

26  
28.



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN

RECEIVED  
FEB 10 1982

## ANALISIS DINAMICO Y SINTONIZACION DEL SISTEMA DE CONTROL DE EXCITACION DE TURBOGENERADORES

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**INGENIERO            MECANICO            ELECTRICISTA**

**P R E S E N T A :**

**IGNACIO            JAVIER            SANCHEZ            PARTIDA**

CUAUTITLAN IZCALTLI, ESTADO DE MEXICO

1982

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# I N D I C E

	PAG:
INDICE. . . . .	1
LISTA DE FIGURAS. . . . .	iii
LISTA DE TABLAS. . . . .	v
INTRODUCCION. . . . .	1
CAPITULO 1 GENERALIDADES	
1.1 ANTECEDENTES. . . . .	4
1.2 DEFINICION DE TERMINOS BASICOS. . . . .	7
1.3 FUNCION DEL SISTEMA DE EXCITACION. . . . .	10
1.4 HIPOTESIS DE ANALISIS. . . . .	13
CAPITULO 2 MODELADO DEL SISTEMA DE CONTROL DE EXCITACION	
2.1 FORMULACION DEL MODELO. . . . .	15
2.2 MODELADO DEL REGULADOR AUTOMATICO DE VOLTAJE (RAV). . . . .	16
2.2.1 Análisis Del Regulador. . . . .	16
2.2.2 Análisis Del Estabilizador. . . . .	22
2.2.3 Análisis Del Comparador. . . . .	26
2.2.4 Análisis Del Transductor De Voltaje. . . . .	27
2.3 MODELADO DE LA PLANTA. . . . .	29
2.3.1 Análisis Del Excitador. . . . .	29
2.3.2 Análisis Del Generador. . . . .	32
2.4 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA. . . . .	34
2.4.1 Funciones De Transferencia Del Sistema. . . . .	37

### CAPITULO 3 ANALISIS DINAMICO DEL SISTEMA DE CONTROL DE EXCITACION

3.1	INTRODUCCION. . . . .	39
3.2	ESPECIFICACIONES. . . . .	40
3.3	ANALISIS DEL ERROR EN ESTADO ESTABLE. . . . .	41
3.4	ANALISIS DE SENSIBILIDAD PARAMETRICA. . . . .	42
3.5	SENSIBILIDAD DE LOS PARAMETROS DEL CONTROLADOR. . . . .	43
3.5.1	Análisis De Sensibilidad Del Regulador. . . . .	43
3.5.2	Análisis De Sensibilidad Del Estabilizador. . . . .	49
3.5.3	Análisis De Sensibilidad Del Comparador. . . . .	56
3.6	SENSIBILIDAD DE LOS PARAMETROS DE LA PLANTA. . . . .	60
3.6.1	Análisis De Sensibilidad Del Excitador. . . . .	60
3.6.2	Análisis De Sensibilidad Del Generador. . . . .	63
3.7	ANALISIS DE RESPUESTA EN FRECUENCIA. . . . .	66
3.7.1	Estudio De Los Diagramas De Bode. . . . .	66

### CAPITULO 4 SINTONIZACION DEL SISTEMA DE CONTROL DE EXCITACION

4.1	PRINCIPIO DE SINTONIZACION. . . . .	71
4.1.1	El Problema De La Sintonización. . . . .	71
4.1.2	Utilidad De Un Método De Sintonización. . . . .	73
4.2	METODOS GENERALES DE SINTONIZACION. . . . .	74
4.2.1	Método De La Curva De Reacción. . . . .	74
4.2.2	Método De Ziegler-Nichols. . . . .	79
4.2.3	Criterios De Sintonización Basados En Métodos Integrales. . . . .	80
4.3	METODO DE SINTONIZACION EN CAMPO. . . . .	80
4.3.1	Técnica De Sintonización. . . . .	81

CONCLUSIONES Y RESULTADOS. . . . .	84
------------------------------------	----

BIBLIOGRAFIA. . . . .	88
-----------------------	----

APENDICE A SISTEMA DE CONTROL DE EXCITACION EN POR UNIDAD. . . . .	92
--	----

APENDICE B MEMORIA DE CALCULOS DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA. . . . .	96
---	----

#### APENDICE C PROGRAMA DE COMPUTACION CC.

C.1	INTRODUCCION. . . . .	100
C.2	PROGRAMAS CC .MAC. . . . .	101
C.3	EXPRESIONES MATEMATICAS. . . . .	104
C.4	TABLAS DE LOS LUGARES DE LAS RAICES. . . . .	119



## LISTA DE FIGURAS.

FIGURA:	TITULO:	PAG:
1.1	Configuración del Sistema de Control de Excitación Tipo Alternador Rectificador sin Escobillas. . . . .	9
1.2	Principales Lazos de Control de una Unidad Generadora Geotérmica. . . . .	10
2.1	Diagrama Funcional del Sistema de Control de Excitación. . . . .	17
2.2	Representación del Preamplificador. . . . .	18
2.3	Puente Rectificador Controlado Trifásico. . . . .	19
2.4	Diagrama del Circuito Estabilizador. . . . .	24
2.5	Representación del Comparador. . . . .	26
2.6	Circuito Transductor de Voltaje. . . . .	27
2.7	Diagrama del Excitador. . . . .	30
2.8	Modelo del Excitador. . . . .	31
2.9	Diagrama del Generador. . . . .	33
2.10	Modelo del Sistema de Control de Excitación. (A) Forma General. (B) Cambiando el Punto de Bifurcación del Excitador al Generador. (C) Forma Canonica. . . . .	35
3.1	Respuesta Transitoria para Variación de la Ganancia del Regulador, sin el Estabilizador. . . . .	45
3.2	Respuesta Transitoria para Variación de la Ganancia del Regulador, con el Estabilizador Conectado. . . . .	46
3.3	Lugar de las Raíces para Variación de la Ganancia del Regulador, sin el Estabilizador. . . . .	47

3.4	Lugar de las Raíces para Variación de la Ganancia del Regulador, con el Estabilizador Conectado. . . . .	48
3.5	Respuesta Transitoria para Variación de la Ganancia del Estabilizador. . . . .	50
3.6	Lugar de las Raíces para Variación de la Ganancia del Estabilizador. . . . .	51
3.7	Respuesta Transitoria para Variación de la Constante de Tiempo del Estabilizador. . . . .	54
3.8	Lugar de las Raíces para Variación de la Constante de Tiempo del Estabilizador. . . . .	55
3.9	Diagrama del Circuito Comparador. . . . .	56
3.10	Característica de Detección de Error del Circuito Comparador. . . . .	57
3.11	Característica de Detección de Error para la Operación del 90R. . . . .	59
3.12	Respuesta Transitoria para Variación de la Constante de Tiempo del Excitador. . . . .	61
3.13	Lugar de las Raíces para Variación de la Constante de Tiempo del Excitador. . . . .	62
3.14	Respuesta Transitoria para Variación de la Constante de Tiempo del Generador. . . . .	64
3.15	Lugar de las Raíces para Variación de la Constante de Tiempo del Generador. . . . .	65
3.16	Respuesta en Frecuencia del Sistema de Control de Excitación en Lazo Abierto. . . . .	69
3.17	Respuesta en Frecuencia del Sistema de Control de Excitación en Lazo Cerrado. . . . .	70
4.1	Configuración del sistema de control de excitación para la Obtención de la Curva de Reacción del Proceso. . . . .	76
4.2	Curva de Reacción del Sistema de Control de Excitación. . . . .	77

## LISTA DE TABLAS.

TABLA:	TITULO:	PAG:
2.1	Valores de Ganancias del Sistema de Control de Excitación. . . . .	36
2.2	Constantes de Tiempo del Sistema de Control de Excitación. . . . .	37
3.1	Especificaciones de los Sistemas de Control de Excitación. . . . .	40
3.2	Error en Estado Estable del Sistema de Control de Excitación. . . . .	42
3.3	Indices para los Sistemas de Control Realimentados. . . . .	68
C.1	Información del Lugar de las Raíces de la Figura 3.3. . . . .	120
C.2	Información del Lugar de las Raíces de la Figura 3.4. . . . .	121
C.3	Información del Lugar de las Raíces de la Figura 3.6. . . . .	122
C.4	Información del Lugar de las Raíces de la Figura 3.8. . . . .	123
C.5	Información del Lugar de las Raíces de la Figura 3.13. . . . .	124
C.6	Información del Lugar de las Raíces de la Figura 3.15. . . . .	125

## INTRODUCCION.

El estudio realizado en este trabajo es una de las etapas del diseño de un prototipo de un Regulador Automático de Voltaje (RAV) para el control de excitación de turbogeneradores. Este RAV fue diseñado y construido en el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), por haber sido considerado como intransferible dentro del proyecto de asimilación de la tecnología para turbogeneradores geotérmicos de 5 MW, proyecto que se realiza entre el IIE y la empresa Toshiba.

Los objetivos del presente trabajo son efectuar un estudio para el modelado, análisis dinámico y sintonización del RAV diseñado en el IIE, apeándose a las especificaciones de CFE [2] y a las normas de la IEEE [3,4,5], y desarrollar herramientas de análisis para el estudio de otros sistemas de excitación.

Como primer paso en el capítulo 1 se describen los antecedentes del proyecto y se analiza en forma general el sistema de control de excitación con el fin de conocer las diferentes condiciones de operación y establecer los objetivos que debe cumplir.

En el capítulo 2 se estudia cada parte del sistema de control de excitación y se obtiene el modelo matemático y las funciones de transferencia correspondientes.

En el capítulo 3 se analiza el sistema de control de excitación para establecer los diferentes efectos que se introducen cuando varían los parámetros de la planta y del controlador, obteniendo para ello las respuestas transitorias y los lugares de las raíces correspondientes. Este estudio es complementado utilizando las técnicas de respuesta en frecuencia en donde se analizan los diagramas de Bode. Además, se menciona el uso de un sistema de Diseño Auxiliado por Computadora (CAD), como herramienta auxiliar en el estudio de la parte de control.

En el capítulo 4 se presenta un bosquejo del problema de la sintonización, se analizan las diferentes técnicas y métodos de sintonización para, en base a estos criterios y al análisis de sensibilidad paramétrica efectuado en el capítulo 3, desarrollar una técnica de sintonización para el sistema de control de excitación.

En las conclusiones se establece que en el trabajo realizado se consideró al sistema de control de excitación como un sistema de control automático convencional. Por lo tanto esta metodología de análisis puede ser aplicada al estudio de otros sistemas de excitación.

## CAPITULO 1

### GENERALIDADES

#### 1.1 ANTECEDENTES.

La creciente demanda de energía eléctrica, ha generado la necesidad de diversificar las fuentes de energía. Afortunadamente, nuestro país cuenta con un considerable potencial geotérmico que la Comisión Federal de Electricidad (CFE) está tratando de aprovechar [1].

Actualmente existe una capacidad geotérmica instalada de 645 MW; se espera que para fines del siglo se incremente la capacidad a 2400 MW.

Para lograr la meta planteada, la CFE ha establecido como estrategia utilizar turbogeneradores móviles de baja capacidad que operan a boca de pozo, como paso previo a la instalación de centrales de gran capacidad (de más de 30MW).

La razón fundamental, es que los equipos móviles se alimentan de un solo pozo y no requieren de una infraestructura civil y mecánica considerable para su instalación y operación. Con ellos, puede empezarse a

generar electricidad en las etapas tempranas de desarrollo de un campo geotérmico, antes de conocer con mayor precisión su potencial y decidir instalar en él una central de mayor capacidad. Esto permite una recuperación más rápida de las inversiones efectuadas, principalmente en la perforación y terminación de pozos. Además los turbogeneradores geotérmicos a boca de pozo pueden trasladarse de un lugar a otro, en caso de que se instale una central de mayor capacidad o que la producción del pozo que los alimenta se reduzca o termine.

Por ello, la CFE pidió al Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) que llevara a cabo un proyecto de transferencia para asimilar la tecnología de turbogeneradores geotérmicos.

El objetivo del proyecto de transferencia de la tecnología es desarrollar la capacidad que haga posible el diseño y fabricación en México de turbogeneradores geotérmicos de 3, 5 y 7 MW, alcanzando calidad, precios competitivos y el mayor grado de integración nacional.

Para ello, se realizó un concurso internacional, en el que el IIE especificó la compra de un paquete tecnológico para el diseño y fabricación de estos equipos, junto con una unidad muestra.

El concurso fué ganado por la compañía Toshiba, Co. El contrato de transferencia comprende el suministro de documentación para diseño, pruebas, instalación, operación y



mantenimiento; asistencia técnica; el seguimiento de especialistas mexicanos del proceso de fabricación de una máquina muestra de 5 MW en las instalaciones de Toshiba y el apoyo técnico para fabricar en México una máquina prototipo de las mismas características.

La asimilación de la tecnología es en esencia un proceso de aprendizaje. Se pretende entonces conseguir el conocimiento completo de la información suministrada, expresarla en forma de manuales de diseño y manufactura, que representarán uno de los principales resultados de la asimilación.

Para ello, se formaron tres grupos de especialistas en la División de Equipos del Instituto de Investigaciones Eléctricas: el grupo de la turbina, el del generador y el de manufactura.

El grupo del generador subcontrató al Departamento de Electrónica, del Instituto de Investigaciones Electricas para que se encargará de diseñar y construir el Control de Excitación para Turbogeneradores de 5 MW, puesto que este no fue transferido dentro del paquete de Asimilación de la Tecnología. Por lo tanto los investigadores del Departamento de Electrónica encargados de este proyecto tuvieron que enfrentar el problema del diseño de un prototipo de un regulador automático de voltaje. Este prototipo, una vez terminado, se integrará al paquete de tecnología de turbogeneradores que actualmente se encuentra en proceso de transferencia en el IIE.

El trabajo de tesis se ubica en la fase de pruebas del regulador automático de voltaje de este proyecto y comprende el modelado, análisis dinámico y sintonización del sistema de control de excitación y está enfocado primeramente al control de la máquina Toshiba de 5 MW, aunque se pretende que este estudio sea extensivo al análisis de otros sistemas de control de excitación.

## 1.2 DEFINICION DE TERMINOS BASICOS.

Se describe en esta sección el sistema, tomando como base los criterios estándares de la IEEE [3,4], con el fin de definir los componentes de un sistema de excitación y la terminología relacionada. Se pretende de esta manera unificar conceptos para lograr claridad en la comunicación.

El sistema de control de excitación es un sistema de control realimentado que comprende a la máquina síncrona y al excitador como planta o proceso y al Regulador Automático de Voltaje (RAV) como sistema de control y fuente de la variable manipulada. El sistema de control de excitación lo constituyen: el sistema de excitación y la máquina síncrona o generador.

El sistema de excitación constituye la fuente de corriente de campo de la máquina síncrona y comprende las siguientes partes: el RAV, el excitador y el control manual.

El control manual permite operar al sistema de excitación durante el arranque o algunos transitorios de la máquina, dejando fuera al regulador automático de voltaje. Cabe hacer notar que el RAV y el control manual nunca operan en forma simultánea.

El RAV es el elemento principal del sistema de excitación cuando se opera en automático y está asociado también a la palabra controlador por ser donde se encuentran los circuitos que manipulan el funcionamiento.

El RAV relaciona las variables de salida de la máquina síncrona con las variables del excitador, mediante realimentación y elementos de control, con el fin de regular el sistema. Cada uno de estos elementos está compuesto por diversos bloques según se ve en la figura 1.1.

La parte electrónica del sistema de excitación es el RAV que está formado por el comparador, transductor de voltaje, preamplificador, amplificador de potencia, estabilizador etc. Cuando el sistema está conectado a la red, se convierte en un sistema de control multivariable interviniendo otros elementos, como se observa en la figura 1.1. La configuración del RAV es independiente en gran medida, del tipo de excitador que se utilice.

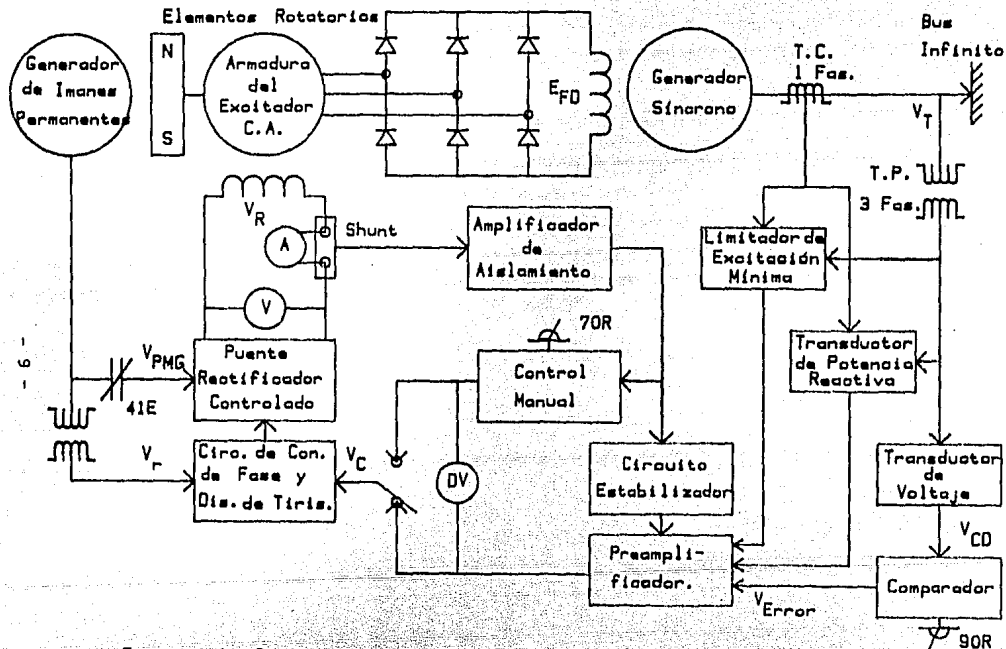


Figura 1.1 Configuración del Sistema de Control de Excitación Tipo Alternador Rectificador sin Escobillas.

### 1.3 FUNCION DEL SISTEMA DE EXCITACION.

En la generación de energía eléctrica usando como fuente la energía geotérmica a boca de pozo, encontramos dos lazos de control que afectan directamente la operación del generador síncrono los cuales son: el gobernador y el sistema de excitación, ambos se muestran en el diagrama de bloques de la figura 1.2.

Para efectuar la transformación de energía térmica a energía mecánica, la potencia del vapor suministrada a la turbina tiene la finalidad de provocar un par de torsión en la flecha del generador, la cuál es controlada por el gobernador. La otra etapa corresponde a la transformación de energía mecánica a energía eléctrica y depende del sistema de excitación, ya que éste proporciona la corriente de campo necesaria para producir un campo magnético en el rotor del generador capaz de inducir una fuerza electromotriz en la armadura.

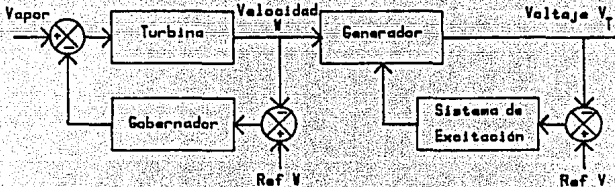


Figura 1.2 Principales Lazos de Control de una Unidad Generadora Geotérmica.

En consecuencia, el sistema de excitación puede en cierta medida gobernar el flujo de energía eléctrica y contribuir de esta manera a la estabilidad del sistema de potencia.

