.98	-104.59
	1.700	2	379.73	1.05	326.96	191.60	0.96	-46.22
	1.700	3	379.85	1.02	302.88	92.01	0.93	-67.25
	1.750	1	382.85	1.06	271.29	6.29	0.99	-88.92
	1.750	2	379.33	1.05	334.22	187.53	0.97	-38.49
	1.750	3	379.76	1.02	310.87	83.55	0.96	-58.10
	1.800	1	383.06	1.06	288.41	32.99	1.01	-72.67
	1.800	2	379.03	1.05	340.46	178.17	0.99	-31.41
	1.800	3	379.94	1.02	319.00	74.83	0.98	-48.85
	1.850	1	383.16	1.06	305.97	62.98	1.01	-56.08
	1.850	2	378.92	1.05	346.09	162.24	1.00	-24.53
	1.850	3	380.37	1.02	328.02	68.48	1.00	-39.02
	1.900	1	383.13	1.06	323.63	92.57	1.02	-39.37
	1.900	2	379.08	1.05	351.76	140.46	1.02	-17.29
	1.900	3	380.93	1.02	338.49	66.51	1.01	-28.25
	1.950	1	383.00	1.06	341.65	117.96	1.02	-22.75
	1.950	2	377.59	1.05	358.40	116.21	1.03	-9.00
	1.950	3	381.48	1.02	350.59	68.94	1.02	-16.34

EXCITER DATA

BUS

No. =>GENERADOR SIN SISTEMA DE EXCITACION<=

1

BUS

No.	TIPO	KA	TA	VRMAX	VRMIN	KF	TF	TE	AEX	REX
2	1	25.00	0.20	1.00	-1.00	0.080	0.35	0.50	0.0016	1.465

BUS

No. =>GENERADOR SIN SISTEMA DE EXCITACION<=

3

1EJEMPLO ANDERSON & FOUND. PAG,354

OSTABILITY SEGMENT CARD NO. 1 ,CASE NO. 1 READ -

ANAX= 1.073 STANGL=-0.009 STANGH=1745.312

OSTEADY STATE ANGULAR SEPARATION BETWEEN EACH PAIR OF MACHINE NETWORK BUSES
LIES WITHIN INCONCLUSIVE BAND - CASE STUDY CONTINUING.

0	TIME (SEC)	BUS NO.	ROTOR SPEED	V BEHIND T. REACT	ROTOR ANGLE (DEGR)	GEN. OUTPUT (MW)	BUS VOLTAGE	BUS ANGLE (DEGR)
	0.000	1	376.99	1.06	2.27	67.95	0.85	-0.36
	0.000	2	376.99	0.79	61.11	0.00	0.27	61.11
	0.000	3	376.99	1.02	13.20	38.25	0.62	6.90
	0.050	1	377.01	1.06	2.30	65.52	0.85	-0.24
	0.050	2	379.39	0.77	64.55	0.00	0.26	64.55
	0.050	3	378.43	1.02	15.28	40.58	0.62	8.59

OSTABILITY SEGMENT CARD NO. 2 ,CASE NO. 1 READ -

0.100	1	377.03	1.06	2.36	56.34	0.99	0.49
0.100	2	379.81	0.76	72.10	145.40	0.72	25.83
0.100	3	380.57	1.02	22.55	24.01	0.89	19.80
0.150	1	377.14	1.06	2.61	29.20	0.98	1.63
0.150	2	379.91	0.76	80.39	167.11	0.71	30.05
0.150	3	382.09	1.02	35.19	50.38	0.88	29.30
0.200	1	377.37	1.06	3.35	1.33	0.97	3.30
0.200	2	379.70	0.75	88.52	185.76	0.70	34.58
0.200	3	382.70	1.02	50.90	80.91	0.85	41.16
0.250	1	377.70	1.06	4.88	-19.90	0.96	5.57
0.250	2	379.26	0.74	95.71	199.34	0.69	38.90
0.250	3	382.40	1.02	67.02	107.18	0.82	53.61
0.300	1	378.09	1.06	7.45	-31.88	0.94	8.57
0.300	2	378.66	0.73	101.38	207.09	0.69	42.52
0.300	3	381.39	1.02	81.20	125.59	0.80	64.89
0.350	1	378.51	1.06	11.20	-36.35	0.93	12.48
0.350	2	377.99	0.72	105.21	209.45	0.68	45.08
0.350	3	379.93	1.02	91.80	137.01	0.78	73.54
0.400	1	378.94	1.06	16.17	-35.76	0.94	17.43
0.400	2	377.31	0.71	107.10	207.46	0.68	46.41
0.400	3	378.19	1.02	97.76	143.33	0.78	78.59
0.450	1	379.36	1.06	22.37	-29.82	0.94	23.41
0.450	2	376.69	0.70	107.12	202.14	0.68	46.48
0.450	3	376.33	1.02	98.53	144.20	0.79	79.66

0.500	1	379.74	1.06	29.71	-14.56	0.96	30.21
0.500	2	376.17	0.69	105.49	194.11	0.69	45.44
0.500	3	374.57	1.02	94.05	135.80	0.83	77.05
0.550	1	380.03	1.06	38.03	15.25	0.98	37.52
0.550	2	375.79	0.68	102.56	183.48	0.70	43.59
0.550	3	373.30	1.02	85.13	112.65	0.87	71.76
0.600	1	380.17	1.06	46.98	59.48	1.00	45.01
0.600	2	375.58	0.67	98.77	170.23	0.70	41.37
0.600	3	373.00	1.02	73.84	74.20	0.90	65.41
0.650	1	380.12	1.06	56.06	107.92	1.00	52.51
0.650	2	375.59	0.66	94.68	154.90	0.70	39.34
0.650	3	374.03	1.02	63.56	31.17	0.92	60.09
0.700	1	379.89	1.06	64.74	146.44	1.00	59.93
0.700	2	375.82	0.66	90.94	138.72	0.71	37.98
0.700	3	376.24	1.02	58.02	0.71	0.92	57.94

