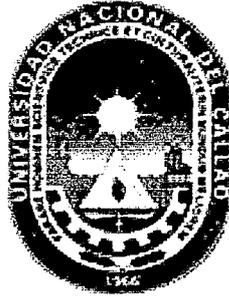


T/621.3/ch 88

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

1937



**“APLICACIÓN DE ALGORITMOS GENÉTICOS PARA
COORDINAR ESTABILIZADORES EN SISTEMAS
ELÉCTRICOS DE POTENCIA”**

TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE

INGENIERO

EN LA ESPECIALIDAD DE

INGENIERÍA ELÉCTRICA

POR

BRAULIO CHUCO PAUCAR

ASESOR DE TESIS

ING. MANUEL JUAN CASAS SALAZAR

UNAC-PERU

Diciembre del 2003.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**APLICACIÓN DE ALGORITMOS GENÉTICOS PARA
COORDINAR ESTABILIZADORES EN SISTEMAS
ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

Por:

BRAULIO CHUCO PAUCAR

Tesis de grado presentada a la Comisión integrada por los profesores:

ING. CARLOS HUAYLLASCO MONTALVA

ING. FERNANDO OYANGUREN RAMÍREZ

ING. HUBER MURILLO MANRIQUE

ING. MANUEL JUAN CASAS SALAZAR (Asesor)

UNAC – PERÚ

Diciembre - 2003

En memoria de mi padre

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer el sacrificio invaluable de mi **Madre** por todo. Y agradecer a mis hermanos Víctor y Basíledes por su apoyo y comprensión.

También quiero agradecer muy sinceramente por la oportunidad, el apoyo y la exigencia recibida de mi asesor el profesor Ing. Manuel J. Casas Salazar. Durante el proceso de investigación del presente trabajo.

Al Ing. José Antonio Castillo. Investigador de fenómenos transitorios en sistemas de potencia de México por haberme influido en la investigación; así mismo al Ing. Orlando P. Hevia. (Argentina) Investigador y miembro del CLAUE, Por haberme brindado valiosas soluciones con respecto al Programa ATP.

A los Profesores de la escuela profesional ingeniería eléctrica de la Universidad Nacional del Callao.

A mis Amigos con quienes comparto informaciones y puntos de vista con respecto a las nuevas tendencias de la tecnología eléctrica.

Braulio Chuco Paucar

Lima diciembre 2003

CONTENIDO

ACRÓNIMOS.....	7
LISTA DE FIGURAS.....	8
LISTA DE TABLAS.....	10
RESUMEN.....	11

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1	Objetivos.....	13
1.1.1	Generales:.....	13
1.1.2	Específicos:.....	13
1.2	Estructura del trabajo.....	14
1.3	Antecedentes.....	16
1.3.1	El Sistema eléctrico de Potencia (SEP).....	16
1.3.2	La evolución de la tecnología en los sistemas eléctricos.....	20
1.3.3	Evolución de métodos de sintonización de estabilizadores de sistemas de potencia.....	21
1.3.4	Algoritmos de optimización.....	27
1.3.5	Sintonización de controles basada en técnicas inteligentes.....	27
1.3.6	Dispositivos FACTS.....	28
1.4	Referencias.....	30

CAPÍTULO 2

ESTABILIDAD DE SEÑAL PEQUEÑA

2.1	INTRODUCCIÓN.....	34
2.2	Estabilidad de Señal Pequeña.....	34
2.3	Conceptos Fundamentales de estabilidad de Sistemas Dinámicos.....	36
2.3.1	Representación del Estado-Espacio.....	36
2.3.2	Linealización.....	38
2.4	Método de Análisis de Estabilidad.....	39
2.5	Eigenpropiedades de la Matriz de Estado.....	40
2.5.1	Eigenvalores.....	40
2.5.2	Eigenvectores.....	40
2.5.3	Matriz Modal.....	41
2.5.4	Modo, sensibilidad y factor de participación.....	41
2.5.5	Relación entre Eigenpropiedades y Funciones de Transferencia.....	43
2.6	Estabilidad de Señal Pequeña para una Máquina conectada a una Barra-Infinita.....	44
2.6.1	Efectos de Sistemas de Excitación.....	49
2.7	Estabilizadores de Sistemas de Potencia(PSS).....	50
2.7.1	Señal estabilizadora Washout.....	52
2.7.2	Compensación de adelanto de fase.....	52
2.7.3	Efectos del PSS.....	53
2.8	Resumen.....	55
2.9	Referencias.....	56

CAPÍTULO 3

ESTABILIDAD DE SEÑAL PEQUEÑA PARA SISTEMA MULTIMÁQUINA

3.1	INTRODUCCIÓN.....	59
3.2	Modelamiento Matemático de las Ecuaciones de Estado del sistema	60
3.3	Ecuaciones de la Red	63
3.4	Modelo de las Cargas Estáticas.....	64
3.5	Integraciones de las ecuaciones de la Red y de la Máquina	67
3.6	Resumen.....	68
3.7	Referencias.....	69

CAPÍTULO 4

ALGORITMOS GENÉTICOS Y TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN

4.1	INTRODUCCIÓN.....	71
4.2	Condiciones de Optimización.....	73
4.2.1	Optimización Monovariable.....	74
4.2.2	Optimización Multivariable.....	74
4.3	Métodos de búsqueda.....	75
4.3.1	Métodos de búsqueda directa.....	75
4.3.2	Métodos de búsqueda indirecta.....	76
4.4	Técnicas Heurísticas	76
4.4.1	Redes Neuronales Artificiales (ANN)	77
4.4.1.1	Aplicaciones de ANN.....	79
4.4.2	Lógica Difusa(FL)	83
4.4.2.1	Conceptos básicos de Lógica Difusa.....	84
4.4.2.1.1	Conjuntos Concretos.....	84
4.4.2.1.2	Conjuntos Difusos.....	84
4.4.2.1.3	Conceptos Imprecisos.....	85
4.4.2.1.4	Etiquetas lingüísticas y Operadores.....	85
4.4.2.2	Controlador Difuso.....	86
4.4.2.3	Inferencia en lógica difusa.....	87
4.4.2.4	Aplicación de FL(En el diseño de PSS).....	88
4.5	Descripción de los Algoritmos Genéticos GA.....	89
4.5.1	Representación de la Población Inicial.....	91
4.5.2	Selección.....	92
4.5.3	Operadores Genéticos	94
4.5.3.1	Recombinación (Crossover).....	94
4.5.3.2	Mutación(Mutation).....	95
4.5.3.3	Reinserción(Reinsertion)	96
4.5.4	Selección de los parámetros del algoritmo	97
4.5.5	Terminación del GA	99
4.5.6	Aplicación de Algoritmo Genético	99
4.5.7	GA versus Métodos Tradicionales.....	101
4.5.7.1	Ventajas.....	102
4.5.7.2	Desventajas	102
4.6	Metodología propuesta para selección de parámetros del PSS.....	103

4.6.1	Sensitividad de primer y segundo orden de Eigenvalor.....	103
4.6.1.1	Sensitividad de eigenvalor de matriz aumentada.....	104
4.6.1.1.1	Sensitividad de eigenvalor de primer orden.....	104
4.6.1.1.2	Sensitividad de eigenvector de primer orden.....	105
4.6.1.1.3	Sensitividad de eigenvalor de segundo orden.....	105
4.6.1.2	Sensitividad de eigenvalor de matriz aumentada perturbada.....	106
4.6.2	Función Objetiva.....	107
4.6.3	Sintonización de PSSs y FDSs.....	108
4.7	Resumen.....	111
4.8	Referencias.....	111

CAPÍTULO 5

APLICACIONES

5.1	INTRODUCCIÓN.....	114
5.2	Aplicación 1: Máquina de Aguaytia-Barra Infinita.....	115
5.2.1	Datos para el modelo.....	115
5.2.2	Representación del modelo en ATP-Draw.....	118
5.2.3	Condiciones de Operación.....	118
5.2.4	Resultado de simulaciones para los casos 1, 2, 3 y 4.....	119
5.2.5	Determinación de modos naturales de la Máq.de Aguaytia sinPSS.....	123
5.2.6	Análisis de respuesta con PSS y AVR (parámetros existentes).....	123
5.2.7	Análisis con parámetros optimizados con el GA.....	124
5.2.8	Simulaciones en el tiempo de los parámetros encontrados.....	126
5.2.9	Discusión de Resultados.....	127
5.3	Aplicación 2: Sistema de 5 Máquinas: Aguaytia, C. Pato, Carhuaquero, Cahua, Talara y 24 barras.....	128
5.3.1	Datos para el modelo:.....	128
5.3.2	Condiciones de operación.....	130
5.3.3	Resultados de simulación con parámetros de control existentes.....	131
5.3.4	Determinación de modos naturales sin PSS.....	136
5.3.5	Análisis con parámetros existentes de PSS y AVR, modos de oscilación..	137
5.3.6	Análisis con parámetros optimizados con el GA.....	138
5.3.7	Simulaciones en el tiempo ATP-Draw.....	141
5.4	Discusión de Resultados.....	152
5.5	Resumen.....	153
5.6	Referencias.....	153

CAPÍTULO 6

DESCRIPCIÓN DEL MODELAMIENTO EN ATP-DRAW Y MATLAB

6.1	INTRODUCCIÓN.....	155
6.2	ATP-Draw, Descripción del programa.....	155
6.2.1	Alternative Transients Program (ATP).....	155
6.2.2	ATP-Draw.....	156
6.2.3	Instalación.....	156
6.2.4	Modelamiento de Generadores Máquina Síncrona 59.....	156

6.2.4.1	Máquina síncrona 59 controlado.....	161
6.2.4.2	Máquina síncrona 59 no controlada.....	162
6.2.5	Modelamiento de Transformadores trifásicos de 3 devanados.....	163
6.2.5.1	Cálculos Previos de parámetros con rutina de O Hevia.....	163
6.2.5.2	Interpretación de los Archivos *pch.....	164
6.2.6	Modelamiento de Líneas de Transmisión.....	166
6.2.6.1	Interpretación de Setup J-Marti.....	166
6.2.6.2	Interpretación de los archivos *pch.....	169
6.2.7	TACS, Descripción de. (Transient Analysis of Control Systems).....	169
6.2.7.1	Desarrollo de Controladores utilizando los TACS.....	170
6.2.7.2	Programación Fortran en TACS para el PSS.....	172
6.2.7.3	Ventajas y desventajas de los TACS, posibilidades de desarrollar Prototipos.....	173
6.2.8	MODELS; Descripción.....	176
6.2.8.1	Programando en MODELS para el AVR(Modelo EXBAS de PTI) y PSS(Modelo IEEEEST de PTI).....	178
6.2.8.2	Ventajas y desventajas de los MODELS, posibilidades de desarrollar Prototipos.....	180
6.2.9	Utilización del ANALYZER.....	184
6.2.9.1	Procesamiento de Datos en el Analyzer.....	185
6.2.9.2	Utilización de Archivos *PL4. ,Generación de Archivos Comtrade, casos de comparación.....	186
6.3	MatLab, Descripción del Programa.....	186
6.3.1	Descripción de los Comandos de Álgebra Lineal Numérica de interés.....	186
6.3.2	Programación en MatLab.....	187
6.3.3	Diseño del GA(Genetic Algorithm).....	188
6.4	Simulink Power systems-Descripción de.....	193
6.4.1	Aplicación en control y Modelamiento de SEP.....	195
6.5	Resumen.....	201
6.6	Referencias.....	202
CONCLUSIONES.....		204
RECOMENDACIONES Y CONTRIBUCIONES.....		205
APÉNDICE A.....		206
APÉNDICE B.....		207
APÉNDICE C.....		209
APÉNDICE D.....		215
APÉNDICE E.....		217

ACRÓNIMOS

AVR	Automatic Voltage Regulator
PSS	Power Systems Stabilizers
FDS	FACTS Devices Stabilizers
HVDC	High Voltage Direct Current
SEP	Sistemas Eléctricos de Potencia
SICN	Sistema Interconectado Centro Norte
SEIN	Sistema Eléctrico Interconectado Nacional
ANN	Artificial Neural Network
GA	Genetic Algorithm
FL	Fuzzy Logic
FACTS	Flexible Altern Current Transmission Systems
TCSC	Thyristor Controlled Series Capacitors
UPFC	Unified Power Flow Controller
IPFC	Interline Power Flow Controller
STATCOM	Static Compensator
SVC	Static Vars Compensator
TCPST	Thyristor Controller Phase Shifted Transformer
ATP	Alternative Transient Program
AG	Algoritmo Genético

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1.1	Estructura del trabajo.....	15
Fig. 1.2	Sistema Eléctrico de Potencia.....	20
Fig. 1.3	Influencia de los Controladores FACTS en la Transmisión de potencia	30
Fig. 2.1	Clasificación de los tipos de Estabilidad	34
Fig. 2.2	Transformación del marco de referencia	44
Fig. 2.3	Sistema de excitación con transductor de tensión, sin entrada de PSS	48
Fig. 2.4	(a) Comportamiento normal de la máquina sin control, (b) K1A y D1A por el efecto del AVR.	50
Fig. 2.5	Sistema de Excitación thyristorizado con PSS	51
Fig. 2.6	Bloque Washout	52
Fig. 2.7	Bloque de Compensación de adelanto de fase.....	52
Fig. 2.8	Influencia del PSS en el Torque resultante.....	55
Fig. 3.1	Representación de la carga a través de la combinación de los componentes básicos.....	65
Fig. 4.1	Neurona tipo biológico	78
Fig. 4.2	Representación de una neurona artificial.....	78
Fig. 4.3	Diagrama de bloques para la implementación.....	80
Fig. 4.4	Representación multicapa con representación en la salida.....	80
Fig. 4.5	Modelo del sistema configurado.....	81
Fig. 4.6	Aprendizaje del Neuro-Identificador durante precontrol.	82
Fig. 4.7	Proceso de adaptación o estimación de la desviación de la velocidad	82
Fig. 4.8	Comportamiento de la Lógica Humana.....	84
Fig. 4.9	Estructura interna del controlador difuso.	86
Fig. 4.10	(a) Inferencia en lógica tradicional (b) Inferencia en lógica difusa.....	87
Fig. 4.11	Representación gráfica de los mecanismos de Inferencia en Lógica Difusa... ..	88
Fig. 4.12	Universo: Funciones de pertenencia	89
Fig. 4.13	La ruleta de Selección.....	93
Fig. 4.14	Cruzamiento de un solo punto y multipuntos.....	95
Fig. 4.15	Reinserción de los descendientes a la nueva generación.....	97
Fig. 4.16	Diagrama de flujo para el Algoritmo Genético	99
Fig. 4.17	Convergencia del GA. mostrando el mejor fenotipo ($f(x)$) / genotipo (x) ...	100
Fig. 4.18	Convergencia del GA. multi-población.....	101
Fig. 4.19	Diagrama de bloques de un PSS con dos bloques de atraso y adelanto	108
Fig. 4.20	Diagrama de Flujo del Método.....	110
Fig. 5.1	Curva de Magnetización del transformador / grupo de Aguaytia.	115
Fig. 5.2	Disposición geométrica de los conductores.....	116
Fig. 5.3	Modelo del Sistema de excitación con control básico.....	117
Fig. 5.4	Modelo del PSS de dos canales.	117
Fig. 5.5	Sistema C.T. Aguaytia- Barra Infinita.....	118
Fig. 5.6	Caso 1. En pu: Potencia eléctrica, Ángulo de par(Grad. Electr.) Efd. , Desviación angular.....	119
Fig. 5.7	Caso 2. En pu: Potencia eléctrica, Ángulo de par(Grad. Electr.) , Desviación angular y Efd.....	120
Fig. 5.8	Caso 3. En pu: Potencia eléctrica, Ángulo de par(Grad. Electr.) , Efd, Desviación angular.....	121
Fig. 5.9	Caso 4. En pu: Potencia eléctrica, Efd. y Desviación angular.....	122

Fig. 5.10	Parámetros seleccionados por cada generación, convergencia de la función objetiva del GA.....	125
Fig. 5.11	Caso 2 Ángulo de par, Desviación de la Velocidad.....	126
Fig. 5.12	Caso 3 en pu. Ángulo de par eléctrico, Torque electrodinámico y desviación de la velocidad.....	127
Fig. 5.13	En pu. Potencia del generador 1 Caso 2 y 3.....	131
Fig. 5.14	En pu. Potencia del generador 2 Caso 1, 2 y 3.....	131
Fig. 5.15	En pu. Potencia del generador 3 Caso 1, 2 y 3.....	132
Fig. 5.16	En pu. Potencia del generador 4 Caso 1, 2 y 3.....	132
Fig. 5.17	En pu. Potencia del generador 5 Caso 1, 2 y 3.....	132
Fig. 5.18	En grados eléctricos. Ángulo de par del generador 1 Caso 2 y 3.....	133
Fig. 5.19	En grados eléctricos. Ángulo de par del generador 2 Caso 1, 2 y 3.....	133
Fig. 5.20	En grados eléctricos. Ángulo de par del generador 3 Caso 1, 2 y 3.....	133
Fig. 5.21	En grados eléctricos. Ángulo de par del generador 4 Caso 1, 2 y 3.....	134
Fig. 5.22	En grados eléctricos. Ángulo de par del generador 5 Caso 1, 3.....	134
Fig. 5.23	En grados eléctricos. Diferencia angular entre máquinas Caso 1,.....	134
Fig. 5.24	En grados eléctricos. Diferencia angular entre máquinas Caso 1,.....	135
Fig. 5.25	En grados eléctricos. Diferencia angular entre máquinas Caso 2,.....	135
Fig. 5.26	En grados eléctricos. Diferencia angular entre máquinas Caso 2,.....	135
Fig. 5.27	En grados eléctricos. Diferencia angular entre máquinas Caso 3,.....	136
Fig. 5.28	En grados eléctricos. Diferencia angular entre máquinas Caso 3,.....	136
Fig. 5.29	Convergencia de la función objetiva.....	140
Fig. 5.30	Parámetros de PSSs obtenidos con el GA por cada generación.....	140
Fig. 5.31	Caso 1: Comportamiento de la potencia en M. Cahua.....	141
Fig. 5.32	Caso 1: Comportamiento de la desviación de velocidad en M. Cahua.....	141
Fig. 5.33	Caso 1: Comportamiento de la potencia en M. C. Pato.....	142
Fig. 5.34	Caso 1: Comportamiento de la desviación de velocidad en M. C.P.....	142
Fig. 5.35	Caso 1: Comportamiento de la potencia en M. Aguaytia.....	142
Fig. 5.36	Caso 1: Comportamiento de la desviación de velocidad en M. Aguay.....	143
Fig. 5.37	Caso 1: Comportamiento de la potencia en M. Talara.....	143
Fig. 5.38	Caso 1: Comportamiento de la desviación de velocidad en M. Talara.....	143
Fig. 5.39	Caso 1: Diferencia angular entre máquinas.....	144
Fig. 5.40	Caso 2: Comportamiento de la potencia en M. Carhuaquero.....	145
Fig. 5.41	Caso 2: Comportamiento de la desviación de la velocidad en M. Carhq... ..	145
Fig. 5.42	Caso 2: Comportamiento de la desviación de velocidad en M. Cahua.....	145
Fig. 5.43	Caso 2: Comportamiento de la potencia en M. C. Pato.....	146
Fig. 5.44	Caso 2: Comportamiento de la desviación de velocidad en M. C. Pato.....	146
Fig. 5.45	Caso 2: Comportamiento de la potencia en M. Aguaytia.....	146
Fig. 5.46	Caso 2: Comportamiento de la desviación de velocidad en M. Aguaytia.. ..	147
Fig. 5.47	Caso 3: Comportamiento de la desviación de velocidad en M. Carhq.....	147
Fig. 5.48	Caso 3: Comportamiento de la potencia en M. Cahua.....	147
Fig. 5.49	Caso 3: Comportamiento de la desviación de velocidad en M. Cahua.....	148
Fig. 5.50	Caso 3: Comportamiento de la potencia en M. C. Pato.....	148
Fig. 5.51	Caso 3: Comportamiento de la desviación de velocidad en M. C. Pato.....	148
Fig. 5.52	Caso 3: Comportamiento de la potencia en M. Aguaytia.....	149
Fig. 5.53	Caso 3: Comportamiento de la desviación de velocidad en M. Aguay.....	149
Fig. 5.54	Caso 3: Comportamiento de la potencia en Mach. Talara.....	149
Fig. 5.55	Caso 3: Comportamiento de la desviación de velocidad en M. Talara.....	150
Fig. 5.56	Caso 4: Comportamiento de las potencias en las Máquinas.....	150

Fig. 5.57	Caso 4: Comportamiento de las potencias en las Máquinas.....	151
Fig. 5.58	Caso 4: Comportamiento de tensión RMS Barras de Talara y Machala.....	151
Fig. 5.59	Caso 4: Comportamiento de las tensiones en RMS en las Barras de Talara, Zorritos y Machala después de la energización.....	152
Fig. 5.60	Caso 4: Comportamiento de la Corriente en RMS en Barra de Machala....	152
Fig. 5.61	Caso 1A Comportamiento de la tensión	152
Fig. 5.62	Caso 1A y 3A Comportamiento de la Potencia de las máquinas	153
Fig. 6.1	Unidades de Turbina-Generador	157
Fig. 6.2	Turbina-Generador componentes de alrededor de la masa.....	157
Fig. 6.3	Diagrama vectorial del MS59.....	158
Fig. 6.4	Disposición de los devanados en una máquina generalizada.....	158
Fig. 6.5	Diagrama de Bloques para la transformación de Park's.....	159
Fig. 6.6	MS59 Controlado con AVR, sistema de excitación Dinámica, PSS data IN. Y nodos de control.....	162
Fig. 6.7	Ingreso de atributos y características.....	165
Fig. 6.8	Curva de saturación del transformador de 3 devanados ubicado en la SE. de Trujillo Norte	166
Fig. 6.9	Ingreso de atributos y características de JMARTI SETUP	167
Fig. 6.10	Resultado del cálculo de parámetros de la Línea, Comparación del comportamiento del modelo con respecto al modelo tipo PI.....	168
Fig. 6.11	Diagrama de Bloques para el control de la SM59.....	170
Fig. 6.12	Modelo representado en ATP-Draw (CT Aguaytia)	170
Fig. 6.13	Esquema a bloque del lazo principal del regulador de tensión.....	171
Fig. 6.14	Diagrama de bloques del PSS modelo IEEEEST.....	173
Fig. 6.15	Modelo que ejecuta la sentencia IF de la salida del IEEEEST	173
Fig. 6.16	Diagrama esquemático del convertidor AC-DC-AC.....	174
Fig. 6.17	Diseño del control de AC-DC-AC mediante el TACS (Parte de un sistema BACK to BACK de 24 pulsos).....	174
Fig. 6.18	Algunos pulsos de disparo de conmutación para los GTO.....	175
Fig. 6.19	Sistema Excitatriz Dinámica con AVR en MODELS.....	179
Fig. 6.20	PSS en MODELS.....	180
Fig. 6.21	Control Inteligente de un SEP.....	182
Fig. 6.22	Speed Drive Ajustable de 6 pulsos.....	183
Fig. 6.23	Resultados del ADS6P.....	184
Fig. 6.24	Respuesta en tiempo real para Low pass-Parallel.....	196
Fig. 6.25	Respuesta en tiempo real para Low pass-Series.....	197
Fig. 6.26	Modelo del sistema eléctrico simple	197
Fig. 6.27	Representación del modelo en Simulink	197
Fig. 6.28	Analizador Powergui del Simulink.....	198
Fig. 6.29	Resultados de la impedancia en función de la frecuencia.....	200
Fig. 6.30	Resultados desde un medidor	201
Fig. 1-D	Esquema simplificado del sistema Centro-Norte en el ATP-Draw.....	218

LISTA DE TABLAS

Tabla 4.1	Correspondencia entre operadores de la Teoría de Conjuntos, el Álgebra Booleana y la Lógica Tradicional.....	86
Tabla 5.1	Parámetros de la máquina de Aguaytia.....	115
Tabla 5.2	Parámetros de Línea secuencia positiva y cero.....	116
Tabla 5.3	Datos para el sistema equivalente en la S.E. T. Maria.....	116
Tabla 5.4	Parámetros del Sistema Excitatriz con AVR.....	117
Tabla 5.5	parámetros del PSS con dos canales.....	117
Tabla 5.6	Modos, Frecuencia natural, y coeficiente de amortiguamiento Caso Base sin Estabilizador.....	123
Tabla 5.7	Modos, Frecuencia natural, y coeficiente de amortiguamiento Caso Base con Estabilizador y parámetros existentes.....	124
Tabla 5.8	Modos electromecánicos de interés sin Estabilizador.....	124
Tabla 5.9	Parámetros del estabilizador obtenido por medio del algoritmo genético.....	126
Tabla 5.10	Principales Parámetros de los Generadores.....	128
Tabla 5.11	Parámetros de las fuentes equivalentes Estiaje-Mínima 2003.....	128
Tabla 5.12	Parámetros de los sistemas de excitación según la Ref. [1].....	129
Tabla 5.13	Parámetros de los PSS según la Ref. [1].....	129
Tabla 5.14	Despacho de potencia de las máquinas.....	130
Tabla 5.15	Modos, frec. De oscilación, coeficiente de amortiguamiento sin PSS.	137
Tabla 5.16	Modos, frecuencia de oscilación, coeficiente de amortiguamiento con PSS.....	138
Tabla 5.17	Modos de interés para los tres casos.....	138
Tabla 5.18	Parámetros asumidos para los tres generadores.....	139
Tabla 5.19	Parámetros de los AVR.....	139
Tabla 5.20	Parámetros de los PSS.....	141

ABSTRACT

This work presents development of a methodology based on a tool evolutionary - Genetic algorithm - as an alternative for optimize the problem of power systems stabilizers (PSS) parameter tuning, obtaining robust parameters that allow to enlarge the region of stability of power systems and to respond appropriately in front of any operation state or conditions; This methodology is based on the solution of an objective function by means of the aleatory search of parameters with any condition (Aptitude) that satisfies the minimization condition real part of the first and second-order Eigenvalue Sensitivity of the augmented system state matrix, representing this a global power system.