Así, puede verse que el sistema de excitación, manipulando la corriente de excitación, afecta las variables fundamentales del sistema eléctrico que son: voltaje, potencia real y potencia reactiva. De ahí que el sistema de excitación sea capaz de ejecutar una adecuada estrategia de control y tenga una gran importancia para lograr las especificaciones de calidad y continuidad en el suministro eléctrico

La tarea básica del sistema de excitación es suministrar la corriente necesaria al generador y mantener un punto de operación en estado estable; pero existen otros requerimientos orientados a mejorar el amortiguamiento natural y extender los límites de estabilidad.

La estructura de sistema de control junto con los parámetros de ajuste deben operar satisfactoriamente en todos los casos. Las diferentes condiciones de operación del sistema son las siguientes:

- Sin carga en circuito abierto.
- Sin carga bajo operación síncrona.

- Sin carga después de la apertura del interruptor.
- Operación síncrona bajo varias condiciones de carga.
- Operación asíncrona y resincronización.

En cada uno de estos estados de operación existen varios objetivos pero su importancia varía según sea el caso. En general, estos objetivos se suman como sigue:

- Buena respuesta en el control de voltaje y de reactivos.
- Estabilidad en estado estable; es decir, suficiente amortiguamiento en pequeñas oscilaciones tanto del sistema eléctrico como del sistema mecánico.
- Estabilidad transitoria bajo cualquier condición de falla.
- Recuperación del voltaje después de las fallas.

El concepto de estabilidad del sistema de control de excitación se relaciona con la capacidad de los generadores de un sistema para mantener el sincronismo y la tendencia a regresar y permanecer en el punto de operación de estado estable después de disturbios del sistema. La experiencia ha mostrado que el buen control de los sistemas de excitación puede contribuir grandemente al funcionamiento dinámico del sistema de potencia.

Para lograr este objetivo, el sistema de excitación debe ser sintonizado óptimamente. La sintonización de sistemas de excitación es un problema poco conocido en México ya que los RAV son vistos como cajas negras por los operadores de las plantas. Por lo tanto con este trabajo se pretende también estudiar esta problemática.

Hasta aquí se ha dado un breve bosquejo de la función del sistema de excitación, a continuación se expondrán las hipótesis sobre las cuales se basan los estudios subsecuentes.

#### 1.4 HIPOTESIS DE ANALISIS.

El análisis y diseño de un RAV para el control de excitación está basado en las siguientes hipótesis:

El sistema de control de excitación es un sistema monovariante, esto es tiene una entrada y una salida. La condición en la cual se cumple el postulado anterior es cuando la máquina está en circuito abierto. En esta condición al variar la corriente de campo, variamos el voltaje en terminales (suponemos que la velocidad de la máquina síncrona, es constante y controlada por el gobernador de la turbina).

Cuando el generador se conecta a la red el voltaje queda fijo al voltaje del bus y el RAV se convierte en un regulador de potencia reactiva. Para esta condición el sistema de control de excitación es un sistema de control



multivariable (ver figura 1.1). El análisis de un sistema de control multivariable involucra un grado de complejidad mayor.

La experiencia ha demostrado que si el sistema tiene una buena respuesta en circuito abierto trabajará adecuadamente cuando se encuentre conectado a la red.

Es por ello que en los análisis subsecuentes se considera únicamente el sistema de control de excitación en circuito abierto.

## CAPITULO 2

### MODELADO DEL SISTEMA DE CONTROL DE EXCITACION

#### 2.1 FORMULACION DEL MODELO.

Para estudiar el proceso o planta que se desea controlar, así como para ajustar el controlador, es necesario desarrollar modelos. Dichos modelos pueden ser equipos prototipo hechos a escala, modelos matemáticos o similares analógicos. Independientemente del tipo que sean, resulta obvio que se requiere conocer los elementos físicos presentes, para modelar el sistema.

La formulación de este modelo se ubica en la fase de pruebas del RAV. Para esta formulación se utilizarán los datos de los circuitos eléctricos y electrónicos proyectados en la fase de diseño del RAV y los datos de manufactura de la máquina Toshiba.

El modelo que obtendremos, es un modelo matemático en el dominio de la variable "s" (Laplace) por convenir a las diferentes técnicas de análisis de sistemas de control y al programa de computación CC [29] que se utilizará en el

### capítulo 3.

Para ello se analizará cada parte del sistema físico para obtener las funciones de transferencia de los bloques correspondientes y el modelo de todo el sistema de control de excitación.

Además, son considerados los antecedentes sobre modelado de los sistemas de excitación que propone la IEEE [11,12].

El diagrama funcional del sistema de control de excitación que estudiaremos se muestra en la figura 2.1.

#### 2.2 MODELADO DEL REGULADOR AUTOMATICO DE VOLTAJE (RAV).

Los bloques agrupados dentro del RAV necesarios para el análisis en circuito abierto son: el regulador, el estabilizador, el comparador y transductor de voltaje, principalmente.

##### 2.2.1 Análisis Del Regulador.

Los reguladores o amplificadores que se utilizan en los sistemas de excitación son de diversos tipos. Ente ellos podemos mencionar la amplidina, el amplificador magnético, el amplificador electrónico, etcétera. El regulador usado en este caso, es del tipo electrónico y es el que se analizará a continuación.

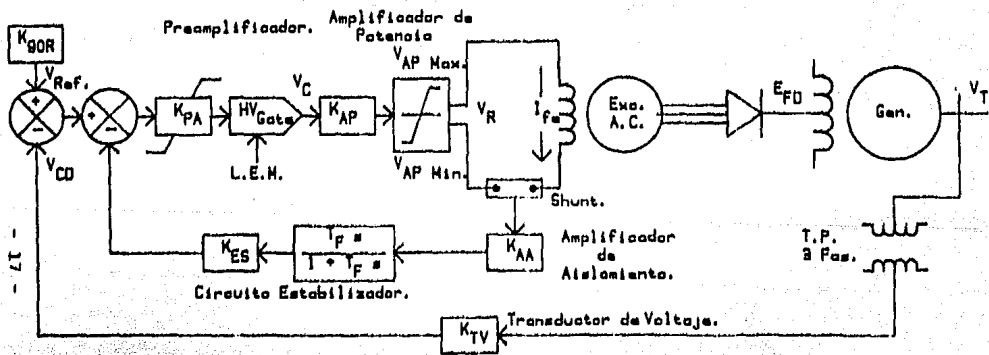


Figura 2.1 Diagrama Funcional del Sistema de Control de Excitación.

Para fines de análisis se divide el regulador en dos partes principales: el preamplificador y el amplificador de potencia. El amplificador de potencia a su vez esta formado por el puente rectificador controlado trifásico y el circuito de control de fase y disparo de tiristores.

El preamplificador es el encargado de generar la señal  $V_C$  que es alimentada al circuito de control de fase y su representación se muestra en la figura 2.2.

En el preamplificador se realizan las funciones de: filtro pasabajos, circuito sumador, amplificación, limitador de tensión y compuerta activada con un voltaje alto (HV Gate).

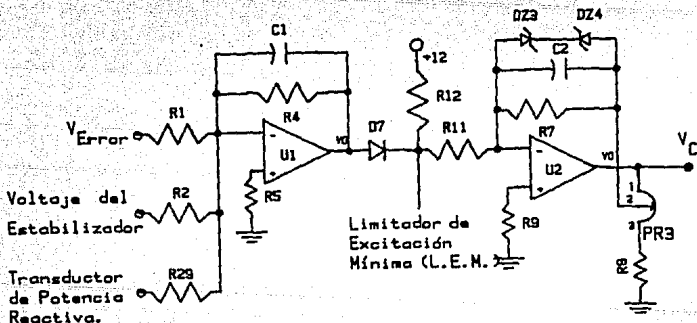


Figura 2.2 Representación del Preamplificador.

Este circuito está diseñado para manejar una ganancia  $K_{PA}$  la cual puede ser variada en un rango de 1 a 30 y tiene una constante de tiempo de 0.012 segundos. Esta ganancia se ajusta por medio del potenciómetro PR3.

El generador de imanes permanentes produce la potencia que se alimenta al campo del excitador, la cual es controlada y convertida a corriente directa por el puente rectificador (ver figura 1.1).

El puente rectificador emplea un puente completo con seis tiristores SCR's como se muestra en el circuito de la figura 2.3.

Esta configuración permite que el puente rectificador pueda ser controlado de manera que se produzcan voltajes inversos, mientras que la corriente de campo del excitador  $I_{fe}$  permanezca positiva [10].

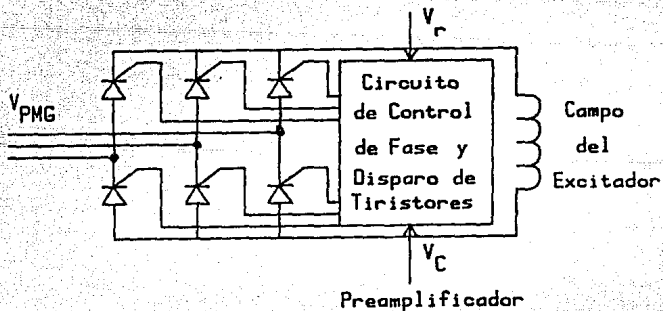


Figura 2.3 Puente Rectificador Controlado Trifásico.

De esta forma, este circuito puede forzar a la corriente de campo  $I_{fe}$  a tomar valores nulos rápidamente mediante la inversión del voltaje  $V_C$ , es decir puede forzar la constante de tiempo del excitador.

El voltaje promedio de salida del puente rectificador es función del ángulo de disparo, el cuál es gobernado mediante el circuito de control de fase, dependiendo éste a su vez del valor de voltaje  $V_C$ .

El circuito de disparo es el encargado de generar y acondicionar los pulsos que son alimentados a las compuertas de los tiristores. Estos pulsos se generan en función de la señal de salida del circuito de control de fase.

Una característica importante de la etapa de potencia es que la relación entre el voltaje de salida  $V_R$  y el voltaje de control  $V_C$  es lineal (ganancia constante) [14] y en nuestro caso esta dado por la siguiente expresión:

$$V_R = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{PMG} \cos \delta$$

$$\text{Como: } \cos \delta = \frac{V_r}{V_C}$$

$$K_{AP} = \frac{V_R}{V_C} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{V_{PMG}}{V_r} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{175}{10} = 23.6$$

Dadas las características de esta etapa, es lógico pensar que existan tiempos muertos. Si disparamos el tiristor en un instante  $\delta_1$ , pero inmediatamente después cambiamos la señal de control  $V_C$ , ahora para un tiempo de disparo  $\delta_2$ , tendremos que esperar hasta el próximo período de disparo para que se manifieste este cambio en la salida. Así un tiempo muerto  $t_d$  ocurre entre el cambio de señal de control y el cambio de respuesta.

Afortunadamente no es necesario conocer exactamente este tiempo, ya que puede variar desde cero a  $1/q$  del período de la fuente de CA, [13] esto es:

$$t_d \leq 1/(qxf)$$

Usualmente se considera el valor promedio,  $t_{prom} = t_d/2$  donde  $q$  es el número de semiperíodos rectificadas y  $f$  es la frecuencia de la fuente de CA.

En nuestro caso la fuente de corriente alterna es el generador de imanes permanentes, el cual produce una frecuencia de 210 Hz.

De lo anterior el tiempo muerto promedio vale:

$$t_{prom} = 1/(2)(6)(210) \approx 0.4 \text{ mSeg.}$$

Por consiguiente, podemos concluir que para este caso el tiempo muerto promedio es muy pequeño comparado con la constante de tiempo del preamplificador, por lo tanto para este estudio el tiempo muerto se desprecia.



De todo lo anterior, la función de transferencia del regulador es la siguiente:

$$K_A / (1 + T_A s)$$

Donde la  $K_A$  es la ganancia del regulador, la cuál está dada por el producto de la ganancia del preamplificador  $K_{PA}$  y la ganancia del amplificador de potencia  $K_{AP}$ . La  $T_A$  es la constante de tiempo del regulador y está dada por la constante de tiempo del preamplificador, ya que éste tiene el mayor retraso del circuito regulador.

## 2.2.2 Análisis Del Estabilizador.

Para tener un error en estado estable despreciable es necesaria una alta ganancia de lazo. Sin embargo, esto causa una respuesta dinámica indeseable y posiblemente inestabilidad en el sistema.

Si añadimos un bloque en realimentación (o en serie) para compensar la estabilidad del sistema, esta situación de conflicto puede estar resuelta.

El estabilizador es un módulo que realimenta al regulador la señal de corriente de excitación con el fin de estabilizar el sistema. La corriente se mide mediante un shunt resistivo, pasa a un amplificador con aislamiento, se transmite hacia el circuito estabilizador y se cierra el lazo de realimentación, enviando la señal al preamplificador.

Los elementos que participan en esta fase son los siguientes:

-Shunt.

-Amplificador de Aislamiento.

-Circuito Estabilizador.

El shunt es un elemento resistivo que es conectado en serie al campo del excitador. Su resistencia es de unos cuantos miliohms y está hecho de un material que no varía la resistencia con los cambios de temperatura. El voltaje de d.c. en terminales del shunt es proporcional a la corriente que pasa a través de él.

El amplificador de aislamiento es un circuito que está compuesto por tres elementos básicos: el amplificador de entrada, el troceador (o chopper) y el acondicionador de salida. Primeramente, se amplifica la señal procedente del shunt. Enseguida, pasa al troceador de alta frecuencia (unos 20 KHz.) que utiliza un transformador de aislamiento para separar el circuito de potencia del circuito de control y finalmente se rectifica y acondiciona la señal a un nivel de voltaje estándar.

De lo anterior observamos que existe una relación entre la corriente de campo  $I_{fe}$  y el voltaje de entrada al circuito estabilizador, el cuál depende del shunt y del amplificador de aislamiento (ver figura 2.1). Esta relación es representada por  $K_{AA}$ .

La señal de salida del amplificador de aislamiento se hace pasar a través del estabilizador, el cuál responde básicamente a la razón de cambio de la corriente de excitación con un cierto retraso. Este efecto se consigue conectando en cascada un amplificador con efecto derivativo y un compensador de atraso (ó filtro pasabajos) como se muestra en el circuito de la figura 2.4.

La función de transferencia de este circuito es la siguiente:

$$\frac{PR_6 R_{14} C_3 s}{(1 + PR_5 R_{13} C_3 s)(1 + PR_6 R_{14} C_4 s)} \left(1 + \frac{PR_4}{R_{15}}\right)$$

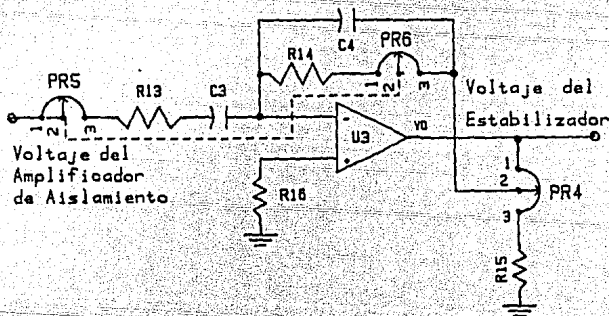


Figura 2.4 Diagrama del Circuito Estabilizador.

Las características de diseño son:

- Los potenciómetros PR<sub>5</sub> y PR<sub>6</sub> están acoplados en el mismo eje de rotación.
- Las resistencias R<sub>13</sub> y R<sub>14</sub> son del mismo valor.
- La constante de tiempo R<sub>13</sub>C<sub>3</sub> es muy grande comparada con R<sub>14</sub>C<sub>4</sub>.

De lo anterior, la función de transferencia de interés para nuestros fines de análisis se muestra a continuación:

$$\frac{T_F s}{1 + T_F s} K'_F$$

Donde:

$$T_F = R_{13} C_3 = R_{14} C_3.$$

$$K_{ES} = (1 + PR_4/R_{15}).$$

$$K'_F = K_{ES} K_{AA}.$$

$$K_F = T_F K'_F.$$

El valor de los parámetros K'<sub>F</sub> y T<sub>F</sub> es ajustado por los potenciómetros PR<sub>4</sub> y PR<sub>5</sub>:PR<sub>6</sub> respectivamente (ver figura 2.4). Los rangos de variación de K'<sub>F</sub> y T<sub>F</sub> son de 0.05 a 0.5 p.u. y de 0.2 a 1.2 seg., respectivamente (Ver apéndice A).

### 2.2.3 Análisis Del Comparador.

El comparador (ó detector de error) es un circuito tipo puente de Wheatstone que produce una señal de error que es la diferencia entre el voltaje de referencia  $V_{REF}$  y  $V_{CD}$ , que es la señal de realimentación del voltaje en terminales del generador.

Su representación en diagramas de bloques se muestra en la figura 2.5.

La función matemática que realiza el comparador es la siguiente:

$$V_{Error}(s) = V_{REF}(s) - V_{CD}(s)$$

Se analizará en detalle la estructura y la función del comparador en la sección 3.4.3.

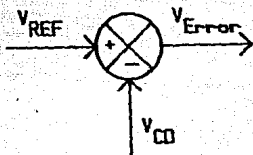


Figura 2.5 Representación de Comparador.

## 2.2.4 Análisis Del Transductor De Voltaje.

El transductor de voltaje en conjunto con el transformador de potencial, es un bloque que realimenta la señal de salida del generador al circuito comparador. Este bloque está formado por transformadores reductores y un rectificador, quedando nuestro sistema como se muestra en la figura 2.6.

Los transformadores tienen la función de aislar galvánicamente la señal de potencia de la señal de control y acondicionar la señal a un nivel de voltaje estándar. El puente rectificador trifásico se encarga de convertir el voltaje de alterna en voltaje de directa para ser comparado con el voltaje de referencia en el detector de error.

El voltaje  $V_{CD}$  es proporcional al voltaje  $V_T$  en terminales de la máquina síncrona.

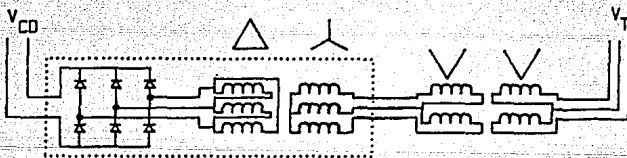


Figura 2.6 Circuito Transductor de Voltaje.

De la teoría de circuitos eléctricos tenemos que la constante de proporcionalidad  $K_R$  que relaciona el voltaje de salida  $V_{CD}$  con el voltaje de entrada  $V_T$  es función de los siguientes parámetros y tiene el valor que a continuación se muestra.

$$K_R = \frac{K_{TV}}{\alpha_1} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{1}{\sqrt{3} \alpha_1} \frac{1}{\alpha_2} = 0.01298 \frac{V}{V}$$

Donde  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  son las relaciones de transformación de los transformadores conectados en delta-estrella y delta abierta respectivamente (ver figura 2.6).

Además, existe una constante de tiempo  $T_R$  que es el retraso de este circuito, el cual es función de las reactancias de dispersión de los transformadores y de la impedancia de entrada del comparador.

$$T_R = L_e / R_o$$

De lo anterior, la función de transferencia de este circuito queda de la siguiente manera:

$$K_R / (1 + T_R s)$$

En general, para cualquier sistema de excitación, la constante de tiempo  $T_R$  tiene un valor pequeño y varía aproximadamente en el intervalo de  $0.06 > T_R > 0$  seg. En nuestro sistema  $T_R$  tiene un valor de 0.001 seg.