1EJEMPLD ANDERSON & FOUND. PAG,354

0	TIME	BUS	ROTOR	V BEHIND	ROTOR	GEN.	BUS	BUS
	(SEC)	NO.	SPEED	T, REACT	ANGLE	OUTPUT	VOLTAGE	ANGLE
					(DEGR)	(MW)		(DEGR)
0.750	1	379.55	1.06	72.58	166.99	1.00	67.09	
0.750	2	376.30	0.66	88.22	123.28	0.72	37.68	
0.750	3	379.05	1.02	59.85	-5.29	0.93	60.43	
0.800	1	379.16	1.06	79.35	168.21	1.01	73.83	
0.800	2	376.98	0.66	87.17	110.53	0.73	38.67	
0.800	3	381.62	1.02	69.59	15.65	0.93	67.88	
0.850	1	378.80	1.06	85.04	152.35	1.01	80.05	
0.850	2	377.82	0.66	88.31	103.36	0.74	40.97	
0.850	3	383.18	1.02	85.39	56.90	0.94	79.18	
0.900	1	378.53	1.06	89.81	126.10	1.01	85.68	
0.900	2	378.70	0.66	91.94	105.00	0.74	44.33	
0.900	3	383.32	1.02	103.68	103.38	0.93	92.22	
0.950	1	378.37	1.06	93.97	99.50	1.00	90.70	
0.950	2	379.47	0.66	97.98	117.09	0.73	48.29	
0.950	3	382.14	1.02	120.40	139.13	0.91	104.57	
1.000	1	378.30	1.06	97.79	80.45	1.00	95.14	
1.000	2	380.00	0.66	105.92	139.32	0.73	52.42	
1.000	3	380.13	1.02	132.40	156.50	0.89	114.23	
1.050	1	378.28	1.06	101.51	72.27	1.00	99.12	
1.050	2	380.13	0.66	114.84	169.80	0.73	56.26	
1.050	3	377.86	1.02	138.12	155.32	0.89	120.05	
1.100	1	378.28	1.06	105.21	75.74	1.00	102.71	
1.100	2	379.78	0.66	123.46	203.88	0.72	59.38	
1.100	3	375.89	1.02	137.66	137.56	0.90	121.89	
1.150	1	378.24	1.06	108.85	89.07	1.00	105.92	
1.150	2	379.58	0.64	131.23	190.86	0.72	68.56	
1.150	3	374.71	1.02	132.58	106.20	0.92	120.64	
1.200	1	378.13	1.06	112.29	107.32	1.00	108.77	
1.200	2	378.96	0.64	137.85	218.21	0.71	70.44	
1.200	3	374.63	1.02	125.64	68.95	0.92	117.98	
1.250	1	377.96	1.06	115.32	123.86	1.00	111.26	
1.250	2	378.02	0.62	142.19	232.53	0.69	71.57	
1.250	3	375.63	1.02	120.08	39.33	0.92	115.72	

1.300	1	377.73	1.06	117.77	132.99	1.00	113.40
1.300	2	376.98	0.61	143.64	231.51	0.68	72.03
1.300	3	377.30	1.02	118.49	27.75	0.92	145.40
1.350	1	377.48	1.06	119.52	132.39	1.00	115.17
1.350	2	376.06	0.60	142.25	217.06	0.68	71.96
1.350	3	378.99	1.02	121.87	37.41	0.92	117.71
1.400	1	377.25	1.06	120.59	123.15	1.00	116.55
1.400	2	375.44	0.59	138.61	192.19	0.68	71.54
1.400	3	380.10	1.02	129.39	64.50	0.92	122.20
1.450	1	377.08	1.06	121.08	109.56	1.00	117.47
1.450	2	375.22	0.59	133.75	162.77	0.68	70.91
1.450	3	380.20	1.02	138.70	98.82	0.91	127.54
1.500	1	376.95	1.06	121.13	97.43	1.00	117.92
1.500	2	375.43	0.59	128.88	137.00	0.68	70.12
1.500	3	379.29	1.02	146.81	128.01	0.90	132.06
1.550	1	376.86	1.06	120.88	91.33	1.00	117.86
1.550	2	375.94	0.58	125.08	120.36	0.67	69.23
1.550	3	377.65	1.02	151.15	144.13	0.89	134.28
1.600	1	376.78	1.06	120.40	93.22	1.00	117.32
1.600	2	376.63	0.58	123.05	114.04	0.67	68.35
1.600	3	375.74	1.02	150.31	144.78	0.89	133.35