The first part is presented an overview to the modern power systems, their evolution and implementation with the devices FACTS, etc. Without leaving aside a brief description of classical approaches to tuning of the PSS.

In the following two sections, the formulation of the state matrix in the context of machine-infinite bus, considering the inclusion of AVR and PSS. Later on the formulation extends to a multi-machine system.

In the following section, it is described the most important heuristic method, a global search techniques about to simultaneously optimize the PSS parameter settings of the PSS and the FDS. The method has been used for tuning in a machine- infinite bus system, for validate and to value its applicability, it is shown that using the powerful properties of GA, to simultaneously optimize the robust parameter settings and has been found to perform very satisfactorily before the presence perturbation signal, then it is applied to a power system, in this case to the SINC represented by the most important machines, obtaining appropriate answer front different operation condition, or small and large signal perturbation, as loads or generation variations and transmission systems out. Finally, it is described the implementation process of power system and GA in ATP-Draw and the MatLab with purpose for the future applications help.

RESUMEN

En este trabajo se presenta el desarrollo de una metodología basada en una herramienta evolutiva –Algoritmo Genético– como una alternativa para optimizar la sintonización de estabilizadores de sistemas de potencia (PSS) obteniendo parámetros robustos que permitan ampliar la región de estabilidad de un SEP y responder adecuadamente frente a cualquier estado de operación; Esta metodología se basa en la solución de una función objetiva mediante la búsqueda aleatoria de parámetros con ciertos requisitos (Aptitud) que satisfaga la condición de minimización de la parte real de las sensitividades de primer y segundo orden de los eigenvalores de la matriz de estado aumentado, representando este último al SEP en forma global.

En la primera parte se presenta una breve introducción a los modernos sistemas de potencia, su evolución y la implementación con los dispositivos FACTS, etc. Sin dejar de lado una breve descripción de la evolución de las metodologías desarrolladas para la sintonización de los PSS.

En las siguientes dos secciones, se desarrolla la formulación de la matriz de estado en el contexto de máquina-barra infinita considerando la inclusión del AVR y el PSS. Posteriormente se extiende la formulación a un sistema multimáquina.

En la siguiente sección, se describe las técnicas heurísticas más importantes, y se plantea la metodología para la sintonización y optimización de los PSS y los FDS. Posteriormente, esta metodología se prueba en un sistema máquina-barra infinita para validar y valorar su aplicabilidad. Se muestra que la sintonización de controles mediante el algoritmo genético satisface las expectativas planteadas mediante el desempeño adecuado, eficiente y robusto ante la presencia de diferentes tipos de perturbaciones, luego se aplica a sistemas de potencia, en este caso al SICN representado por las máquinas más importantes, obteniendo una respuesta adecuada frente a diferentes condiciones de operación y/o pequeñas y grandes perturbaciones como variaciones de cargas o generación y salidas de líneas de transmisión. Finalmente, se describe el proceso de Modelamiento e implementación de GA en el ATP-Draw y el MatLab respectivamente a manera de ayuda para las futuras aplicaciones.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Los sistemas eléctricos de potencia continúan sujetos a cambios vertiginosos, debido a las diferentes necesidades como: Suministrar grandes cantidades de energía a grandes distancias dentro del margen establecido por las normas técnicas de calidad de servicio eléctrico, implementar con las nuevas tecnologías basadas en la electrónica de potencia, microprocesadores, sistemas de telecomunicaciones, etc. Para garantizar el servicio óptimo y económico que permita mantenerse dentro del nivel de competencia.

En la actualidad los sistemas de potencia presentan un gran nivel de interconexión por las ventajas que estos tienen, tal es así, que el sistema eléctrico Peruano en un plazo no muy lejano se interconectará con todos los países fronterizos, ya sea sincrónica o asincrónicamente mediante los convertidores Back to Back (AC-DC-AC) o los sistemas HVDC (High Voltage Direct Current) que indirectamente incrementan la robustez del sistema. De ser la interconexión sincrónica traerá como consecuencia un crecimiento excesivo de los sistemas de potencia llevando a que estos sean cada vez mas difíciles de controlar y por tanto, pueden ser menos seguros, evacuar grandes cantidades de potencia a través de líneas con capacidades no prevenidas, aunado a esto el control inadecuado, con potencia reactiva en zonas no deseadas, con grandes oscilaciones dinámicas entre Diferentes partes del Sistema, limitan el uso del cien por ciento del potencial de un sistema.

En la actualidad, existe la imperiosa necesidad de utilizar los dispositivos microelectrónicas, comunicaciones de alta velocidad, para el control y

protección de los sistemas de transmisión, además de estos, los dispositivos FACTS de última generación serán los que terminen de controlar en forma global a los sistemas de transmisión. Sin embargo los centros de producción energética son los que juegan el papel de responder y mantenerse produciendo energía frente a cualquier anomalía en el sistema, para esto la tendencia es dotarse de elementos autoadaptables basados en la microelectrónica y su respectivo software, que sean capaces de responder adecuadamente, estos elementos o dispositivos autoadaptables son básicamente la nueva generación de los AVR (Automatic Voltage Regulator), PSVR (Power System Voltage Regulator), APSS (Adaptive Power System Stabilizer). Mientras no se cuente con esta tecnología, se debe optimizar el uso de los controles existentes en el sistema peruano, es decir los AVR y los PSS (Power System Stabilizer) existentes que son los que incrementan la respuesta positiva frente a oscilaciones electromecánicas luego de grandes o pequeñas perturbaciones. Así, en este trabajo se propone optimizar los parámetros del PSS mediante la aplicación del Algoritmo Genético.

1.1 Objetivos

1.1.1 Generales:

- ✓ Analizar la influencia del AVR y el PSS en la respuesta de la máquina a los diferentes estados de operación en el SICN.
- ✓ Optimizar los parámetros de PSS para una mejor respuesta de amortiguamiento mediante la aplicación del Algoritmo Genético.

1.1.2 Específicos:

- ✓ Evaluar los modos de oscilación, y análisis de la sensibilidad de primer y segundo orden. Mediante el análisis de Eigenvalores y Eigenvectores.

- ✓ Realizar el análisis matemático de manera simplificada a las ecuaciones diferenciales linealizando y desarrollando un modelo lineal para un sistema compuesto de:
 - Generadores.
 - Cargas estáticas y dinámicas.
 - Redes de interconexión
 - Sistemas de excitación.
 - Controladores así como el PSS.
- ✓ Desarrollar un software de optimización evolutiva basado en algoritmo Genético para su respectiva utilización en la selección de parámetros robustos de PSS.
- ✓ Incentivar la utilización del software libre de análisis transitorio ATP-Draw en los diferentes estudios relacionados en el área de control y protección de sistemas eléctricos ya sea en la Universidad u otros centros de investigación. Además, el empleo del MatLab para los cálculos de estados y simulación de controles en SEP. Para tal efecto este trabajo se desarrolló en lo que respecta al Modelamiento para la simulación respectiva en dicho programa(ATP-Draw), además de ello se ha incluido procedimientos y detalles para lograr un correcto Modelamiento implementados con los TACS (Transients Analysis of Control System) y lenguaje MODELS propio del programa, esto como una forma de HELP para los estudiantes.

1.2 Estructura del trabajo

Este trabajo se encuentra estructurado en 4 partes importantes, en la primera parte, los Capítulos 2 y 3, se desarrolla una revisión y adecuación de la teoría para el análisis de estabilidad de señal pequeña, desarrollando los conceptos básicos para dar con la ecuación de estado del sistema eléctrico multimáquina incluyendo los dispositivos de control.

En la segunda parte, el Capítulo 4, se desarrolla las diferentes técnicas de optimización, centralizado en las técnicas heurísticas y profundizando la teoría de los Algoritmos Genéticos, se prosigue con la proposición de la *función objetiva* basada en el análisis de los modos de oscilación y la sensibilidad de segundo orden de los eigenvalores, esta función objetiva es resuelta mediante el Algoritmo Genético para obtener los parámetros robustos de los PSS que permita ampliar la región de estabilidad de un sistema eléctrico.

En la tercera parte, Capítulo 5, se ejecuta la aplicación de la propuesta en la sintonización de PSS en un sistema Máquina-Barra infinita y en el Sistema Interconectado Centro-Norte del País SICN.

En la última parte se describe la implementación del sistema eléctrico y algunos dispositivos de control en el ATP-DRAW y el MatLab a manera de ayuda para los interesados en aprender el uso adecuado del programa.

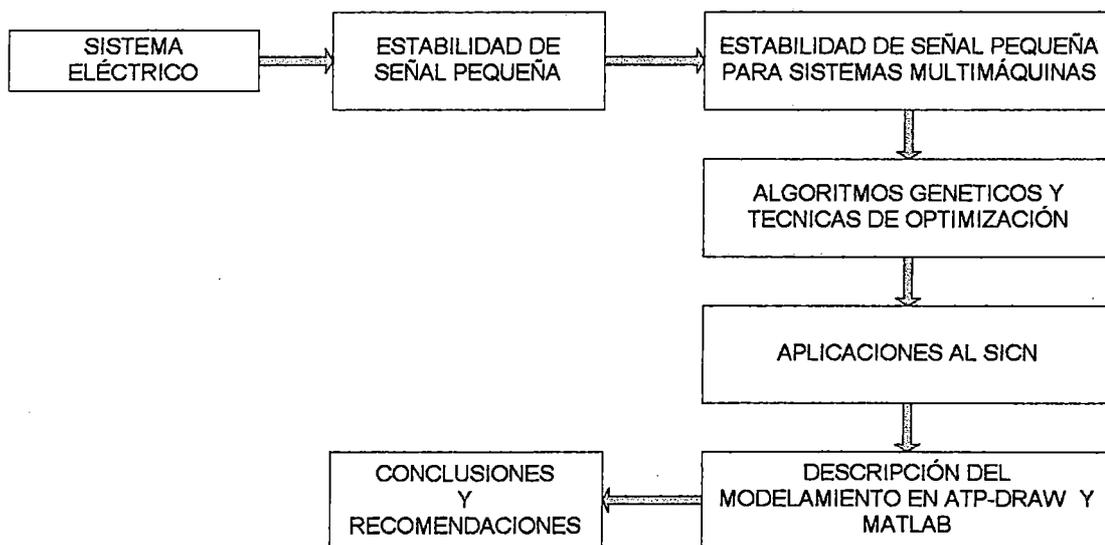


Fig. 1. 1 Estructura del trabajo

1.3 Antecedentes

1.3.1 *El Sistema eléctrico de Potencia (SEP)*

Los sistemas eléctricos desde sus inicios hasta la actualidad han cambiado dramáticamente en niveles de potencia y niveles de calidad, transformándose prácticamente en un reto para los ingenieros electricistas mantener en condiciones óptimas de funcionamiento y simplificar los trabajos a través de la implementación y desarrollo de nuevas tecnologías y estrategias de control a un costo mínimo.

En el sistema eléctrico nacional los cambios principalmente se están dando en el incremento de la demanda de 1520.5MW en el año 1991 a 2953MW en el año 2003, en cuanto a la tecnología de control básicamente de frecuencia y tensión la mayor parte de ellos son tecnologías de los 70s, un ejemplo para citar tenemos el caso de los SVC encargados de controlar el voltaje, son las primeras generaciones de los sistemas flexibles de transmisión en corriente alterna FACTS. No cabe duda de que la tendencia de los sistemas eléctricos en los países de Sudamérica es interconectarse en forma global, primero por presión comercial y segunda por razones de operatividad, esto sugiere plantearnos dos preguntas simples acerca de las posibilidades del País.

Primero: ¿el SEIN tiene las características técnicas para incorporarse y garantizar un servicio adecuado de acuerdo a las exigencias de las normas técnicas de calidad internacional? Y segundo: Siendo nuestro País uno de los que tiene el más alto índice de riqueza Hidro-energética que podría suministrar energía a los mercados internacionales, ¿Estamos desarrollando algún tipo de proyecto para dar con esto? Una respuesta sencilla podría ser “es decisión de las empresas concesionarias”, la posibilidad es, que en algún momento el País se convierta en cargas de paso, es decir, en lo que actualmente para el sistema es por ejemplo, Huanuco, una

carga colgada al sistema en uno de los anillos del SEIN, y que el centro de control de San Juan en Lima se traslade a cualquier otro país preparado para hacerlo.

El suministro de energía con gran confiabilidad es fundamental, ya que cualquier interrupción en el servicio puede causar inconvenientes mayores a los usuarios, puede llevar a situaciones de riesgo; en el consumo industrial, puede ocasionar severos problemas técnicos y de producción ya que en estos existen equipos sofisticados. Invariablemente, en tales circunstancias, la pérdida del suministro repercute en grandes pérdidas económicas. La confiabilidad en el suministro puede incrementarse asegurando con elementos instalados de calidad, un parque de generación en reserva adecuada, un gran sistema de corredores de energía interconectados grandes distancias con rutas alternativas para evacuar el flujo de potencia de acuerdo a su capacidad. El crecimiento natural del sistema obliga a los operadores a pensar en nuevas estrategias de operación por los distintos escenarios y más problemáticos que hace algunos años atrás. Uno de estos problemas que viene causando interés en la industria eléctrica es la aparición de oscilaciones de baja frecuencia asociados con los modos electromecánicos que podrían ser entre distintas áreas interconectadas, estas oscilaciones pueden permanecer y crecer hasta llegar a separarse estos sistemas si no se tiene un amortiguamiento adecuado, desde sus inicios al amortiguamiento de las oscilaciones ha sido catalogado como un problema importante en la operación de los SEP para asegurar el continuo funcionamiento. No obstante este fenómeno ha sido conocido desde hace mucho como un sistema masa-resorte análogo al sistema eléctrico.

No cabe duda que la estabilidad transitoria juega un rol importante para cumplir con los objetivos de suministro de energía, la estabilidad transitoria

se traduce en la capacidad de los generadores de permanecer en sincronismo bajo cualquier ámbito de operación sujetos a grandes perturbaciones tales como fallas trifásicas salidas de líneas o de generadores, la estabilidad transitoria se desarrolla en pocos segundos debido a que la pérdida del sincronismo es en este corto tiempo llevando al incremento de la posición angular de los rotores de los generadores bajo la influencia de la potencia acelerante, perdiendo así la estabilidad con grandes excursiones de los rotores. A raíz de estos problemas existe la necesidad del diseño y uso de los dispositivos basados en la electrónica de potencia que incrementen la estabilidad de un sistema en estos periodos. Por otro lado existe la proliferación de los sistemas de control automático mal sintonizados que incrementan la probabilidad de interacción negativa entre los SEP.

Las oscilaciones que pueden aparecer en los sistemas podrían ser las oscilaciones electromecánicas con duración de pocos milisegundos (dinámica rápida) y las oscilaciones electromecánicas (dinámica lenta) con duración de algunos segundos. En el análisis y control de los SEP, las oscilaciones de mayor interés son:

Las oscilaciones de modo local, que interactúan unidades en una estación generadora con respecto al resto de generadores de una misma área con frecuencia en el rango de 0.7 a 2.0 Hz. Estos modos son controlables fácilmente por ejemplo implementando a la máquina con PSS con entradas simples de ΔP , Δf , Δw y en forma efectiva con alimentación de ΔP .

Las oscilaciones de modo Inter-área que interactúan con un grupo de máquinas en una parte o área del sistema contra otro grupo(s) de máquinas situadas en diferentes regiones con frecuencia en el rango de 0.1 a 0.7 Hz. Estos modos podrían ser controlados por ejemplo implementando a la

máquina con PSS con entradas simples de ΔP , Δf , Δw y en forma efectiva con alimentación de Δf , Δw .

Y las oscilaciones combinadas tanto de modo local y modo Inter-área podrían ser controladas por ejemplo implementando a las máquinas con PSS con entradas múltiples de $\Delta P + \Delta f$ o $\Delta P + \Delta w$.

El PSS convencional es un control lineal de excitación suplementario que proporciona amortiguamiento al sistema de potencia, con objeto de ayudar a extinguir las oscilaciones y eliminar los efectos del amortiguamiento negativo causado por el regulador de voltaje. La función básica de los estabilizadores de sistemas de potencia es incrementar los límites de estabilidad modulando la excitación del generador, para suministrar amortiguamiento a las oscilaciones del rotor del generador Ref. [1]

Otros dispositivos pueden ser efectivos como apoyo auxiliar a los dispositivos convencionales. El desarrollo de la electrónica de potencia proporciona nuevas alternativas de mejorar e incrementar el desempeño y la capacidad de los sistemas de transmisión de potencia, estos podrían ser los FACTS, es la tendencia de la actualidad. Los dispositivos FACTS pueden proporcionar un control rápido y continuo del flujo de potencia en los sistemas de transmisión controlando los voltajes en los nodos críticos, cambiando la impedancia de las líneas de transmisión o controlando el ángulo de fase al final de las líneas. Ref. [2] el control de la potencia activa en tiempo real, es lo que se logra con estos dispositivos, para el tema que nos ocupa, estos dispositivos proporcionan el amortiguamiento de algunos modos de oscilación mediante FDS (FACTS Devices Stabilizers), algunos Autores denominan el POD (Power Oscillations Damping)

Lograr Estabilizadores tanto PSS como FDS robustos bajo todas las condiciones de operación sin interactuar entre ellos es de principal interés.

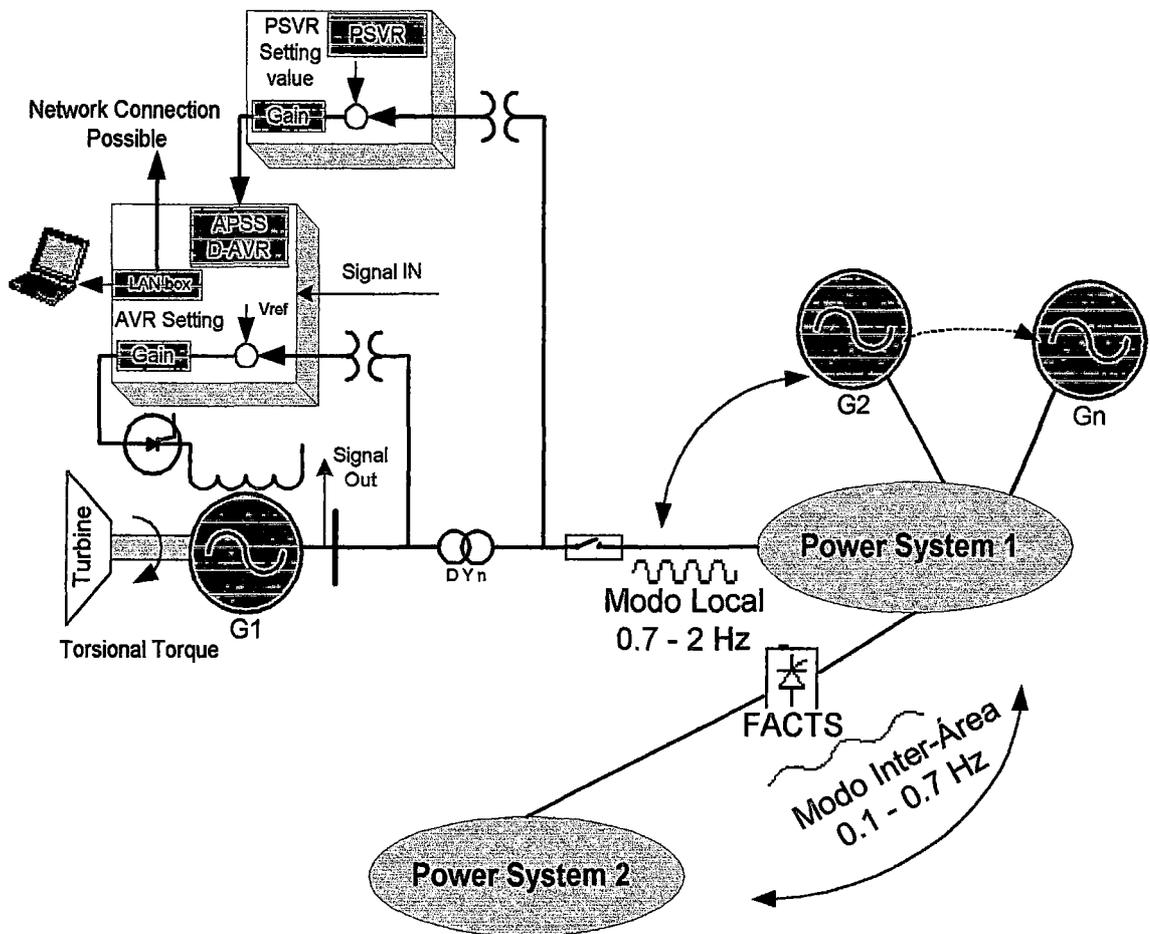
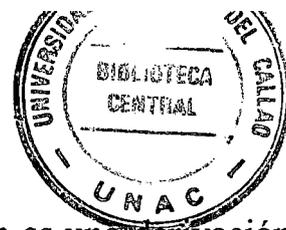


Fig. 1. 2 Sistema Eléctrico de Potencia

1.3.2 La evolución de la tecnología en los sistemas eléctricos.

Para los países como el Perú es difícil absorber el desarrollo de la tecnología en su totalidad, por diversas razones la limitación se acrecienta más, tal es por ejemplo, la capacidad económica, las dimensiones técnicas del sistema eléctrico nacional, etc. Como se sabe, el desarrollo de las nuevas tecnologías principalmente tiene dos vertientes: el desarrollo de las telecomunicaciones y el desarrollo de la ingeniería genética, estos asu vez a ocasionado el desarrollo de la microelectrónica y la ingeniería de software que emulan la inteligencia humana para ser almacenados en estos

1937



dispositivos microelectrónicas; Cualquier otra aplicación es una derivación de estos dos.