## 2.3 MODELADO DE LA PLANTA.

Los bloques del sistema de excitación que integran la planta son los correspondientes al excitador y el generador, los cuales son analizados a continuación. Los datos de la planta que se utilizan son los de la máquina Toshiba de 5 MW que, en primera instancia, es la que va a controlar el RAV diseñado.

### 2.3.1 Análisis Del Excitador.

El excitador es esencialmente un generador síncrono, que tiene el campo en el estator y la armadura en el rotor.

Un análisis detallado del excitador resulta extremadamente tedioso y no garantiza un resultado adecuado. Por lo tanto consideramos razonable obtener una aproximación de primer orden para el modelo del excitador. Para ello tomaremos la mayor de las constantes de tiempo y se ignorarán otros efectos secundarios.

Kimbark [9] observó que la corriente en el devanado de campo, cambia mucho más lentamente que el cambio correspondiente en los devanados de la armadura. Por eso, dado que el voltaje en terminales es proporcional a la corriente de campo  $I_{fe}$  (despreciando la saturación), el voltaje del excitador cambia con la misma rapidez que la corriente de campo (aproximadamente). La razón de cambio de la corriente de campo depende en gran medida de la impedancia de carga. Sin embargo, usando la definición de



"Relación de Respuesta" [4] se puede asumir que el excitador está en circuito abierto.

Por lo tanto, para este estudio, se consideró adecuado usar la constante de tiempo de circuito abierto,  $T'_{do}$ . Esta consideración dará el resultado mas conservador ya que con una carga conectada a la armadura, la inductancia efectiva vista por la corriente de campo será menor y por lo tanto, la constante de tiempo disminuirá.

Considerando el excitador que se muestra en la figura 2.7 si  $R_e$  y  $L_e$  representan la resistencia y la inductancia del campo del excitador, obtenemos la siguiente ecuación en el dominio de Laplace:

$$V_R(s) = R_e I_{fe}(s) + s L_e I_{fe}(s)$$

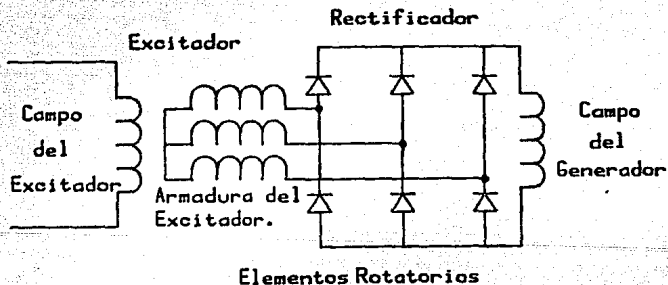


Figura 2.7 Diagrama del Excitador.

El excitador produce  $K_i$  volts de armadura por amper de corriente de campo  $I_e$  (aproximadamente, antes de la saturación). Esto significa que se tiene la siguiente proporcionalidad:

$$E_{FD}(s) = K_i I_e(s)$$

Representando las ecuaciones anteriores mediante diagramas de bloques obtenemos el modelo para el excitador, el cual se observa en la figura 2.8.

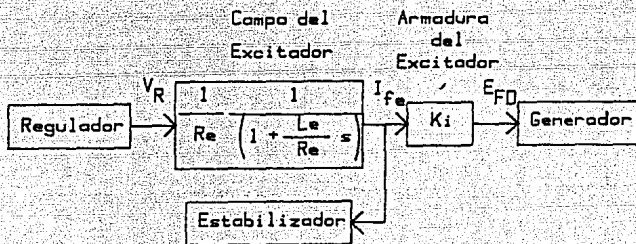


Figura 2.8 Modelo del Excitador.

Trasladando el punto de bifurcación de  $I_{fe}$  a  $E_{FD}$  y reduciendo, mediante álgebra de diagramas de bloques, obtenemos la siguiente función de transferencia.

$$K_e/(1+T_e s)$$

Donde:

$$K_e = K_i / R_e$$

$$T_e = L_e / R_e$$

Conviene hacer notar que algunos autores representan el bloque del excitador en la forma  $1/(K_E + sT_E)$ . Aquí se ha decidido representar el bloque del excitador como se muestra en la función de transferencia anterior, para estar de acuerdo con las definiciones generales de sistemas de control para la "ganancia" y "constante de tiempo" [6].

El rango de variación de la constante de tiempo del excitador está dado por la condición de operación en circuito abierto y en corto circuito. Estos datos normalmente son proporcionados por el fabricante y son los que a continuación se muestran:

- Constante de tiempo de circuito abierto:

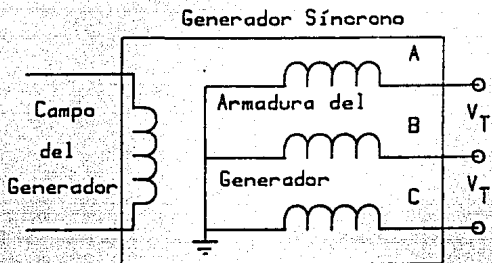
$$T'_{dO} = 0.75 \text{ segundos.}$$

- Constante de tiempo de corto circuito:

$$T'_d = 0.16 \text{ segundos.}$$

### 2.3.2 Análisis Del Generador.

El último bloque a definir es el correspondiente al generador, en donde obtendremos la relación entre el voltaje de campo del generador  $E_{FD}$  y el voltaje en terminales de la máquina síncrona  $V_T$  (ver figura 2.9).



**Figura 2.9 Diagrama del Generador.**

Haciendo las mismas consideraciones que para el excitador obtenemos una aproximación de primer orden para el modelo de generador. Para un estudio mas detallado sobre modelado de la máquina síncrona se puede consultar la referencia [19].

De lo anterior obtenemos las siguientes ecuaciones:

$$E_{FD}(s) = R_f I_f(s) + s L_f I_f(s)$$

$$V_T(s) = n I_f(s)$$

Por lo tanto la función de transferencia del generador queda de la siguiente forma.

$$K_G / (1 + T_G s)$$

Donde:

$$K_G = n/R_f.$$

$$T_G = L_f/R_f.$$

La constante de tiempo del generador, al igual que la del excitador, varía cuando varía la carga que tienen conectada. El rango de variación de la constante de tiempo del generador es el siguiente:

- Para la condición de circuito abierto:

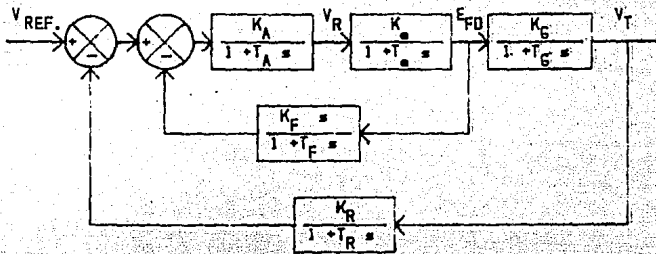
$$T'_{do} = 4 \text{ segundos.}$$

- Para la condición de corto circuito:

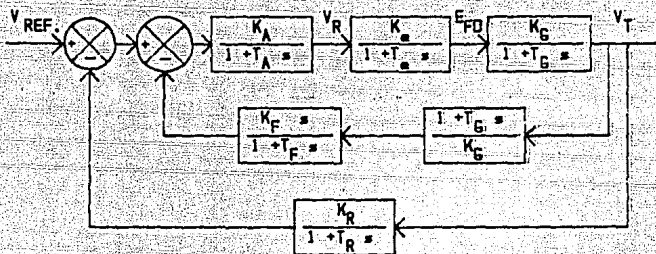
$$T'_d = 0.6 \text{ segundos.}$$

#### 2.4 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA.

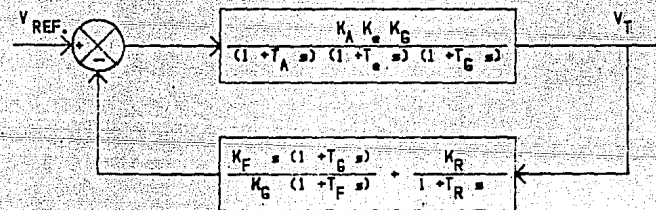
El modelo del sistema de excitación se muestra en la figura 2.10. Este modelo es clasificado como Tipo 1 por el IEEE [11]. En el siguiente análisis se desprecia la saturación del excitador y los limitadores de tensión. Este modelo únicamente es válido para disturbios de pequeña señal.



(A)



(B)



(C)

Figure 2.10 Modelo del Sistema de Control de Excitación  
 (A) Forma General. (B) Cambiando el Punto de Bifurcación del Excitador al Generador. (C) Forma Canónica.

A continuación se muestran los rangos de variación de los parámetros del sistema de control de excitación. Para fines prácticos de análisis es conveniente convertir las ganancias en valores por unidad [12] de manera que se obtengan resultados normalizados. De acuerdo al apéndice A los valores de ganancia en unidades de volts por volts (V/V) y en por unidad (p.u.) se aprecian en la tabla 2.1.

**Símbolo:**

**Rango del Parámetro:**

	Valor Adimensional:		Valor en por unidad:	
$K_A$	10	a 500 V/V	10	a 500 p.u.
$K_e$	2.52	V/V	1	p.u.
$K_G$	194.17	V/V	1	p.u.
$K'_F$	0.223	a 2.23 V/A	0.05	a 0.5 p.u.
$K_F$	0.044	a 2.67 V/A-seg	0.01	a 0.6 p.u.-seg
$K_R$	0.0129	V/V	1	p.u.

Tabla 2.1 Valores de Ganancia del Sistema de Control de Excitación (Modelo Tipo 1).

Y las constantes de tiempo respectivas se muestran en la tabla 2.2.

Símbolo:            Rango del Parámetro:

$T_A$	0.012	seg.
$T_e$	0.16 a 0.75	seg.
$T_G$	0.6 a 4	seg.
$T_F$	0.2 a 1.2	seg.
$T_R$	0.001	seg.

Tabla 2.2 Constantes de Tiempo del Sistema de Control de Excitación (Modelo Tipo 1).

#### 2.4.1 Funciones De Transferencia Del Sistema.

De la figura 2.10c la función de transferencia del lazo principal está dada por:

$$G(s) = \frac{K_A K_e K_G}{(1+T_A s)(1+T_e s)(1+T_G s)}$$

Y la función de transferencia del lazo de realimentación es igual a:

$$H(s) = \frac{K_F T_F s (1+T_G s)}{K_G (1+T_F s)} + \frac{K_R}{(1+T_R s)}$$

Por lo tanto, la función de transferencia de lazo cerrado del sistema de control de excitación es la siguiente:  $V_T(s)/V_{REF}(s) = -G(s)/(1+G(s)H(s))$  y la función de transferencia de lazo abierto es el producto de  $G(s)H(s)$ .



La función de transferencia general de lazo cerrado en forma desarrollada y las funciones de transferencia de lazo abierto para los parámetros  $K_A$ ,  $K_F$ ,  $T_F$ ,  $T_e$  y  $T_G$  se muestran en el apéndice B.

## CAPITULO 3

### ANALISIS DINAMICO DEL SISTEMA DE CONTROL DE EXCITACION

#### 3.1 INTRODUCCION.

Se presenta en este capítulo una estudio de la dinámica del sistema de control de excitación, considerando las especificaciones definidas por la C.F.E. [2] y los criterios estándares para la identificación, pruebas y evaluación del funcionamiento dinámico de los sistemas de control de excitación propuestos por la IEEE [5].

El sistema de control de excitación es en esencia un sistema de control automático convencional, por lo que en su estudio aplicaremos las técnicas de análisis de teoría de control.

Para ello se hará uso de un sistema de Diseño de Auxiliado por Computadora (CAD) [27,28], consistente en una Computadora Personal (PC/AT) y un paquete de computación conocido como Control Clasico (CC) [29]. Utilizando esta herramienta es como se obtendrán todas las gráficas de la respuesta del sistema y la información correspondiente para

evaluar el comportamiento del sistema de control de excitación.

### 3.2 ESPECIFICACIONES.

En este análisis, se consideran los índices que se muestran en la tabla 3.1. Estos índices permiten evaluar la dinámica de funcionamiento de los sistemas de control de excitación o bien especificar las características de diseño de dichos sistemas.

INDICE	RANGO PROP. ESPECIFICACIONES	
	POR LA IEEE	C.F.E
Margen de Ganancia $G_m$ .	2 a 20 dB	10 dB
Margen de Fase $\phi_m$ .	20 a 80 grados	45 grados
Sobreimpulso.	0 a 80 %	< 27 %
Relación de Amort. $\zeta$ .	-----	$0.43 < \zeta < 0.7$
Máximo sobreimpulso $M_p$ .	0 a 12 dB	0.8 a 4 dB
Ancho de Banda $\omega_B$ .	0.3 a 12 Hz.	0.01 a 5 Hz.
Tiempo de Crecimiento $T_r$ .	0.1 a 2.5 seg.	-----
Tiempo de Establecimiento $T_s$ .	0.12 a 10 seg.	-----

Tabla 3.1 Especificaciones de los Sistemas de Control de Excitación.

### 3.3 ANALISIS DEL ERROR EN ESTADO ESTABLE.

Una característica importante de los sistemas de control es referente al error en estado estable que presentan. Se pueden atribuir los errores en un sistema de control a muchos factores: modificaciones en la entrada de referencia producen errores inevitables en periodos transitorios y también pueden causar errores en estado estable; imperfecciones en los componentes como fricción estática, juego y deriva del regulador, así como envejecimiento y deterioro son causas de errores en estado estable.

El error en estado estable es una medida de la exactitud de los sistemas de control. En general, se juzga el comportamiento en estado estable de un sistema de control por el error que presenta debido a entradas escalón, rampa o aceleración.

Cualquier sistema de control físico sufre inherentemente un error en estado estable en respuesta a cierto tipo de entradas. Un sistema puede no tener error a una entrada escalón, pero el mismo sistema puede presentar error no nulo a una entrada rampa. El único modo en que se puede eliminar este error es modificando la estructura del sistema. Si un sistema dado ha de presentar un error en estado estable ante determinado tipo de entrada, este error depende del tipo de función de transferencia de lazo abierto del sistema [23]. Si clasificamos el sistema de control de excitación, de acuerdo a la capacidad para seguir

entradas, escalón, rampa, parabólica, etc., el sistema se clasifica como sistema tipo cero, ya que la función de transferencia de lazo abierto  $G(s)H(s)$  no tiene ningún polo en el origen (ver apéndice B). En la tabla 3.2 se muestran los errores en estado estable para los diferentes tipos de entradas.

Tipo de Entrada.	Error en Estado Estable.
Entrada Escalón.	$e_{SS} = 1/(1+K_A)$
Entrada Rampa.	$e_{SS} = \infty$
Entrada Aceleración.	$e_{SS} = \infty$

Tabla 3.2 Error en Estado Estable del Sistema de Control de Excitación (Sistema Tipo Cero).

Por lo tanto el error en estado estable depende de la ganancia del regulador y únicamente es finito para una entrada escalón.

### 3.4 ANALISIS DE SENSIBILIDAD PARAMETRICA.

El objetivo de este análisis es conocer como se comporta la respuesta del sistema cuando cambian de valor los parámetros. Para ello se obtendrán las respuestas transitorias a partir de la función de transferencia de lazo cerrado a entrada escalón. Para complementar este análisis utilizaremos el método de lugar de las raíces. En los lugares de raíces que se analizaran únicamente se muestran

los polos dominantes de la función de transferencia. La información adicional de los lugares de las raíces presentados se muestra en el apéndice C.

En los sistemas de excitación tenemos principalmente dos tipos de parámetros que determinan la dinámica del sistema. Estos parámetros son los de la planta y los parámetros del controlador.

### 3.5 SENSIBILIDAD DE LOS PARAMETROS DEL CONTROLADOR.

Los parámetros de interés del controlador son tres: la ganancia del regulador  $K_A$ , la ganancia del estabilizador  $K'_F$  y la constante de tiempo del estabilizador  $T_F$ .

Estos parámetros pueden ser ajustados en un determinado rango y tienen la capacidad de modificar la dinámica del sistema de excitación. Dichos parámetros corresponden a potenciómetros de ajuste que se encuentran al frente del equipo RAV.

#### 3.5.1 Análisis De Sensibilidad Del Regulador.

Desde el punto de vista de la dinámica del sistema, la principal función del regulador, es la de modificar la ganancia  $K_A$  del lazo principal. Esta ganancia se puede ajustar en un rango de 10 a 500.

En las figuras 3.1 y 3.2 se presenta la respuesta transitoria del sistema sin estabilizador y con el estabilizador conectado, para valores de ganancia de 10, 46 y 400 respectivamente.

Las figuras 3.3 y 3.4 muestran los lugares de las raíces respectivos y la ubicación de los polos de lazo cerrado para las condiciones antes expuestas.

En la figura 3.1 se observa que al aumentar la ganancia, el tiempo de crecimiento disminuye mientras que el sobreimpulso aumenta hasta que llega un momento en el cual el coeficiente de amortiguamiento se hace cero y el sistema se vuelve oscilatorio; si aumentamos la ganancia más allá de este valor el sistema aumenta su inestabilidad. En la figura 3.3 se aprecia la analogía de los resultados correspondientes al método del lugar de las raíces.

En la figura 3.2 observamos algunos de los efectos antes expuestos pero con una sensibilidad menor, debido al efecto del circuito estabilizador. En la figura 3.4 del lugar de las raíces se observa mejor la razón de este comportamiento, ya que el estabilizador introduce un par de polos complejos conjugados de lazo abierto cerca del origen (ver sección C.4 del apéndice C), ocasionando con esto que el sistema tenga esta respuesta y la estabilidad sea grande.

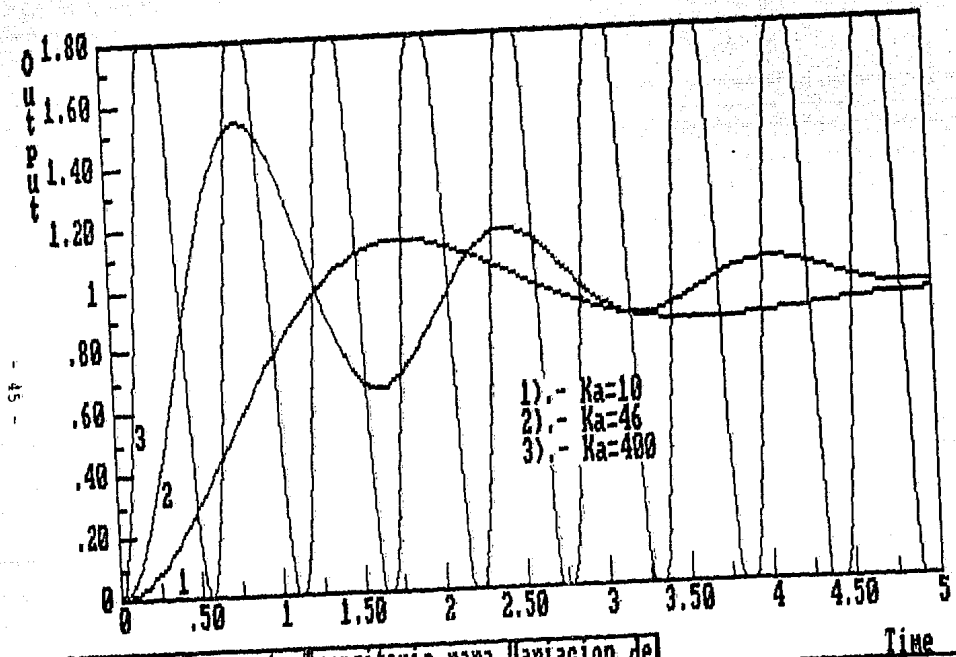


Figura 3.1 Respuesta Transitoria para Variacion de la Ganancia del Regulador, sin el Estabilizador.