LEJEMPLD ANDERSON & FOUNO, PAG,386

0

TIME (SEC)	BUS NO.	ROTOR SPEED	V BEHIND T. REACT	ROTOR ANGLE (DEGR)	GEN. OUTPUT (MW)	BUS VOLTAGE	BUS ANGLE (DEGR)
1.650	1	376.68	1.06	119.66	102.99	1.00	116.27
1.650	2	377.34	0.58	123.04	117.68	0.68	67.58
1.650	3	374.07	1.02	144.21	129.68	0.90	129.25
1.700	1	376.53	1.06	118.56	118.40	1.00	114.67
1.700	2	377.92	0.58	124.92	130.57	0.68	66.98
1.700	3	373.09	1.02	134.22	100.38	0.91	122.88
1.750	1	376.31	1.06	116.93	134.23	1.00	112.52
1.750	2	378.26	0.58	128.14	149.79	0.68	66.65
1.750	3	373.18	1.02	122.90	64.02	0.92	115.75
1.800	1	376.03	1.06	114.59	143.89	1.00	109.85
1.800	2	378.31	0.58	131.93	169.26	0.66	66.68
1.800	3	374.35	1.02	113.42	33.34	0.92	109.70
1.850	1	375.75	1.06	111.43	142.58	1.00	106.74
1.850	2	378.11	0.57	135.47	183.20	0.65	67.10
1.850	3	376.23	1.02	109.45	19.60	0.91	106.24
1.900	1	375.49	1.06	107.48	128.63	1.00	103.24
1.900	2	377.75	0.56	139.18	199.51	0.64	67.83
1.900	3	378.22	1.02	109.18	26.97	0.90	106.13
1.950	1	375.31	1.06	102.89	103.65	1.00	99.47
1.950	2	377.36	0.55	139.81	188.66	0.63	68.74
1.950	3	379.68	1.02	114.99	52.25	0.90	109.04
2.000	1	375.24	1.06	97.93	73.25	0.99	95.51
2.000	2	377.03	0.55	140.36	182.12	0.63	69.66
2.000	3	380.18	1.02	123.68	86.10	0.89	113.69

OTRANSIENT STABILITY CHECK INDICATES CASE STABLE, ADVANCE TO NEXT CASE.

LEND OF JOB

c) Con Sistema de Excitación de Corriente Alterna

• Archivo de datos:

```

6          STABILITY CRITERIA CARD
-1.  10.  -5.99999.  -1.99999.  2.0  2.01
8          GENERATOR DATA CARDS
  1  9.57 0.0000 0.0608 0.1460 0.0969 0.0336 8.9600      247.
  2  3.33 0.0000 0.1198 0.8958 0.8645 0.0521 6.0000 0.0020 9.8100  192.
  3  2.35 0.0000 0.1813 1.3125 1.2578 0.0742 5.8900      128.
999
9          EXCITER DATA CARDS
  1
  2  3.400. 0.050 3.50-3.50 0.040 1.00 1.00 0.950 0.0039 1.555 0.200 0.38
  3
999
11         PERFORM STABILITY STUDY
1 1  2.1 0.001 .050 0.05 7 1
1 2  2.1 0.001 2.1 0.05 7 2  5 1
12

```

• Archivo de resultados:

```

1EJEMPLO ANDERSON & FOUND. PAG,354
0  GENERATOR ACTIVE AND REACTIVE OUTPUTS
  BUS NO.  MW      MVAR
  1      71.680   27.380
  2     163.000    6.700
  3      85.000   -10.900
OSTABILITY CRITERIA DATA:
  MINIMUM ACCEPTABLE DEMAND/GENERATOR RATIO----- -1.000
  MAXIMUM ACCEPTABLE DEMAND/GENERATOR RATIO----- 10.000
  MINIMUM STEADY STATE ANG. DIFF. BETWEEN PAIR OF GEN. BUSES ----- -0.500
  MAXIMUM STEADY STATE ANG. DIFF. BETWEEN PAIR OF GEN. BUSES -----#####
  MINIMUM TRANSIENT STATE ANG. DIFF. BETWEEN PAIR OF MACHINE ROTORS- -1.000
  MAXIMUM TRANSIENT STATE ANG. DIFF. BETWEEN PAIR OF MACHINE ROTORS-#####
  MINIMUM THRESHOLD TIME FOR TRANSIENT STABILITY CHECK ----- 2.000
  MAXIMUM THRESHOLD TIME FOR TRANSIENT STABILITY CHECK ----- 2.010

```

```

1EJEMPLO ANDERSON & FOUND. PAG,366
SYNCHRONOUS MACHINE DATA
BUS HBASE
No.  100 MVA  RA(PU) XDS(PU) XD(PU) XQ(PU) XL(PU) TDD(sec) MVA-G
  1   23.6  0.0000  0.0608  0.1460  0.0969  0.0336  8.9600  247.0
  2    6.4  0.0000  0.1198  0.8958  0.8645  0.0521  6.0000  192.0
  3    3.0  0.0000  0.1813  1.3125  1.2578  0.0742  5.8900  128.0

```

```

EXCITER DATA
BUS
No.          =>GENERADOR SIN SISTEMA DE EXCITACION<=
  1
BUS
No. TIPO KA  TA VRMAX VRMIN  KF  TF  KE  TE  KC  XD  AEX  BEX
  2  3 400.00  0.05  3.50 -3.50  0.04 1.00 1.00 0.95 0.20 0.38 0.0039 1.555
BUS
No.          =>GENERADOR SIN SISTEMA DE EXCITACION<=
  3

```

1EJEMPLD ANDERSON & FOUND. PAG,386
 OSTABILITY SEGMENT CARD NO. 1 ,CASE NO. 1 READ -

AKAX= 1.073 STANGL=-0.009 STANGH=1745.312

OSTEADY STATE ANGULAR SEPARATION BETWEEN EACH PAIR OF MACHINE NETWORK BUSES
 LIES WITHIN INCONCLUSIVE BAND - CASE STUDY CONTINUING.