El desarrollo de la ingeniería eléctrica no está exento de lo descrito, las telecomunicaciones, la microelectrónica implementados con software basado en el comportamiento humano o la genética humana están llevando a sistemas eléctricos inteligentes, que se traducen en los dispositivos de control inteligentes para generadores (Governors, AVR, PSS), controles inteligentes para las líneas de transmisión (FACTS De última generación) con sus respectivos sistemas inteligentes de protección y sistemas de comunicación.

Si bien es cierto, los principios básicos son los mismos pero no existe punto de comparación, la tecnología del antaño con las nuevas tecnologías y los que están en proceso de diseño.

1.3.3 Evolución de métodos de sintonización de estabilizadores de sistemas de potencia.

Durante las últimas cuatro décadas, gran cantidad de trabajos de investigación se han publicado en el área de PSS. La investigación se ha orientado a objetivos parecidos en obtener PSS que pueden mantener un funcionamiento óptimo entre sistemas de máquina y parámetros del sistema. Sin embargo, como se menciona en la Ref. [3], la determinación de una función universal para los PSSs no es prácticamente factible. Las diversas estrategias de control y optimización han encontrado sus aplicaciones; Es difícil detallar el desarrollo histórico de PSS y sus aplicaciones, por eso se describe modestamente solo algunos trabajos importantes en el área.

Heffron y Phillips [4] analizaron el efecto de los reguladores de voltaje en el funcionamiento de un moderno Amplidyne a baja-excitación como generadores. Ellos fueron los primeros en presentar al modelo con pequeña

perturbación. Sus investigaciones revelaron que el uso de un moderno regulador incrementa el límite de estabilidad.

DeMello y Concordia [3] Examinaron el caso de una sola máquina conectado a un una barra infinito a través de una reactancia externa. Este análisis desarrolló las visiones en los efectos de sistemas de excitación con thyristores y estableció los requisitos de estabilidad para tales sistemas. Estos requisitos de estabilidad incluyeron el voltaje del regulador, parámetros de ganancia, así como los parámetros de PSS. Ellos exploraron el efecto de la variación de la carga de la máquina, constante de inercia y la impedancia externa (la longitud de la línea de transmisión) en el amortiguamiento, características de voltaje y velocidad inyectando pequeñas perturbaciones en el torque mecánico. Ellos desarrollaron algunos conceptos unificados que explican los fenómenos de la estabilidad y predijeron magnitudes característicos deseables de las funciones de estabilizadores.

Larsen y Swann [5] Presentaron la aplicación de PSS con señal de entrada como: velocidad, frecuencia o potencia. Presentaron las pautas para poner a punto los PSS que permite una actuación dinámica deseada.

Kundur [6] describió los detalles de un PSS diseñado para las unidades generadoras en Ontario Hydro. Se consideraron dos esquemas de excitación alternativos, con y sin TGR (Transient Gain Reduction) que fue demostrado con la selección de parámetros de PSS, ambos esquemas proporcionaron la respuesta satisfactoria. La selección apropiada de constante de tiempo del bloque washout, la salida del PSS limitado a la compensación de adelanto y atraso de fase.

Yu y Siggers [7] presentaron la aplicación de estado-retroalimentado para optimizar el PSS, mientras Moussa y Yu [8] propusieron una técnica de desplazamiento de los eigenvalores para dimensionar la matriz, la técnica

consiste en el desplazamiento del eigenvalor dominante a la izquierda en el plano del eigenvalor hasta un punto satisfactorio que permite determinar los límites del control, esta técnica también es aplicada a sistemas multimáquinas. Sin embargo la técnica no tuvo mucha evolución por ser difícil de aplicar.

Los Autores también se han ocupado de las técnicas de sintonización simultánea para sistemas multimáquinas. DeMello [9] presentó un análisis del eigenpar (eigenvalor-eigenvector) para identificar las máquinas más idóneas para ser equipadas con PSS en sistemas multimáquina, esto debido a ser susceptible a la inestabilidad dinámica carentes de amortiguamientos en varios modos de oscilaciones.

Abdalla [10] también presentó un procedimiento para la determinación de las máquinas más eficaces para la estabilización. Sugiere la inclusión del coeficiente de amortiguamiento en las ecuaciones de operación de la máquina.

Fleming [11] propuso un algoritmo de asignación secuencial de eigenvalores para seleccionar los parámetros de estabilizadores en un sistema de potencia multimáquina. En la sintonización secuencial, los parámetros del estabilizador se determinan usando aplicación repetida de SISO (single-input/single-output). La sugerencia habilita la selección de parámetros de estabilizadores tal que una mejora específica en la relación de amortiguamiento de cualquier modo de oscilación aproxima una solución.

Los estabilizadores están secuencialmente aplicados a las diferentes situaciones de operación por medio del análisis modal presentada por DeMello [9]. Sin embargo, debe observarse que la obtención secuencial de estabilizadores perturba el eigenvalor previamente determinado.

Doi y Abe [12] propusieron el diseño / sintonización coordinado de PSS en el sistema multimáquina combinando el análisis de sensibilidad del eigenvalor y la programación lineal. Los parámetros de PSS son determinados minimizando los índices de participación. Este método puede simultáneamente seleccionar a las máquinas en el cual pueden aplicarse eficazmente el PSS.

Lim y Elangovan [13] y [14] presentaron un método que consiste en diseñar los estabilizadores en un sistema multimáquina a partir del acercamiento de frecuencia en el dominio complejo.

En los anteriores trabajos se ha discutido, considerando que la estructura del PSS es fijada a varios puntos de operación del sistema incluido las condiciones nominales de operación. Sin embargo, tal fijación de operación óptima en algunos puntos, para otros puntos resultan negativas al cambiar los parámetros del sistema.

Varias estrategias de control moderno tales como self-tuning control, VSC (Variable-Structure Control), FLS (Fuzzy-Logic Systems), ANN (Artificial Neural Networks), han sido desarrollados en recientes publicaciones apuntando en desarrollar configuraciones robustas de PSSs. La aplicabilidad, las ventajas y las desventajas de mínimas variaciones, de asignación de polos, o la adaptación de la desviación lineal y cuadrática de polos, para un sistema eléctrico de potencia han sido planteadas por Ghosh [15]. Presentaron una comparación de la operación de los sistemas dinámicos usando tres alternativas de PSS, Adaptación de variación de polos, adaptación lineal y cuadrática, y los PSS convencionales; demostrando que la adaptación de la variación de los polos tiene una respuesta óptima.

Cheng [16] presento un PSS adaptable basado en un algoritmo de autobúsqueda de variación de polos y somete a la prueba de pequeñas y grandes perturbaciones con resultados óptimos.

Cheng [17] propone mas allá de las expectativas un PSS autoadaptable basado en un algoritmo de autobúsqueda de variación de polos para oscilaciones multimodos. En este algoritmo los parámetros del sistema son identificados cada 80 milisegundos mientras la señal del control es actualizada cada 20 milisegundos.

Lim [18] propuso un método para diseñar un PSS auto-sintonizado basado en la minimización del índice de función error cuadrático. La efectividad del PSS auto-sintonizado para el excitatriz o el governor bajo diferentes condiciones de operación ha respondido satisfactoriamente.

Como una alternativa a los PSS auto-sintonizado, la estructura variable PSS ha sido desarrollada por algunos autores con el objetivo de fortalecer la respuesta positiva del PSS frente a variaciones de parámetros y condiciones de operación del sistema. Los VSC son insensibles a la variación de parámetros del sistema y esto puede ser superada fácilmente mediante el uso de microcomputadores, sin embargo un procedimiento sistemático para la detección del vector cambiante(sistema) para el diseño es importante.

Chan and Hsu [19] han propuesto el VSPSS óptimo para un sistema Máquina-Barra infinita al igual que para un sistema multimáquina, la ventaja principal de los VSPSS es censar las variaciones de parámetros en el sistema para su minimización de la función error cuadrático que represente estos cambios o modos de operación.

Kothari [20] ha presentado un diseño de VSPSS basados en los eigenvalores de interés para los diferentes modos donde la variación de los parámetros es obtenida mediante el método de colocación de polos.

La teoría Fuzzy aplicada en PSS ha sido reportado por Hsu and Cheng [26]. La propuesta desarrollada con PSS de múltiples entradas requiere solamente de medidas locales dentro de cada máquina sin importar los parámetros externos.

En [21], Hoang y Tomsovic propusieron un acercamiento sistemático, al diseño de control mediante la lógica difusa, donde los parámetros de control son calculados cada uno mientras el PSS no esta conectada o calculadas en tiempo real como respuesta frente a los cambios en la operación. En este método se mostró que el controlador es insensible a la precisión del funcionamiento del sistema.

Las Redes Neuronales Artificiales también se aplicaron en el diseño de los PSS, basado en el concepto del proceso paralelo y tiene una gran habilidad principalmente para complicados comportamientos no lineales del sistema, basados en espacios de estado así como los espacios de entrada y salida.

Zhang [22] presentó PSS basado en un método de aproximación que emplea el perceptron (funciones cognoscitivas, identificación y clasificación) con redes multi-capa con auto-corrección de errores basado en métodos de aprendizaje. El ANN es entrenado con el grupo de datos de entrenamiento generado por un estabilizador de sistema de potencia adaptable.

Abido and Abdel-Magid presentaron en [23] un diseño de PSS que combina numéricamente ANN y FLS de manera uniforme proporcionando así una descripción de un modelo libre del sistema de control superando así la debilidad de ANN y FLS que presentan por separado en la implementación del PSS en estado de operación.

Las técnicas de diseño de los PSS continúan siendo materia de investigación, desde la combinación de análisis modal, asignación de

modos y análisis de sensibilidades, hasta las técnicas heurísticas pasando por sistemas inteligentes autoadaptables. La estructura del control consiste de componentes PID en cascada y filtro de tipo adelanto-atraso. A pesar de que estas técnicas brindan buenos resultados son superadas por el avance continuo y el desarrollo de la investigación.

1.3.4 Algoritmos de optimización

La sintonización de estabilizadores mediante técnicas robustas conlleva a la búsqueda de robustez en la operación de los sistemas de potencia de gran magnitud, esto se consigue optimizando parámetros preseleccionados de los estabilizadores en cuestión, la técnica de sintonización propuesta en [11] al [23] considerando el modelo completo del sistema basándose en un análisis no lineal, sin embargo requieren de información previa (eigenvalores del sistema) maximizar el amortiguamiento de los diferentes modos de oscilación y minimizar las interacciones de los controles e incrementar la estabilidad global se utiliza la integral del error cuadrático.

$$\min\{J = \int_0^{\infty} [\hat{X}^T Q \hat{X}] dt\} \quad (1.1)$$

Donde \hat{X} es un vector de desviaciones de variables de estado y se define como $\hat{X} = X(t) - X(0)$ y $X(t)$ es el estado en el tiempo t .

1.3.5 Sintonización de controles basada en técnicas inteligentes.

Las técnicas inteligentes son algoritmos que se basan en la emulación del comportamiento humano, la genética humana o las neuronas. Cada una con sus propias características, estas técnicas más importantes se clasifican en la Lógica Difusa: Una verdad intermedia basada en la reacción humana o el comportamiento frente a eventos cotidianos.

Las Redes Neuronales Artificiales: Una emulación de la neurona humana, que se basa en las funciones cognitivas, identificación, clasificación y transmisión de la información.

Los Algoritmos Genéticos: Basado en la alteración de la genética humana para evolucionar en uno superior, es decir, se busca el individuo perfecto a través de las alteraciones de los genes.

Cada una de estas técnicas son detalladas en forma básica para ser aplicadas en el diseño de los PSS y se centralizan en los Algoritmos Genéticos.

1.3.6 Dispositivos FACTS

Por la orientación que tiene este trabajo es necesario el tratamiento de las principales características que tiene estos dispositivos así como la capacidad de amortiguar a las oscilaciones electromecánicas locales o Inter-áreas, incrementando considerablemente la región de estabilidad de un sistema de potencia a través de sus señales estabilizantes los FDS que requieren de una adecuada sintonización.

Según IEEE PES [25] los FACTS son “Sistemas de Trasmisión de corriente alterna basadas en electrónica de potencia y en otros controladores estáticos para incrementar la confiabilidad, capacidad de transferencia de potencia”.

Si bien es cierto en el sistema eléctrico peruano aun no se tiene los requerimientos de estos dispositivos de última generación, pero se tiene los SVC (Satatic Vars Compensator) una tecnología de la década del 70 considerado hoy el primer controlador FACTS cuya función es controlar los niveles de tensión y de transmisión de potencia. Las principales características que tienen esta nueva tecnología son:

- Mejoran los perfiles de tensión.

- Posibilitan la interconexión entre sistemas de potencia de diferentes frecuencias.
- Responden dinámicamente a inestabilidades del sistema.
- Brindan un control efectivo del flujo de potencia desplazando por la ruta más conveniente para el ente generador.
- Permite incrementar la capacidad de transporte de los corredores hasta los límites térmicos.
- Maximizan la transferencia de potencia, minimizando las pérdidas por reactivos.
- Amortigua las oscilaciones de potencia.

Entre otras ventajas que tienen los FACTS, la evolución de esta tecnología basada en la electrónica de alta potencia, es con la aparición de los SVC considerados de primera generación sumándose posteriormente el TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) que usa Rectificadores Controlados de Silicio en un banco de condensadores conectados en serie con una línea.

Con la aplicación de los GTO (Gate Turn-Off) en la década de los 80s nace la denominada segunda generación de los FACTS, con el STATCOM (Static Compensator) cuyo propósito es controlar la tensión en una Línea de transmisión, generando o absorbiendo potencia reactiva a través de una conexión en derivación, paralelamente aparecen los SSSC (Series Synchronous Static Compensator) que se encarga de controlar la corriente, estabilidad de la tensión, etc.

Desde la década de los 90s con el propósito de obtener un control global en el sistema de potencia se ha venido desarrollando dispositivos basados en el STATCOM y el SSSC obteniendo el UPFC (Unified Power Flow Controller) surgiendo así la tercera generación de los FACTS, y posteriormente se sumo los IPFC (Interline Power Flow Controller), el

propósito de estos dispositivos es básicamente el control de la potencia activa y reactiva en una Línea y entre dos líneas respectivamente. Los FACTS como el TCPST (Thyristor Controller Phase Shifted Transformer) logra controlar la dirección del flujo de potencias.

La continuidad en el desarrollo de estos dispositivos se basa en los dispositivos de estado sólido así como los thyristores que poseen la habilidad de bloqueo de mas de 10kV y una capacidad de conducción de mas de 5kA, en cambio los GTO ofrecen posibilidades adicionales en el control de apagado, y los IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) por tener una amplia capacidad de *Switcher* en el rango de 3 a 10Hz son los favoritos no solo en los FACTS sino en los HVDC de última generación Ref. [26].

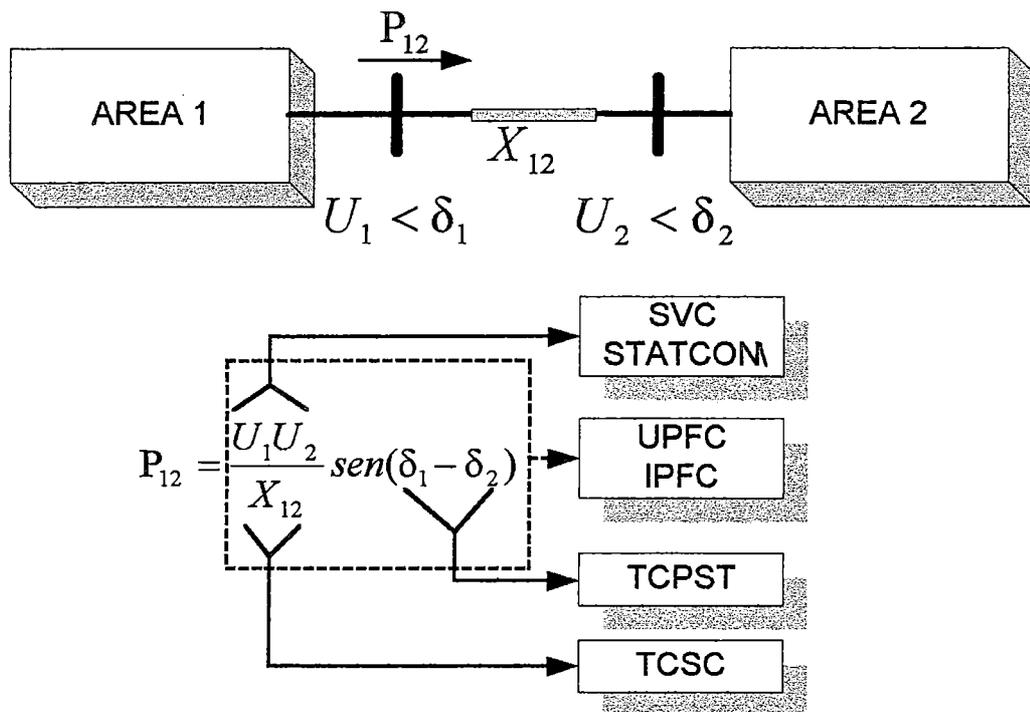


Fig. 1. 3 Influencia de los Controladores FACTS en la Transmisión de potencia

1.4 Referencias

- [1] K. R. Padiyar, "Power System Dynamics". Indian Institute of Science, Bangalore, John Wiley and Sons (Asia) Pte Ltd, 1996.

- [2] S. Kundur, Prabha, *"Power System Stability And Control"*. Mc Graw-Hill, Inc, 1994.
- [3] F.P. DeMello and C. Concordia, *"Concepts of synchronous machines stability as affected by excitation control"*. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-88, Apr.'69, pp. 316-329.
- [4] W.G. Heffron, R.A. Phillips, *"Effect of modern amplidyne voltage regulator on under-excited operation of large turbine generators"*. AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-71, Aug.'52, pp. 692-697.
- [5] E.V. Larsen and D. A. Swann, *"Applying power system stabilizers. Part I: General concepts; Part II: Performance objectives and tuning concepts; Part III: Practical considerations"*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS- 100, June '81, pp. 3017-3046.
- [6] P. Kundur, M. Klein, G. J. Rogers and M. S. Zywno, *"Application of power system stabilizers for enhancement of overall system stability"*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, May 1989, pp. 614-626.
- [7] Y.N. Yu and C. Siggers, *"Stabilization and optimal control signals for a power system"*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-90, Jul/Aug.'71, pp.1469-1481.
- [8] H.A.M. Moussa and Y.N. Yu, *"Optimal power system stabilization through excitation and/or governor control"*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-91, May/June'72, pp.1166-1174.
- [9] F.P. DeMello, P.J. Nolan, T.F. Laskowski and J.M. Undrill, *"Co-ordinated application of stabilizers in multi-machine power systems"*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, May/June'80, pp.892-901.
- [10] O.H.Abdalla, S.A.Hassan and N.T.Tweig, *"Co-ordinated stabilization of a multimachine power system"*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, Mar.'84, pp. 483-494.

- [11] R.J. Fleming, M.A. Mohan and K. Parvatisam, "*Selection of parameters of stabilizers in multi-machine power systems*". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-100, May'81, pp.2329-2333.
- [12] A. Doi and S. Abe, "*Coordinated synthesis of power system stabilizers in multimachine power systems*". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-103, June'84, pp.1473-1479.
- [13] C.M. Lim and S. Elangovan, "*Design of stabilizers in multi-machine power systems*". Proceedings of IEE, Part-C, Vol.132, May'85, pp.146-153.
- [14] C.M. Lim and S.Elangovan, "*New approach to power system stabilizer design*". Electric Power Systems Research, Vol.8, 1985, pp.285-292.
- [15] A. Ghosh, G. Ledwich, O.P. Malik and G.S. Hope, "*Power system stabilizer based on adaptive control techniques*". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, Aug. '84, pp. 1983-1989.
- [16] S.J. Cheng, Y.S. Chow, O.P. Malik and G.S. Hope, "*An adaptive synchronous machine stabilizer*". IEEE Transactions on Power Systems, Vol.PWRS-1, Aug. '86, pp.101-109.
- [17] S.J. Cheng, O.P. Malik and G.S. Hope, "*Damping of multi-modal oscillations in power systems using a dual-rate adaptive stabilizer*", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.PWRS-3, Feb. '88, pp. 101-108.
- [18] C.M. Lim, "*A self-tuning stabilizer for excitation or governor control of power systems*". IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 4, June'89, pp. 152-159.
- [19] W.C. Chan and Y.Y. Hsu, "*An optimal variable structure stabilizer for power system stabilization*". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, June'83, pp. 1738-1746.
- [20] M.L. Kothari, J. Nanda, K. Bhattacharya, "*Design of variable structure power system stabilizers with desired eigenvalues in the*

- sliding mode*". IEE Proceedings-C (Generation, Transmission and Distribution), Vol. 140, No. 4, July 1993, pp. 263- 268.
- [21] P. Hoang and K. Tomsovic, "*Design and analysis of an adaptive fuzzy power system stabilizer*". IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 11, Dec. 1996, pp. 455 - 461.
- [22] Y. Zhang, G.P. Chen, O.P. Malik, G.S. Hope, "*An artificial neural network based adaptive power system stabilizer*". IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 8, No. 1, March 1993.
- [23] M.A. Abido and Y.L. Abdel-Magid, "*A hybrid neuro-fuzzy power system stabilizer for multimachine power systems*". IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 13, No. 4, November 1998.
- [24] IEEE Transmission and Distribution Comitte, 2001, "*FACTS Applications*". IEEE FACTS Working Group.
- [25] Harold M. Stillman, "*TGCT, conmutador de semiconductores de alta potencia para tensiones medias*" ABB Power Systems AB, 2000.
- [26] Bertil Arnlov, "*HVDC 2000, una nueva generaci3n de instalaciones CCAT*". ABB Power Systems AB, 2000.
- [27] Rolf Gr3nbaum, Mojtaba Noroozian and Bj3rn Thorvaldsson, "*FACTS, poderosos sistemas para una transmisi3n flexible de la energ3a*". ABB Power SystemsAB,1999.

CAPÍTULO 2

ESTABILIDAD DE SEÑAL PEQUEÑA

2.1 INTRODUCCIÓN

La Estabilidad de un SEP, es la habilidad para mantener en equilibrio las fuerzas opuestas entre las mecánicas y las electromagnéticas, repercutiendo en: según Ref. [1]

Estabilidad del Ángulo.

Estabilidad de frecuencia.

Estabilidad del Voltaje.

Cada una de ellos con características propias; dentro del primero se clasifica en: Estabilidad transitoria y en Estabilidad de pequeña señal. Este último abordaremos en detalle.

2.2 Estabilidad de Señal Pequeña

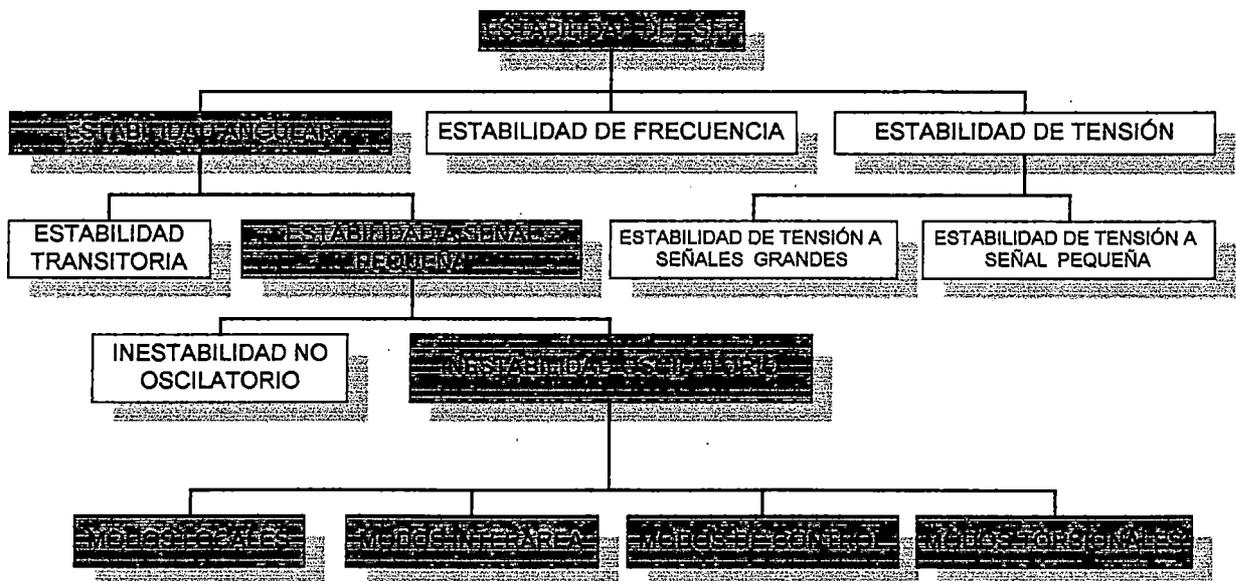


Fig. 2. 1 Clasificación de los tipos de Estabilidad

La habilidad de un SEP para mantener en sincronismo a sus máquinas cuando es sujeto a pequeños disturbios los cuales en un sistema ocurren permanentemente debido a las pequeñas variaciones de las cargas y generadores. Los disturbios son considerados suficientemente pequeñas para linealización del sistema de ecuaciones en análisis. Consecuencia de estos pequeños disturbios se podría tener dos tipos de inestabilidad:

- Incremento de Ángulo del rotor debido a la carencia de suficiente Torque sincronizante.
- Oscilaciones del rotor con una amplitud creciente debido a la carencia del Torque amortiguante.