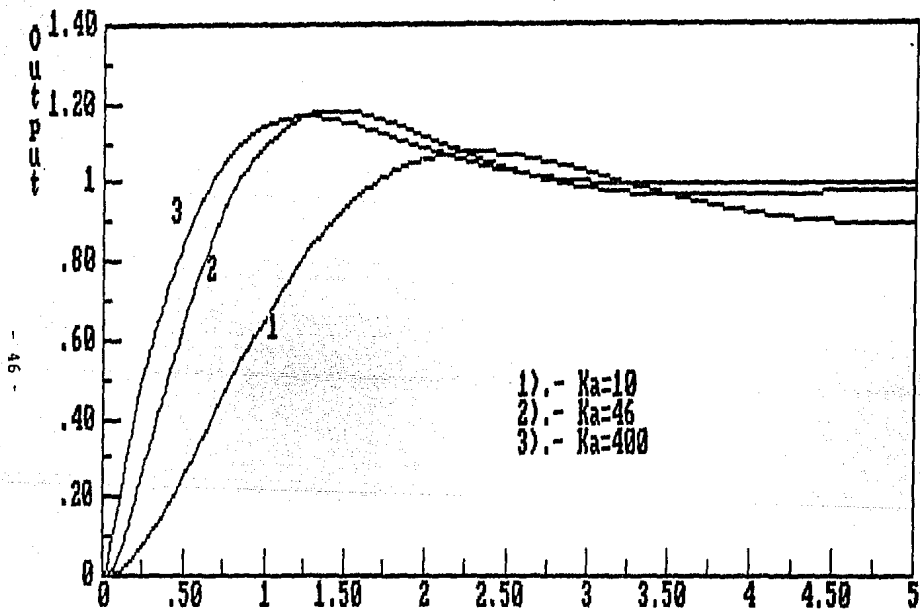


Figura 3.2 Respuesta Transitoria para Variación de Time -  
 La Ganancia del Regulador, con el Estabilizador Conectado.

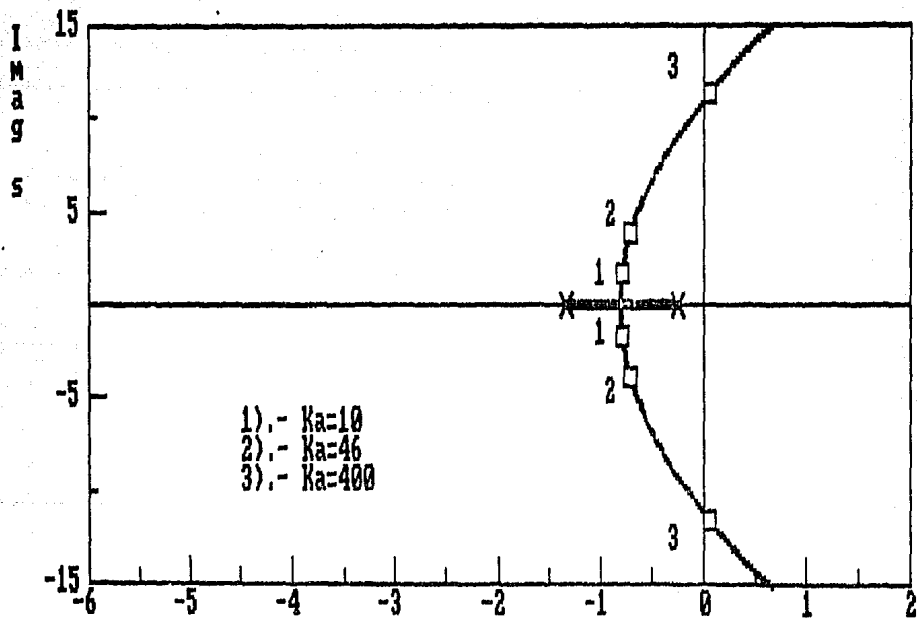


Figura 3.3 Lugar de las Raíces para Variación de la Ganancia del Regulador, sin el Estabilizador.

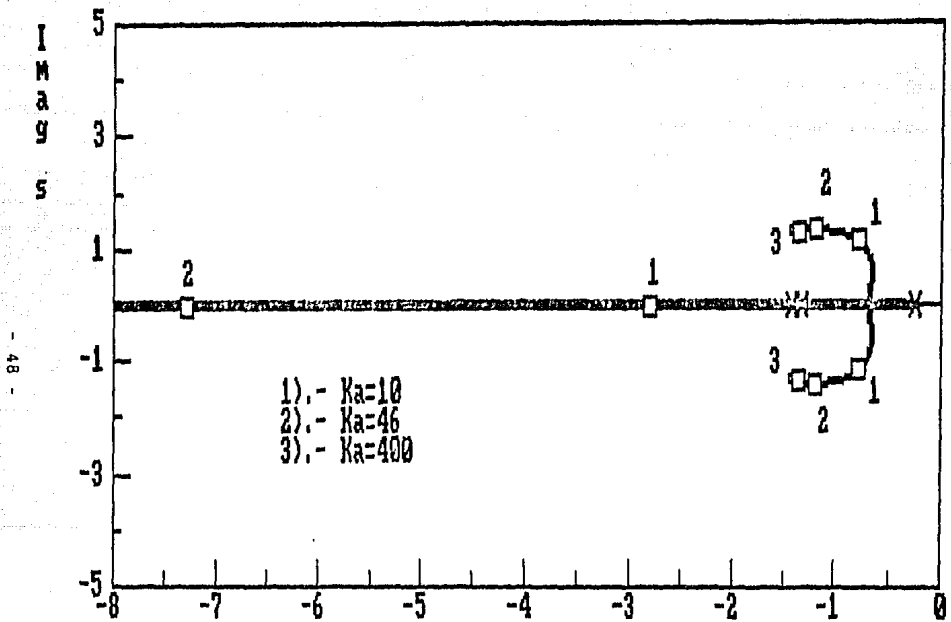


Figura 3.4 Lugar de las Raíces para Variación de  $K_a$  Real s  
la Ganancia del Regulador, con el Estabilizador Conectado.

Otro aspecto importante, es referente al error en estado estable que presenta el sistema de control de excitación, el cual depende de las condiciones expuestas anteriormente, en donde la ganancia tiene un valor mínimo determinado por el error en estado estable permisible (consultar sección 3.2).

### 3.5.2 Análisis De Sensibilidad Del Estabilizador.

El principal objetivo de utilizar realimentación en sistemas de control es reducir la sensibilidad del sistema a variaciones y perturbaciones indeseadas. El estabilizador del sistema de excitación es una de estas realimentaciones. En este circuito tenemos dos parámetros que podemos manipular y de los cuales nos interesa conocer el efecto que causan en el sistema de control de excitación. Estos parámetros son la ganancia del estabilizador  $K'_F$  y la constante de tiempo del estabilizador  $T_F$ .

La figura 3.5 presenta la respuesta transitoria para variaciones de la ganancia del estabilizador  $K'_F$ . Los valores de  $K'_F$  graficados son: 0.05, 0.1 y 0.5.

La figura 3.6 muestra el lugar de las raíces y la ubicación de los polos de lazo cerrado para los valores anteriores.

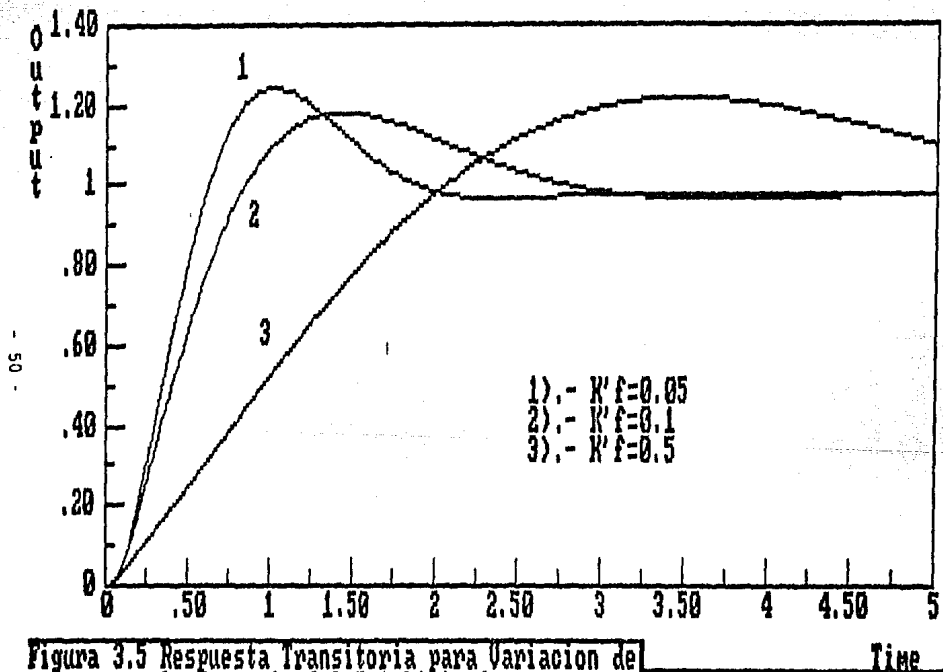


Figura 3.5 Respuesta Transitoria para Variacion de la Ganancia del Estabilizador.

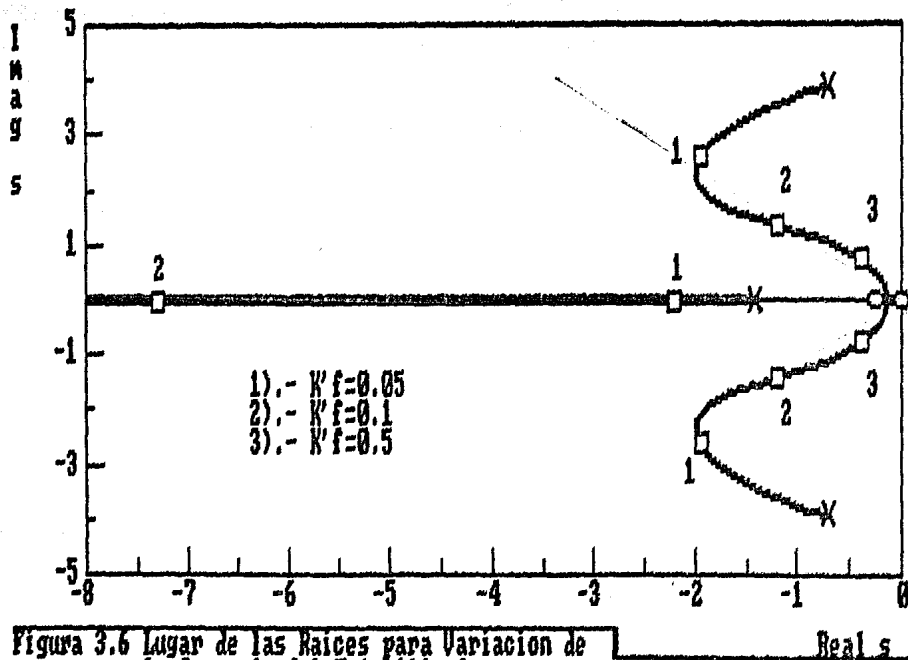


Figura 3.6 Lugar de las Raíces para Variación de la Ganancia del Estabilizador.

En estas figuras podemos observar los siguientes efectos al variar la ganancia del estabilizador (dentro de un rango de operación normal):

- Si la ganancia del estabilizador se disminuye, se reduce también el tiempo de pico y el tiempo de crecimiento.
- El sobreimpulso permanece prácticamente constante ante variaciones de  $K'p$ .
- El tiempo de establecimiento es mayor mientras mayor sea la  $K'p$ . La figura 3.6 del lugar de las raíces muestra estos efectos con mayor claridad. En esta figura podemos apreciar que el rango de operación está dado por la recta de relación de amortiguamiento  $\zeta$  constante, (aproximadamente) y es en esta zona en donde se debe de ajustar este parámetro ya que más allá de este lugar los efectos se reinvierten.

Las figuras 3.7 y 3.8 muestran la respuesta transitoria y el lugar de las raices para la variación de la constante de tiempo del estabilizador  $T_F$ . Los valores de  $T_F$  graficados son: 1.2, 0.7 y 0.2. Los efectos de la variación de este parámetro son:

- El sobreimpulso aumenta a medida que la  $T_F$  disminuye. Es conveniente aclarar que esto es debido a que  $T_G$  tiene un valor superior a  $T_F$  ( $T_G = 4$  seg.). En realidad, el sobreimpulso disminuye cuando  $T_F$  tiende a  $T_G$ .
- La disminución del tiempo de crecimiento es proporcional al tiempo de pico.
- El período de oscilación crece a medida que aumenta la  $T_F$ . Es decir, que la frecuencia de oscilación  $\omega_n$  disminuye y el sistema oscila menos.



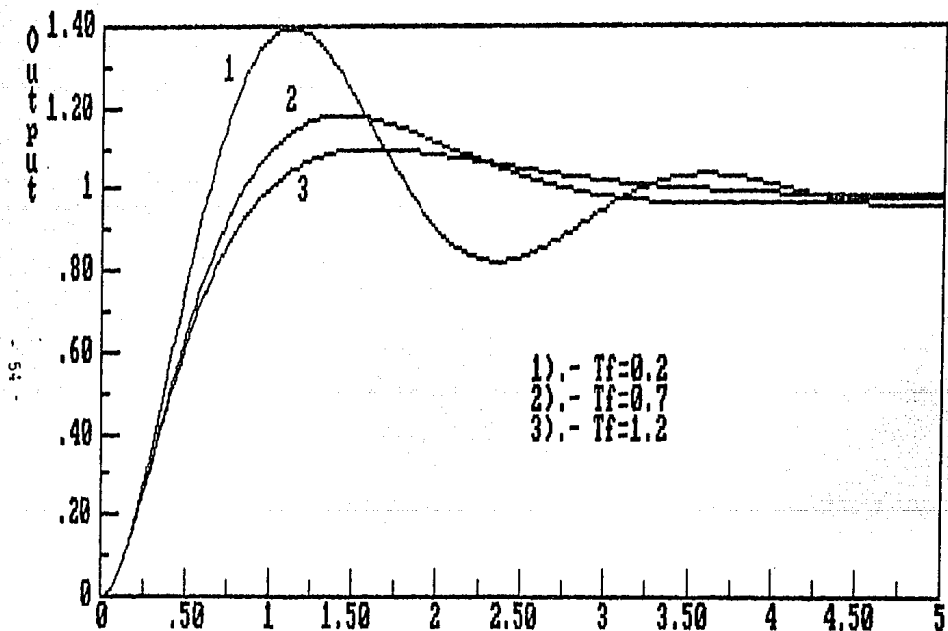


Figura 3.7 Respuesta Transitoria para Variación de Time  
la Constante de Tiempo del Estabilizador

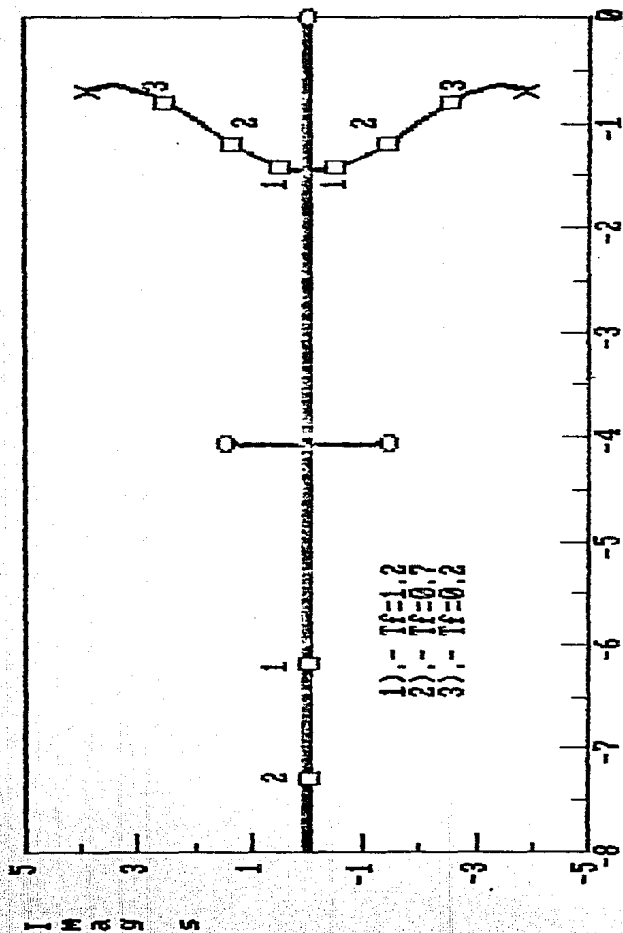


Figura 3.8 Lugar de las Raíces Para Variación de la Constante de Tiempo del Estabilizador.

### 3.5.3 Análisis De Sensibilidad Del Comparador.

El comparador es un circuito importante dentro del sistema de control de excitación ya que es aquí donde se fija la señal de referencia del sistema de excitación.

Una característica del comparador es que la variación de este parámetro (90R) no representa una variación en la dinámica del sistema, esto en comparación con los demás parámetro analizados. Por lo tanto la característica de variación de este parámetro es estática.

Físicamente el comparador en nuestro sistema está constituido por el circuito que se muestra en la figura 3.9.

Este es un circuito tipo puente el cual consta de una parte lineal y otra no lineal: la parte lineal está constituida por los elementos R20, PR7, 90R, PR8 y R21 mientras que la parte no lineal está formada por R22, R23, DZ1 y DZ2.

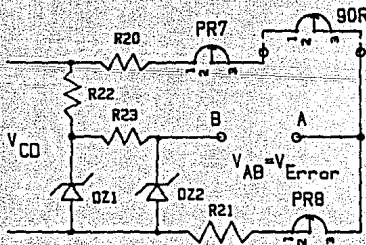


Figura 3.9 Diagrama del Circuito Comparador.

Debido a la característica no lineal, el voltaje en el punto B de la figura 3.9 se mantiene casi constante. Esto está representado por la curva  $V_B$  de la figura 3.10.

Por otro lado el voltaje en el punto A varía proporcionalmente con el voltaje en terminales de la máquina síncrona, como se aprecia en la curva  $V_A$  de la figura 3.10. Por lo tanto la diferencia de potencial entre A y B que corresponde a la señal de error varía proporcionalmente cerca del voltaje  $V_B$  y la polaridad cambia de positivo a negativo y viceversa dependiendo de las perturbaciones que existan en la carga del generador.

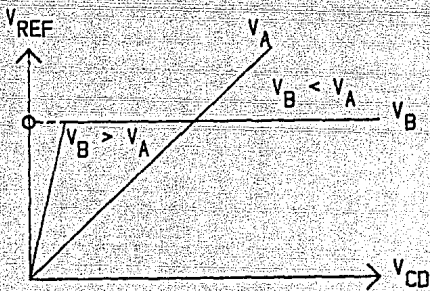


Figura 3.10 Característica de Detección de Error del Circuito Comparador.