0	TIME (SEC)	BUS NO.	ROTOR SPEED	V BEHIND T. REACT	ROTOR ANGLE (DEGR)	GEN. OUTPUT (MW)	BUS. VOLTAGE	BUS ANGLE (DEGR)
	0.000	1	376.99	1.06	2.27	67.95	0.85	-0.36
	0.000	2	376.99	0.79	61.11	0.00	0.27	61.11
	0.000	3	376.99	1.02	13.20	38.25	0.62	6.90
	0.050	1	377.01	1.06	2.30	65.52	0.85	-0.24
	0.050	2	379.39	0.76	64.55	0.00	0.26	64.55
	0.050	3	378.43	1.02	15.28	40.58	0.62	8.59

OSTABILITY SEGMENT CARD NO. 2 ,CASE NO. 1 READ -

	0.100	1	377.03	1.06	2.36	56.87	0.99	0.47
	0.100	2	379.84	0.76	72.15	142.92	0.71	25.77
	0.100	3	380.56	1.02	22.52	24.52	0.89	19.71
	0.150	1	377.14	1.06	2.60	29.91	0.98	1.60
	0.150	2	379.98	0.75	80.59	164.31	0.70	30.04
	0.150	3	382.07	1.02	35.09	50.56	0.87	29.18
	0.200	1	377.36	1.06	3.32	2.26	0.97	3.24
	0.200	2	379.82	0.74	88.98	182.72	0.69	34.65
	0.200	3	382.67	1.02	50.73	80.53	0.85	41.01
	0.250	1	377.68	1.06	4.82	-18.81	0.95	5.47
	0.250	2	379.42	0.73	96.57	196.15	0.68	39.11
	0.250	3	382.39	1.02	66.80	106.06	0.82	53.47
	0.300	1	378.07	1.06	7.35	-30.70	0.94	8.43
	0.300	2	378.87	0.71	102.77	203.90	0.67	42.93
	0.300	3	381.44	1.02	81.04	123.62	0.79	64.88
	0.350	1	378.49	1.06	11.05	-35.19	0.93	12.29
	0.350	2	378.24	0.70	107.27	206.51	0.66	45.76
	0.350	3	380.05	1.02	91.87	134.21	0.77	73.83
	0.400	1	378.92	1.06	15.95	-34.88	0.93	17.19
	0.400	2	377.61	0.68	109.94	205.14	0.66	47.42
	0.400	3	378.41	1.02	98.31	139.90	0.77	79.37
	0.450	1	379.33	1.06	22.07	-29.99	0.94	23.13
	0.450	2	377.01	0.67	110.84	200.94	0.66	47.87
	0.450	3	376.65	1.02	99.86	140.89	0.78	81.12
	0.500	1	379.72	1.06	29.35	-17.27	0.95	29.95
	0.500	2	376.50	0.66	110.15	194.61	0.66	47.23
	0.500	3	374.98	1.02	96.46	134.16	0.81	79.31
	0.550	1	380.03	1.06	37.63	8.25	0.97	37.35
	0.550	2	376.09	0.64	108.13	186.16	0.66	45.74
	0.550	3	373.71	1.02	88.73	114.73	0.85	74.80
	0.600	1	380.20	1.06	46.62	47.81	0.99	45.03
	0.600	2	375.83	0.63	105.14	175.21	0.67	43.82
	0.600	3	373.27	1.02	78.45	80.91	0.88	69.05
	0.650	1	380.21	1.06	55.87	93.74	1.00	52.78
	0.650	2	375.74	0.63	101.64	161.73	0.67	41.95
	0.650	3	374.04	1.02	68.59	40.50	0.90	64.01
	0.700	1	380.04	1.06	64.88	132.98	1.00	60.51
	0.700	2	375.87	0.62	98.20	146.57	0.67	40.65
	0.700	3	375.97	1.02	62.66	8.66	0.91	61.68