Existen factores determinantes como las condiciones iniciales de operación, La robustez de las líneas de transmisión, el tipo de control de excitación usada en la máquina, para la respuesta natural a estos pequeños disturbios, por ejemplo para el caso i podría darse con una máquina conectada radialmente a un gran sistema sin la presencia del AVR.

Para el caso ii podría darse en presencia del AVR en la máquina que suministra el amortiguamiento a estos pequeños disturbios,

Nuestro interés de acuerdo a la Fig. 2.1 es la estabilidad angular a pequeña señal, de ser inestable oscilatorio entonces se tiene los siguientes modos de oscilación tal como se muestran en Ref. [1], [2] y [3]

Modo local.- (0.7 a 2 Hz.) Interacción entre las máquinas en un área pequeña del sistema, llamado también como oscilaciones inter máquinas o inter plantas.

Modo Inter.-área.- Interacción entre dos grupos de máquinas de áreas distintas o sistemas interconectadas, los grandes sistemas interconectados usualmente tienen dos distintas formas de oscilación Inter.-área:

A muy bajas frecuencias, que involucran a todos los generadores de un sistema compuesto de dos áreas interconectadas, cuya frecuencia de oscilación esta en el rango de 0.1 a 0.3 Hz.

A bajas frecuencias, que involucran a subgrupos de generadores ubicadas en áreas distintas cuya frecuencia de oscilación está en el rango de 0.3 a 0.7 Hz.

Modo control.- Son asociadas entre unidades de generación y controles tales como excitador mal sintonizada, gobernadores, convertidores HVDC y los dispositivos FACTS. Este modo esta comprendido en oscilaciones de modo local.

Modo Torsional.- interacción entre la turbina - máquina, La interacción torsional, que se produce cuando las corrientes asincrónicas de la red ocasionan la excitación de un modo natural de oscilación del eje de la máquina. Estos pueden ser ocasionados por: controles de excitadores, gobernadores, controladores de HVDC, controladores de los dispositivos FACTS y compensación serie en líneas de transmisión que ocasiona básicamente las oscilaciones subsincronas.

2.3 Conceptos Fundamentales de estabilidad de Sistemas Dinámicos

2.3.1 Representación del Estado-Espacio.

El comportamiento de cualquier sistema dinámico se puede representar por una ecuación diferencial ordinaria de la siguiente forma:

$$x' = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n; u_1, u_2, u_3, \dots, u_r; t), \quad i=1, 2, 3, \dots, n \quad (2.1)$$

En donde: n: orden del sistema

r: numero de entradas.

Esto podría escribirse en la siguiente forma, utilizando una notación de vector matriz de la forma.

$$x' = f(x, u, t) \quad (2.2)$$

Donde

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ x_n \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \cdot \\ u_r \end{bmatrix}, \quad f = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \cdot \\ f_n \end{bmatrix}$$

x : vector de estado, x_i : variables de estado, u : vector de entrada del sistema. Estas son las señales externas que influye en el funcionamiento del sistema, t : representa el tiempo, x' derivada de variables de estado con respecto al tiempo. Si asumimos que las variables de estado no son funciones explicitas del tiempo, el sistema será llamado autónomo y será representado así:

$$x' = f(x, u) \quad (2.3)$$

Las variables de salida del sistema pueden ser expresados en términos de las variables de estado y variables de entrada así:

$$y = g(x, u) \quad (2.4)$$

Donde:

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdot \\ y_m \end{bmatrix}, \quad g = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \cdot \\ g_m \end{bmatrix}$$

y : es el vector de entradas, g : es el vector de funciones no lineales, entradas y salidas de variables de estado.

El Estado de un sistema representa la mínima cantidad de información acerca del sistema en algún instante de tiempo t_0 que es necesario para dar con la tendencia del comportamiento sin tomar en cuenta antes del t_0 .

2.3.2 Linealización.

De Ref. [1] y [2] en general para un sistema de estado- espacio alrededor de un punto de operación de x_0 , y u_0 : vector del estado inicial y el vector de entrada correspondiente al punto de equilibrio respectivamente, la ecuación diferencial (2.3) debe de satisfacer el siguiente:

$$x'_0 = f(x_0, u_0) = 0 \quad (2.5)$$

Donde:

$$x = x_0 + \Delta x \quad u = u_0 + \Delta u$$

Tal que Δ indica una pequeña desviación. Por lo tanto:

$$x' = f[(x_0 + \Delta x), (u_0 + \Delta u)] \quad (2.6)$$

Como la perturbación es pequeña la última ecuación podría ser desarrollada mediante las series de Taylor de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} x' &= x'_{i0} + \Delta x'_i = f[(x_0 + \Delta x), (u_0 + \Delta u)] \\ &= f(x_0, u_0) + \frac{\partial f_i}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial f_i}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial u_r} \Delta u_r \end{aligned}$$

Desde que

$$x'_{i0} = f_i(x_0, u_0) \text{ obtenemos} \quad \Delta x'_i = \frac{\partial f_i}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial f_i}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial u_r} \Delta u_r$$

$i : 1, 2, 3, \dots, n$. De la misma forma para la ecuación (2.4) :

$$\Delta y'_j = \frac{\partial f_j}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_j}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial f_j}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial f_j}{\partial u_r} \Delta u_r \quad j : 1, 2, 3, \dots, m.$$

Las ecuaciones (2.3) y (2.4) podemos plantear de la siguiente forma:

$$\Delta x' = A \Delta x + B \Delta u \quad (2.7) \quad \Delta y = C \Delta x + D \Delta u \quad (2.8)$$

Donde:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial u_r} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial u_r} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial g_m}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_m}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial u_r} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial g_m}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial g_m}{\partial u_r} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

En las ecuaciones (2.7) y (2.8)

ΔX : Vector de estado dimensión n

ΔY : Vector de salida dimensión m

ΔU : Vector de entrada dimensión r

A : Matriz de estado dimensión $n \times n$

B : Matriz entradas del control $n \times r$

C : Matriz de salida dimensión $m \times n$

D : Matriz el cual define la proporción de entradas dimensión $m \times r$. Si queremos que las ecuaciones mostradas estén en función de la frecuencia, se deberá aplicar la transformada de Laplace.

2.4 Método de Análisis de Estabilidad.

La teoría del matemático Ruso A. Lyapunov (1857 -1918), Ref. [5] es una herramienta bastante poderosa aplicado al análisis de estabilidad de sistemas dinámicos. De Ref. [1] y [5]:

La estabilidad de pequeña señal para un sistema no lineal esta dado por las raíces de la ecuación característica del sistema. (eigenvalores de la matriz de estado)

Primer método de A. Lyapunov

- Si la parte real del eigenvalor es negativa entonces el sistema es asintoticamente estable

- Si por lo menos uno de los eigenvalores tiene la parte real positivo entonces el sistema es inestable.
- Si la parte real del eigenvalor es cero no es posible determinar la condición del sistema para el estado evaluado.

2.5 Eigenpropiedades de la Matriz de Estado

2.5.1 Eigenvalores

Los eigenvalores de la matriz de estado, son dados por los valores de los escalares λ_i Ref. [6], para el cual debe existir una solución no trivial de la ecuación:

$$A\phi_i = \lambda_i\phi_i \quad (2.10)$$

Donde Φ_i es un vector $n \times 1$.

Para hallar los eigenvalores de la ecuación (2.10)

$$(A - \lambda_i I)\phi_i = 0 \quad (2.11)$$

Para una solución no trivial hacemos que: $\det(A - \lambda_i I) = 0$ (2.12)

De la ecuación característica, para las n soluciones se tendrán $\lambda_i = \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$

De la forma $\lambda_i = \sigma_i \pm j\omega_i$

2.5.2 Eigenvectores

Para algún valor λ_i el vector ϕ_i que satisface la Ec. (2.11) será llamado eigenvector derecho asociado a la matriz A:

$$A\Phi_i = \lambda_i\Phi_i \quad i: 1, 2, 3 \dots n \quad (2.13)$$

El eigenvector derecho tiene la forma

$$\phi = \begin{bmatrix} \phi_{1i} \\ \phi_{2i} \\ \vdots \\ \phi_{ni} \end{bmatrix}$$

Asimismo para la Ec. (2.11) que satisface lo siguiente:

$$A^T \Psi_i = \lambda_i \Psi_i \quad i : 1, 2, 3, \dots, n \quad (2.14)$$

Ψ será llamado eigenvector izquierdo, Tal que

$$\phi_j \psi_i = 0 \quad (2.15)$$

Sin embargo los eigenvectores correspondientes al mismo eigenvalor será:

$$\phi_i \psi_i = C_i \quad (2.16)$$

Generalmente se asigna a $C_i = I$

2.5.3 Matriz Modal

De Ref. [6]: De la ecuaciones (2.13) y (2.14) se forma las matrices con elementos compuesta de todos los eigenvectores derecho e izquierdo respectivamente, y se tiene:

$$\Phi = [\Phi_1 \ \Phi_2 \ \dots \ \Phi_n] \quad (2.17)$$

$$\Psi = [\Psi^T_1 \ \Psi^T_2 \ \dots \ \Psi^T_n]^T \quad (2.18)$$

y $\Lambda =$ matriz diagonal con elementos $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$

Φ, Ψ . Son llamados Matriz Modal.

2.5.4 Modo, sensibilidad y factor de participación

(a) *El Modo de oscilación* esta dado por z_1, z_2, \dots, z_n cada cual asociado con un modo, estos valores se obtienen de:

$$\Delta x(t) = \Phi^* z(t)$$

Donde $\Delta x(t)$ es el vector de estado.

(b) *Sensitividad del eigenvalor.*- Por el momento tendremos un concepto básico, acerca de la sensibilidad, en el capítulo 4 se hará un eigenanálisis en detalle.

La sensibilidad o sensibilidad de un sistema está dado por la variación del eigenvalor con respecto a un elemento de la matriz de estado así:

A la ecuación (2.13) $A\Phi_i = \lambda_i\Phi_i$

Aplicando una diferencial con respecto a un elemento de la matriz de estado, Ref. [7] a_{kj} resulta

$$\frac{\partial A}{\partial a_{kj}}\phi_i + A\frac{\partial \phi_i}{\partial a_{kj}} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{kj}}\phi_i + \lambda_i\frac{\partial \phi_i}{\partial a_{kj}}$$

Simplificando la ecuación luego de multiplicar por ψ_i y sabiendo que,

$$\phi_i\psi_i = C_i = 1 \quad \text{y} \quad \psi_i(A - \lambda_i I) = 0$$

Se obtiene

$$\psi_i \frac{\partial A}{\partial a_{kj}} \phi_i = \frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{kj}} \quad (2.19)$$

De esto, todos los elementos de:

$\frac{\partial A}{\partial a_{kj}}$ Son ceros excepto para el k -ésimo fila y j -ésimo columna que finalmente resulta:

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{kj}} = \psi_{ik} \phi_{ji} \quad (2.20)$$

Así la sensibilidad del eigenvalor λ_i para el elemento a_{kj} de la matriz de estado es igual al producto de los elementos del eigenvector izquierdo ψ_{ik} y los elementos del eigenvector derecho ϕ_{ji}

Matriz de participación.- El método de factor de participación depende de ambos eigenvectores que magnifica la participación del k -ésimo estado en i -ésimo modo, en Ref. [7] y [8] se muestra en forma clara que dicho de

otra forma el factor de participación es igual a la sensibilidad de primer orden del eigenvalor

$$P = [P_1 \ P_2 \ \dots \ P_n] \quad (2.21A) \quad \text{con}$$

$$P_{ki} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{kj}} = \psi_{ik} \phi_{ji} = \begin{bmatrix} P_{1i} \\ P_{2i} \\ \dots \\ P_{ni} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{1i} \psi_{i1} \\ \phi_{2i} \psi_{i2} \\ \dots \\ \phi_{ni} \psi_{in} \end{bmatrix} \quad (2.21B)$$

2.5.5 Relación entre Eigenpropiedades y Funciones de Transferencia

Para el análisis de estabilidad de pequeña señal de sistemas de potencia, primeramente depende del eigenanálisis de la matriz de estado, no obstante nos interesa el diseño de control, la función de transferencia entre las variables específicas, como es que se relacionan la matriz de estado y los eigenpropiedades, para esto partimos de las ecuaciones (2.7) y (2.8) los cuales podemos escribir de la forma: Ref. [1], [7], [8]

$$\Delta x' = A\Delta x + b\Delta u \quad (2.22) \quad \Delta y = c\Delta x \quad (2.23)$$

donde las variables ya han sido descritas en la sección 2.3.2 con la diferencia de que se considera $d =$ vector columna, $c =$ vector fila y $D = 0$, entonces:

$$G(s) = \frac{\Delta y(s)}{\Delta u(s)} = c(sI - A)^{-1}b \quad (2.24)$$

En forma general:

$$G(s) = K \frac{N(s)}{D(s)} \quad (2.25)$$

Siguiendo el proceso especificado en Ref. [1] se tiene:

$$G(s) = \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{s - \lambda_i} \quad (2.26)$$

Donde,

$$R_i = c\phi_i\psi_i b \quad (2.27)$$

Como se observa, los polos de $\mathbf{G}(s)$ son dadas por los eigenpares (λ, Φ_i) de la matriz de estado ya que el eigenvector izquierda depende de eigenvector

derecha. Y los ceros se obtienen de
$$\sum_{i=1}^n \frac{R_i}{s - \lambda_i} = 0 \quad (2.28)$$

2.6 Estabilidad de Señal Pequeña para una Máquina conectada a una Barra-Infinita.

La máquina esta expresada en su propio Marco de referencia (d-q) el cual gira con su rotor. Las ecuaciones de interconexión con el sistema, los voltajes y corrientes están expresadas en un marco de referencia común (R-I) rotando a la velocidad síncrona. De la siguiente figura.

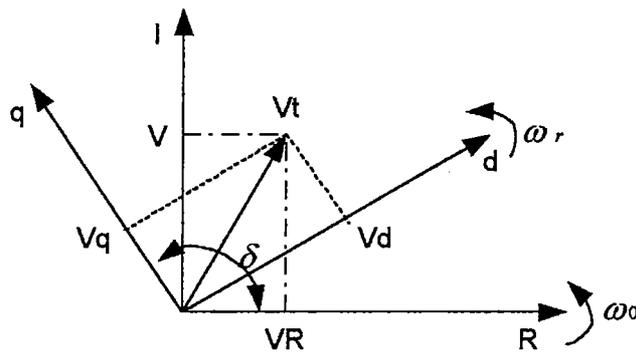


Fig. 2.2 Transformación del marco de referencia

Planteamos las ecuaciones linealizadas. Ref. [9] y [10]

a) *Ecuaciones de aceleración o de oscilación:*

$$\frac{d}{dt} \Delta\delta = \Delta\omega \quad (2.29)$$

$$\frac{d}{dt} \Delta\omega = \frac{1}{T_j} [\Delta T_m - \Delta T_e - D\Delta\omega] \quad (2.30)$$

Donde:

$$\Delta T_e = [E'_{do} + (X'_q - X'_d)i_{qo}] \Delta i_d + [E'_{qo} + (X'_q - X'_d)i_{do}] \Delta i_q + (i_{do}) \Delta E'_d + (i_{qo}) \Delta E'_q \quad (2.31)$$

b) *Ecuación de voltaje interno transitorio*

$$\frac{d}{dt} \Delta E'_q = \frac{1}{T'_{do}} (\Delta E'_{fd} - \Delta E'_q - (X_d - X'_d) \Delta i_d) \quad (2.32)$$

$$\frac{d}{dt} \Delta E'_d = \frac{1}{T'_{qo}} (-\Delta E'_d + (X_q - X'_q) \Delta i_q) \quad (2.33)$$

c) *Ecuación de voltaje en terminales*

$$\begin{bmatrix} \Delta V_d \\ \Delta V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta E'_d \\ \Delta E'_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_a & -X'_q \\ X'_d & R_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_q \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

Donde:

- δ : Ángulo de potencia del generador
- ω : Velocidad angular del rotor
- ω_{ref} : Velocidad síncrona
- T_j : $2H/\omega_0$, donde H es la constante de inercia.
- T_m : Par mecánico aplicado a la flecha
- T_e : Par eléctrico
- D : Factor de amortiguamiento
- i_d, i_q : Corrientes del estator en eje directa y el eje en cuadratura
- V_d, V_q : Voltajes del estator en eje directo y el eje en cuadratura
- E'_{fd} : Voltaje de campo
- E'_d : Componente en el eje d de la f.e.m. Transitoria interna proporcional a los enlaces de flujo del eje q.
- E'_q : Componente en el eje q de la f.e.m. Transitoria interna proporcional a los enlaces de flujo del devanado de campo.
- R_a : Resistencia de armadura

- X_d, X_q : Reactancias síncronas
 $X'd, X'q$: Reactancias transitorias
 $T'do, T'qo$: Constantes de tiempo transitorio en circuito abierto.
 Δ : Representa incremento.
 \circ : Indica condición inicial.

De la Fig. 2.2, se tiene los valores de tensión y corrientes transformadas:

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{sen} \delta & -\text{cos} \delta \\ \text{cos} \delta & \text{sen} \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ V_I \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{sen} \delta & -\text{cos} \delta \\ \text{cos} \delta & \text{sen} \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_R \\ I_I \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

desarrollando y linealizando resulta:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_d \\ \Delta V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{sen} \delta_0 & -\text{cos} \delta_0 \\ \text{cos} \delta_0 & \text{sen} \delta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_R \\ \Delta V_I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{q0} \\ -V_{d0} \end{bmatrix} \Delta \delta \quad (2.37)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta I_d \\ \Delta I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{sen} \delta_0 & -\text{cos} \delta_0 \\ \text{cos} \delta_0 & \text{sen} \delta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_R \\ \Delta I_I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{q0} \\ -I_{d0} \end{bmatrix} \Delta \delta \quad (2.38)$$

despejando las corrientes de la ecuación (2.34) y remplazando en la última ecuación (2.37) se obtiene:

$$\begin{bmatrix} \Delta I_d \\ \Delta I_q \end{bmatrix} = Y_g \begin{bmatrix} R_a & X'q \\ -X'd & R_a \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} \Delta E'd \\ \Delta E'q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{sen} \delta_0 & -\text{cos} \delta_0 \\ \text{cos} \delta_0 & \text{sen} \delta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_R \\ \Delta V_I \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{q0} \\ -V_{d0} \end{bmatrix} \Delta \delta \right\} \quad (2.39)$$

En donde:

$$Y_g = \frac{1}{R_a^2 + X'dX'q}$$

sustituyendo el valor de las corrientes de la ecuación (2.38) en la última ecuación (2.39) desarrollando y despejando el valor de las corrientes en sistema de referencia (R-I) resulta:

$$\begin{bmatrix} \Delta I_R \\ \Delta I_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E'_d \\ \Delta E'_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} \\ w_{21} & w_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_R \\ \Delta V_I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} z_{14} \\ z_{24} \end{bmatrix} \Delta \delta \quad (2.40)$$

en donde:

$$\begin{aligned} z_{11} &= Y_g(R_a \text{sen} \delta_o - X'_d \text{cos} \delta_o), & z_{12} &= Y_g(X'_q \text{sen} \delta_o + R_a \text{cos} \delta_o) \\ z_{21} &= Y_g(-R_a \text{cos} \delta_o - X'_d \text{sen} \delta_o), & z_{22} &= Y_g(-X'_q \text{cos} \delta_o + R_a \text{sen} \delta_o) \\ w_{11} &= Y_g[-R_a + (X'_d - X'_q) \text{cos} \delta_o' \text{sen} \delta_o], & w_{12} &= -Y_g[X'_d \text{cos}^2 \delta_o' + X'_q \text{sen}^2 \delta_o] \\ w_{21} &= -Y_g[X'_d \text{sen}^2 \delta_o + X'_q \text{cos}^2 \delta_o'] & w_{22} &= Y_g[-R_a + (X'_q - X'_d) \text{cos} \delta_o' \text{sen} \delta_o] \\ z_{14} &= Y_g(-R_a V_{I_o} + X'_d V_{q_o} \text{cos} \delta_o + X'_q V_{d_o} \text{sen} \delta_o) - I_{I_o} \\ z_{24} &= Y_g(-R_a V_{R_o} + X'_d V_{q_o} \text{sen} \delta_o + X'_q V_{d_o} \text{cos} \delta_o) + I_{R_o} \end{aligned}$$

Para obtener la representación de estado de la máquina síncrona.

Desarrollando la ecuación (2.39)

$$\begin{bmatrix} \Delta I_d \\ \Delta I_q \end{bmatrix} = Y_g \begin{bmatrix} R_a \Delta E'_d + X'_q \Delta E'_q - m_1 \Delta V_R + m_2 \Delta V_I + m_3 \Delta \delta \\ -X'_d \Delta E'_d + R_a \Delta E'_q - m_4 \Delta V_R + m_5 \Delta V_I + m_6 \Delta \delta \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

En donde:

$$\begin{aligned} m_1 &= (R_a \text{sen} \delta_o + X'_q \text{cos} \delta_o), & m_2 &= (R_a \text{cos} \delta_o - X'_q \text{sen} \delta_o), & m_3 &= (X'_q V_{d_o} - R_a V_{q_o}) \\ m_4 &= (R_a \text{cos} \delta_o - X'_d \text{sen} \delta_o), & m_5 &= (R_a \text{sen} \delta_o + X'_d \text{cos} \delta_o), & m_6 &= (X'_d V_{q_o} + R_a V_{d_o}) \end{aligned}$$

la ecuación (2.31) en la ecuación (2.30) se obtiene:

$$\left[\frac{E'_{q_o} + (X'_q - X'_d) i_{d_o}}{T_j} \right] \Delta i_q - \left[\frac{i_{d_o}}{T_j} \right] \Delta E'_d - \left[\frac{i_{q_o}}{T_j} \right] \Delta E'_q \quad (2.42)$$

sustituyendo la ecuación (2.41) en la ecuación (2.42) los valores de

ΔI_d y ΔI_q resulta:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \Delta \omega &= \left[\frac{1}{T_j} \right] \Delta T_m - \left[\frac{1}{T_j} \right] \Delta \omega - \left[\frac{i_{d_o} + F_1 R_a - F_2 X'_d}{T_j} \right] \Delta E'_d - \left[\frac{i_{q_o} + F_1 X'_q + F_2 R_a}{T_j} \right] \Delta E'_q \\ &\quad \left[\frac{F_1 (R_a \text{sen} \delta_o + X'_q \text{cos} \delta_o) + F_2 (-X'_d \text{sen} \delta_o + R_a \text{cos} \delta_o)}{T_j} \right] \Delta V_R + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left[\frac{-F_1(R_a \cos \delta_o - X_q' \text{sen} \delta_o) + F_2(X_d' \cos \delta_o + R_a \text{sen} \delta_o)}{T_j} \right] \Delta V \\ & - \left[\frac{F_1(X_q' V_{do} - R_a V_{qo}) + F_2(X_d' V_{qo} + R_a V_{do})}{T_j} \right] \Delta \delta \end{aligned} \quad (2.43)$$

En Donde se ha definido las constantes:

$$F_1 = (E_{do}' + (X_q' - X_d') i_{qo}) Y_g, \quad F_2 = (E_{qo}' + (X_q' - X_d') i_{do}) Y_g$$

Incluyendo un sistema de excitación como el de la siguiente Fig.