Ahora, si  $V_A$  es aproximadamente igual a  $V_B$ , la señal de error es de un valor pequeño y el sistema está en equilibrio. Si  $V_A < V_B$ , lo cual está asociado a una disminución del voltaje en terminales del generador, una

señal de error es aplicada al preamplificador y como consecuencia de esto el sistema opera intensificando la excitación.

Consecuentemente si  $V_A > V_B$ , asociado a un incremento del voltaje en terminales, una señal de error es aplicada y el sistema opera debilitando la excitación (ver figura 3.10).

Además, el voltaje de la máquina síncrona puede ser cambiado moviendo el voltaje de referencia, el cual está definido por el réostato 90R que aparece en la figura 3.9.

Si el 90R se gira en sentido antihorario la curva de voltaje se desplaza de  $V_A$  a  $V_A'$  como aparece en la figura 3.11, causando la condición en la cual  $V_A' > V_B$ . Por lo tanto se genera una señal de error que es aplicada al preamplificador y el sistema opera bajando el voltaje en terminales hasta que se dé la condición en el comparador en que  $V_A \approx V_B$ .

Por otro lado si el 90R se gira en sentido horario, la curva de voltaje de A se mueve a  $V_A''$ . Con esto se tiene que  $V_A'' < V_B$ , con lo cual el sistema opera aumentando el voltaje en terminales hasta que el voltaje de error se estabiliza.

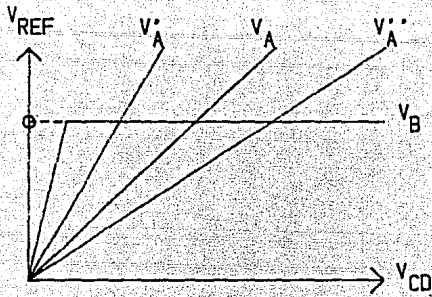


Figura 3.11 Característica de Detección de Error para la Operación del 90R.

### 3.6 SENSIBILIDAD DE LOS PARAMETROS DE LA PLANTA.

Los parámetros de la planta tienen la característica de ser fijos para una determinada condición de funcionamiento del sistema pero varían para diferentes condiciones de carga conectada a la máquina síncrona [8].

Los parámetros de interés de la planta que tienen estas características son la constante de tiempo del excitador  $T_e$  y la constante de tiempo del generador  $T_g$ .

El objetivo del análisis de la planta, únicamente será en forma cualitativa, ya que dichos parámetros dependen de condiciones externas al sistema.

#### 3.6.1 Análisis De Sensibilidad Del Excitador.

La constante de tiempo del excitador está acotada por las condiciones de operación en circuito abierto y en corto circuito; los valores respectivos para estas condiciones son de 0.75 y 0.16 segundos.

Las figuras 3.12 y 3.13 muestran la respuesta transitoria y el lugar de las raíces respectivos, para cuando varía la constante de tiempo del excitador  $T_e$ .

Analizando esta figura, observamos que la sensibilidad de este parámetro no representa una variación significativa en la dinámica del sistema.

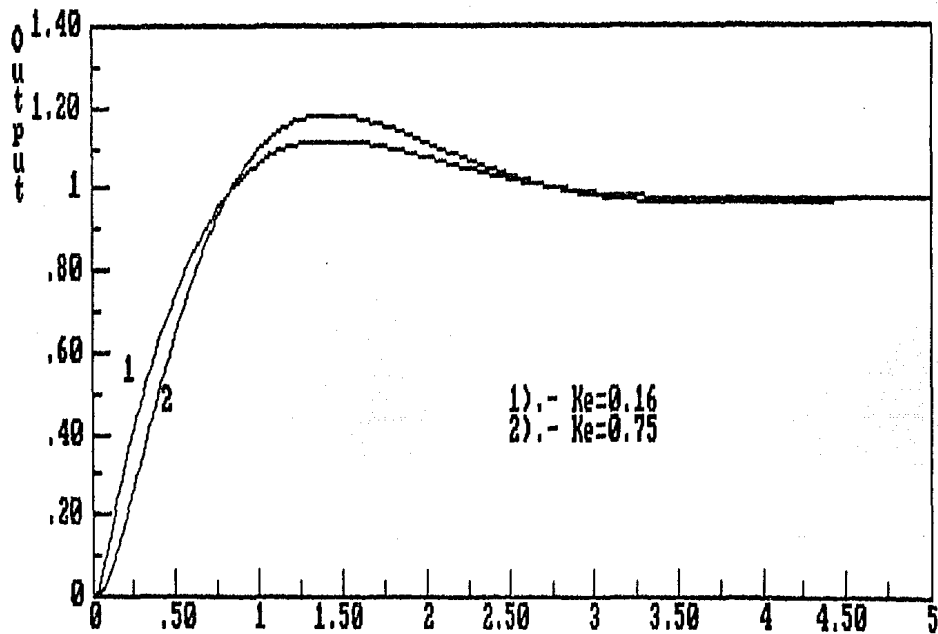


Figura 3.12 Respuesta Transitoria Para Variacion de la Constante de Tiempo del Excitador. Time



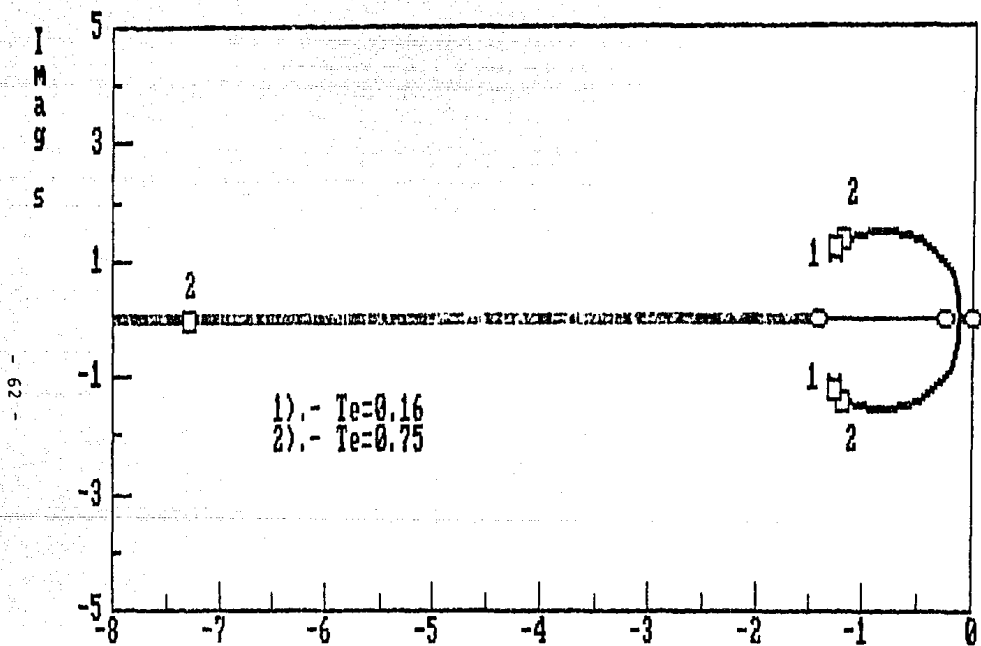


Figura 3.13 Lugar de las Raíces para Variación de la Constante de Tiempo del Excitador.

Real s

### 3.6.2 Análisis De Sensibilidad Del Generador.

La constante de tiempo del generador es la mayor de las constantes de tiempo del sistema. Esta constante está acotada entre 4 y 0.6 segundos para las condiciones de circuito abierto y corto circuito respectivamente.

Es adecuado calcular el valor de este parámetro para condiciones de carga nominal del generador y con ello conocer el valor en el cuál operará normalmente.

El valor de este parámetro para condiciones de carga nominal se puede calcular de acuerdo a la referencia [18] por medio de la curva de saturación del generador. Calculando este valor por medio de este método, tenemos que la constante de tiempo del generador para condiciones de carga nominal tiene un valor de 2 segundos.

La figura 3.14 muestra la respuesta transitoria para las condiciones de circuito abierto ( $T'_{do}=4$  seg.), carga nominal ( $T_G=2$  seg.) y corto circuito ( $T'_d=0.6$  seg.).

La figura 3.15 presenta el lugar de las raíces y la ubicación de los polos de lazo cerrado para las condiciones antes expuestas.

De lo anterior podemos concluir que asegurando un buen funcionamiento para la condición de circuito abierto, obtendremos una mejor respuesta para cualquier otra condición de funcionamiento.

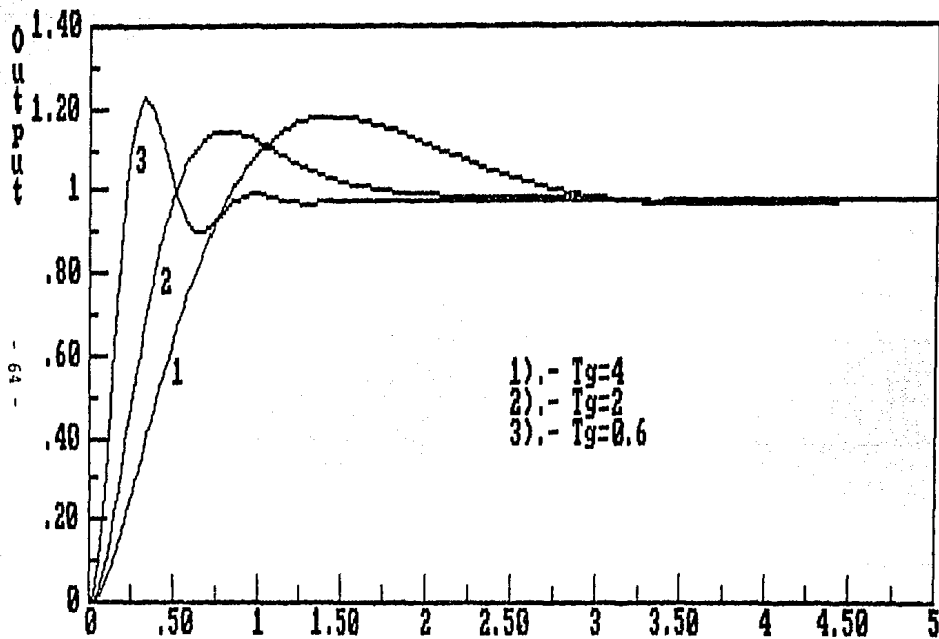


Figura 3.14 Respuesta Transitoria para Variación de la Constante de Tiempo del Generador.

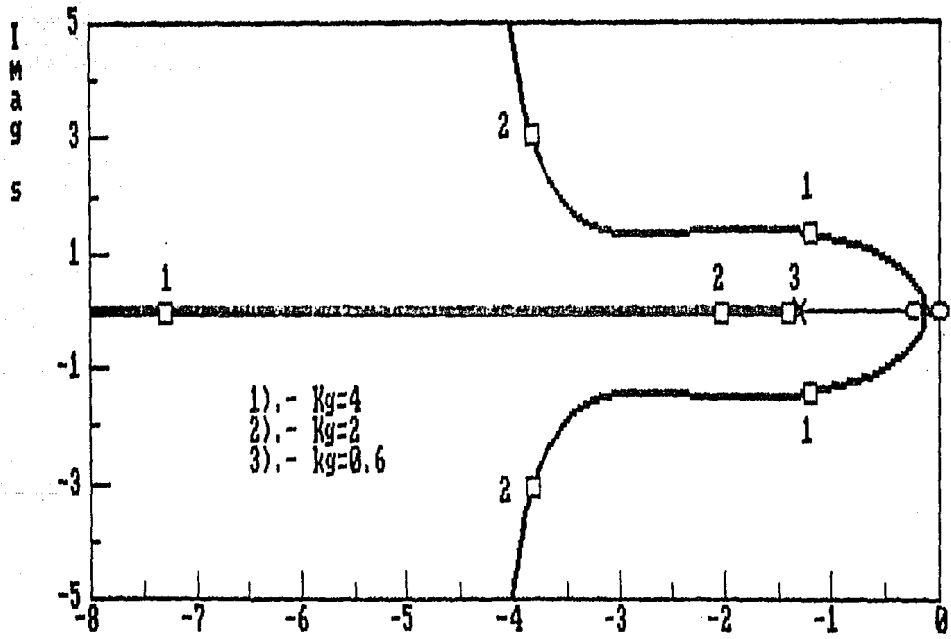


Figura 3.15 Lugar de las Raíces para Variación de la Constante de tiempo del Generador.

### 3.7 ANALISIS DE RESPUESTA EN FRECUENCIA.

Para complementar este análisis en forma objetiva aplicaremos la técnica de respuesta en frecuencia al estudio del sistema de control de excitación.

#### 3.7.1 Estudio De Los Diagramas De Bode.

En esta sección se dará una descripción del análisis de respuesta en frecuencia y dado este análisis obtendremos los parámetros de interés para evaluar el comportamiento dinámico de respuesta en frecuencia del sistema de excitación.

La gráfica de respuesta en frecuencia de lazo abierto la usaremos para determinar los márgenes de fase y de ganancia. Estos parámetros nos dan una medida de la estabilidad relativa en estado estable del sistema. En general, para los sistemas de control realimentados, se considera aceptable un margen de fase de 40 grados o mayor y un margen de ganancia de 6 decibeles o mayor. Estos valores son utilizados en la práctica para asegurar una adecuada respuesta del sistema.

Con respecto a la gráfica de respuesta en frecuencia de lazo cerrado se obtiene el valor pico  $M_p$  de la fase. Este parámetro nos proporciona también una medida de la estabilidad relativa; un valor alto de  $M_p$  ( $>1.6$ ) es indicativo de un sistema oscilatorio, observándose un sobreimpulso grande en la respuesta transitoria.

El ancho de banda  $\omega_B$ , obtenido de la gráfica de respuesta en frecuencia de lazo cerrado, es un índice significativo del funcionamiento dinámico. Prácticamente constituye un indicador del tiempo de crecimiento  $T_r$  ó de la velocidad de respuesta transitoria del sistema. Asimismo, nos da una idea de la habilidad del sistema para reproducir la señal de entrada y describe aproximadamente su característica de rechazo al ruido ó filtrado.

En sistemas de control realimentados, obtenemos como respuesta a entrada escalón, menos del 10 por ciento de sobreimpulso y un tiempo de crecimiento  $T_r$  en segundos que es proporcional al ancho de banda  $\omega_B$  en Hz., donde tenemos la siguiente relación aproximada:

$$T_r \omega_B = 0.3 \text{ a } 0.4$$

En general el producto  $T_r \omega_B$  incrementa el sobreimpulso en la respuesta transitoria del sistema. Si aumentan los valores en el rango de 0.3 a 0.35 obtendremos un insignificante sobreimpulso; valores en la región de 0.45 corresponden a un sistema con alrededor del 10 por ciento de sobreimpulso.

Generalmente se aceptan índices de valores de funcionamiento por encima de la caracterización para lograr un buen funcionamiento del sistema de control realimentado. Estos índices se muestran en la tabla 3.3.

Indice.	Valor.
Margen de Ganancia .....	> 6 dB
Margen de Fase .....	> 40 grados
Sobreimpulso .....	5 a 15 por ciento
Máximo Sobreimpulso $M_p$ .....	0.8 a 4 dB

Tabla 3.3 Indices para los Sistemas de Control Realimentados.

La respuesta en frecuencia de lazo abierto del sistema de excitación con la máquina síncrona en circuito abierto se muestra en la figura 2.16. Los parámetros de interés son: la ganancia a baja frecuencia  $K_A$ , frecuencia de cruce  $\omega_c$ , margen de fase  $\phi_m$  y margen de ganancia  $G_m$ .

La respuesta en frecuencia correspondiente de lazo cerrado, se muestra en la figura 2.17. Los parámetros de interés en este caso son: el ancho de banda  $\omega_B$ , el valor pico  $M_p$  de la ganancia característica y la frecuencia  $\omega_m$  a la cual ocurre esto.

Analizando estas gráficas observamos que el sistema de control de excitación tiene una estabilidad relativa alta.

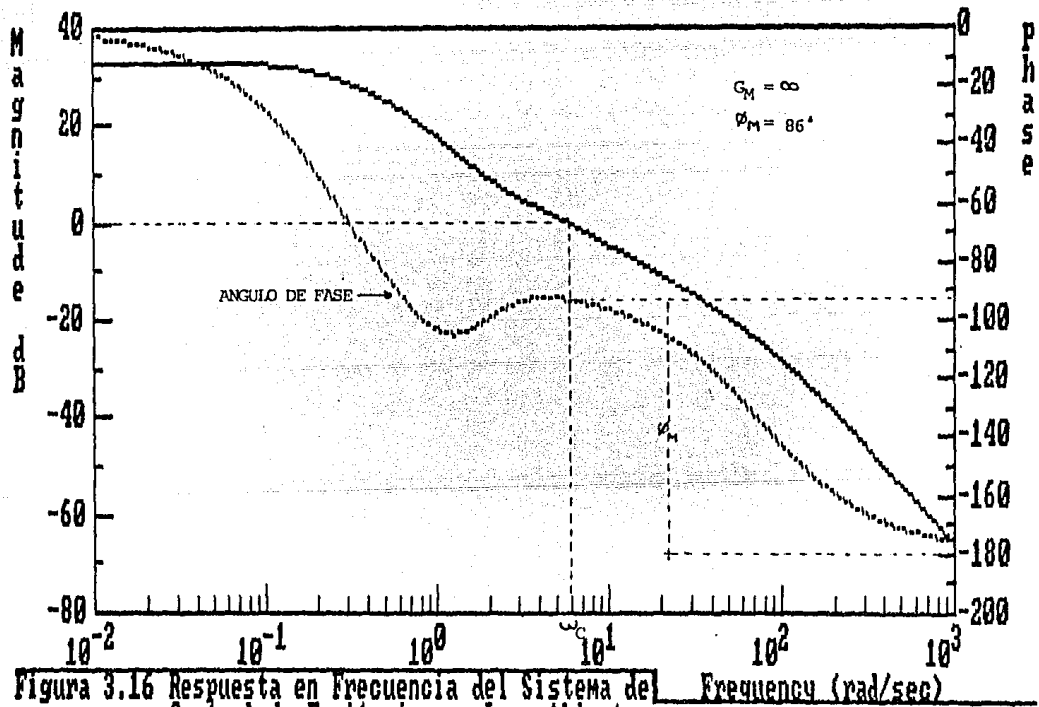


Figura 3.16 Respuesta en Frecuencia del Sistema de Control de Excitación en Lazo Abierto.