0	TIME (SEC)	BUS NO.	ROTOR SPEED	V BEHIND T. REACT	ROTOR ANGLE (DEGR)	GEN. OUTPUT (MW)	BUS VOLTAGE	BUS ANGLE (DEGR)
	0.750	1	379.74	1.06	73.21	156.43	1.00	68.06
	0.750	2	376.23	0.62	95.45	131.23	0.68	40.28
	0.750	3	378.60	1.02	63.41	-2.13	0.92	63.65
	0.800	1	379.39	1.06	80.58	161.59	1.00	75.27
	0.800	2	376.80	0.61	94.04	117.46	0.69	41.10
	0.800	3	381.16	1.02	71.80	12.39	0.92	70.43
	0.850	1	379.05	1.06	86.95	149.94	1.01	82.03
	0.850	2	377.55	0.61	94.54	107.84	0.70	43.20
	0.850	3	382.92	1.02	86.54	48.05	0.93	81.24
	0.900	1	378.78	1.06	92.43	126.90	1.01	88.27
	0.900	2	378.39	0.61	97.33	105.65	0.70	46.38
	0.900	3	383.39	1.02	104.54	92.33	0.92	94.24
	0.950	1	378.61	1.06	97.28	101.59	1.00	93.94
	0.950	2	379.19	0.61	102.52	113.06	0.70	50.23
	0.950	3	382.54	1.02	121.93	129.69	0.90	107.10
	1.000	1	378.53	1.06	101.79	82.19	1.00	99.07
	1.000	2	379.82	0.61	109.78	130.17	0.69	54.33
	1.000	3	380.76	1.02	135.43	150.84	0.89	117.78
	1.050	1	378.51	1.06	106.16	72.64	1.00	103.76
	1.050	2	380.12	0.61	118.40	155.57	0.69	58.29
	1.050	3	378.60	1.02	143.16	154.38	0.88	124.96
	1.100	1	378.51	1.06	110.52	74.01	1.00	108.07
	1.100	2	380.01	0.60	127.32	185.96	0.69	61.71
	1.100	3	376.58	1.02	144.78	141.77	0.89	128.24
	1.150	1	378.48	1.06	114.84	85.14	1.00	112.03
	1.150	2	380.04	0.60	136.09	175.01	0.68	71.68
	1.150	3	375.19	1.02	141.41	114.88	0.90	128.27
	1.200	1	378.39	1.06	118.99	102.23	1.00	115.63
	1.200	2	379.64	0.59	144.36	204.83	0.67	74.23
	1.200	3	374.80	1.02	135.42	79.13	0.91	126.50
	1.250	1	378.24	1.06	122.80	119.28	1.00	118.88
	1.250	2	378.87	0.57	150.90	223.54	0.65	76.13
	1.250	3	375.52	1.02	129.94	46.80	0.91	124.68
	1.300	1	378.02	1.06	126.08	130.05	1.00	121.79
	1.300	2	377.93	0.56	154.94	227.79	0.64	77.46
	1.300	3	377.04	1.02	127.77	29.27	0.90	124.47
	1.350	1	377.78	1.06	128.69	131.15	1.00	124.37
	1.350	2	377.01	0.54	156.29	220.21	0.63	78.34
	1.350	3	378.80	1.02	130.46	31.51	0.90	126.89
	1.400	1	377.56	1.06	130.63	122.59	1.00	126.59
	1.400	2	376.28	0.53	155.25	203.67	0.62	78.94
	1.400	3	380.20	1.02	137.80	51.98	0.90	131.90
	1.450	1	377.39	1.06	132.00	107.65	1.00	128.45
	1.450	2	375.85	0.52	152.52	180.76	0.62	79.37
	1.450	3	380.76	1.02	148.03	83.36	0.90	138.48
	1.500	1	377.28	1.06	132.96	92.03	1.00	129.92
	1.500	2	375.76	0.51	149.03	156.51	0.62	79.58
	1.500	3	380.30	1.02	158.41	114.66	0.88	145.03
	1.550	1	377.22	1.06	133.68	81.21	0.99	130.99
	1.550	2	376.01	0.50	145.81	137.04	0.61	79.54
	1.550	3	379.00	1.02	166.19	136.60	0.87	149.91
	1.600	1	377.19	1.06	134.29	78.16	0.99	131.69
	1.600	2	376.49	0.50	143.64	125.89	0.61	79.27
	1.600	3	377.21	1.02	169.45	145.28	0.86	151.94

LEJEMPL0 ANDERSON & FOUND. PAG,386

0	TIME (SEC)	BUS NO.	ROTOR SPEED	V BEHIND T. REACT	ROTOR ANGLE (DEGR)	GEN. OUTPUT (MW)	BUS VOLTAGE	BUS ANGLE (DEGR)
	1.650	1	377.15	1.06	134.81	83.67	0.99	132.04
	1.650	2	377.06	0.50	143.02	123.75	0.61	78.83
	1.650	3	375.37	1.02	167.40	140.06	0.87	150.62
	1.700	1	377.08	1.06	135.19	97.14	1.00	131.98
	1.700	2	377.60	0.50	144.02	129.98	0.61	78.30
	1.700	3	373.90	1.02	160.50	121.03	0.88	146.29
	1.750	1	376.94	1.06	135.27	115.75	1.00	131.45
	1.750	2	378.00	0.49	146.39	142.56	0.61	77.76
	1.750	3	373.23	1.02	150.47	90.62	0.89	140.03
	1.800	1	376.73	1.06	134.85	133.80	1.00	130.44
	1.800	2	378.20	0.49	149.62	157.16	0.60	77.38
	1.800	3	373.59	1.02	139.95	56.88	0.90	133.46
	1.850	1	376.46	1.06	133.73	144.82	1.00	128.95
	1.850	2	378.19	0.48	153.11	168.70	0.59	77.33
	1.850	3	374.91	1.02	131.90	31.24	0.89	128.33
	1.900	1	376.16	1.06	131.78	144.53	1.00	127.00
	1.900	2	378.06	0.47	156.38	174.71	0.57	77.74
	1.900	3	376.78	1.02	128.55	22.16	0.89	126.00
	1.950	1	375.89	1.06	129.02	131.73	1.00	124.66
	1.950	2	377.87	0.46	159.18	175.69	0.56	78.63
	1.950	3	378.65	1.02	130.69	31.79	0.88	127.01
	2.000	1	375.70	1.06	125.57	108.18	1.00	121.99
	2.000	2	377.70	0.45	161.45	172.80	0.55	79.95
	2.000	3	379.96	1.02	137.50	56.31	0.88	130.92

OTRANSIENT STABILITY CHECK INDICATES CASE STABLE. ADVANCE TO NEXT CASE.
LEND OF JOB

d) Con Sistema de Excitación Estático

• Archivo de datos:

```

6          STABILITY CRITERIA CARD
-1.  10.  -5.99999.  -1.99999.  2.0  2.01
8          GENERATOR DATA CARDS
 1  9.57 0.0000 0.0608 0.1460 0.0969 0.0336 8.9600      247.
 2  3.33 0.0000 0.1198 0.8958 0.8645 0.0521 6.0000 0.0020 9.8100 192.
 3  2.35 0.0000 0.1813 1.3125 1.2578 0.0742 5.8900      128.
999
9          EXCITER DATA CARDS
 1
 2  6 120. 0.15 1.20-1.20 0.02 0.60 1.0 0.05 0.00 0.00 0.20 1.190 2.780 2.62
 3
999
11         PERFORM STABILITY STUDY
1 1 2.1 0.001 .050 .05 7 1
1 2 2.1 0.001 2.1 .05 7 2 5 1
12