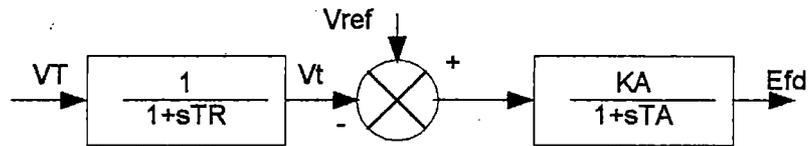


Fig. 2.3 Sistema de excitación con transductor de tensión, sin entrada de PSS

Del segundo bloque de la Fig. 2.3

$$E_{fd} = \frac{k_A}{1 + sT_A} (V_{ref} - V_t) \quad \text{linealizando resulta:}$$

$$\frac{d}{dt} \Delta E_{fd} = \frac{1}{T_A} [-\Delta E_{fd} + k_A (V_{ref} - V_t)] \quad (2.44)$$

Del primer Bloque de la Fig. 2.3

$$V_t = \frac{1}{1 + sT_R} (VT) \quad \text{en forma similar:}$$

$$\frac{d}{dt} \Delta V_t = \frac{1}{T_R} (-\Delta V_t + \Delta VT) \quad (2.45)$$

de donde para el voltaje terminal linealizado se tiene:

$$\Delta|V_t| = \frac{V_{Iro}}{\sqrt{(V_{Iro}^2 + V_{Ito}^2)}} \Delta V_{IR} + \frac{V_{Ito}}{\sqrt{(V_{Iro}^2 + V_{Ito}^2)}} \Delta V_{II}$$

en forma similar los valores de ΔI_d y ΔI_q en las ecuaciones (2.32) y (2.33) respectivamente cuyos resultados y las ecuaciones (2.39), (2.43), (2.44), (2.45) resumidos en la matriz de estado para una máquina con excitación permanente en función de la entrada ΔT_m , los voltajes ΔV_R ΔV_I resulta:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta E'_d \\ \Delta E'_q \\ \Delta \omega \\ \Delta \delta \\ \Delta E'_{fd} \\ \Delta v_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & a_{14} & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & a_{24} & 1/T'_{do} & 0 \\ a_{31} & a_{32} & D/T_j & a_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1/T_A - KA/TR & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/TR \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E'_d \\ \Delta E'_q \\ \Delta \omega \\ \Delta \delta \\ \Delta E'_{fd} \\ \Delta v_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1/T_j \\ 0 & 0 \\ KA/T_A & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{ref} \\ \Delta T_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \\ c_{31} & c_{32} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ c_{61} & c_{62} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_R \\ \Delta V_I \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

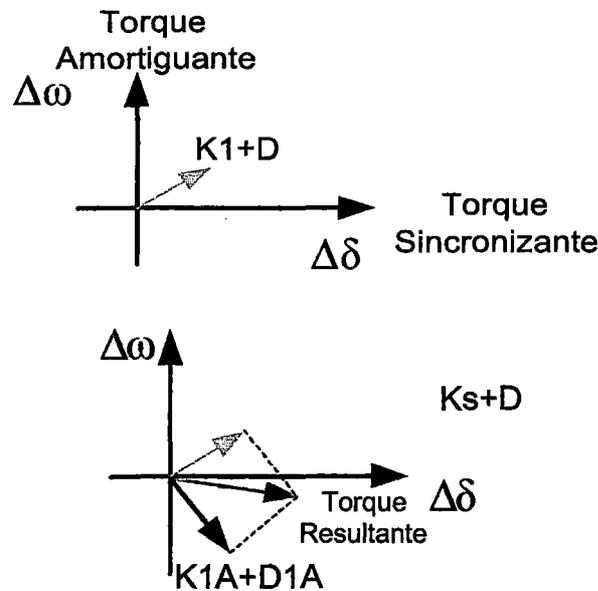
cuyos elementos están definidos en el Apéndice A.

2.6.1 Efectos de Sistemas de Excitación

De la Ecuación 2.44 y V_t en función de las variables de estado $\Delta \delta$ y $\Delta E'_{fd}$ se logra el torque sincronizante y amortiguante en función de KA (ganancia del AVR) Ref. [1], evaluando para los valores de KA en el rango [0.00 a ∞] se observa que para valores entre [0.0 a 50] el torque sincronizante es mínima y el torque amortiguante es máximo, y para valores de KA mayores de este rango el torque sincronizante incrementa y el torque amortiguante disminuye; claro esta, de que este rango depende de los parámetros

externos de la máquina, así como reactancia externa. Para los modos oscilatorios en Ref. [10] y [11] generalmente incrementa Torque sincronizante y disminuye el Torque amortiguante así como se muestra en la siguiente gráfica:

(a)



(b)

Fig. 2.4 (a) Comportamiento normal de la máquina sin control, (b) $K1A$ y $D1A$ por el efecto del AVR.

2.7 Estabilizadores de Sistemas de Potencia (PSS)

Como se observa en la sección anterior, los controles automáticos de tensión inyecta para algunos modos un amortiguamiento negativo, para evitar y amortiguar oscilaciones se emplea comúnmente los estabilizadores de sistemas de potencia (PSS) Ref. [12], que son controles suplementarios que actúan en el sistema de excitación. El PSS tiene 3 alternativas de señales de entrada: variación de velocidad del rotor, variación de frecuencia de nodo, variación de potencia eléctrica, o una combinación de estas variables. Ref. [13] El objetivo principal del PSS es proporcionar un par amortiguante adicional sin producir par sincronizante,

en las frecuencias de oscilaciones criticas, es decir los PSS inyectan una señal de modulación en el SEP a través de los sistemas de excitación para aumentar el amortiguamiento de las oscilaciones del rotor. En algunos modos de operación este dispositivo puede ser insuficiente, siendo necesario combinar con otro tipo de dispositivos que son los FACTS, o los dispositivos APSS, (Adaptive Power System Stabilizer) por sus siglas en ingles, Ref. [14] desarrollado por ABB y la Universidad Calgary (Canadá) un estabilizador autoadaptable que mediante un ajuste continuo a las variaciones de la Red y delas condiciones de operación garantiza en todo momento un amortiguamiento óptimo de las oscilaciones de potencia activa, esta basado en un microprocesador que son capaces de:

Identificar el punto de operación del generador y la impedancia de la red.

Disponer de parámetros PSS regulables para tener en cuenta la variación continua de los parámetros del sistema.

Disponer de una función regulable de transferencia para una amplia gama de frecuencias(por ejemplo para una oscilación subsincrona cuando se conectan dos máquinas en paralelo)

Los PSS convencionales como los que están instalados en las principales centrales eléctricas del SEIN se representa con el siguiente modelo de la Fig.

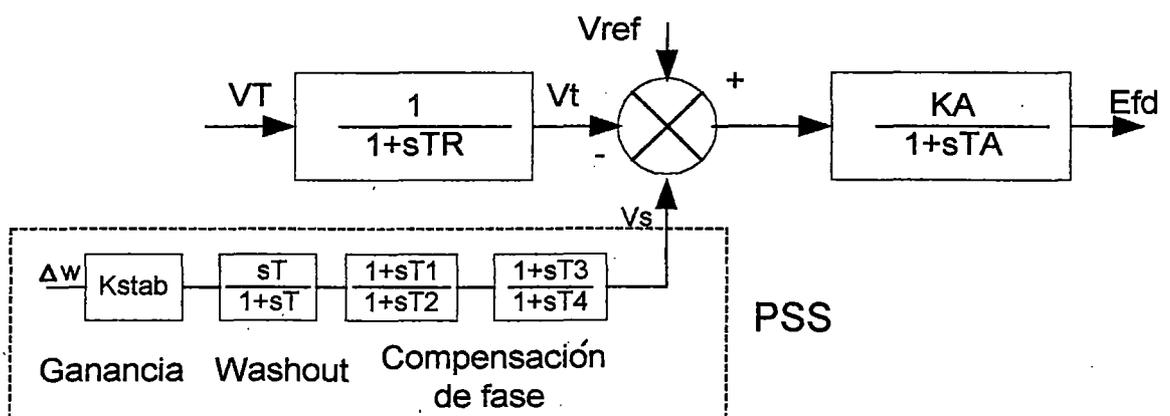


Fig. 2.5 Sistema de Excitación thyristorizado con PSS

2.7.1 Señal estabilizadora Washout.

Sirve para filtrar señales de baja frecuencia y permite que las señales relacionados con las oscilaciones de la velocidad angular w , pasen sin cambio. Ref.[13] Sin él, se tendría un error en estado estacionario que modificaría el voltaje en terminales. Este bloque permite que el PSS solo actúe al ocurrir cambios en la entrada.



Fig. 2.6 Bloque Washout

De este, se puede deducir los siguientes:

$$x'1 = w \frac{k}{1 + sT} \quad s x'1 T = x1$$

Linealizando estas expresiones:

$$\Delta x'1 = \Delta w \frac{k}{1 + sT} \quad s \Delta x'1 T = \Delta x1$$

De las dos últimas relaciones se tiene:

$$\Delta x'1 = k \Delta w - \Delta x \quad (2.47)$$

2.7.2 Compensación de adelanto de fase

Proporciona la compensación de fase requerida en el intervalo de frecuencia de interés, con el par eléctrico en fase con la velocidad del rotor. Ref. [15] para esto se requiere circuitos de adelanto y atraso de fase para que compense entre la entrada del excitador y el par eléctrico resultante.

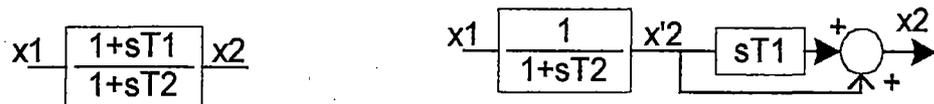


Fig. 2.7 Bloque de Compensación de adelanto de fase

De estos bloques se puede obtener las siguientes ecuaciones:

$$x'2 = x1 \frac{1}{1 + sT2}, \quad x2 = sT1x'2 + x'2$$

Linealizando se tiene las siguientes expresiones:

$$\Delta x'2 = \Delta x1 \frac{1}{1 + sT2} \quad \Delta x2 = sT1\Delta x'2 + \Delta x'2$$

Relacionando las dos últimas ecuaciones se obtiene:

$$\Delta x'2 = \frac{T2}{T2 - T1} \Delta x2 - \frac{T1}{T2 - T1} \Delta x1 \quad (2.48)$$

Para el tercer bloque de la Fig. 2.5 de forma similar

$$\Delta V's = \frac{T4}{T4 - T3} \Delta Vs - \frac{T3}{T4 - T3} \Delta x2 \quad (2.49)$$

2.7.3 Efectos del PSS

Se desarrolla la matriz de estado incluyendo el sistema de excitación de la Fig. 2.5 con PSS.

En la ecuación (2.44) incluimos la entrada de la señal de V_s que resulta:

$$\frac{d}{dt} \Delta E_{fd} = \frac{1}{T_A} [-\Delta E_{fd} + k_A (V_{ref} + V_s - V_t)]$$

esta última ecuación y las ecuaciones (2.47), (2.48), (2.49) agregamos en la ecuación (2.46) resulta:

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta E'_d \\ \Delta E'_q \\ \Delta \omega \\ \Delta \delta \\ \Delta E'_{fd} \\ \Delta v_t \\ \Delta x1 \\ \Delta x2 \\ \Delta V_s \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & a_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & a_{24} & 1/T'_{do} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & D/T_j & a_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1/T_A & -K_A/T_A & 0 & 0 & K_A/T_A \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/TR & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{87} & a_{88} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{98} & a_{99} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E'_d \\ \Delta E'_q \\ \Delta \omega \\ \Delta \delta \\ \Delta E'_{fd} \\ \Delta v_t \\ \Delta x1 \\ \Delta x2 \\ \Delta V_s \end{bmatrix} + \\
&\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1/T_j \\ 0 & 0 \\ K_A/T_A & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{ref} \\ \Delta T_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \\ c_{31} & c_{32} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ c_{61} & c_{62} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_R \\ \Delta V_I \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{2.50}$$

Los elementos son definidos en el Apéndice A.

De la Figura 2.5 diagrama de bloques del AVR se considera la entrada directa de VT, es decir obviamos el bloque del filtro, para simplificar la matriz de estado ya que TR (constante de tiempo del filtro de entrada al sistema de control) no es decisivo en el análisis de estabilidad de señal pequeña. Resulta:

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta E'_d \\ \Delta E'_q \\ \Delta \omega \\ \Delta \delta \\ \Delta E'_{fd} \\ \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \Delta V_s \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & a_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & a_{24} & 1/T'_{do} & 0 & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & D/T_j & a_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1/T_A & 0 & 0 & K_A/T_A \\ 0 & 0 & k & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{76} & a_{77} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{87} & a_{88} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E'_d \\ \Delta E'_q \\ \Delta \omega \\ \Delta \delta \\ \Delta E'_{fd} \\ \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \Delta V_s \end{bmatrix} + \\
&\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1/T_j \\ 0 & 0 \\ K_A/T_A & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{ref} \\ \Delta T_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \\ c_{31} & c_{32} \\ 0 & 0 \\ c_{51} & c_{52} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_R \\ \Delta V_I \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{2.50a}$$

Cuyos elementos de las matrices son definidos en el Apéndice A.

Se resume con el siguiente diagrama:

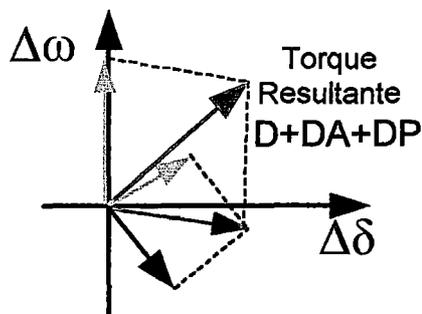


Fig. 2.8 Influencia del PSS en el Torque resultante.

2.8 Resumen

En la primera parte de este capítulo se plantea los conceptos básicos de estabilidad de pequeña señal, luego la representación de estado de un

sistema eléctrico, asimismo se desarrolla una teoría básica para el eigenanálisis de las eigenpropiedades de la matriz de estado, de cómo está representado la sensibilidad de primer orden y el factor de participación, el método de análisis de *A. Lyapunov* a partir de los eigenvalores, asimismo se plantean las ecuaciones que modelan una máquina síncrona utilizando un modelo de cuarto orden y considerando un sistema de excitación incluido el AVR, Estas ecuaciones se linealizan a fin de obtener una representación de estado de la máquina síncrona (2.46), así mismo se representa el diagrama vectorial evidenciando la influencia del AVR en el comportamiento de la máquina. Luego se obtiene la representación en variables de estado de un estabilizador de sistemas de potencia (PSS), la cual se utiliza para extender la representación en variables de estado de una máquina síncrona incluyendo un estabilizador de sistemas de potencia (2.50). Finalmente se evidencia la influencia del PSS en el Torque amortiguante resultante. Las expresiones obtenidas en este capítulo servirán como plataforma para extender la representación de estado a un sistema multimáquinas en el cual se considera la topología de la red y los distintos elementos que la componen.

2.9 Referencias

- [1] Prabha Kundur, *“Power System Stability and Control”*. Electric Power Research Institute – Power System Engineering Series, Mc Graw Hill, 1994.
- [2] Aaron Francis Snyder, *“Inter-Area Oscillation Damping with Power System Stabilizers and Synchronized Phasor Measurements”*. Thesis submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Electrical Engineering. February 1997, Paris, France
- [3] A. Román Messina and Daniel Olguín Salinas, *“Análisis de oscilaciones subsíncronas y supersíncronas envolviendo interacción entre compensación serie y paralelo y las características de la carga”*. 1º Congreso de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas, de la SEPI de la ESIME. IPN. nov. 25-29 de 1991, Unidad Zacatenco, México D.F.
- [4] Göran Andersson, *“Dynamics and Control of Electric Power Systems”*. Lectures 35-526, ITET ETH. EEH - Power Systems Laboratory ETH Zürich, March 2003.

- [5] Göran Andersson, *“Modelling and Analysis of Electric Power Systems”*, Lectures, 35-528, ITET ETH, EEH - Power Systems Laboratory ETH Zürich, March 2003.
- [6] John E. Condren and Thomas W. Gedra, *“Eigenvalue and Eigenvector Sensitivities Applied to Power System Steady-State Operating Point”*. School of Electrical and Computer Engineering Oklahoma State University, Stillwater, OK 74078 Pp. 2002.
- [7] Somieski Gerhard, *“An Eigenvalue Method for Calculation of Stability and Limit Cycles in Nonlinear Systems”*. Institut of Aeroelasticity, Vehicle Systems Dynamic Group, German Aerospace Center (DLR). D-82230 Weßling, Germany. Pp. 2002.
- [8] H. K. Nam, Y. K. Kim, K. S. Shim, and K. Y. Lee, *“A New Eigen-Sensitivity Theory of Augmented Matrix and its Application to Power System Stability Analysis”*. IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 15, No. 1, Pp. 363-369, Feb. 2000.
- [9] P. Kundur, G. J. Rogers, D. Y. Wong, L. Wang and M. G. Lauby, *“A Comprehensive Computer Program Package For Small Signal Stability Analysis of Power system”*. IEEE Trans on Power Systems, Vol. PWRS-5, Pp.1076-1083, November 1990.
- [10] Ixtláhuatl Coronado G., *“Ubicación de dispositivos FACTS desde una perspectiva dinámica”*. Tesis de maestría en ciencias, Cinvestav unidad Guadalajara, Octubre, 2001.
- [11] Felipe Alfonso Morales Silva, *“Simulación de Transitorios Electromecánicos en Sistemas eléctricos de Potencia Mediante Procesamiento Paralelo”*. Tesis de Maestría en Ciencias de la ingeniería, Pontificie Universidad Católica de Chile, Escuela de ingeniería, Santiago de Chile, 1999.
- [12] K. R. Padiyar, *“Power System Dynamics: stability and control”*. Edit. John Wiley & Sons, 1996.
- [13] Rubén Tapia Olivera, *“Un criterio óptimo para coordinar estabilizadores enfocado mediante una técnica global heurística”*.

Tesis de maestría en ciencias, Cinvestav unidad Guadalajara, Jalisco, Agosto de 2002.

- [14] Armin Elchmann y Alessandro Kohler, "*Estabilizador Autoadaptable para Amortiguar las Oscilaciones de Potencia Activa*". Revista ABB 2/1999.
- [15] M. A. Abido, "*Simulated annealing based approach to PSS and FACTS based stabilizer tuning*". Electrical Power and Energy Systems, Elsevier 2000. Vol. 22. Pp. 247-258.



CAPÍTULO 3

ESTABILIDAD DE SEÑAL PEQUEÑA PARA SISTEMAS MULTIMÁQUINAS

3.1 INTRODUCCIÓN

El análisis de un SEP implica la solución simultánea de las ecuaciones que representan a las diferentes componentes del sistema, así como:

- Máquinas síncronas asociados con sus sistemas de excitación, Control, y Motor primo.
- Las redes de interconexión.
- Sistema de cargas estáticas y dinámicas.
- Otros dispositivos tales como los convertidores HVDC, FACTS.

En la Ref. [1], muestra la estructura del modelo de un sistema completo, al cual nos remitiremos para el desarrollo de esta sección. Al igual que en el capítulo anterior; Cada modelo de la máquina está expresado en su propio marco de referencia (d-q) el cual gira con su rotor, las ecuaciones de interconexión con la red, todos los voltajes y las corrientes es expresado en un marco de referencia común (R-I) rotando a la velocidad síncrona.

Del marco de referencia de la Fig. 2.2 del capítulo anterior el eje real (R) sirve para medir la posición del eje del rotor de la máquina, y el Ángulo del rotor δ se define el Ángulo por el cual el eje q de la máquina adelanta al eje R.

La formulación de ecuaciones de estado para un análisis de pequeña señal implica el desarrollo de las ecuaciones linealizadas alrededor de un punto de operación y eliminando todas las variables que no son variables de estado, en general el procedimiento es similar en el caso de una máquina-barra infinita.

Para el problema que nos ocupa el sistema esta compuesta de 5 máquinas (Aguaytia, C Pato, Cahua, Carhuaquero y Talara) y 24 nodos con sus respectivas redes de interconexión y un dispositivo FACTS de primera

generación (SVC) en la barra de Vizcarra, este SVC no ha sido modelado para este estudio a falta de un modelo exacto que le corresponde a este dispositivo que esta instalado en dicha barra.

De la ecuación de estado (2.7) del Capítulo 2.

$$X_i' = A_i X_i + B_i \Delta V_i, \quad \Delta I_i = C_i X_i - Y_i \Delta V$$

donde:

X_i son los valores incrementales de las variables de estado de cada dispositivo

I_i es la inyección de corriente proveniente de cada dispositivo

V es el vector de voltajes nodales

El vector de corrientes I_i y el de voltaje V , son complejos.

Desarrollaremos un modelo completo para el sistema multimáquina incluyendo los dispositivos de control.