Frequency (rad/sec)



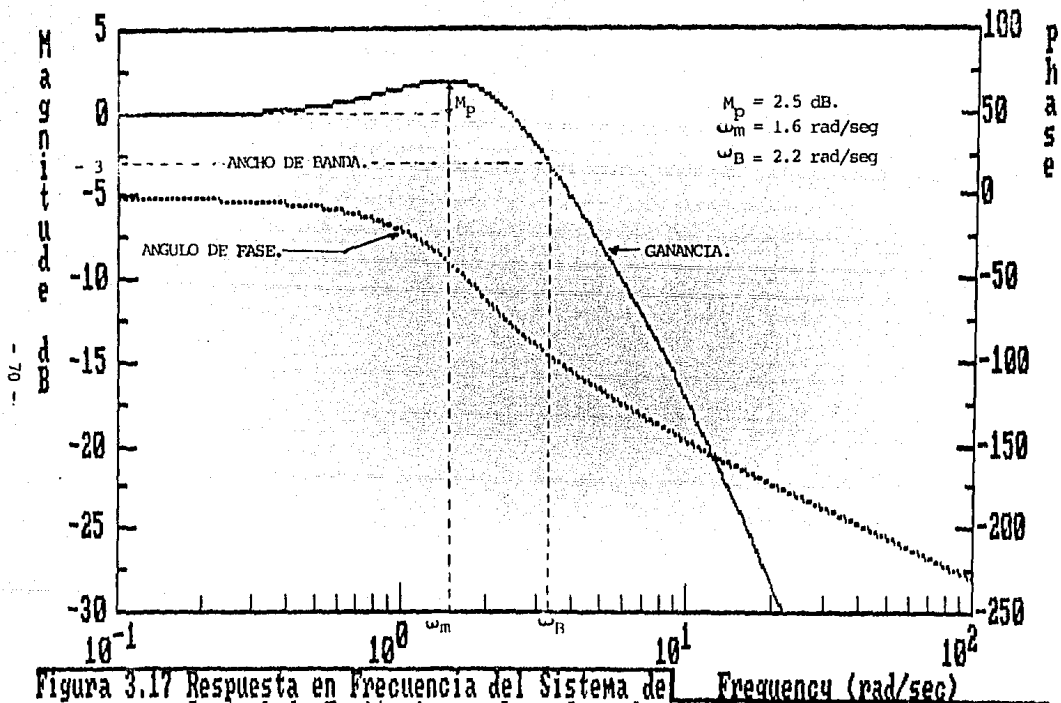


Figura 3.17 Respuesta en Frecuencia del Sistema de Control de Excitacion en Lazo Cerrado.

Frequency (rad/sec)

## CAPITULO 4

### SINTONIZACION DEL SISTEMA DE CONTROL DE EXCITACION

#### 4.1 PRINCIPIO DE SINTONIZACION.

La idea principal de este estudio es poder estimar el ajuste óptimo del RAV (controlador) diseñado en el IIE cuando éste se conecte a cualquier máquina síncrona (planta o proceso) que tenga diferentes características dinámicas. Es por ello que se analizan las diferentes técnicas y métodos de sintonización para, en base a estos criterios y al análisis de sensibilidad paramétrica efectuado en el capítulo 3, desarrollar una técnica de sintonización.

##### 4.1.1 El Problema De La Sintonización.

El ajuste o sintonización de controladores es un problema muy poco entendido y pobremente practicado, sin embargo es un aspecto extremadamente importante de la aplicación de la teoría de control automático.

La primera dificultad encontrada en la sintonización de controladores es la de definir que es un buen control y ésto desafortunadamente difiere de proceso a proceso.

Probablemente el 90 por ciento de todos los controladores son sintonizados experimentalmente con instrumentos de medición por prueba y error. En un 75 por ciento de los casos la persona que ajusta el controlador puede adivinar aproximadamente el ajuste, basada en su experiencia con controladores similares.

En cualquier sistema de control tenemos varios parámetros para ajustar la dinámica del sistema. Murrill [22] establece que la dificultad para sintonizar un controlador aumenta con el cuadrado del número de parámetros que intervienen en el ajuste.

En el sistema de control de excitación que se analiza, tenemos tres parámetros para ajustar la respuesta. Estos parámetros son la  $K_A$ ,  $K'_F$  y  $T_F$ , los cuales deben ser ajustados durante la puesta en operación de un RAV.

El controlador es solo una parte del sistema de control automático. Hay mas elementos conectados necesarios para que exista un buen funcionamiento. Para el propósito de ajustar el controlador es conveniente analizar también estos elementos, así como obtener información cuantitativa del proceso o planta a la que se va a conectar el controlador.

Es también conveniente para cualquier sistema dinámico desconocido que se desee sintonizar tratar de obtener su modelo para poder efectuar una buena sintonización.

#### 4.1.2 Utilidad De Un Método De Sintonización.

Una vez teniendo el controlador se presenta el problema de como ajustar los parámetros para un determinado proceso. De aqui la importancia de contar con una metodología de sintonización. Existen tres procedimientos generales que pueden ser usados para ajustar los parámetros del controlador:

- 1) Usar criterios como son un cuarto de relación de decaimiento, mínimo tiempo de establecimiento, mínimo error estacionario, etc. Esto puede ser fácilmente implementado en procesos reales teniendo un modelo aproximado del proceso o planta. Usualmente esto conduce a obtener múltiples soluciones, pero especificando las condiciones de funcionamiento en lazo cerrado del sistema, esto lleva a la necesidad de eliminar la multiplicidad y seleccionar un único valor de ajuste para el controlador.
- 2) Usando criterios basados en la integral del tiempo como son, ISE, IAE o ITAE. Estas aproximaciones son algo engorrosas y requieren contar con el modelo matemático (ó función de transferencia) del proceso. Este método aplicado experimentalmente a procesos reales es bastante laborioso.

3) Usando reglas semiempíricas que hayan sido probadas en la práctica.

#### 4.2 METODOS GENERALES DE SINTONIZACION.

Los métodos para ajustar controladores pueden ser clasificados en dos grupos: técnicas de lazo abierto y técnicas de lazo cerrado.

Las técnicas de lazo abierto son aquellas que se basan en parámetros determinados de la respuesta de lazo abierto, comúnmente llamada curva de reacción del proceso. Usando el método de lazo abierto no es necesario que el controlador esté instalado para poder predecir el ajuste.

En las técnicas de lazo cerrado hay dos métodos comunes: el primero originalmente propuesto por Ziegler y Nichols [25] y el segundo llamado método de oscilación amortiguada presentado por Harriott [26]. El método de lazo cerrado que estudiaremos aquí es el método propuesto por Ziegler-Nichols por ser de mayor sencillez y utilidad al caso que se está analizando.

##### 4.2.1 Método De La Curva De Reacción.

En esta sección discutiremos el más usual de los métodos de sintonización empírica, conocido como método de la curva de reacción del proceso, desarrollado por Cohen y Coon [24].

Considere el sistema de control de excitación de la figura 4.1, el cual es operado en control manual y sin realimentaciones. Se introduce una señal escalón  $V_C$  de magnitud  $A$  en el amplificador de potencia y se grafica el valor de la señal de salida con respecto al tiempo. La curva obtenida  $V_{CD}(t)$  es llamada curva de reacción del proceso. Esta curva es la respuesta libre del proceso (lazo abierto).

En la figura 4.1 se puede apreciar que la curva de reacción del proceso es afectada no solo por la dinámica del proceso o planta sino también por la dinámica del dispositivo transductor y por el amplificador de potencia.

Cohen y Coon observaron que la respuesta de la mayoría de los procesos en las condiciones expuestas anteriormente (sistema en lazo abierto) tendrán una respuesta parecida a la de la figura 4.2, la cuál puede ser aproximada por una función de transferencia de primer orden con un tiempo muerto.

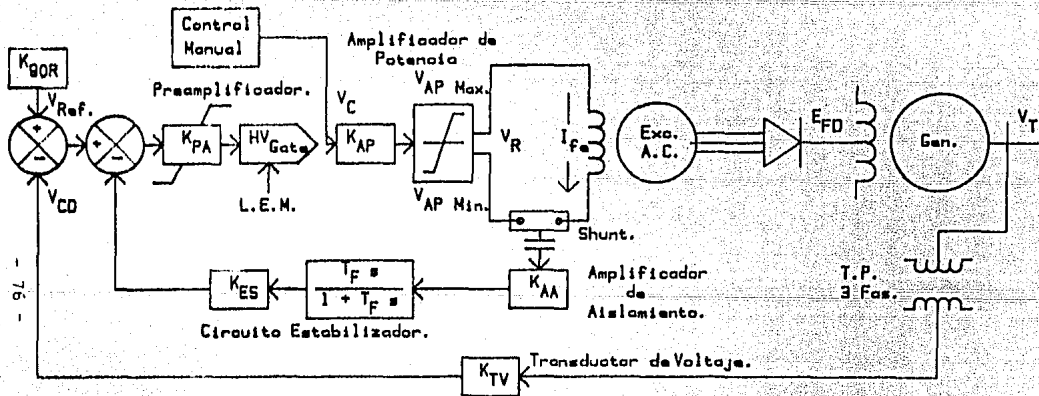


Figura 4.1 Configuración del Sistema de Control de Excitación para la Obtención de la Curva de Reacción del proceso.

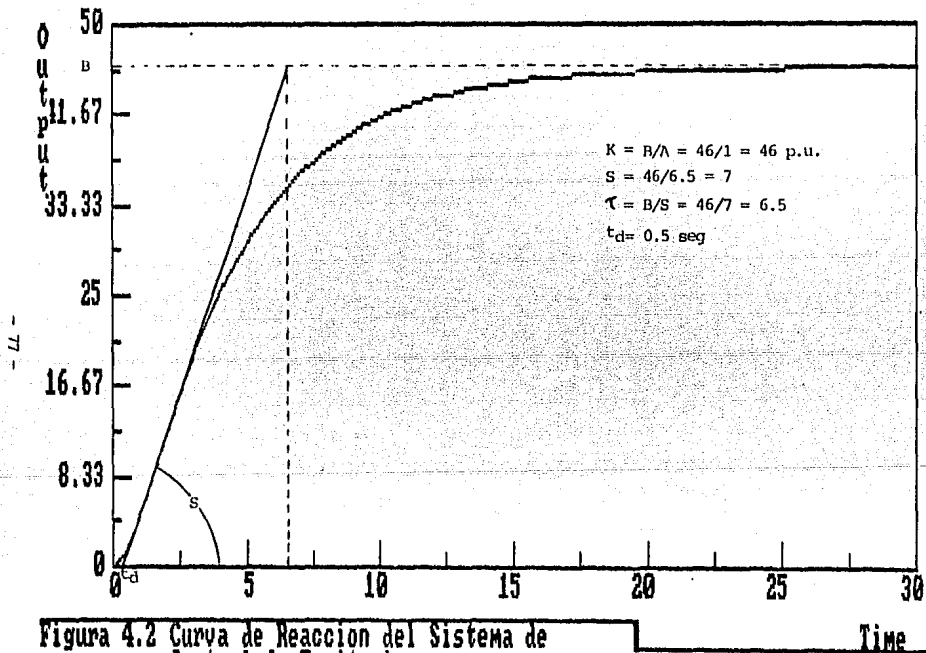


Figura 4.2 Curva de Reaccion del Sistema de Control de Excitacion.



De la respuesta obtenida en la curva de reacción es fácil estimar el valor de estos parámetros. Así:

$$K = B/A$$

$$\tau = B/S$$

Donde:

K = Ganancia Estática.

$\tau$  = Constante de tiempo.

A = Señal de entrada en estado estable.

B = Señal de salida en estado estable.

S = Pendiente de la respuesta en el punto de inflexión.

$t_d$  = Tiempo trascurrido hasta que el sistema responde.

La información proporcionada por la curva de reacción nos sirve para caracterizar el proceso. El dato más importante proporcionado por la curva de reacción del proceso es la constante de tiempo, la cual depende principalmente de los retrasos en el excitador y en el generador. Los otros datos dependen de los parámetros del RAV que son conocidos.

#### 4.2.2 Método De Ziegler-Nichols.

Uno de los primeros métodos propuestos para la sintonización de sistemas de control automático fue el método de la última sensibilidad propuesto por Ziegler-Nichols [25]. El termino "última sensibilidad" está asociado a este método por que su uso requiere de la determinación de la última ganancia y el ultimo período. La última ganancia es el máximo valor de ganancia del regulador (operando el controlador en modo proporcional y minimizando los efectos integral y derivativo de los demás parámetros del controlador) para la cuál el sistema de lazo cerrado es estable.

Si incrementamos la ganancia del regulador hasta que el sistema comience a oscilar, este valor es la máxima ganancia en la cuál el sistema puede operar y recibe el nombre de última ganancia. El período de estas continuas oscilaciones es llamado último período. Si la ganancia del regulador se aumenta por arriba de este límite el sistema se vuelve inestable.

En este método Ziegler-Nichols proponen una serie de relaciones para ajustar los parámetros de los controladores PID en función de la última ganancia y el último período.

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

## Integrales.

En años recientes han sido desarrollados nuevos métodos de sintonización adicionales a los ya presentados. Estos métodos de sintonización buscan minimizar el valor del error actuante y están basados en un criterio integral. Estos criterios son:

- IAE.- Integral del valor absoluto del error.
- ISE.- Integral del cuadrado del error.
- ITAE.- Integral del tiempo por el valor absoluto del error.

Las técnicas basadas en criterios integrales del tiempo, son bien aprovechadas en aplicaciones de control por computadora y son recomendables para tal fin en donde puede obtenerse un resultado más fino de sintonización. Para mayor información sobre estos criterios se puede consultar la referencia [20].

### 4.3 METODO DE SINTONIZACION EN CAMPO.

En esta sección se expondrá una metodología para sintonizar el sistema de control de excitación en campo. Esta metodología considera algunos aspectos expuestos por Ziegler-Nichols en su método de sintonización de lazo cerrado. Además, también toma en cuenta la información que proporciona la curva de reacción del proceso y la

experiencia obtenida en el análisis de sensibilidad paramétrica efectuado en el capítulo 3.

#### 4.3.1 Técnica De Sintonización.

El método de sintonización que se expone busca poder efectuar el ajuste del sistema control de excitación en aquellos casos donde no se tienen instrumentos de análisis complejos y únicamente se tienen instrumentos de medición sencillos. La secuencia de pasos a seguir es la siguiente:

1. Obtener la curva de reacción del proceso como se indicó en la sección 4.2.1.
2. Poner en automático el controlador.
3. Ajustar los potenciómetros referentes a  $K_A$ ,  $K_F$  y  $T_F$  en su valor mínimo.
4. Encender el sistema y ajustar el voltaje en terminales mediante el 90R.
5. Aumentar progresivamente la ganancia  $K_A$  hasta que el sistema llegue a ser muy poco amortiguado y oscilatorio (cada vez que se mueva cualquiera de los potenciómetros se deberá checar que el voltaje en terminales tenga el

valor nominal, si no se deberá ajustar con el 90R). La ganancia a la cuál ocurre ésto es la última ganancia. Se registra este valor.

6. Aplicando el metodo de Ziegler-Nichols, al dividir este dato entre dos se obtiene el valor en donde debe ajustarse la ganancia  $K_A$ .
7. Enseguida se mueve el potenciómetro correspondiente a la  $K_F$  girándolo un 15 % en cada caso y encendiendo y apagando el sistema con el fin de introducir entradas escalón y de checar la respuesta transitoria hasta que el sistema tenga el tiempo de establecimiento deseado, aplicando los criterios obtenidos en el capítulo 3.
8. El siguiente paso es ajustar la  $T_F$ . Este valor depende de la constante de tiempo de la planta y debe ser ajustado aproximadamente a un octavo del valor de la constante de tiempo obtenida en la curva de reacción del proceso.
9. Compruebe que se cumplan las especificaciones; si no gire los potenciómetros referentes a  $K_F$  y  $T_F$  hasta conseguir ésto, aplicando los criterios obtenidos en el capítulo 3.

Un factor importante que debe considerarse son las características de los potenciómetros que controlan estas variables para determinar si estos son logarítmicos o lineales. Esto con el fin de tener una idea de cuanto deberá ser desplazado el potenciómetro.

## CONCLUSIONES Y RESULTADOS.

En este trabajo se ha desarrollado una metodología para el modelado, análisis dinámico y sintonización del regulador automático de voltaje RAV-VI diseñado en el IIE, apegándonos a las especificaciones de la CFE [2] y a las normas de la IEEE [3,4,5]. Esta metodología fué desarrollada considerando al sistema de control de excitación como un sistema de control automático convencional. Es por ello que este estudio puede ser aplicado al análisis de otros sistemas de control de excitación.

-La formulación del modelo del sistema de control de excitación fué de gran ayuda a este proyecto ya que se pudo ajustar adecuadamente el RAV y en algunos casos corregir errores de diseño.

-La idea de utilizar el método del lugar de las raíces para el análisis de sensibilidad paramétrica fué adecuada, ya que así pudimos observar las causas del comportamiento de la respuesta transitoria: si no se hubiese hecho de esta forma, se hubieran obtenido criterios mas pobres.

-La técnica de respuesta en frecuencia se utilizó en forma complementaria, aunque la información que ahí se expone es de gran importancia para la etapa de diseño de un sistema de control de excitación

-Resultó ventajoso el uso del programa de computación CC [29] para esta aplicación puesto que ofrece la oportunidad de simplificar el proceso de desarrollo matemático y reduce el tiempo de obtención de resultados. Además, otro aspecto importante es la seguridad de que los resultados obtenidos son confiables.

-Referente al tema de la sintonización existen diferentes tipos de técnicas de sintonización disponibles, las cuales varían considerablemente en la filosofía y en la implementación. Generalmente hablando, varían en términos de su definición inherente de un buen control sin importar si son de lazo abierto, lazo cerrado ó que tan complejos pueden ser matemáticamente. Por lo tanto, es frecuente que den mucha variedad de resultados: es virtualmente imposible decir que una técnica es claramente superior a otra.

Por consiguiente es justo decir que mucha de la sintonización de sistemas de control es un arte. Esto requiere de una gran cantidad de práctica y experiencia para desarrollar una sensibilidad y un tacto profesional para la sintonización de sistemas de control. Considerando esta dificultad es conveniente mencionar a los controladores adaptivos como alternativa a este problema.



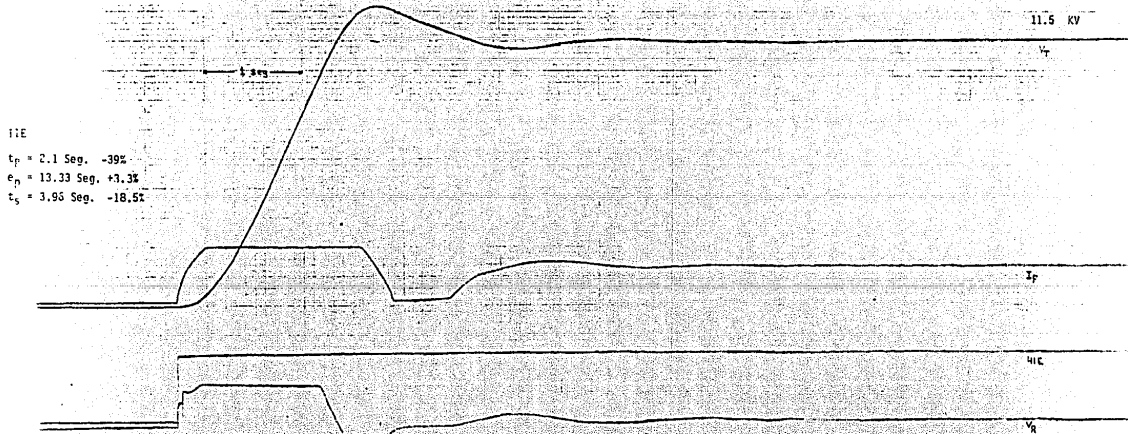
-El equipo RAV-VI se probó en laboratorio con una micromáquina en donde se simularon y comprobaron los resultados presentados en los capítulos 3 y 4; con ésto se pudo validar el modelo obtenido.