```

• Archivo de resultados:

1EJEMPLO ANDERSON & FOUND. PAG,354

0 GENERATOR ACTIVE AND REACTIVE OUTPUTS

BUS NO.	MW	MVAR
1	71.680	27.380
2	163.000	6.700
3	85.000	-10.900

0STABILITY CRITERIA DATA:

```

MINIMUM ACCEPTABLE DEMAND/GENERATOR RATIO----- -1.000
MAXIMUM ACCEPTABLE DEMAND/GENERATOR RATIO----- 10.000
MINIMUM STEADY STATE ANG. DIFF. BETWEEN PAIR OF GEN. BUSES ----- -0.500
MAXIMUM STEADY STATE ANG. DIFF. BETWEEN PAIR OF GEN. BUSES -----#####
MINIMUM TRANSIENT STATE ANG. DIFF. BETWEEN PAIR OF MACHINE ROTORS- -1.000
MAXIMUM TRANSIENT STATE ANG. DIFF. BETWEEN PAIR OF MACHINE ROTORS-#####
MINIMUM THRESHOLD TIME FOR TRANSIENT STABILITY CHECK ----- 2.000
MAXIMUM THRESHOLD TIME FOR TRANSIENT STABILITY CHECK ----- 2.010

```

1EJEMPLO ANDERSON & FOUND. PAG,354

SYNCHRONOUS MACHINE DATA

BUS BASE

No.	100 MVA	RA(PU)	XDS(PU)	XD(PU)	XQ(PU)	XL(PU)	TDO(sec)	MVA-G
1	23.6	0.0000	0.0608	0.1460	0.0969	0.0336	8.9600	247.0
2	6.4	0.0000	0.1198	0.8958	0.8645	0.0521	6.0000	192.0
3	3.0	0.0000	0.1813	1.3125	1.2578	0.0742	5.8900	128.0

EXCITER DATA

BUS

No. =>GENERADOR SIN SISTEMA DE EXCITACION<=

1

BUS

No.	TIPO	KA	TA	VRMAX	VRMIN	VIMAX	VIMIN	KF	TF	KE	TE
2	6	120.00	0.15	1.20	-1.20	0.00	0.00	0.02	0.60	1.00	0.05
		KP	KI	EFDMAX	EFDL						
		1.190	2.620	2.78	0.00						

BUS

No. =>GENERADOR SIN SISTEMA DE EXCITACION<=

3

1EJEMPLD ANDERSON & FOUND. PAG,354

OSTABILITY SEGMENT CARD NO. 1 ,CASE NO. 1 READ -

AMAX= 1.073 STANGL=-0.009 STANGH=1745.312

OSTEADY STATE ANGULAR SEPARATION BETWEEN EACH PAIR OF MACHINE NETWORK BUSES
LIES WITHIN INCONCLUSIVE BAND - CASE STUDY CONTINUING.

0	TIME (SEC)	BUS NO.	ROTOR SPEED	V BEHIND T. REACT	ROTOR ANGLE (DEGR)	GEN. OUTPUT (MW)	BUS VOLTAGE	BUS ANGLE (DEGR)
	0.000	1	376.99	1.06	2.27	67.95	0.85	-0.36
	0.000	2	376.99	0.79	61.11	0.00	0.27	61.11
	0.000	3	376.99	1.02	13.20	38.25	0.62	6.90
	0.050	1	377.01	1.06	2.30	65.52	0.85	-0.24
	0.050	2	379.39	0.78	64.55	0.00	0.27	64.55
	0.050	3	378.43	1.02	15.28	40.58	0.62	8.59

OSTABILITY SEGMENT CARD NO. 2 ,CASE NO. 1 READ -

0.100	1	377.03	1.06	2.37	55.33	0.99	0.53
0.100	2	379.76	0.78	72.04	150.28	0.73	25.94
0.100	3	380.60	1.02	22.58	22.98	0.89	19.96
0.150	1	377.15	1.06	2.63	27.49	0.98	1.71
0.150	2	379.76	0.78	80.06	174.65	0.73	30.13
0.150	3	382.15	1.02	35.34	49.58	0.88	29.58
0.200	1	377.39	1.06	3.40	-1.07	0.97	3.44
0.200	2	379.43	0.78	87.60	195.28	0.73	34.50
0.200	3	382.76	1.02	51.24	81.31	0.86	41.54
0.250	1	377.72	1.06	4.99	-22.80	0.96	5.78
0.250	2	378.84	0.78	93.81	209.64	0.73	38.48
0.250	3	382.42	1.02	67.50	109.65	0.83	53.94
0.300	1	378.13	1.06	7.66	-34.96	0.94	8.88
0.300	2	378.10	0.77	98.07	216.68	0.73	41.56
0.300	3	381.30	1.02	81.60	130.69	0.81	64.89
0.350	1	378.56	1.06	11.53	-39.18	0.94	12.91
0.350	2	377.30	0.77	100.09	216.80	0.73	43.37
0.350	3	379.63	1.02	91.66	144.83	0.80	72.76
0.400	1	379.00	1.06	16.67	-37.32	0.94	17.97
0.400	2	376.54	0.77	99.85	211.18	0.74	43.78
0.400	3	377.61	1.02	96.38	153.06	0.80	76.50
0.450	1	379.42	1.06	23.04	-27.68	0.95	24.00
0.450	2	375.90	0.77	97.60	201.09	0.75	42.85
0.450	3	375.44	1.02	95.06	153.38	0.83	75.77
0.500	1	379.78	1.06	30.54	-4.40	0.97	30.69
0.500	2	375.43	0.77	93.75	187.63	0.77	40.84
0.500	3	373.47	1.02	87.70	139.48	0.87	71.09