3.2 Modelamiento Matemático de las Ecuaciones de Estado del sistema

Agrupando las ecuaciones de cada uno de los dispositivos dinámicos se denota así: Ref. [2]

$$X' = A_D X + B_D \Delta V, \quad \Delta I = C_D X - Y_D \Delta V$$

Donde X es el vector de estado del sistema completo, A_D y C_D son matrices diagonales a bloques, conformadas por las matrices A_i y C_i asociadas a cada dispositivo. Así:

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} X'_1 \\ X'_2 \\ X'_3 \\ \dots \\ X'_n \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & A_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ \dots \\ X_n \end{bmatrix} + \\
 \begin{bmatrix} B_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & B_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ \dots \\ U_n \end{bmatrix} &+ \begin{bmatrix} C_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \\ \dots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} \quad (3.1)
 \end{aligned}$$

Donde A_i , B_i , C_i , X_i , U_i , V_i , esta representado por la Ec. (2.50) del Capitulo 2

$$A_i = \begin{bmatrix} a_{11i} & a_{12i} & 0 & a_{14i} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21i} & a_{22i} & 0 & a_{24i} & (1/T_{do})_i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{31i} & a_{32i} & (D/T_j)_i & a_{34i} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (-1/T_A)_i & (-K_A/T_A)_i & 0 & 0 & (K_A/T_A)_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (-1/TR)_i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_i & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{87i} & a_{88i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{98i} & a_{99i} \end{bmatrix}$$

$$B_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & (1/T_j)_i \\ 0 & 0 \\ (K_A/T_A)_i & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$C_i = \begin{bmatrix} C_{11i} & C_{12i} \\ C_{21i} & C_{22i} \\ C_{31i} & C_{32i} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ C_{61i} & C_{62i} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$X_i = \begin{bmatrix} \Delta E^i_{di} \\ \Delta E^i_{qi} \\ \Delta \omega_i \\ \Delta \delta_i \\ \Delta E^i_{fdt} \\ \Delta v_{ti} \\ \Delta x1_i \\ \Delta x2_i \\ \Delta V S_i \end{bmatrix}, \quad U_i = \begin{bmatrix} \Delta V_{refi} \\ \Delta T_{mi} \end{bmatrix}, \quad \Delta V_i = \begin{bmatrix} \Delta V_{Ri} \\ \Delta V_{Ii} \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, 3$$

En el trabajo inicial se consideró el sistema compuesto de solo tres máquinas con PSS existentes en el sistema centro norte (C. Pato, Aguaytia, Talara) y 18 barras, para este caso la ecuación (3.1) en forma compacta resulta:

$$\begin{bmatrix} x'_g \end{bmatrix}_{27 \times 1} = \begin{bmatrix} A_g \end{bmatrix}_{27 \times 27} \begin{bmatrix} x_g \end{bmatrix}_{27 \times 1} + \begin{bmatrix} B_g \end{bmatrix}_{27 \times 6} \begin{bmatrix} U_g \end{bmatrix}_{6 \times 1} + \begin{bmatrix} C_g \end{bmatrix}_{27 \times 6} \begin{bmatrix} \Delta V_g \end{bmatrix}_{6 \times 1} \quad (3.2)$$

Las corrientes de las máquinas están relacionadas por:

$$\begin{bmatrix} \Delta I_1 \\ \Delta I_2 \\ \Delta I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 & 0 & 0 \\ 0 & Z_2 & 0 \\ 0 & 0 & Z_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_1 & 0 & 0 \\ 0 & W_2 & 0 \\ 0 & 0 & W_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Cuyos elementos están definidos en el Apéndice A, y Z_i en forma general resulta:

$$Z_i = \begin{bmatrix} Z_{11i} & Z_{12i} & Z_{13i} & Z_{14i} & Z_{15i} & Z_{16i} & Z_{17i} & Z_{18i} & Z_{19i} \\ Z_{21i} & Z_{22i} & Z_{23i} & Z_{24i} & Z_{25i} & Z_{26i} & Z_{27i} & Z_{28i} & Z_{29i} \end{bmatrix},$$

$$W_i = \begin{bmatrix} W_{11i} & W_{12i} \\ W_{21i} & W_{22i} \end{bmatrix}$$

$$\Delta I_i = \begin{bmatrix} \Delta I_{Ri} \\ \Delta I_{Ii} \end{bmatrix}, \quad \Delta V_i = \begin{bmatrix} \Delta V_{Ri} \\ \Delta V_{Ii} \end{bmatrix}, \quad \text{con } i = 1, 2, 3$$

la ecuación (3.3) en forma compacta resulta:

$$[\Delta I_g]_{6 \times 1} = [Z_g]_{6 \times 27} [X_g]_{27 \times 1} + [W_g]_{6 \times 6} [\Delta V_g]_{6 \times 1} \quad \text{reacomodando esta expresión resulta:}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta I_g \\ 0 \end{bmatrix}_{36 \times 1} = \begin{bmatrix} Z_g \\ 0 \end{bmatrix}_{36 \times 27} [X_g]_{27 \times 1} + \begin{bmatrix} W_g & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{36 \times 36} \begin{bmatrix} \Delta V_g \\ \Delta V_L \end{bmatrix}_{36 \times 1} \quad (3.4)$$

Donde ΔI_g es el vector de corrientes de los generadores, ΔV_g el vector de voltaje de los generadores y ΔV_L el vector de voltaje en los nodos de carga.

2.3 Ecuaciones de la Red

Las ecuaciones de la red se tienen que agregar a la formulación desarrollada hasta el momento, partimos de la teoría descrita en Ref. [3] y [4]

$$I = YV \quad (3.5)$$

para nuestro caso resulta:

$$\begin{bmatrix} I_{R1} + jI_{I1} \\ I_{R2} + jI_{I2} \\ I_{R3} + jI_{I3} \\ I_{R4} + jI_{I4} \\ I_{R5} + jI_{I5} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ I_{R17} + jI_{I17} \\ I_{R18} + jI_{I18} \end{bmatrix}_{18 \times 1} = \begin{bmatrix} g_{11} + jb_{11} & g_{12} + jb_{12} & g_{13} + jb_{13} & \dots & g_{118} + jb_{118} \\ g_{21} + jb_{21} & g_{22} + jb_{22} & g_{23} + jb_{23} & \dots & g_{218} + jb_{218} \\ g_{31} + jb_{31} & g_{32} + jb_{32} & g_{33} + jb_{33} & \dots & g_{318} + jb_{318} \\ g_{41} + jb_{41} & g_{42} + jb_{42} & g_{43} + jb_{43} & \dots & g_{418} + jb_{418} \\ g_{51} + jb_{51} & g_{52} + jb_{52} & g_{53} + jb_{53} & \dots & g_{518} + jb_{518} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ g_{171} + jb_{171} & g_{172} + jb_{172} & g_{173} + jb_{173} & \dots & g_{1718} + jb_{1718} \\ g_{181} + jb_{181} & g_{182} + jb_{182} & g_{183} + jb_{183} & \dots & g_{1818} + jb_{1818} \end{bmatrix}_{18 \times 18} \begin{bmatrix} V_{R1} + jV_{I1} \\ V_{R2} + jV_{I2} \\ V_{R3} + jV_{I3} \\ V_{R4} + jV_{I4} \\ V_{R5} + jV_{I5} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ V_{R17} + jV_{I17} \\ V_{R18} + jV_{I18} \end{bmatrix}_{18 \times 1}$$

Linealizando la ecuación (3.5)

$$\begin{bmatrix} \Delta I_{R1} \\ \Delta I_{I1} \\ \Delta I_{R2} \\ \Delta I_{I2} \\ \Delta I_{R3} \\ \Delta I_{I3} \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta I_{R18} \\ \Delta I_{I18} \end{bmatrix}_{36 \times 1} = \begin{bmatrix} g_{11}' & -b_{11}' & g_{12} & -b_{12} & \dots & g_{118} & -b_{118} \\ b_{11}' & g_{11}' & b_{12} & g_{12} & \dots & b_{118} & g_{118} \\ g_{21} & -b_{21} & g_{22}' & -b_{22}' & \dots & g_{218} & -b_{218} \\ b_{21} & g_{21} & b_{22}' & g_{22}' & \dots & b_{218} & g_{218} \\ g_{31} & -b_{31} & g_{32} & -b_{32} & \dots & g_{318} & -b_{318} \\ b_{31} & g_{31} & b_{32} & g_{32} & \dots & b_{318} & g_{318} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ g_{181} & -b_{181} & g_{182} & -b_{182} & \dots & g_{1818}' & -b_{1818}' \\ b_{181} & g_{181} & b_{182} & g_{182} & \dots & b_{1818}' & g_{1818}' \end{bmatrix}_{36 \times 36} \begin{bmatrix} \Delta V_{R1} \\ \Delta V_{I1} \\ \Delta V_{R2} \\ \Delta V_{I2} \\ \Delta V_{R3} \\ \Delta V_{I3} \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta V_{R18} \\ \Delta V_{I18} \end{bmatrix}_{36 \times 1} \quad (3.6)$$

2.4 Modelo de las Cargas Estáticas

La representación de la carga en el estudio de un sistema generalmente es simplificada a través de las cargas llamadas estáticas, que en definitiva es una gran aproximación a un sistema real compuesto de una combinación de cargas dependientes de varios parámetros. Estos se clasifican en dos diferentes sistemas de cargas dependiendo de su comportamiento en el tiempo:

Cargas estáticas

Cargas dinámicas

En este caso nos centraremos en el primero que se clasifican en: Ref. [5]

Modelo de carga de potencia constante, donde la potencia no varía con cambios en la magnitud del voltaje.

Modelo de carga de corriente constante, donde la potencia varía directamente con la magnitud del voltaje.

Modelo de carga de impedancia constante, donde la potencia varía directamente con el cuadrado de la magnitud del voltaje.

Tal como se plantea en Ref. [6] la carga resulta una mezcla de las tres componentes básicas, una parte de la carga de potencia constante se transfiere a las cargas de corriente e impedancia constante tal como se muestra en la gráfica extraída de Ref. [6]

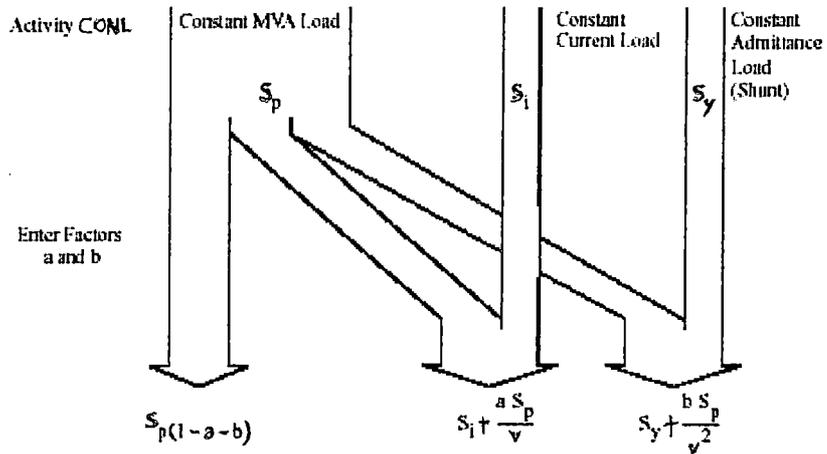


Fig. 3.1 Representación de la carga a través de la combinación de los componentes básicos.

$$S_p = S_p(1-a-b), \quad S_I = S_I + \frac{aS_p}{v}, \quad S_Y = S_Y + \frac{bS_p}{v^2}, \quad (3.7)$$

Donde:

- Sp carga potencia constante inicial
- Si Carga corriente constante inicial
- Sy Carga admitancia constante inicial
- SP carga potencia constante final
- SI Carga corriente constante final
- SY Carga admitancia constante final
- a, b Representa fracción de transferencia
- v Magnitud de voltaje.

Como se observa en la formulación (3.7) esta en función del voltaje, para el modelo real de una carga en general se tiene, de Ref. [7] lo siguiente:

$$\begin{aligned}
 P &= P_0 \left[P_{a1} \left[\frac{V_L}{V_0} \right]^{K_{pv1}} [1 + K_{pf1}(f - f_0)] + (1 - P_{a1}) \left[\frac{V_L}{V_0} \right]^{K_{pv2}} \right] \\
 Q &= P_0 \left[Q_{a1} \left[\frac{V_L}{V_0} \right]^{K_{qv1}} [1 + K_{qf1}(f - f_0)] \right. \\
 &\quad \left. + [1 + K_{qf2}(f - f_0)] \left[\frac{Q_0}{P_0} - Q_{a1} \right] \left[\frac{V_L}{V_0} \right]^{K_{qv2}} \right]
 \end{aligned} \quad (3.8)$$

Donde VL es el voltaje de la barra conectada la carga y f la frecuencia, en las ecuaciones del (3.8)

K_{pv1} y K_{pv2} representan los exponentes de voltaje para las cargas de potencia activa dependiente e independiente de frecuencia.

K_{qv1} y K_{qv2} simbolizan los exponentes de voltaje para las cargas de potencia reactiva la compensación y la descompensación de la potencia reactiva.

K_{pf1} y K_{qf1} son los coeficientes de sensibilidad de frecuencia para las cargas de potencia activa y potencia reactiva descompensado.

K_{qf2} es el coeficiente de sensibilidad de frecuencia para la compensación reactiva y P_{a1} y Q_{a1} representan la fracción dependiente de la carga de potencia activa y reactiva, el coeficiente de descompensación de la carga reactiva a la carga de potencia activa respectivamente.

V_0 , P_0 , y Q_0 denotan los valores nominales del voltaje de carga y potencia activa y reactivo de la carga.

Es importante recalcar que en esta formulación se plantea que una fracción de la carga es función del voltaje de la barra al cual esta conectado la carga y la otra fracción es función de la frecuencia de sistema.

En este caso consideramos las cargas como impedancias constantes o admitancias constantes, estos se pueden incluir en la matriz de admitancia nodal, esto es, si un nodo tiene un voltaje, V_0 , potencia real, P_0 , potencia reactiva, Q_0 , y corriente I_0 que fluye hacia una admitancia de carga, $Y_L = G_L + jB_L$,

$P_0 + jQ_0 = V_0 \times I_0^* = V_0 [V_0^* \times (G_L - jB_L)] = V_0^2 (G_L - jB_L)$, Dé donde la admitancia shunt equivalente en esa barra resulta:

$$Y_L = \frac{P_0}{V_0^2} - j \frac{Q_0}{V_0^2}$$

Es decir, los nodos que tienen carga contribuyen con un valor de admitancia en el diagonal principal de la matriz de admitancia Y .

Al considerar las cargas como admitancia constante, las inyecciones de corriente en los nodos que no estén asociado con un generador será cero, por lo tanto la ecuación (3.6) se describe como:

$$\begin{bmatrix} \Delta I_{R1} \\ \Delta I_{I1} \\ \Delta I_{R2} \\ \Delta I_{I2} \\ \Delta I_{R3} \\ \Delta I_{I3} \\ 0 \\ \cdot \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{36 \times 1} = \begin{bmatrix} g_{11}' & -b_{11}' & g_{12} & -b_{12} & \dots & g_{118} & -b_{118} \\ b_{11}' & g_{11}' & b_{12} & g_{12} & \dots & b_{118} & g_{118} \\ g_{21} & -b_{21} & g_{22}' & -b_{22}' & \dots & g_{218} & -b_{218} \\ b_{21} & g_{21} & b_{22}' & g_{22}' & \dots & b_{218} & g_{218} \\ g_{31} & -b_{31} & g_{32} & -b_{32} & \dots & g_{318} & -b_{318} \\ b_{31} & g_{31} & b_{32} & g_{32} & \dots & b_{318} & g_{318} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ g_{181} & -b_{181} & g_{182} & -b_{182} & \dots & g_{1818}' & -b_{1818}' \\ b_{181} & g_{181} & b_{182} & g_{182} & \dots & b_{1818}' & g_{1818}' \end{bmatrix}_{36 \times 36} \begin{bmatrix} \Delta V_{R1} \\ \Delta V_{I1} \\ \Delta V_{R2} \\ \Delta V_{I2} \\ \Delta V_{R3} \\ \Delta V_{I3} \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta V_{R18} \\ \Delta V_{I18} \end{bmatrix}_{36 \times 1}$$

En forma compacta

$$\begin{bmatrix} \Delta I_g \\ 0 \end{bmatrix}_{36 \times 1} = \begin{bmatrix} Y_g & Y_{NL} \\ Y_{NL} & Y_L \end{bmatrix}_{36 \times 36} \begin{bmatrix} \Delta V_g \\ \Delta V_L \end{bmatrix}_{36 \times 1} \quad (3.9)$$

2.5 Integraciones de las ecuaciones de la Red y de la Máquina

Igualando las ecuaciones (3.4) y (3.9) y despejando $\begin{bmatrix} \Delta V_g \\ \Delta V_L \end{bmatrix}$ resulta:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_g \\ \Delta V_L \end{bmatrix}_{36 \times 1} = [Y_{inv}]_{36 \times 36} \begin{bmatrix} Z_g \\ 0 \end{bmatrix}_{36 \times 27} [X_g]_{27 \times 1} \quad (3.10)$$

$$\text{Donde} \quad [Y_{inv}]_{36 \times 36} = \begin{bmatrix} Y_g - W_g & Y_{NL} \\ Y_{NL} & Y_L \end{bmatrix}_{36 \times 36}^{-1}$$

Rescribiendo la ecuación (3.2) resulta:

$$[x'_g]_{27 \times 1} = [A_g]_{27 \times 27} [x_g]_{27 \times 1} + [C_g \quad 0]_{27 \times 36} \begin{bmatrix} \Delta V_g \\ \Delta V_L \end{bmatrix}_{36 \times 1} + [B_g]_{27 \times 6} [U_g]_{6 \times 1} \quad \text{sustituyendo}$$

(3.10) en esta última expresión,

$$[x'_g]_{27 \times 1} = [A_g + A_{red}]_{27 \times 27} [x_g]_{27 \times 1} + [B_g]_{27 \times 6} [U_g]_{6 \times 1} \quad (3.11)$$

Donde

$$[A_{red}]_{27 \times 27} = [C_g \quad 0]_{27 \times 36} [Y_{inv}]_{36 \times 36} \begin{bmatrix} Z_g \\ 0 \end{bmatrix}_{36 \times 27}$$

La ecuación (3.11) es una representación de un sistema multimáquina en la forma estándar de variables de estado. Las variables de salida se pueden considerar las velocidades, los flujos de potencia, los voltajes. En los dos últimos casos se requiere expresar esas señales en función del vector de variables de estado.

Los parámetros de los dispositivos de control AVR y PSS, han sido incluidos en la matriz de estado, por lo tanto la última ecuación también refleja un sistema multimáquina incluido los controles, del mismo modo se tiene que incluir los controles de los dispositivos FACTS es decir las señales estabilizantes llamados como los FDS o POD (FACTS Devices Stabilizers), (Power Oscillations Damping) por las siglas en Ingles respectivamente; Para lograr una matriz de estado compuesto de todos los elementos de control, que nos permita realizar el eigenanálisis y determinar los modos de interés en una SEP.

3.6 Resumen

En este capítulo se desarrolló un Modelamiento completo de un sistema multimáquina, es decir para n máquinas como en la ecuación (3.1) el cual ha sido aplicado para 3 máquinas y 18 nodos descritos en la Fig. 1-D que representa el esquema simplificado del sistema Centro-Norte del SEIN, cabe resaltar que cada máquina esta compuesto de sus respectivos controles como en el caso de los AVR se incluyen el transductor de voltaje y su respectiva ganancia amortiguante, y en el caso del PSS se trabajo con el modelo mas general desarrollado en el capítulo 2.

El Modelamiento de las cargas es un tema bastante amplio desarrollado por muchos investigadores con el objeto de representar el comportamiento exacto en estado de operación, en la Ref. [7] se menciona una clasificación y Modelamiento matemático detallado, acerca de las cargas estáticas y dinámicas, clasificando este ultimo en dinámicas lineales y no lineales. En este caso he descrito un modelo básico para el caso de las cargas estáticas

que a su vez ha sido utilizado el modelo de cargas estáticas de admitancia constante para dar con el modelo matemático de un sistema multimáquina compuesta de máquinas generadoras con sus respectivos controles, redes de interconexión y cargas, dada por la ecuación (3.11).

3.7 Referencias

- [1] Prabha Kundur, *“Power System Stability and Control”*. Electric Power Research Institute – Power System Engineering Series, McGraw Hill, 1994.
- [2] P. Kundur, G. J. Rogers, D. Y. Wong, L. Wang y M. G. Lauby, *“A Comprehensive Computer Program Package For Small Signal Stability Analysis of Power system”*. IEEE Trans on Power Systems, Vol. PWR5-5, Pp.1076-1083, November 1990.
- [3] Ixtláhuatl Coronado G., *“Ubicación de dispositivos FACTS desde una perspectiva dinámica”*. Tesis de maestría en ciencias, Cinvestav unidad Guadalajara, Octubre, 2001.
- [4] Hadi Saadat, *“Power System Analysis”*. Milwaukee School of Engineering, <http://www.mhhe.com>. McGraw - Hill, 1999.
- [5] *“Load representation for dynamic performance analysis”*. IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 2, May 1993.
- [6] Power Technologies, INC., *“Program Application Guide”*, Volumen II Online Documentation PSS/E-26.2, U.S.A., December 1998.
- [7] Valery Knyazkin, Claudio Cañizares, and Lennart Söder, *“On the Parameter Estimation and Modeling of Aggregate Power System Loads”*, IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, Manuscript submitted January 2003. Revised and resubmitted June 2003. , Accepted for publication July 2003.

- [8] S. Arabi, G.J. Rogers, D.Y. Wong, P. Kundur, and M.G. Lauby, "*Small Signal Stability Program Analysis of SVC and HVDC in AC Power Systems*," IEEE Trans., Vol. PWRS-6 Pp. 1147-1153, August 1991.



CAPÍTULO 4

ALGORITMOS GENÉTICOS Y TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN

4.1 INTRODUCCIÓN

Este es el capítulo donde pretendemos estar al día con las diferentes técnicas modernas e inteligentes de optimización; Desde los inicios el hombre ha buscado incesantemente la comodidad, simplicidad y la seguridad en los procesos, hoy en día prácticamente se tiene los reemplazantes de los hombres en las acciones físicas e intelectuales que satisfacen de alguna medida estas necesidades logrando desarrollar actividades desde simples hasta los mas complicados, para el hombre simplemente era imposible; No obstante se tuvo que resolver el problema, y es logrado fruto a una constante investigación de nuevas y evolucionarias estrategias de control óptimo llegando a tal punto de hacerlo en tiempo real que ya algunos años atrás ha sido incorporado en las funciones específicas de la NASA como una arquitectura de control en la división de Space Station Flight Telerobot Server, esta arquitectura de control ahora es aplicado a la operatividad de sistemas de potencia con la integración de interruptores de estado sólido (Thyristores, GTO, IGBT, etc.) Ref. [1] que permiten controlar la dirección y la magnitud de las potencias que son evacuadas a través de las líneas de transmisión, esto es posible debido a un control basado en algoritmos evolutivos que son capaces de adecuarse, aprender y decidir de acuerdo a las necesidades del entorno, que normalmente son llamados sistemas auto adaptable; Estas nuevas tendencias de control en los SEP son clasificadas en varios niveles de control en analogía a control en la robótica. Ref. [2] Esto significa que las

tratativas a los SEP son o serán similares a los robots autónomas controlados en tiempo real.

Las técnicas de optimización son un conjunto de métodos de procedimientos y búsqueda para encontrar un juego de parámetros $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ de un plan, esto puede de alguna manera ser definida como óptimo. En un caso simple éste es el minimizar o maximizar alguna característica del sistema que es dependiente en un parámetro x . En una formulación más avanzada la función objetivo, $f(x)$, para ser minimizado o aumentado al máximo, esta sujeto a las restricciones condicionantes de igualdad o desigualdad.

$$G_i(x) = 0, \quad (i = 1, \dots, m_e)$$

$$G_i(x) \leq 0, \quad (i = m_e + 1, \dots, m) \quad \text{dentro de rango} \quad x_l \leq x \leq x_u$$

Un Problema General es representada de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} & \min f(x) \\ & x \in \mathfrak{R}^n \\ \text{sujeto a} \quad & G_i(x) = 0 \quad i = 1, \dots, m_e \\ & G_i(x) \leq 0 \quad i = m_e + 1, \dots, m \\ & x_l \leq x \leq x_u \end{aligned}$$

Donde x es el vector de parámetros de ($x \in \mathfrak{R}^n$), $f(x)$ es la función objetivo que devuelve un valor del escalar ($f(x): \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$), y el vector función $G(x)$ evalúa los valores de la igualdad y desigualdad restringidos para x ($G(x): \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}^m$)

Existen diferentes técnicas de optimización orientadas a soluciones específicas, en los problemas complejos de la ingeniería se requieren nuevas técnicas de optimización con una base en el desarrollo histórico de este arte mas que ciencia, iniciándose con los grandes matemáticos como *Newton*, *Lagrange* y *Cauchy* entre otros; Actualmente las técnicas de

optimización han alcanzado un desarrollo importante, las herramientas modernas de computo están brindando la posibilidad de tener un desarrollo sin precedentes con las nuevas técnicas en el campo de la ingeniería, por ejemplo el uso de las técnicas heurísticas para el análisis de estabilidad transitoria de sistemas eléctricos de potencia. existen técnicas heurísticas con algoritmos evolutivos que permiten aprender y tomar decisiones tales como los VSC (Variable-Structure Control) ANN (Artificial Neural Network), FLS (Fuzzy-Logic Systems), GA(Genetic Algorithm) por sus siglas en Ingles.

Para el efecto del propósito de este trabajo, es necesario describir el análisis completo de la sensibilidad de un sistema representado por la ecuación de estado; Para el análisis de estabilidad de pequeña señal y la estabilidad de voltaje es necesario desarrollar el eigenanálisis para identificar los modos a los cuales es susceptible un sistema de potencia, tradicionalmente dicho análisis se ha efectuado usando el sistema de matriz de estado reducido resultando limitado a medianos sistemas, en este trabajo se propone realizar mediante el análisis de la sensibilidad del eigenvalor de primer y segundo orden del sistema de matriz de estado aumentada. Además de ellos se propone una función objetiva basado en dichas sensibilidad que son resueltos mediante la aplicación de los algoritmos genéticos.