-Por otro lado, los criterios obtenidos durante el desarrollo de este trabajo quedaron validados al probarse el equipo RAV-VI en campo en la planta Turbojet de Lechería, en la Instalaciones de la Compañía de Luz Fuerza del Centro del 26 al 30 de octubre de 1987. En la puesta en operación de este RAV se aplicó el método de sintonización en campo presentado en el capítulo 4, obteniéndose resultados satisfactorios.

Esto lo podemos constatar en el siguiente oscilograma que se muestra al final de estas conclusiones, donde se observa la curva de excitación del sistema. En ella vemos que se cumplen las especificaciones para los sistemas de control de excitación expuestas en el capítulo 3.

-En general, aseguramos un buen resultado al aplicar este método en cualquier sistema de excitación que tenga un modelo tipo 1 de acuerdo a la IEEE [11]. Si se aplica a cualquier otro sistema de excitación no aseguramos que se obtengan los mismos resultados.

-Por último, es necesario destacar el importante papel que desempeña el sistema CAD [27,28,29] utilizado. Esta herramienta fué de gran ayuda, ya que en teoría de control depende mucho la experiencia que se tenga en este campo. Además, el control moderno requiere de realizar complicados cálculos y todos estos inconvenientes fueron resueltos utilizando esta herramienta contribuyendo a la eficiencia y a la productividad.



## BIBLIOGRAFIA.

1. Asimilación de la Tecnología para la Fabricación Nacional de Turbogeneradores Geotérmicos, Boletín del Instituto de Investigaciones Electricas, Vol. 9, No. 3, Mayo/Junio de 1985.
2. CFE, Laboratorio, "Procedimiento para Pruebas de Reguladores Automáticos de Voltaje (RAV)", Area de Ingeniería, Oficinas de Ingeniería de Control, Febrero de 1979.
3. "IEEE Standard Criteria and Definitions for Excitation Systems for Synchronous Machines", IEEE Std. 421-1972.
4. "IEEE Standard Definitions for Excitations Systems for Synchronous Machines", IEEE Std. ANSI/421.1-1986.
5. "IEEE Guide for Identification, Testing, and Evaluation of the Dynamic Performance of Excitation Control Systems", IEEE Std. 421A-1978.

6. "Terminology for Automatic Control", ANSI C85.1, 1963.
7. Anderson P.M., Fouad A.A., "Power System Control and Stability", The Iowa State University Press, First Edition, 1977.
8. Olle I. Elgerd, "Electric Energy Systems Theory and Introduction", Mc Graw-Hill, Second Edition, 1983.
9. Kimbark E.W. "Power System Stability", Vol. 3, Wiley, New York 1956.
10. Dewan S.B., Slemon G.R., Straughen A., "Power Semiconductor Drives", John Wiley, 1984.
11. IEEE Committee Report, "Computer Representation of Excitation Systems", IEEE Trans on PAS, Vol. 87, June 1968, p.p. 1460-1464.
12. IEEE Committee Report, "Excitation Systems Models for Power System Stability Studies", IEEE Trans. on PAS, vol. 100, Feb. 1981, p.p. 494-501.
13. IEEE Committee Report, "Considerations affecting the Design Philosophy of Solid-State Exciters.", IEEE Trans. on PAS, Vol. 87, May. 1968 p.p. 1288-1299.
14. García A., Cervantes A., "Método de Control de Disparo de Tiristores en Convertidores Trifásicos.", IEEE MEXICON 86, 86MEX129.

15. IEEE Committee Report, "Excitation System Dynamic Characteristics.", IEEE Trans. on PAS, Vol. 92 Jua./Feb. 1973, p.p. 64-75.
16. IEEE Committee Report "Determining Parameters for Hydro Electric Excitation System Modeling" A-76-487-9, 1976.
17. Stigers, Hurley, Gorden, Callanan, "Field Test and Simulation of a High Initial Response Brushless Excitation System", IEEE Trans. Vol. EC-1, No. 1 March 1986.
18. Schlelf F.R., "Excitation System Modeling", Symposium on Adequacy and Philosophy of Modeling: Dynamic System Performance, IEEE Power Engineering Society, 1975, p.p. 29-32.
19. Canay I.M., "Block Diagrams and Transfer Functions of the Synchronous Machine", IEEE Trans. on PAS vol.85 No. 9, September 1966, p.p. 952-959.
20. Stephanopoulos George, "Chemical Process Control", Prentice-Hall, 1984.
21. Murril Paul W., "Automatic Control of Processes", International Textbook Company, 1967.
22. Murril Paul W., "Fundamentals of Process Control Theory", Instrument Society of America, 1981.

23. Ogata Katsuhiko "Ingenieria de Control Moderna",  
Printece-Hall International, 1980.
24. Cohen G. H. and Coon G. A. "Theoretical  
Consideration of Retarded Control", Trans. ASME Vol.  
75, July 1953, p.p. 827-834.
25. Ziegler J. C., and Nichols N. B., "Optimum Settings  
for Automatic Controllers", Trans. ASME, Vol. 64, 1942  
p.p. 759-765.
26. Harriot P., "Process Control" New York Mc Graw-Hill Book  
Company 1964.
27. Kaneda M., Kuraoka H., "A CAD System on a Personal  
Computer for Designing Actual Control System"  
Proceedings of IEEE IECON'84, 1984, p.p. 237-238.
28. Naitoh H., "Control System Design Oriented CAD System on  
a Personal Computer", Proceedings of IEEE IECON'85,  
1985, p.p. 41-46.
29. Thompson P. M., "Manual Program CC: Computer Aided  
Control System Design", System Technology Inc., May.  
1985.

## APENDICE A

### SISTEMA DE CONTROL DE EXCITACION EN POR UNIDAD.

En el análisis de sistemas eléctricos en donde se manejen diferentes escalas de voltajes es recomendable utilizar valores por unidad, ya que el cálculo en dichos sistemas se simplifica si todas las condiciones eléctricas de interés se expresan como el cociente de la cantidad eléctrica dividida por una base o magnitud de referencia de la misma cantidad. Este método de expresar las cantidades por unidad permite eliminar los distintos niveles de voltajes, estableciendo un circuito equivalente del sistema en por unidad.

#### Valores Base:

La convención tomada para definir los voltajes base del generador y del excitador es la siguiente:

- Base  $V_T = 4160$  V, voltaje nominal del generador para la condición de circuito abierto.

- Base  $I_f = 103$  A, corriente de campo del generador necesaria para producir el voltaje nominal  $V_T$  considerando una relación lineal entre  $V_T$  y  $I_f$  (línea de air-gap de la curva de saturación).

- Base  $E_{FD} = I_f \times R_f = 21.42$  V.

Donde:  $R_f = 0.208$  ohms.

- Base  $I_{fe} = 1.9$  A, corriente de campo del excitador necesaria para producir el voltaje  $E_{FD}$  en el campo del generador, considerando una relación lineal entre  $E_{FD}$  y  $I_{fe}$  (línea de air-gap de la curva de saturación).

- Base  $V_R = I_e \times R_e = 8.5$  V.

Donde:  $R_e = 4.47$  ohms.

Las corrientes base  $I_f$  y  $I_{fe}$  fueron obtenidas a partir de las curvas de saturación del generador y el excitador de la máquina Toshiba.

Esta consideración es conveniente para nuestros fines ya que la condición de operación de interés es la máquina en vacío, además de que se simplifican los cálculos ya que los voltajes p.u.  $V_T$ ,  $E_{FD}$  y  $V_R$  son todos iguales bajo condiciones de estado estable sin saturación.



Los demás voltajes base son los voltajes nominales en cada punto de interés y son los siguientes:

- Base  $V_{REF} = 8.5$  V.
- Base  $V_{CD} = 8.5$  V.
- Base  $V_{Error} = 8.5$  V.

Valores de Ganancia del Sistema de Control de Excitación no Ajustables:

$$K_G = 194.172 \text{ V/V.}$$

$$K_e = 2.52 \text{ V/V.}$$

$$K_{AP} = 23 \text{ V/V.}$$

$$K_{TV/\alpha 2} = 0.01298 \text{ V/V.}$$

$$K_{AA} = 0.22 \text{ V/A.}$$

Valores de Ganancia del Sistema de Control de Excitación Ajustables:

$$K_{PA} = 0.5 \text{ a } 20 \text{ V/V.}$$

$$K_{ES} = 1 \text{ a } 10 \text{ V/V.}$$

Valores de Ganancia en Por Unidad.

$$K_G = K_G (\text{Base } E_{FD} / \text{Base } V_T) = 1 \text{ p.u.}$$

Los demás voltajes base son los voltajes nominales en cada punto de interés y son los siguientes:

- Base  $V_{REF} = 8.5 \text{ V.}$
- Base  $V_{CD} = 8.5 \text{ V.}$
- Base  $V_{Error} = 8.5 \text{ V.}$

Valores de Ganancia del Sistema de Control de Excitación no Ajustables:

$$K_G = 194.172 \text{ V/V.}$$

$$K_e = 2.52 \text{ V/V.}$$

$$K_{AP} = 23 \text{ V/V.}$$

$$K_{TV/\alpha_2} = 0.01298 \text{ V/V.}$$

$$K_{AA} = 0.22 \text{ V/A.}$$

Valores de Ganancia del Sistema de Control de Excitación Ajustables:

$$K_{PA} = 0.5 \text{ a } 20 \text{ V/V.}$$

$$K_{ES} = 1 \text{ a } 10 \text{ V/V.}$$

Valores de Ganancia en Por Unidad.

$$K_G = K_G (\text{Base } E_{FD} / \text{Base } V_T) = 1 \text{ p.u.}$$

$$K_e = K_e (\text{Base } V_R / \text{Base } E_{FD}) = 1 \text{ p.u.}$$

$$K_A = K_{PA} K_{AP} (\text{Base } V_{CD} / \text{Base } V_R) = 10 \text{ a } 500 \text{ p.u.}$$

$$K'_F = K_{AA} K_{ES} (\text{Base } I_{fe} / \text{Base } V_{CD}) = .05 \text{ a } .5 \text{ p.u.}$$

$$K_R = K_{TV} / \alpha_2 (\text{Base } V_T / \text{Base } V_{CD}) = 1 \text{ p.u.}$$

Las constantes de tiempo permanecen inalterables y son las siguientes:

$$T_A = 0.012 \text{ segundos.}$$

$$T_e = 0.75 \text{ segundos.}$$

$$T_G = 4 \text{ segundos.}$$

$$T_F = 0.2 \text{ a } 1.2 \text{ segundos.}$$

$$T_R = 0.001 \text{ segundos.}$$

## APENDICE B

### MEMORIA DE CALCULOS DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA.

En este apéndice se expondrá un breve resumen de los cálculos realizados para obtener las funciones de transferencia de lazo cerrado y lazo abierto.

La función de transferencia de lazo cerrado se utilizó para obtener las respuestas transitorias a entrada escalón de  $V_{REF}$ .

Las funciones de transferencia de lazo abierto se usaron para obtener los lugares de las raíces.

De la figura 2.10c observamos que la función de transferencia directa  $G(s)$  y la función de transferencia de realimentación  $H(s)$  son las siguientes:

$$G(s) = \frac{K_A K_e K_G}{(1+T_A s)(1+T_e s)(1+T_G s)}$$

$$H(s) = \frac{K_F^2 T_F s (1+T_G s)}{K_G (1+T_F s)} + \frac{K_H}{(1+T_R s)}$$

Partiendo de las ecuaciones anteriores, calculamos la función de transferencia de lazo cerrado de la siguiente forma:

$$V_T(s)/V_{REF}(s) = G(s)/(1+G(s)H(s))$$

Sustituyendo los valores de las funciones G(s) y H(s) y desarrollando obtenemos la siguiente función de transferencia de lazo cerrado del sistema de control de excitación:

$$\frac{U_{REF}(s)}{U_T(s)} = \frac{K_A K_e K_G (1+T_F s) (1+T_R s)}{(1+T_A s)(1+T_e s)(1+T_G s)(1+T_F s)(1+T_R s) + K_A K_e K_G K_R (1+T_F s) + K_A K_e K_F^2 T_F s(1+T_G s)(1+T_R s)}$$

Las funciones de transferencia de lazo abierto por definición se obtiene a partir de la ecuación característica. La ecuación característica es el denominador de la función de transferencia de lazo cerrado. Esta ecuación en forma desarrollada se muestra a continuación:

$$\left. \begin{aligned} & (T_A T_e T_F T_G T_R) s^5 \\ & + (T_e T_F T_G T_R + T_A T_F T_G T_R + T_A T_e T_G T_R + T_A T_e T_F T_R + T_A T_e T_F T_G) s^4 \\ & + (T_A T_e T_F + T_A T_e T_G + T_A T_F T_G + T_A T_e T_R + T_A T_G T_R + T_A T_F T_R + T_e T_F T_G \\ & \quad + T_G T_R T_F + T_R T_F T_e + T_G T_e T_R + K_A K_e K_F^2 T_F T_G T_R) s^3 \\ & + (T_A T_e + T_A T_F + T_A T_G + T_A T_R + T_e T_F + T_e T_G + T_e T_R + T_F T_G + T_F T_R \\ & \quad + T_G T_R + K_A K_e K_F^2 T_F T_G + K_A K_e K_F^2 T_F T_R) s^2 \\ & + (T_A T_e + T_F + T_G + T_R + K_A K_e K_F^2 T_F + K_A K_e K_G K_R T_F) s + (K_A K_e K_G K_R + 1) \end{aligned} \right\} = 0$$

La función de transferencia de lazo abierto para  $K_A$  se calcula fácilmente a partir de  $G(s)$  y  $H(s)$ . Esta función se muestra a continuación:

$$G(s)H(s) = K_A \left[ \frac{K_e K_F T_F s (1+T_G s) (1+T_R s) + K_e K_G K_R (1+T_F s)}{(1+T_A s) (1+T_e s) (1+T_G s) (1+T_F s) (1+T_R s)} \right]$$

De igual manera la función de transferencia de lazo abierto para  $K'_F$ , está dada por:

$$G(s)H(s) = K'_F \left[ \frac{K_A K_e T_F s (1+T_G s) (1+T_R s)}{(1+T_A s) (1+T_e s) (1+T_G s) (1+T_F s) (1+T_R s) + K_A K_e K_G K_R (1+T_F s)} \right]$$

La función de transferencia para el parámetro  $T_F$  se calcula a partir de la ecuación característica. Esta función de transferencia se muestra a continuación:

$$G(s)H(s) = T_F \left[ \frac{\begin{aligned} &(T_A T_e T_G T_R) s^5 \\ &+ (T_e T_G T_A + T_A T_G T_R + T_A T_e T_R + T_A T_e T_G) s^4 \\ &+ (T_A T_e + T_A T_G + T_A T_R + T_e T_G + T_G T_R + T_R T_e) s^3 \\ &+ (T_A + T_e + T_G + T_R) s^2 \\ &+ s + K_A K_e K_F s (1+T_G s) (1+T_R s) + K_A K_e K_G K_R s \end{aligned}}{\begin{aligned} &(T_A T_e T_G T_R) s^4 \\ &+ (T_A T_e T_G + T_A T_e T_R + T_A T_G T_R + T_G T_e T_R) s^3 \\ &+ (T_A T_e + T_A T_G + T_A T_R + T_e T_G + T_e T_R + T_G T_R) s^2 \\ &+ (T_A + T_e + T_G + T_R) s \\ &+ (K_A K_e K_G K_R + 1) \end{aligned}} \right]$$

La función de transferencia de lazo abierto para el parámetro  $T_e$  se calcula de igual forma que la ecuación anterior. Esta función es la siguiente:

$$G(s)H(s) = T_e \frac{\begin{aligned} & (T_A T_F T_G T_R) s^5 \\ & + (T_F T_G T_R + T_A T_G T_R + T_A T_F T_R + T_A T_F T_G) s^4 \\ & + (T_A T_F + T_A T_G + T_A T_R + T_F T_G + T_A T_F + T_G T_R) s^3 \\ & + (T_A + T_F + T_G + T_R) s^2 \end{aligned}}{\begin{aligned} & (T_A T_F T_G T_R) s^4 \\ & + (T_A T_F T_G + T_A T_G T_R + T_A T_F T_R + T_G T_R T_F + K_A K_e K_f T_F T_G T_R) s^3 \\ & + (T_A T_F + T_A T_G + T_A T_R + T_F T_G + T_F T_R + T_G T_R + K_A K_e K_f T_F T_G \\ & + K_A K_e K_f T_F T_R) s^2 + (T_A + T_F + T_G + T_R + K_A K_e K_f T_F \\ & + K_A K_e K_f T_R) s + (K_A K_e K_f T_R + 1) \end{aligned}}$$

Por ultimo obtenemos la función de transferencia de lazo abierto para el parámetro  $T_G$ :

$$G(s)H(s) = T_G \frac{\begin{aligned} & (T_A T_e T_F T_R) s^5 \\ & + (T_e T_F T_R + T_A T_F T_R + T_A T_e T_R + T_A T_e T_F) s^4 \\ & + (T_A T_e + T_A T_F + T_A T_R + T_e T_F + T_A T_F + T_e T_F + K_A K_e K_f T_F T_R) s^3 \\ & + (T_A + T_e + T_F + T_R + K_A K_e K_f T_F) s^2 + s \end{aligned}}{\begin{aligned} & (T_A T_e T_F T_R) s^4 + (T_A T_e T_F + T_A T_e T_R + T_A T_F T_R + T_A T_F T_e) s^3 \\ & + (T_A T_e + T_A T_F + T_A T_R + T_e T_F + T_e T_R + T_F T_R + K_A K_e K_f T_F T_R) s^2 \\ & + (T_A + T_e + T_F + T_R + K_A K_e K_f T_F + K_A K_e K_f T_R) s \\ & + (K_A K_e K_f T_R + 1) \end{aligned}}$$

APENDICE C  
PROGRAMA DE COMPUTACION CC.

C.1 INTRODUCCION.

La proliferación de computadoras ha ocasionado cambios en los diferentes procesos de la vida del hombre. Las diferentes áreas científicas se han modificado notablemente al ser introducido este tipo de tecnología.

Cada una de las diferentes áreas tiene requerimientos especiales de análisis auxiliado por computadora. Este cambio se ha acelerado al observarse que los algoritmos que se requieren pueden ser programados en una computadora como un paquete de "software" para tal aplicación, obteniéndose una herramienta rápida y eficiente en la solución de problemas.

Este es el caso del programa de computación Control Clasico (CC), el cual es un paquete de software creado para análisis y diseño de sistemas de control auxiliado por computadora. Este software está diseñado para correr en computadoras personales IBM ó compatibles.



## C.2 PROGRAMAS CC .MAC.

Para evaluar en forma eficiente el sistema de control de excitación se crearon en el paquete CC una serie de programas con extensión .MAC

Estos programas tienen como objetivo evaluar las funciones de transferencia del sistema de control de excitación para diferentes valores de los parámetros y obtener las gráficas que aparecen en los capítulos 3 y 4.

Los programas principales creados para tal fin son 5. Esto programas calculan la función de transferencia de lazo cerrado y evalúan cada una de las funciones de transferencia de lazo abierto para los parámetros  $K_A$ ,  $K_F$ ,  $T_F$ ,  $T_e$  y  $T_G$  que se exponen en el apéndice B. Estos programas fueron nombrados de la siguiente forma: SCE1.MAC, KF.MAC, TF.MAC, EX.MAC y TG.MAC respectivamente.