0.550	1	380.00	1.06	38.88	37.56	0.99	37.64
0.550	2	375.18	0.77	88.86	171.94	0.78	38.17
0.550	3	372.25	1.02	75.61	104.93	0.91	63.81
0.600	1	380.03	1.06	47.61	92.88	1.01	44.57
0.600	2	375.17	0.77	83.60	155.35	0.79	35.38
0.600	3	372.40	1.02	61.86	53.99	0.94	56.01
0.650	1	379.84	1.06	56.09	144.77	1.01	51.36
0.650	2	375.40	0.77	78.66	139.14	0.80	33.08
0.650	3	374.16	1.02	50.87	6.10	0.95	50.22
0.700	1	379.47	1.06	63.76	178.76	1.01	57.90
0.700	2	375.87	0.78	74.73	124.23	0.81	31.76
0.700	3	377.09	1.02	46.79	-18.12	0.95	48.73

IEJEMPLD ANDERSON & FOUND. PAG,354

0	TIME	BUS	ROTOR	V BEHIND	ROTOR	GEN.	BUS	BUS
	(SEC)	NO.	SPEED	T. REACT	ANGLE	OUTPUT	VOLTAGE	ANGLE
					(DEGR)	(MW)		(DEGR)
0.750	1	379.01	1.06	70.22	190.64	1.01	63.98	
0.750	2	376.53	0.79	72.42	111.67	0.82	31.71	
0.750	3	380.28	1.02	51.71	-9.62	0.96	52.73	
0.800	1	378.55	1.06	75.35	181.33	1.01	69.43	
0.800	2	377.36	0.79	72.26	103.53	0.84	33.08	
0.800	3	382.70	1.02	64.89	29.26	0.97	61.80	
0.850	1	378.16	1.06	79.24	155.21	1.01	74.18	
0.850	2	378.25	0.80	74.58	103.20	0.85	35.71	
0.850	3	383.60	1.02	82.94	84.59	0.97	73.96	
0.900	1	377.89	1.06	82.18	122.76	1.01	78.18	
0.900	2	379.06	0.81	79.40	114.19	0.85	39.17	
0.900	3	382.78	1.02	101.08	134.75	0.95	86.42	
0.950	1	377.75	1.06	84.54	95.73	1.01	81.40	
0.950	2	379.63	0.82	86.22	137.26	0.85	42.93	
0.950	3	380.70	1.02	114.91	164.54	0.93	96.55	
1.000	1	377.69	1.06	86.60	80.56	1.01	83.96	
1.000	2	379.77	0.82	94.11	170.44	0.85	46.48	
1.000	3	378.05	1.02	121.77	170.60	0.93	102.61	
1.050	1	377.66	1.06	88.55	79.30	1.01	85.96	
1.050	2	379.38	0.82	101.66	209.47	0.85	49.28	
1.050	3	375.56	1.02	121.12	154.61	0.94	104.02	
1.100	1	377.61	1.06	90.41	91.76	1.01	87.41	
1.100	2	378.42	0.82	107.26	244.97	0.86	50.83	
1.100	3	373.88	1.02	114.36	120.51	0.95	101.35	
1.150	1	377.49	1.06	92.02	113.07	1.01	88.34	
1.150	2	377.73	0.82	110.41	219.18	0.85	56.89	
1.150	3	373.43	1.02	104.48	77.18	0.97	96.29	
1.200	1	377.28	1.06	93.16	134.34	1.01	88.79	
1.200	2	376.80	0.82	111.24	230.55	0.85	56.41	
1.200	3	374.31	1.02	95.26	39.33	0.97	91.11	
1.250	1	377.00	1.06	93.60	148.29	1.01	88.77	
1.250	2	375.83	0.82	109.28	224.08	0.85	55.14	
1.250	3	376.08	1.02	89.98	22.12	0.97	87.65	
1.300	1	376.68	1.06	93.17	151.49	1.01	88.23	
1.300	2	375.08	0.82	104.80	201.31	0.85	53.32	
1.300	3	377.97	1.02	90.14	31.47	0.97	86.83	
1.350	1	376.37	1.06	91.83	144.40	1.01	87.14	
1.350	2	374.74	0.82	98.73	169.47	0.86	51.26	
1.350	3	379.20	1.02	94.94	62.96	0.97	88.31	

1.400	1	376.11	1.06	89.68	131.05	1.01	85.41
1.400	2	374.88	0.82	92.38	139.17	0.86	49.23
1.400	3	379.26	1.02	101.66	102.94	0.97	90.71
1.450	1	375.90	1.06	86.84	117.81	1.01	83.00
1.450	2	375.40	0.83	87.00	118.35	0.87	47.38
1.450	3	378.16	1.02	106.82	135.16	0.95	92.20
1.500	1	375.74	1.06	83.47	109.84	1.01	79.89
1.500	2	376.14	0.84	83.47	108.67	0.87	45.82
1.500	3	376.31	1.02	107.62	149.47	0.95	91.30
1.550	1	375.59	1.06	79.66	109.14	1.01	76.11
1.550	2	376.95	0.84	82.19	109.70	0.88	44.63
1.550	3	374.34	1.02	102.79	142.65	0.95	87.33
1.600	1	375.43	1.06	75.42	114.55	1.01	71.69
1.600	2	377.66	0.85	83.12	122.01	0.88	43.86
1.600	3	372.91	1.02	92.94	115.15	0.97	80.69