4.2 Condiciones de Optimización

La optimización consiste en maximizar o minimizar una función objetiva que permita encontrar una condición requerida, en el proceso de optimización existen indicadores que garantizan la optimización, esas condiciones y restricciones son los que necesitamos entender en cada modelo o técnicas de optimización para lograr una adecuada labor.

4.2.1 Optimización Monovariante.

Una función monovariante o función escalar se dice que tiene un mínimo local o relativo en un punto $z = z^*$ si, $\forall z \in B(z^*, \varepsilon)$ donde $B(z^*, \varepsilon)$ es el intervalo abierto R (reales) con centro en z^* y radio ε . De manera similar tiene un máximo local o relativo $z = z^*$ tal que $f(z^*) \geq f(z)$, $\forall z \in B(z^*, \varepsilon)$ el mínimo o máximo es global si: $B(z^*, \varepsilon) = R$.

El problema de la función monovariante es determinar si dentro de $[a, b]$ existe un valor de z^* que optimice la función $f(z)$.

Condiciones necesarias para un mínimo

Sea $f(z)$ una función definida en el intervalo $[a, b]$, $z \in [a, b]$ es un

mínimo relativo la derivada $\frac{df(z)}{dz} \Big|_{z^*} < \infty$ (4.1),

Entonces $f'(z^*) = 0$

Condiciones suficiente

Sea $f(z)$ una función tal que $\frac{df(z)}{dz} \Big|_{z^*} = \dots = \frac{d^{(n-1)}f(z)}{dz^{(n-1)}} \Big|_{z^*} = 0$, y $\frac{d^{(n)}f(z)}{dz^{(n)}} \Big|_{z^*} \neq 0$

de Ref. [3] entonces $f(z)$ tiene:

1) Un valor mínimo en z^* si $\frac{d^{(n)}f(z)}{dz^{(n)}} \Big|_{z^*} > 0$ Donde n es número par.

Un valor máximo en z^* si $\frac{d^{(n)}f(z)}{dz^{(n)}} \Big|_{z^*} < 0$ Donde n es número par.

No será máximo ni mínimo si n es un número impar.

4.2.2 Optimización Multivariable

a) *Sin restricción.* – las condiciones necesarias para la optimización de una función se define como:

i) condición necesaria.

Si $f(z)$ tiene un punto extremo en $z = z^*$ y si $\frac{\partial f(z)}{\partial z}$ existe en z^* entonces,

$$\frac{\partial f}{\partial z_1}(z^*) = \frac{\partial f}{\partial z_2}(z^*) = \dots = \frac{\partial f}{\partial z_n}(z^*) = 0 \quad (4.2)$$

ii) condición suficiente.

Para que un punto fijo z^* sea un punto extremo, es que la matriz $\frac{\partial^2 f(z)}{\partial z^2}$ (matriz Hessiana) evaluada en z^* sea:

Positiva definida cuando z^* sea un punto mínimo relativo

Negativa definida cuando z^* sea un punto máximo relativo.

b) Con restricciones de igualdad.

Se consideran funciones continuas sujetas a restricciones de igualdad del tipo.

Minimizar: $f(z)$

Sujeta a: $g_i(z) = b \quad i = 1, 2, \dots, p.$

Donde generalmente $p \leq n$, y n es el número de variables.

4.3 Métodos de búsqueda

4.3.1 Métodos de búsqueda directa

Este método requiere conocer los valores de la función objetivo, también son conocidos como métodos de orden cero. Su aplicación es conveniente en problemas simples que involucran un número pequeño de variables, por lo tanto son menos eficientes que los métodos de búsqueda indirecta. De acuerdo a la literatura, el método más usado es el método de *Hooke-Jeeves* que consiste de dos tipos de movimientos, movimiento exploratorio (comportamiento local) y el movimiento ejecutorio (dirección de búsqueda).

4.3.2 Métodos de búsqueda indirecta

Estos métodos requieren además de los valores de la función objetivo, el cálculo de la primera derivada, de la segunda derivada de la función objetivo. En comparación con los métodos clásicos de optimización son más versátiles por el hecho de utilizar las gradientes de primer y segundo orden, son conocidos también como métodos del gradiente.

4.4 Técnicas Heurísticas

Desde un punto de vista global, las técnicas heurísticas son las técnicas de nivel superior a las técnicas tradicionales o clásicas que tienen limitaciones a problemas simples, uno de las desventajas importantes es el requerimiento de información de gradientes de primer orden o segundo orden que no siempre se dispone (funciones discretas) Ref. [4] y [5]. Los problemas prácticos de optimización que se presentan en la ingeniería son muy complejos por naturaleza, por tanto la aplicación de los métodos clásicos resulta ineficiente.

En la literatura se definen dos principales tipos de métodos de búsqueda de la solución óptima. Métodos basados en cálculos (directas e indirectas), y las técnicas aleatorias. El algoritmo de búsqueda aleatoria tiene múltiples aplicaciones en las diferentes áreas de ingeniería y gozan de una popularidad creciente por ser técnicas eficientes, globales y robustas. Así como: Redes Neuronales (Neural Network), Búsqueda Tabú (Tabu Search), Lógica Difusa (Fuzzy Logic), Escalando la Colina (Hill Climbing), Templado Simulado (Simulated Annealing), y los que se basan en los principios naturales de la evolución son: Programación Evolutiva, Sistemas Clasificadores, Programación Genética, Estrategias Evolutivas, y Algoritmos Genéticos (Genetic Algorithm) a continuación desarrollaremos las principales técnicas heurísticas:

4.4.1 Redes Neuronales Artificiales (ANN)

Las ANN (Artificial Neural Networks) por sus siglas en Ingles, Ref. [6] se origina en los estudios acerca de la inteligencia artificial, esta basado en las neuronas biológicas de los seres vivos. El cerebro humano recibe permanentemente señales de entrada de muchas fuentes y las procesa a manera de crear una apropiada respuesta de salida, cuentan con millones de neuronas que se interconectan para elaborar " Redes Neuronales". Estas redes ejecutan millones de instrucciones necesarias para mantener una vida normal a través de los impulsos eléctricos y reacciones químicas. Los impulsos que utiliza una neurona para intercambiar información con las demás, viajan por el axón que hace contacto con las dendritas de la neurona contigua por intermedio de las sinápsis. La intensidad de la corriente transmitida depende de la eficiencia de la transmisión sináptica. Una neurona en especial transmitirá un impulso eléctrico por su axón, suficientes señales de las neuronas vecinas a través de sus dendritas en pequeños tiempos. La señal que se transmite a la neurona podrá ser además ya sea inhibitoria o excitadora. La neurona dispara, es decir, manda el impulso por su axón si la excitación excede su inhibición por un valor crítico (umbral de la neurona).

La red neuronal fue propuesta en 1943 por McCulloch y Pitts en términos de un modelo computacional binario de "actividad nerviosa", y cada neurona tiene un escalón o umbral prefijado. Este primer modelo sirvió de ejemplo para los modelos posteriores de *Jhon von Neumann*, *Frank Rosenblatt*, *Marvin Minsky*, entre otros.

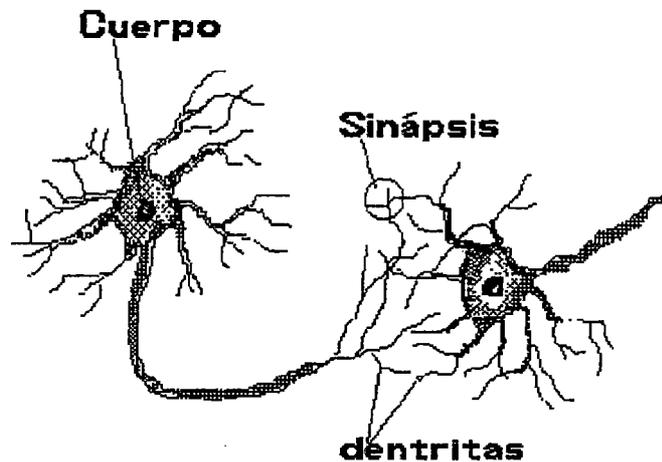


Fig. 4.1 Neurona tipo biológico

Las neuronas y las conexiones entre ellas (*sinapsis*) constituyen la clave para el procesamiento de la información. En la figura 4.1, estas poseen una estructura de árbol llamadas dendritas estos reciben las señales de entrada que viene de otras neuronas por intermedio de las uniones llamadas sinapsis. Algunas neuronas se comunican solo con las cercanas, mientras que otras se conectan con miles. Existen tres partes en una neurona:

1. El Cuerpo de la neurona,
2. ramas de extensión llamadas Dendritas para recibir las entradas, y
3. un axón que intercomunica la salida de la neurona a las dendritas de otras neuronas.

La representación de una neurona "artificial", que intenta emular el comportamiento de la neurona biológica es el siguiente:

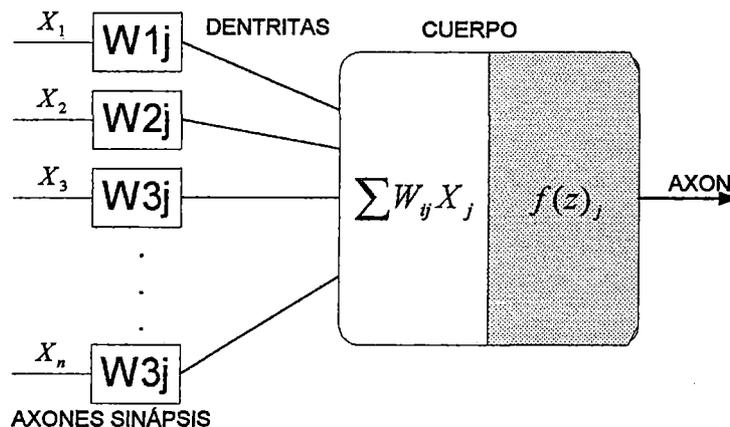


Fig. 4. 2 Representación de una neurona artificial

Aquí el cuerpo de la neurona se representa como un sumador lineal de los estímulos externos z_j , seguida de una función no lineal $y_j = f(z_j)$. Donde $f(z_j)$ es llamada la función de activación, y es la función que utiliza la suma de estímulos para determinar la actividad de salida de la neurona. Este es la representación básica de *McCulloch y Pitts* que sirve de base para teorías complejas y aplicaciones.

En general, las ANN se pueden definir como en Ref. [7]:

El elemento de procesamiento o las características de la neurona $x' = f(z, x)$ es lo que determina qué puede hacer la neurona.

Regla de aprendizaje que está definido por $z' = g(z, x, w)$, que cambia el peso de la conexión de acuerdo con los estímulos.

Topología de la ANN, se refiere de cómo está conectado las neuronas.

4.4.1.1 Aplicaciones de ANN.

La ventaja de la ANN reside en el procesamiento paralelo, adaptativo y no lineal. Las ANN tienen muchas aplicaciones exitosas en la visión artificial, por ejemplo en procesamiento de señales e imágenes, sistemas expertos, reconocimiento del habla y de caracteres, análisis de imágenes médicas, inspección industrial y exploración científica, control remoto, control de robots, procesamiento de información etc.

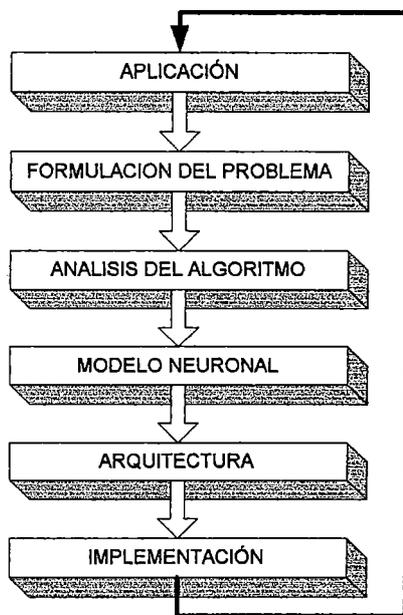


Fig. 4.3 Diagrama de bloques para la implementación.

Las principales aplicaciones son para el procesamiento de señal y el reconocimiento de patrones. La primera etapa algorítmica representa una combinación de la teoría matemática y la fundamentación heurística por los modelos neuronales. El fin último es la construcción de neurocomputadores digitales, con la ayuda de las tecnologías VLSI y el procesamiento adaptativo, digital y paralelo. Una aplicación de múltiples capas se ilustra en la siguiente Fig.

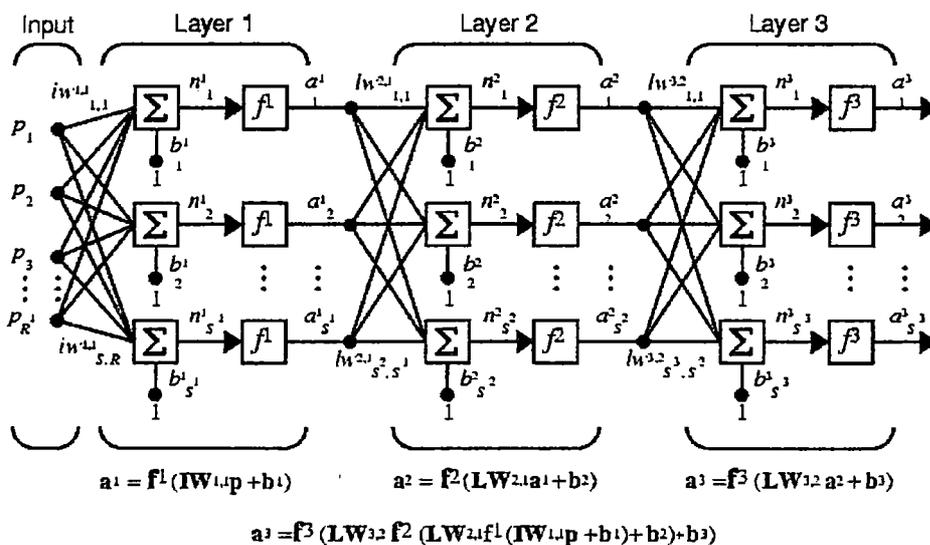


Fig. 4.4 Representación multicapa con representación en la salida.

En el diseño de los PSS algunos Autores han elaborado el IDNC (Indirect adaptive Neural Network Control) que consiste en un neuro-controlador, el cual es usado para generar un control suplementario de la señal inyectada al sistema excitatriz, y un neuro-identificador, el cual es usado para modelar el sistema dinámico del sistema de potencia y adaptar los parámetros hacia el neuro-controlador. El modelo se representa en la siguiente Fig.

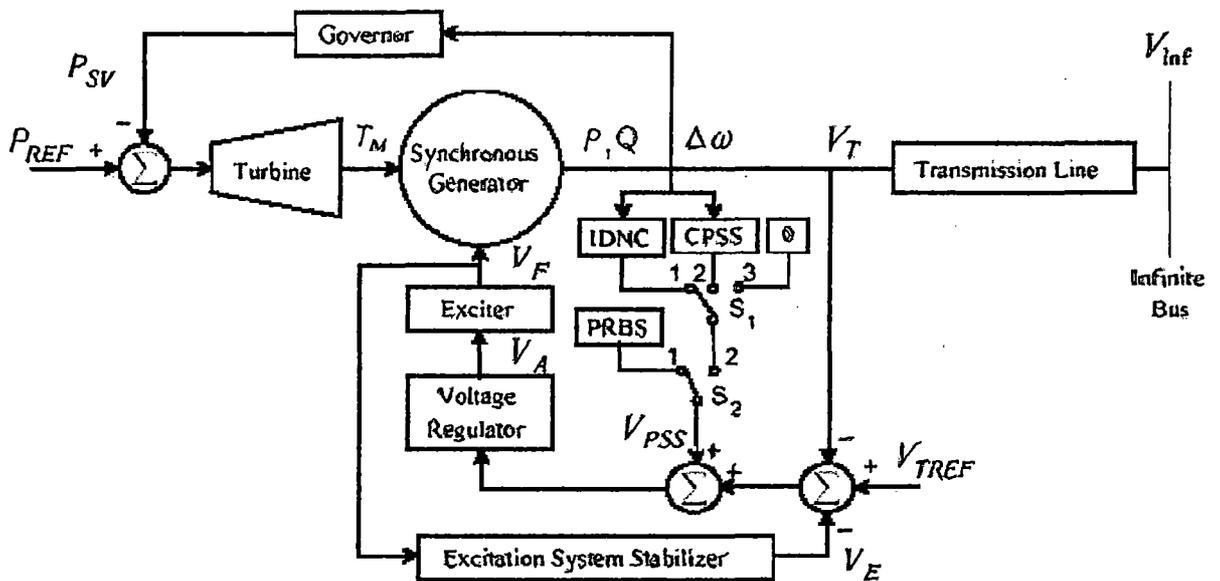


Fig. 4.5 Modelo del sistema configurado

Este modelo está diseñado para operar con tres alternativas, a través de S1 se efectúa la selección: Controlador neuronal, Convencional PSS y sin PSS, a través del S2 es seleccionado entre la operación normal y estado de aprendizaje 1 y 2 respectivamente.

Proceso de Aprendizaje

Fase pre-control.- durante esta fase S2 está en la posición 2, la señal de PRBS (Propagated Back Signal), es sumada al regulador de voltaje cuando el sistema se encuentra en estado estable. Esta adición excita todo el dinamismo del sistema, cuyos valores son seleccionados aleatoriamente en el rango de -0.1 a 0.1 el cual es una salida típica de un PSS convencional.

1) *Aprendizaje del Neuro-Identificador.*- el proceso de aprendizaje de este bloque durante el pre-control es mostrado en la siguiente Fig.

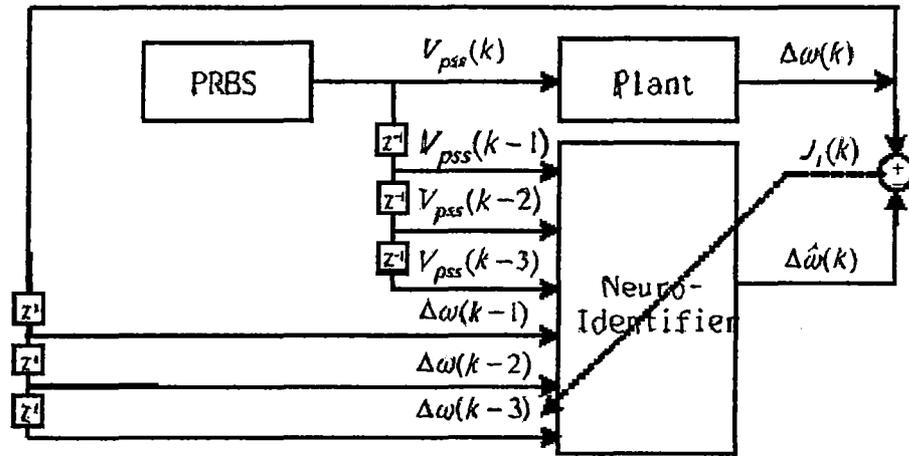


Fig. 4.6 *Aprendizaje del Neuro-Identificador durante precontrol.*

Donde las entradas al Neuro-Identificador durante esta fase son: $[\Delta w(k-1), \Delta w(k-2), \Delta w(k-3), VPSS(k-1), VPSS(k-2), VPSS(k-3)]$ y la salida es $\Delta w'(k)$, la salida deseada de la planta es $\Delta w(k)$. La función de costo de aprendizaje esta dado por:

$$J1(k) = \frac{1}{2} e_i(k)^2 = \frac{1}{2} [\Delta w(k) - \Delta w'(k)]^2$$

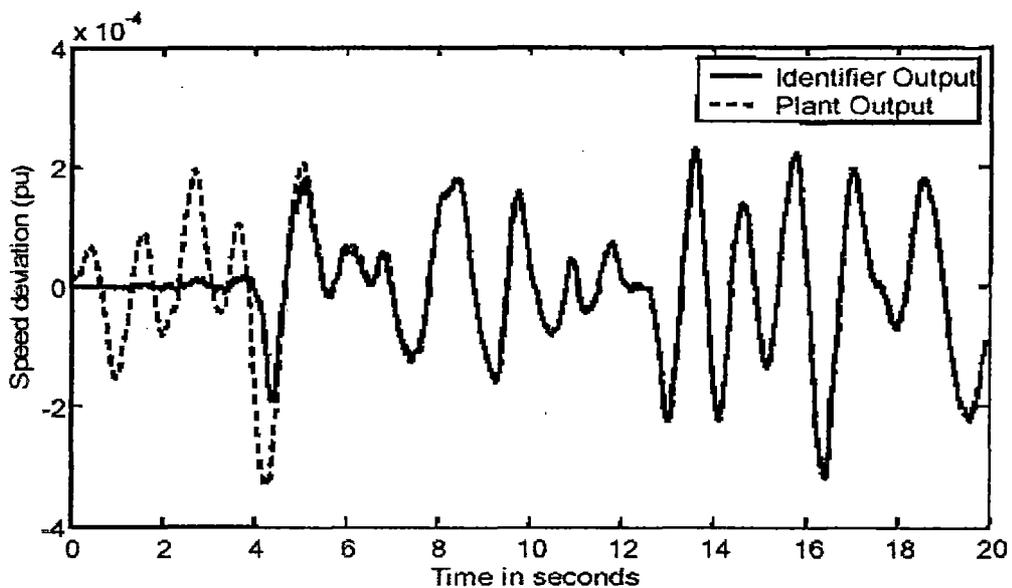


Fig. 4.7 *Proceso de adaptación o estimación de la desviación de la velocidad*

2. *Aprendizaje del Neuro-Controlador.*- El aprendizaje del Neuro-Controlador toma lugar con el aprendizaje del Neuro-Identificador en cascada. Durante esta fase la entrada al Neuro-Controlador es $[\Delta w(k-1), \Delta w(k-2), \Delta w(k-1)]$ y la salida es $V'PSS(k)$ el cual es inyectado al Neuro-Identificador para ser revaluado y conseguir la salida deseada mediante la ecuación:

$$V'_{PSS}(k) = V_{PSS}(k) + \frac{\partial Jc(k+1)}{\partial V_{PSS}(k)}$$

Donde $Jc(k+1) = \frac{1}{2} ec(k+1)^2 = \frac{1}{2} [\Delta w(k+1) - \Delta w'(k+1)]^2$

4.4.2 *Lógica Difusa(FL)*

El FL (Fuzzy Logic) por las siglas en Ingles, data desde los tiempos de los filósofos griegos, con el afán de encontrar una teoría lógica que determinara la situación intermedia entre dos puntos. *Parmenides* propuso una Ley de Exclusión del Intermedio aproximadamente 400 años antes de Cristo. También *Heraclito* propuso que existen cosas que se pueden definir como verdadero o falso. Pero fue *Platón* quien propuso una tercera región (distinta de las conocido verdadero y falso). Ahora, en el año de 1965 *Lotfi A. Zadeh* publicó su trabajo "Fuzzy Sets" en donde describe la matemática de la teoría difusa, la cual llamó "Lógica Difusa". Desde entonces nuevas operaciones de cálculo se han propuesto y añadido a la lógica clásica.

La lógica difusa es basada en la teoría de conjuntos que posibilita imitar el comportamiento de la lógica humana. De Ref. [8]

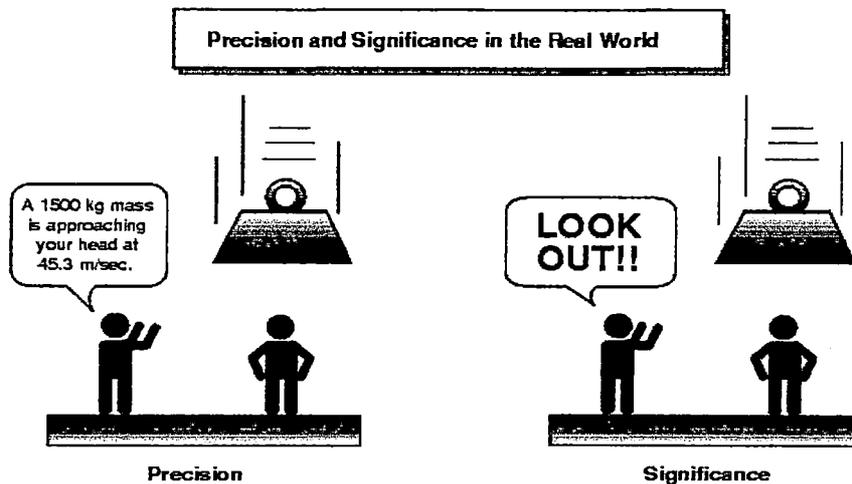


Fig. 4.8 Comportamiento de la Lógica Humana.