Las variables de salida de estos programas son  $g_2$  y  $g_3$ , donde  $g_2$  es la función de transferencia de lazo abierto y  $g_3$  es la función de transferencia de lazo cerrado.

Para un mejor entendimiento de estos programas el lector deberá consultar el manual de usuario del programa CC [29].

Los programas mencionados aparecen a continuación:

```

TYPE SCE1.MAC
build
g6=&1/(1+0.012*s)
g7=&2*&3*s/(1+&3*s)
g8=1/(1+0.75*s)
g9=1/(1+&4*s)
g10=1/(1+0.001*s)
g2=g6*g8*g9*g10+g6*g7*g8
g4=g6*g8*g9
g3=g6*g8*g9/(1+g2)
chpzf,g2,g2 & chpzf,g3,g3 & g&5=g3
quit

```

```

A:\ >TYPE KF.MAC
build
g8=&2*&3*&1*s*(1+&4*s)*(1+.001*s)
g4=(1+.012*s)*(1+.75*s)*(1+&4*s)*(1+&3*s)*(1+.001*s)
g6=&1*(1+&3*s)
g7=g4+g6
g2=g8/g7
g3=&1*(1+&3*s)*(1+.001*s)/((1+g2)*g9)
chpzf,g2,g2 & chpzf,g3,g3 & g&5=g3
quit

```

```

A:\ >TYPE TF.MAC
build
g4=(.012*.75*&4*.001)*s^5
g6=(.75*&4*.001+.012*&4*.001+.012*.75*.001+.012*.75*&4)*s^4
g5=(.012*.75+.012*&4+.012*.001+.75*&4+&4*.001+.001*.75)*s^3
g7=(.012+.75*&4+.001)*s^2+s+&1*&2*s*(1+&4*s)*(1+.001*s)+&1*s
g8=&3*(g4+g5+g6+g7)
g4=(.012*.75*&4*.001)*s^4
g5=(.012*.75*&4+.012*.75*.001+.012*&4*.001+&4*.75*.001)*s^3
g6=(.012*.75+.012*&4+.012*.001+.75*&4+.75*.001+&4*.001)*s^2
g7=(.012+.75*&4+.001)*s+&1+1
g9=g4+g5+g6+g7
g2=g8/g9
g3=&1*(1+&3*s)*(1+.001*s)/((1+g2)*g9)
chpzf,g2,g2 & chpzf,g3,g3 & g&5=g3
quit

```

TYPE EX.MAC

```

build
g4=(.012*&3*&4*.001)*s^5
g5=(&3*&4*.001+.012*&4*.001+.012*&3*.001+.012*&3*&4)*s^4
g6=(.012*&3+.012*&4+.012*.001*&3*&4+.001*&3*&4*.001)*s^3
g7=(.012*&3*&4+.001)*s^2+s
g8=g4+g5+g6+g7
g4=(.012*&3*&4*.001)*s^4
g5=(.012*&3*&4+.012*&4*.001+.012*&3*.001*&4*.001*&3
+&1*&2*&3*&4*.001)*s^3
g6=(.012*&3+.012*&4+.012*.001*&3*&4*&3*.001*&4*.001
+&1*&2*&3*&4*&1*&2*&3*.001)*s^2
g7=(.012*&3*&4+.001*&1*&2*&3*&4*&1*&3)*s+&1+1
g9=g4+g5+g6+g7
g2=g8/g9
g3=&1*(1+&3*s)*(1+.001*s)/((1+g2)*g9)
chpzf,g2,g2 & chpzf,g3,g3
quit

```

A:\ >TYPE TG.MAC

```

build
g4=(.012+.75*&3*.001)*s^5
g5=(.75*&3*.001+.012*&3*.001+.012*.75*.001+.012*.75*&3)*s^4
g6=(.012*.75+.012*&3+.012*.001+.75*&3+.001*&3+.75*.001
+&1*&2*&3*.001)*s^3
g7=(.012+.75*&3+.001*&1*&2*&3)*s^2+s
g8=&4*(g4+g5+g6+g7)
g4=(.012+.75*&3*.001)*s^4
g5=(.012*.75*&3+.012*.75*.001+.012*&3*.001+.001*&3*.75)*s^3
g6=(.012*.75+.012*&3+.012*.001+.75*&3+.75*.001*&3*.001
+&1*&2*&3*.001)*s^2
g7=(.012+.75*&3+.001*&1*&2*&3*&1*&3)*s+&1+1
g9=g4+g5+g6+g7
g2=g8/g9
g3=&1*(1+&3*s)*(1+.001*s)/((1+g2)*g9)
chpzf,g2,g2 & chpzf,g3,g3 & g5=g3
quit

```

### C.3 EXPRESIONES MATEMATICAS.

En esta sección se expondrán las expresiones matemáticas de las respuestas transitorias a entrada escalón que se observan en el capítulo 3. Estas ecuaciones están dadas en el dominio de Laplace y en el dominio del Tiempo.

Esta información tiene como finalidad que las personas interesadas en el análisis matemático tengan toda la información necesaria para tal objetivo.

Los subíndices que tienen dichas expresiones surgieron durante las corridas de los programas anteriores y no siguen ningún orden bien definido.

Esta información esta ordenada de acuerdo a la siguiente relación: en el lado izquierdo el número de la pagina donde se encuentra tal función y de lado derecho el número de figura y la curva a la cual corresponde la expresión matemática.

Pag.	Descripción.
106.	Función Matemática de la Figura 3.1 Curva 1.
107.	Función Matemática de la Figura 3.1 Curva 2.
108.	Función Matemática de la Figura 3.1 Curva 3.
109.	Función Matemática de la Figura 3.2 Curva 1.

110. Función Matemática de la Figura 3.2 Curva 3.
111. Función Matemática de la Figura 3.5 Curva 1.
112. Función Matemática de la Figura 3.5 Curva 3.
113. Función Matemática de la Figura 3.7 Curva 1.
114. Función Matemática de la Figura 3.7 Curva 3.
115. Función Matemática de la Figura 3.12 Curva 1.
116. Función Matemática de la Figura 3.14 Curva 2.
117. Función Matemática de la Figura 3.14 Curva 3.
118. Función Matemática de la Figura 3.2 Curva 2, Figura 3.5 Curva 2, Figura 3.7 Curva 2, Figura 3.12 Curva 2, Figura 3.14 Curva 1.

CC>display,g11

$$G11(s) = \frac{277.7778(s + 1000)}{(s + 999.9997)(s + 83.37777)(s^2 + 1.539203s + 3.664714)}$$

CC>ilt,g11

Causal Inverse Laplace transform

$$G1(t) = \begin{cases} -9.211904E-11 \exp(-999.9997t) + 4.068705E-02 \exp(-83.37777t) \\ \quad + 1.917945 \sin(1.752834t - 2.121544E-02) \exp(-.7696016t) \\ \quad \text{for } t > 0 \\ \\ 0 \text{ for } t < 0 \end{cases}$$

CC>■

CC>display,g12

$$G12(s) = \frac{1277.778(s + 1000)}{(s + 999.9986)(s + 83.53698)(s^2 + 1.381085s + 15.6285)}$$

CC>ilt,g12

Causal Inverse Laplace transform

- 107 -

$$G2(t) = \begin{cases} -1.949259E-09 \exp(-999.9986t) + .1857594 \exp(-83.53698t) \\ \quad + 3.957978 \sin(3.892512t - .0469501) \exp(-.6905426t) \text{ for } t > 0 \\ 0 \text{ for } t < 0 \end{cases}$$

CC>■

CC>display,g13

$$G13(s) = \frac{11111.11(s + 1000)}{(s + 999.9879)(s^2 - .1153668s + 130.9793)(s + 85.04417)}$$

CC>ilt,g13

Causal Inverse Laplace transform

$$G3(t) = \begin{cases} -1.474067E-07 \exp(-999.9879t) + 11.3067 \sin(11.44447t - .1336778) \\ \quad * \exp(5.768338E-02t) + 1.506950 \exp(-85.04417t) \text{ for } t > 0 \\ 0 \text{ for } t < 0 \end{cases}$$

CC>■



CC>display,g11

$$G11(s) = \frac{277.7778(s + 1.428571)(s + 1000)}{(s + 999.9997)(s + 81.97701)(s^2 + 1.572689s + 1.904525)(s + 2.795848)}$$

CC>ilt,g11

Causal Inverse Laplace transform

$$G1(t) = \begin{cases} -9.209665E-11 \exp(-999.9997t) + 4.285841E-02 \exp(-81.97701t) \\ \quad + 1.703794 \sin(1.134102t + .5277593) \exp(-.7863446t) \\ \quad - .9008871 \exp(-2.795848t) \text{ for } t > 0 \\ 0 \text{ for } t < 0 \end{cases}$$

CC>■

CC>display,g13

$$G13(s) = \frac{11111.11(s + 1.428571)(s + 1000)}{(s + 999.9879)(s^2 + 83.63628s + 4455.844)(s^2 + 2.721047s + 3.571241)}$$

CC>ilt,g13

Causal Inverse Laplace transform

- 110 -

$$G3(t) = \begin{cases} -1.459835E-07 \exp(-999.9879t) - 3.238462 \cos(52.02968t - .6621246) \\ \quad * \exp(-41.81814t) + 2.561583 \cos(1.31157t - 7.627214E-02) \\ \quad * \exp(-1.360524t) \text{ for } t > 0 \\ 0 \text{ for } t < 0 \end{cases}$$

CC>■

CC>display,g11

$$G11(s) = \frac{1277.778(s + 1.428571)(s + 1000)}{(s + 999.9986)(s + 80.25665)(s^2 + 3.88498s + 10.53918)(s + 2.205009)}$$

CC>ilt,g11

Causal Inverse Laplace transform

- III -

$$G1(t) = \begin{cases} -1.948169E-09 \exp(-999.9986t) + .210182 \exp(-80.25665t) \\ \quad + 6.358106 \sin(2.601136t + .2624445) \exp(-1.94249t) \\ \quad - 1.859742 \exp(-2.205009t) \text{ for } t > 0 \\ 0 \text{ for } t < 0 \end{cases}$$

CC>■

CC>display,g13

$$G13(s) = \frac{1277.778(s + 1.428571)(s + 1000)}{(s + 999.9986)(s^2 + 85.59061s + 2742.482)(s^2 + .7560241s + .6800708)}$$

CC>ilt,g13

Causal Inverse Laplace transform

- 112 -

$$G3(t) = \begin{cases} -1.938405E-09 \exp(-999.9986t) - .799802 \sin(30.18351t + .6063768) \\ \quad * \exp(-42.7953t) + .823931 \sin(.732924t + .586206) \\ \quad * \exp(-.378012t) \text{ for } t > 0 \\ 0 \text{ for } t < 0 \end{cases}$$

CC>■

CC>display,g11

$$G11(s) = \frac{1277.778(s + 1.428571)(s + 1030)}{(s + 999.9986)(s + 80.25665)(s^2 + 3.88498s + 10.53918)(s + 2.205009)}$$

CC>ilt,g11

Causal Inverse Laplace transform

- 113 -

$$G1(t) = \begin{cases} -1.948169E-09*\exp(-999.9986t) + .210182*\exp(-80.25665t) \\ \quad + 6.358106*\sin(2.601136t + .2624445)*\exp(-1.94249t) \\ \quad - 1.859742*\exp(-2.205009t) \text{ for } t > 0 \\ 0 \text{ for } t < 0 \end{cases}$$

CC>E

CC)display,g13

$$G13(s) = \frac{1277.778(s + 1.428571)(s + 1000)}{(s + 999.9986)(s^2 + 85.59061s + 2742.482)(s^2 + .7560241s + .6800708)}$$

CC)ilt,g13

Causal Inverse Laplace transform

- 114 -

$$G3(t) = \begin{cases} -1.938405E-09 \exp(-999.9986t) - .799802 \sin(30.18351t + .6063768) \\ \quad * \exp(-42.7953t) + .823931 \sin(.732924t + .586206) \\ \quad * \exp(-.378012t) \text{ for } t > 0 \\ 0 \text{ for } t < 0 \end{cases}$$

CC)■

CC>display,g11

$$G11(s) = \frac{5989.584(s + 1.428571)(s + 1630)}{(s + 999.9935)(s^2 + 88.72208s + 2832.428)(s^2 + 2.546378s + 3.036616)}$$

CC>ilt,g11

Causal Inverse Laplace transform

- 115 -

$$G1(t) = \begin{cases} -4.303036E-08 \exp(-999.9935t) - 3.894795 \sin(29.40282t + .5966259) \\ \quad * \exp(-44.36104t) + 2.218006 \cos(1.210622t - .1659931) \\ \quad * \exp(-1.273189t) \text{ for } t \geq 0 \\ 0 \text{ for } t < 0 \end{cases}$$

CC>■

CC>display,g12

$$G12(s) = \frac{2555.556(s + 1.428571)(s + 1000)}{(s + 999.9972)(s + 76.92297)(s^2 + 7.650133s + 23.94775)(s + 2.024919)}$$

CC>ilt,g12

Causal Inverse Laplace transform

- 116 -

$$G2(t) = \begin{cases} -7.792321E-09 \exp(-999.9972t) + .4812429 \exp(-76.92297t) \\ \quad + 12.53252 \sin(3.052313t + 9.102249E-02) \exp(-3.825067t) \\ \quad - 1.620409 \exp(-2.024919t) \text{ for } t > 0 \\ 0 \text{ for } t < 0 \end{cases}$$

CC>■



CC)display,g13

$$G13(s) = \frac{8518.519(s + 1.428571)(s + 1000)}{(s + 999.9907)(s + 78.12749)(s^2 + 8.237083s + 113.1408)(s + 1.406653)}$$

CC)ilt,g13

Causal Inverse Laplace transform

- 117 -

$$G3(t) = \begin{cases} -8.678907E-08 \exp(-999.9907t) + 1.527975 \exp(-78.12749t) \\ \quad + 11.62832 \sin(9.807058t - .1338217) \exp(-4.118542t) \\ \quad + 2.350603E-02 \exp(-1.406653t) \text{ for } t > 0 \\ 0 \text{ for } t < 0 \end{cases}$$

CC)■

CC)display,g12

$$G12(s) = \frac{1277.778(s + 1.428571)(s + 1000)}{(s + 999.9986)(s + 76.65963)(s + 7.288185)(s^2 + 2.398821s + 3.338196)}$$

CC)ilt,g12

Causal Inverse Laplace transform

$$G2(t) = \begin{cases} -1.947081E-09 \exp(-999.9986t) + .2432716 \exp(-76.65963t) \\ \quad - 2.769381 \exp(-7.288185t) + 2.7492 \cos(1.378264t - .4056332) \\ \quad * \exp(-1.19941t) \text{ for } t > 0 \\ 0 \text{ for } t < 0 \end{cases}$$

CC)■

#### C.4 TABLAS DE LOS LUGARES DE LAS RAICES.

En esta parte se expondrá la información adicional de los lugares de las raíces presentados en el capítulo tres. Esta información es proporcionada programa CC. Las tablas correspondientes se muestran a continuación:

OPEN LOOP POLES, ANGLE OF DEPARTURE

-1.333333	0
-83.333334	-180
-1000	0
-.25	-180

OPEN LOOP ZEROS, ANGLE OF ARRIVAL

NONE

CENTER OF GRAVITY = -271.2292  
 # ASYMPTOTIC INFINITE PATTERNS = 4  
 ANGLES:  
 -45 45 135 225

BREAKPOINTS, GAIN

-757.6158	, 3370065
-55.28196	, -2832.398
-.7897427	, .8711673

Tabla C.1 Informacion del Lugar de las Raices de la Figura 3.3.

OPEN LOOP POLES, ANGLE OF DEPARTURE

-1.333333	0
-1.428571	-180
-83.33334	0
-1000	0
-.25	-180

CENTER OF GRAVITY = -43.0476  
 # ASYMPTOTIC INFINITE PATTERNS = 2  
 ANGLES:  
 -90 90

OPEN LOOP ZEROS, ANGLE OF ARRIVAL

-997.4967	180
-1.376656 +j 1.298156	41.5
-1.376656 -j 1.298156	-41.5

BREAKPOINTS, GAIN

-41.84246	, 155.5272
-1.381934	, -1.125815E-02
-.6888955	, .7228237

Tabla C.2 Información del Lugar de las Raíces de la figura 3.4.

OPEN LOOP POLES.	ANGLE OF DEPARTURE
-999.9986	-180
-83.53698	0
-.6905426 +j 3.892512	-155.4
-.6905426 -j 3.892512	155.4
-1.428571	180

CENTER OF GRAVITY = -43.04761  
 # ASYMPTOTIC INFINITE PATTERNS = 2  
 ANGLES:  
 -90 90

OPEN LOOP ZEROS.	ANGLE OF ARRIVAL
0	180
-1000	0
-.25	0

BREAKPOINTS.	GAIN
-1000.694	,-179.4942
-999.3057	,-178.2063
-42.67386	,.3238088
4.622718	,-.2010235
-.1316633	, 21.00509

Tabla C.3 Informacion del Lugar de las Raices de la Figura 3.6.

OPEN LOOP POLES. ANGLE OF DEPARTURE

-999.9986	0
-83.53698	180
-.6905426 +j 3.892512	-76.2
-.6905426 -j 3.892512	76.2

OPEN LOOP ZEROS. ANGLE OF ARRIVAL

0	180
-999.9986	0
-76.80027	0
-4.058098 +j 1.47936	-92.4
-4.058098 -j 1.47936	92.4

CENTER OF GRAVITY = -3.528595E-05  
 # ASYMPTOTIC INFINITE PATTERNS = -1  
 ANGLES:

BREAKPOINTS. GAIN

-999.0303	, 1.000417E-03
-1000.967	, 9.984716E-04
-106.2699	, 7.754112E-03
-60.80858	, 2.632171E-02
-4.069617	, 3.259379
-1.466967	, 1.313617

Tabla C.4 Informacion del Lugar de las Raices de  
 la Figura 3.8.

OPEN LOOP POLES, ANGLE OF DEPARTURE

-1001.79	180
-463.9952	180
-1.280075 +j 1.170781	82.3
-1.280075 -j 1.170781	-82.3

OPEN LOOP ZEROS, ANGLE OF ARRIVAL

0	180
-1000	0
-83.33334	0
-1.428571	-180
-.25	0

CENTER OF GRAVITY = 383.3332  
 # ASYMPTOTIC INFINITE PATTERNS = -1  
 ANGLES:

BREAKPOINTS, GAIN

-1077.652 , 5.590346E-04
-43.33751 , .2383559
-1.038078 , -25.21453
-.1255993 , 741.6466

Tabla C.5 Información del Lugar de las Raíces de  
 la Figura 3.13.



OPEN LOOP POLES, ANGLE OF DEPARTURE	OPEN LOOP ZEROS, ANGLE OF ARRIVAL
-1005.516	0
-39.64003 +j 64.34779	0
-39.64003 -j 64.34779	-180
-1.29892	0
	0

CENTER OF GRAVITY =  $9.700656E-05$   
 # ASYMPTOTIC INFINITE PATTERNS = -1  
 ANGLES:

BREAKPOINTS, GAIN

-931.7353	, 1.175004E-03
-1079.369	, 8.70929E-04
-50.5069	, -7.814122E-02
-.1139885	, 793.3856

Tabla C.6 Informacion del Lugar de las Raices de la Figura 3.15.