IEJEMPLD ANDERSON & FOUND. PAG,354

0	TIME	BUS	ROTOR	V BEHIND	ROTOR	GEN.	BUS	BUS
	(SEC)	NO.	SPEED	T. REACT	ANGLE	OUTPUT	VOLTAGE	ANGLE
					(DEGR)	(MW)		(DEGR)
	1.650	1	375.24	1.06	70.68	121.77	1.02	66.73
	1.650	2	378.10	0.86	85.75	145.07	0.88	43.51
	1.650	3	372.60	1.02	80.49	73.69	0.98	72.76
	1.700	1	375.03	1.06	65.38	124.40	1.01	61.33
	1.700	2	378.16	0.86	89.12	173.31	0.87	43.57
	1.700	3	373.60	1.02	69.05	34.28	0.97	65.45
	1.750	1	374.84	1.06	59.48	117.06	1.01	55.67
	1.750	2	377.82	0.86	92.07	196.97	0.86	43.87
	1.750	3	375.57	1.02	62.01	14.05	0.96	60.52
	1.800	1	374.69	1.06	53.08	97.78	1.01	49.88
	1.800	2	377.22	0.86	93.63	208.52	0.85	44.14
	1.800	3	377.76	1.02	61.13	20.65	0.96	58.93
	1.850	1	374.64	1.06	46.39	68.73	1.01	44.13
	1.850	2	376.55	0.86	93.31	206.06	0.85	44.11
	1.850	3	379.36	1.02	65.85	50.62	0.95	60.40
	1.900	1	374.72	1.06	39.73	36.92	1.00	38.51
	1.900	2	376.01	0.86	91.22	192.52	0.85	43.67
	1.900	3	379.80	1.02	73.58	91.78	0.94	63.51
	1.950	1	374.91	1.06	33.47	11.13	0.99	33.10
	1.950	2	375.70	0.86	87.90	174.39	0.85	42.72
	1.950	3	378.98	1.02	80.72	128.59	0.92	66.23
	2.000	1	375.18	1.06	27.88	-3.86	0.98	28.01
	2.000	2	375.66	0.86	84.09	158.18	0.85	41.25
	2.000	3	377.22	1.02	84.07	150.58	0.90	66.68

TRANSIENT STABILITY CHECK INDICATES CASE STABLE. ADVANCE TO NEXT CASE.
 1END OF JOB

BIBLIOGRAFIA

- [1] Stagg & El Abiad, "Computer Methods in Power System Analysis", Mc Graw-Hill Book Company, 1st Ed, New York 1968
- [2] Anderson and Found, "Power Systems Control and Stability", Vol I, Science Press 1977.
- [3] Westinghouse, "Electrical Transmission and Distribution Reference Book", Pisttsburg 4th Ed, 1964.
- [4] Stevenson, W, "Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia", Mc Graw- Hill Book Company 2nd Ed, New York 1968.
- [5] Kimbark, E.W, "Power System Stability", Vol I, 1st Ed, John Wiley and Sons Inc, Londres, 1970.
- [6] IEEE Committee Report, "Proposed Excitation Systems Definitions for Synchronous Machine", IEEE Trans on PAS-88 N.8, pp. 1248-1258, August, 1969.
- [7] Ogatta, K, "Ingeniería de Control Moderno", Prentice - Hall, 1era Edición, 1991.
- [8] Enríquez, Harper, "Análisis Moderno de los Sistemas Eléctricos de Potencia", Editorial Limusa, 1977
- [9] Samaniego, Julio, "Sistemas de Excitación Modelos y Simulación", Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, Junio, 1978
- [10] IEEE Committee Report, "Excitation Systems Models for Power Systems Stability Studies", IEEE Trans on PAS-100 N.2, pp. 494-509, February, 1981.
- [11] Gómez, Fernando, "Programa para el Cálculo de Estabilidad Transitoria de Sistemas Eléctricos de Potencia", Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, Julio, 1978.
- [12] Argüello, Gabriel, "Análisis y Control de Sistemas Eléctricos de Potencia", INECEL- EPN Marzo 1988.
- [13] Cushicondor, Ramiro, "Métodos de Simulación de Máquinas Síncronas para Estudios de Estabilidad Transitoria en SEP", Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, Junio, 1983

- [14] Quizanga, Marco, "Programa Digital de Estabilidad Transitoria en Sistemas Eléctricos de Potencia utilizando un método de Predicción - Error", Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, Julio, 1985.
- [15] Elgerd, O.I, "Electric Energy Systems Theory", Mc Graw-Hill Book Company 1st Ed, New York 1971.
- [16] Rivera, Pablo, "Estudio de los Sistemas de Excitación y Reguladores de Voltaje de las Máquinas Síncronas", Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, Julio, 1986.
- [17] Gordon, D & Thomas, R, "Fortran 77: Un Estilo Estructurado y Disciplinado", Mc Graw-Hill Book Company, 1st Ed, New York 1990.
- [18] McCracken, Daniel, "Programación Fortran IV", Limusa-Wiley, 1era Edición, New York, 1967.
- [19] Dorf, R, "Sistemas Automáticos de Control", Fondo Educativo Interamericano, S.A, 1978.
- [20] Moon Y. H., Lee W.J. and Chen M.S, "Dynamic Stability Analysis and Control of Power Systems", Analysis and Control System Techniques For Electric Power Systems, Vol 43, Ed Academic Press Inc, 1991.
- [21] Gross Charles, "Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia", Editorial Interamericana, 1982.