4.4.2.1 Conceptos básicos de Lógica Difusa.

En forma simplificada se tiene los siguientes: de Ref. [8], [9], [10]

4.4.2.1.1 Conjuntos Concretos.

Colección de elementos dentro de un universo definidos e identificados plenamente, es decir o se está o no se está dentro del conjunto, por ejemplo el conjunto de los 5 primeros números primos $A = \{1, 2, 3, 5, 7\}$ y los otros números no pertenecen al conjunto.

4.4.2.1.2 Conjuntos Difusos.

En los diferentes eventos que ocurren a diario se presentan conceptos difíciles de precisar. Al tener un grado de imprecisión es difícil definir su naturaleza. Se puede reflejar en la falta de precisión en valores como forma, posición, color, momento, textura, contexto, tiempo, etc. En los diferentes ámbitos es decir en las finanzas, sociología, física, ingeniería, biología, sicología, etc.

Por ejemplo la velocidad relativa con respecto a la velocidad absoluta de dos móviles, entonces en los conjuntos difusos se puede representar lo ambiguo, lo vago, es decir con cierto grado de falsedad o verdad.

4.4.2.1.3 Conceptos Imprecisos.

Por la dificultad de plantear condiciones exactas en algunas situaciones, ejemplo.

El automóvil se desplaza con mucha velocidad.

Los trabajos costosos son mejores.

El equipo dominó el partido.

4.4.2.1.4 Etiquetas lingüísticas y Operadores.

Separamos las etiquetas lingüísticas en dos categorías que son:

Tipo I: Las que se representan como operadores que actúan en un conjunto difuso:

“muy”, “más o menos”, “mucho”, “ligeramente”, “altamente”, “bastante”, etc. y,

Tipo II: Las que requieren una descripción de cómo actúan en las componentes del conjunto difuso:

“esencialmente”, “técnicamente”, “estrictamente”, “prácticamente”, “virtualmente”, etc.

De estas se pueden desprender las variables lingüísticas que son palabras o frases que se enmarcan en un lenguaje predeterminado. Ejemplo:

La velocidad es alta

Juan tiene gripe

La velocidad es alta, pero no tan rápida

Juan tiene gripe y se siente mal.

4.4.2.2 Controlador Difuso.

La aplicación de la lógica difusa es casi generalizada en procesos de control en las esferas de grupos en donde están a la par con las nuevas tendencias de la tecnología, en las industrias es en donde se tienen usualmente controladores basados en la lógica difusa que son llamados *controlador difuso* cuya estructura se ilustra en la siguiente Figura.

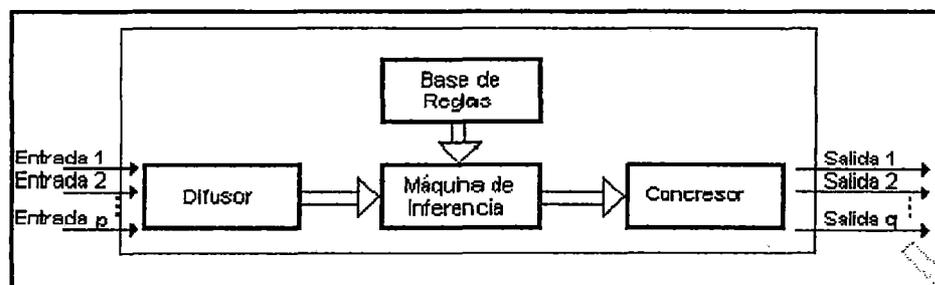


Fig. 4.9 Estructura interna del controlador difuso.

Es bien conocido que la teoría de conjuntos, el álgebra *Booleana* y la lógica tradicional son isomorfas, bajo transformaciones adecuadas. Esto significa que tienen una estructura subyacente similar, y que por tanto las definiciones que se hagan en cualquiera de las tres teorías se pueden llevarse a las otras dos, mediante transformaciones adecuadas.

El resumen se presenta en el siguiente cuadro:

Teoría de Conjuntos	Álgebra Booleana	Lógica Tradicional
Intersección	Conjunción	AND
Unión	Disyunción	OR
Complemento	Negación	NOT

Tabla 4.1 Correspondencia entre operadores de la Teoría de Conjuntos, el Álgebra Booleana y la Lógica Tradicional.

En lógica difusa una proposición puede representarse por un conjunto difuso: "*X es A*" corresponde a un conjunto *A* con función de pertenencia $\mu_A(x)$, mientras que "*Y es B*" corresponde a un conjunto *B* con función de pertenencia $\mu_B(y)$, y la combinación de estas dos proposiciones con el

operador *AND*, es decir la proposición "*X es A AND Y es B*" corresponde a un nuevo conjunto difuso *AANDB* con función de pertenencia

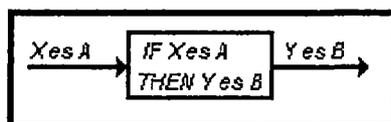
$$u_{AANDB}(x,y) = \min(u_A(x), u_B(y)).$$

En donde se ha utilizado el operador *min.* para efectuar la intersección de los dos conjuntos, pero en general podría haberse utilizado cualquier Norma.

4.4.2.3 Inferencia en lógica difusa.

Consiste en la combinación de proposiciones para producir nuevas proposiciones. Así, al combinar la proposición "*X es A*" con la proposición "*IF X es A THEN Y es B*", se puede inferir la proposición "*Y es B*" (ver Figura 4.10a). Una inferencia como la presentada en el párrafo anterior sólo es posible en la lógica tradicional si la primera proposición ("*X es A*") es idéntica a la primera parte de la proposición ("*(IF) X es A*"); Sin embargo, en la lógica difusa estas dos proposiciones no necesariamente son idénticas, debido a que las fronteras de los conjuntos no son precisas. Así, al combinar la proposición "*X es A**" con la proposición "*IF X es A THEN Y es B*", puede obtenerse la proposición "*Y es B**" (ver la figura 4.10b)

(a)



(b)

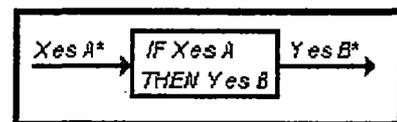


Fig. 4.10 (a) Inferencia en lógica tradicional

(b) Inferencia en lógica difusa

En la siguiente figura se muestra gráficamente la diferencia de estos:

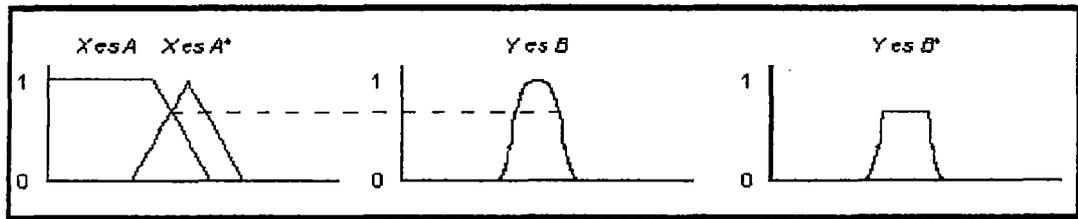


Fig. 4.11 Representación gráfica de los mecanismos de Inferencia en Lógica Difusa

4.4.2.4 Aplicación de FL(En el diseño de PSS).

La base de conocimiento del PSS difuso considera 5 reglas que tiene la forma:

Si $[w - w_{ref}](k) = A_i$ entonces $U_i(k) = B_i$

$$A_1 = \{ [w - w_{ref}](k) < -L/2 \}, \quad B_1 = \{-M\}$$

$$A_2 = \{ -L < [w - w_{ref}](k) < 0 \}, \quad B_2 = \{-0.2M\}$$

$$A_3 = \{ -L/2 < [w - w_{ref}](k) < L/2 \}, \quad B_3 = \{0\}$$

$$A_4 = \{ 0 < [w - w_{ref}](k) < L \}, \quad B_4 = \{0.2M\}$$

$$A_5 = \{ L/2 < [w - w_{ref}](k) \}, \quad B_5 = \{M\}$$

Donde: L determina el universo de discusión para la señal de entradas al **PSS**

M son los límites máximos y mínimos para la variable manipulada.

La señal de control se obtiene mediante:

$$U(t) = U(k); \quad kT_s < t < (k+1)T_s$$

$$U(k) = \left(\sum_{j=1}^3 w_j(k) \right)^{-1} \sum_{i=1}^3 w_j(k) U_i(k)$$

Donde W_i en el instante k es el grado de activación de la regla i .

$M = 0.100$ pu. Considerando el límite de saturación de la señal de control.

$L = 0.001$ pu. A partir de la desviación de la velocidad del generador en el momento de la falla.

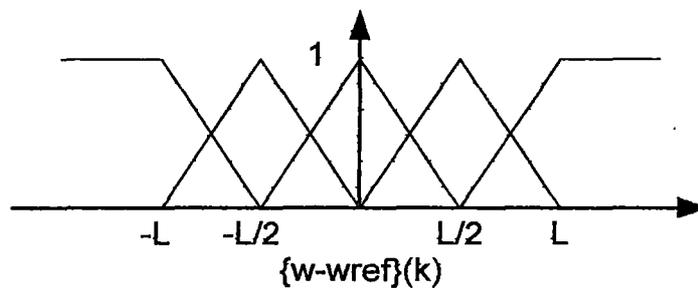


Fig. 4.12 Universo: Funciones de pertenencia

4.5 Descripción de los Algoritmos Genéticos GA

El GA (Genetic Algorithm) por sus siglas en Inglés, es un método de la búsqueda global estocástico que imita la metáfora de evolución biológica natural. El GA opera en una población de soluciones potenciales que aplican el principio de supervivencia del más apto en adecuarse al medio sometido con buena salud para producir y reproducirse en nuevas generaciones (probabilísticamente) en bien y buenas aproximaciones a una solución. A cada generación, un nuevo juego de aproximaciones se crea por el proceso de seleccionar a los individuos según su nivel de aptitud en el dominio del problema y engendrarlos usando a operadores de cruzamiento y mutación de las genéticas naturales. Este proceso lleva a la evolución de poblaciones de individuos en nuevas generaciones que satisfacen o adaptan de forma superior a su ambiente que los individuos que los crearon, así como en la adaptación natural.

Los nuevos individuos, o las aproximaciones actuales, se pone en código como las cadenas de los cromosomas, compuesto sobre el mismo código (alphabet (s)), para que el genotipo (el cromosoma valorada) se represente singularmente hacia el dominio de la decisión (el fenotipo). La representación normalmente usada en el GA es el alfabeto binario {0, 1} aunque pueden usarse otras representaciones, por ejemplo ternario, entero,

evaluación a través de la función objetiva, para asignar un valor de aptitud a cada individuo y los individuos seleccionados pasan a la siguiente generación, para que el proceso continúe a través de las generaciones subsecuentes. Se espera que la aptitud de los individuos en una población aumente de generación en generación. El GA se termina cuando algún criterio está satisfecho, por ejemplo un cierto número de generaciones, una desviación mala en la población, o cuando un punto particular en el espacio de la búsqueda se encuentra.

4.5.1 Representación de la Población Inicial

El algoritmo genético simple (GAs) se describe por *Goldberg* [11] y se usa en este trabajo Para ilustrar los componentes básicos del GA.

El GA opera en varias soluciones potenciales, llamado población compuesta entre 20 y 100 o más individuos, cada individuo o cromosomas esta compuesto por cadenas de genes codificados adecuadamente. Obviamente existen las variantes por ejemplo el llamado el GA microscópico, usa poblaciones muy pequeñas, ~10 individuos, con una reproducción restrictiva y estrategia del reemplazo en un esfuerzo por alcanzar la ejecución en tiempo-real. Ref. [12] Existen muchas formas de representar un cromosoma dependiendo del problema a resolver, entre los que se encuentran los dígitos binarios, números reales, símbolos, matrices, vectores, etc. Los estudios desarrollados para definir la representación más conveniente del cromosoma se inclinan por la representación con valores reales por significar más eficientes en términos de tiempo de simulación en una computadora Ref. [13]; Además que el uso de este tipo de representación ofrece resultados mucho más precisos y más consistente Ref. [14]. La población inicial es generada mediante dos opciones:

Generar aleatoriamente una cantidad de individuos comprendidos dentro de un rango de interés.

Ingresar valores de individuos basados en la experiencia comprendidos dentro del rango de interés o combinar con el primero.

Se entiende que esta población inicial representa una posible solución de la búsqueda de valores óptimos, proceso generalmente aleatorio.

4.5.2 Selección

Es el proceso de determinar el número de tiempos, o ensayos, que un individuo particular basado en su aptitud serán sometidos para la reproducción y, así, el número de descendencia que un individuo producirá. La selección de individuos puede verse como dos procesos separados:

- i) la determinación del número de ensayos que un individuo puede esperar recibir.
- ii) la conversión del número esperado de ensayos en un número discreto de descendencia.

La primera parte se preocupa por la transformación de aptitud valorada en la probabilidad de reproducirse y asignarle la aptitud. La segunda parte es la selección probabilística de individuos para reproducción basada en su aptitud con respecto de la aptitud del pariente de los individuos. De esta forma, un individuo en la población tiene la posibilidad de ser seleccionado mas de una vez así como el de reproducirse en la siguiente generación.

Existen diferentes métodos para el proceso de selección como los que son mencionados en:

- 1) *Asignación de aptitud basada en un rango.* - La población se ordena según los valores objetivos. La aptitud asignada a cada individuo sólo depende de su posición en los individuos alineados y

no en el valor objetivo real. Por lo tanto los individuos que tienen una aptitud menor a un valor deseado son eliminados Ref. [15]

- 2) *Selección local.* - Cada individuo reside dentro de un ambiente particular llamado el barrio local, los Individuos sólo actúan recíprocamente con los individuos dentro de esta región. El barrio se define por la estructura en que la población es distribuida. Por lo tanto la selección es realizada dentro del barrio para formar una población de representantes.
- 3) *Selección truncada.* - Los cromosomas con aptitud superior permanecen truncados en la población y los descendientes de estos sustituyen a los menos aptos.
- 4) *Selección por torneo.* - Se organizan torneos entre los individuos donde gana el individuo con mas alto aptitud entre los participantes y éste se transmite directamente a la siguiente generación Ref. [16]
- 5) *Selección mediante la ruleta.* - A los individuos se les asigna una sección de área proporcional a la aptitud que poseen cada uno de los individuos Ref. [17]

Existen muchos métodos de selección entre los que más se utilizan es la selección mediante la ruleta por ser sencillo y practico, método que utilizaremos en este trabajo. , Y esquematizamos en la siguiente figura:

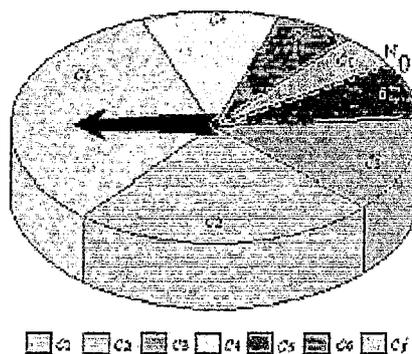


Fig. 4.13 La ruleta de Selección

El algoritmo de muestreo de la rueda de la ruleta se realiza de la siguiente manera:

- a) Cada individuo c_i se calcula la suma acumulada de los valores esperados (fenotipo) $e(c_k)$ para obtener los límites entre los distintos sectores asignando un área o un rango correspondiente.

$$q_i = \sum_{k=0}^i e(c_k) \quad (4.3)$$

- b) Se genera un número en forma aleatoria $r \in [0, N]$ (N suma total de los valores esperados)
- c) Si el valor generado está dentro del límite establecido el individuo correspondiente es seleccionado, es decir el algoritmo se repite en generar aleatoriamente r para comparar con los límites asignados a cada individuo con la posibilidad de que un individuo sea seleccionado varias veces.
- d) La otra alternativa es que Si el valor calculado $q_i \geq r$ el individuo c_i es seleccionado. De lo contrario, se transmite el individuo c_i con $q_{i-1} < r \leq q_i$, $i \geq 2$.
- e) El individuo que haga que esta suma exceda el límite es el seleccionado para transmitirse para la siguiente generación.

4.5.3 Operadores Genéticos

Los operadores genéticos proporcionan el mecanismo básico de búsqueda de los algoritmos genéticos. Los operadores genéticos son los que permiten mejorar a los individuos a través de la manipulación de genes que permite obtener nuevas soluciones el problema en cuestión. Básicamente se tiene de tres operadores: *precombinación*, *mutación* y *reinserción*.

4.5.3.1 Recombinación (Crossover)

El operador básico para producir los nuevos cromosomas en el GA es la recombinación. Como una analogía a la naturaleza, el crossover produce a nuevos individuos que tienen algunas partes del material genético de ambos padres. Entre las formas de recombinación de dos individuos se encuentran: cruzamiento de un solo punto, cruzamiento de dos puntos, cruzamiento multipunto. Ref. [18] La forma más simple de recombinación es eso de cruzamiento de un solo punto. Lo que se aplica en este trabajo, este tipo de cruzamiento se lleva a cabo seleccionando un punto en cada individuo y uniendo las partes separadas con el otro individuo para formar dos descendientes. Se esquematiza en la siguiente Fig.

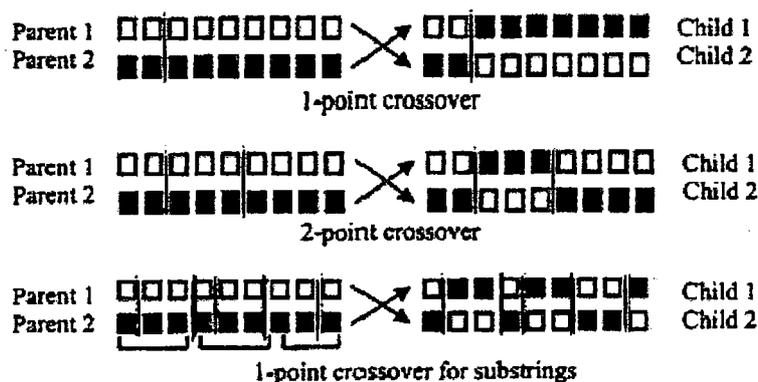


Fig. 4.14 Cruzamiento de un solo punto y multipuntos.

Cada individuo participa en el crossover con una probabilidad P_{Xover} .

4.5.3.2 Mutación (Mutation)

En la evolución natural, la mutación es un proceso probabilística dónde un componente de gen se reemplaza por otro para producir una nueva estructura genética. En el GA, la mutación es aplicada con una baja probabilidad, típicamente en el rango 0.001 y 0.01, y modifica los elementos de los cromosomas. Normalmente considerado como un operador del fondo, el papel de mutación se ve a menudo como

proporcionar una garantía que la probabilidad de investigar cualquier cadena dado nunca será cero y actuando con seguridad para recuperar material genético bueno que puede perderse a través de la acción de selección y crossover Ref. [11].

En la siguiente ilustración para un cromosoma de 10 bits que representa un valor real.

	mutation point		binary
Original string -	0 0	0 1 1 0 0 0 1 0	0.9659
Mutated string -	0 0	1 1 0 0 0 1 0	2.2146

4.5.3.3 *Reinserción(Reinsertion)*

Una vez producido una nueva población mediante la selección, cruzamiento y mutación de individuos de la población anterior, la aptitud de los individuos en la nueva población puede determinarse. Si existe menos individuos producto de las operaciones anteriores que el tamaño de la población original, entonces la diferencia entre los tamaños de la población se le denomina como el hueco de la generación Ref. [19]. Para mantener el tamaño original, los nuevos individuos tienen que ser reinsertados en la población anterior. Para esto debe usarse un esquema de reinserción, para determinar qué individuos serán reinsertados en la nueva población. La estrategia probabilística para realizar esta reinserción es tomando en cuenta a la supervivencia a través de las generaciones sucesivas lo que se muestra en forma esquemática.

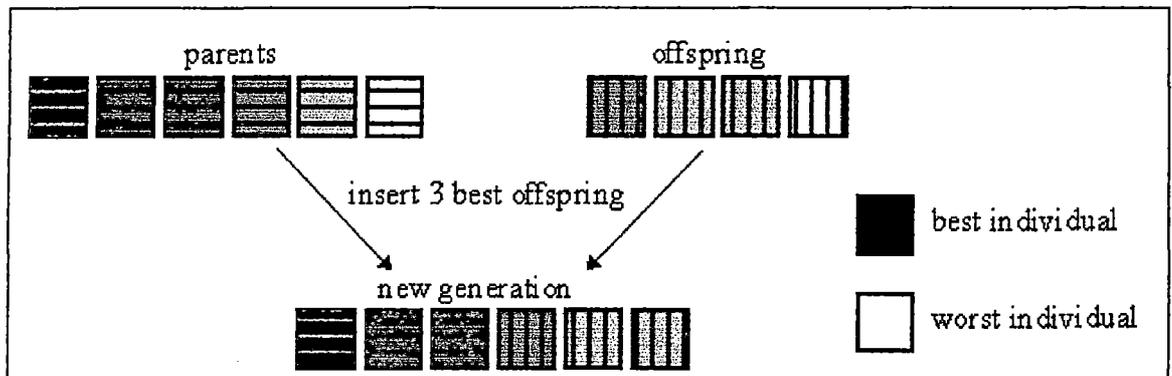


Fig. 4.15 Reinserción de los descendientes a la nueva generación.

4.5.4 Selección de los parámetros del algoritmo

Existen otros factores que afectan el desempeño del Algoritmo Genético de manera significativa los cuales son:

- i) El tamaño de la población seleccionada.
- ii) La probabilidad de cruzamiento.
- iii) La probabilidad de mutación.

Obviamente no existen reglas que se tengan que cumplir para una selección óptima de los valores de estos parámetros, los estudios desarrollados en esta área muestran conocimientos totalmente heurísticas.

i) El tamaño de la población seleccionada.

El tamaño de la población indica la cantidad de individuos que existen en la población. La probabilidad de realizar el cruzamiento exitoso depende del tamaño de la población: si se tiene muchos, el tiempo de convergencia será considerable, si se tiene poco los operadores no tendrán oportunidades de actuar y desarrollarse en su totalidad. En este sentido la selección del tamaño de la población se debe realizar con criterio para evitar una convergencia inadecuada.

ii) La probabilidad de cruzamiento P_{Xover} .

La probabilidad de cruzamiento en el GA es un parámetro que establece la frecuencia en que se realiza el cruzamiento entre los cromosomas, con el cruzamiento, los nuevos individuos contendrán información genética de sus padres.

Si P_{Xover} es muy pequeño, resultan pocos individuos cruzados y el programa requerirá de mayor tiempo de ejecución para encontrar las mejores soluciones.

Si P_{Xover} es muy grande casi todos los individuos se seleccionaran para dicha operación, lo que implica que por lo regular no se quedan en la población los nuevos individuos. Por lo tanto la selección no tendría mucho efecto práctico. El rango de valores típicos utilizados P_{Xover} se encuentran en [0.2 0.8].

iii) La probabilidad de mutación. P_{mut}

Es el parámetro que muestra la frecuencia de mutación de los cromosomas. La mutación se consideró inicialmente como un operador apoyado en la recombinación como sucede en la naturaleza y por ello en el pasado no se le dio la importancia que ahora tiene. En la actualidad, el GA no se pueden construir sin la mutación si se desea un rendimiento alto. En Ref. [20] se propone una regla para determinar el valor adecuado de la probabilidad P_{mut} . Este valor se obtiene aplicando la siguiente fórmula:

$$P_{mut} = 1/n \quad (4.4)$$

Donde n es la longitud de la representación.

En síntesis se ilustra mediante el diagrama de bloques en la siguiente Fig.

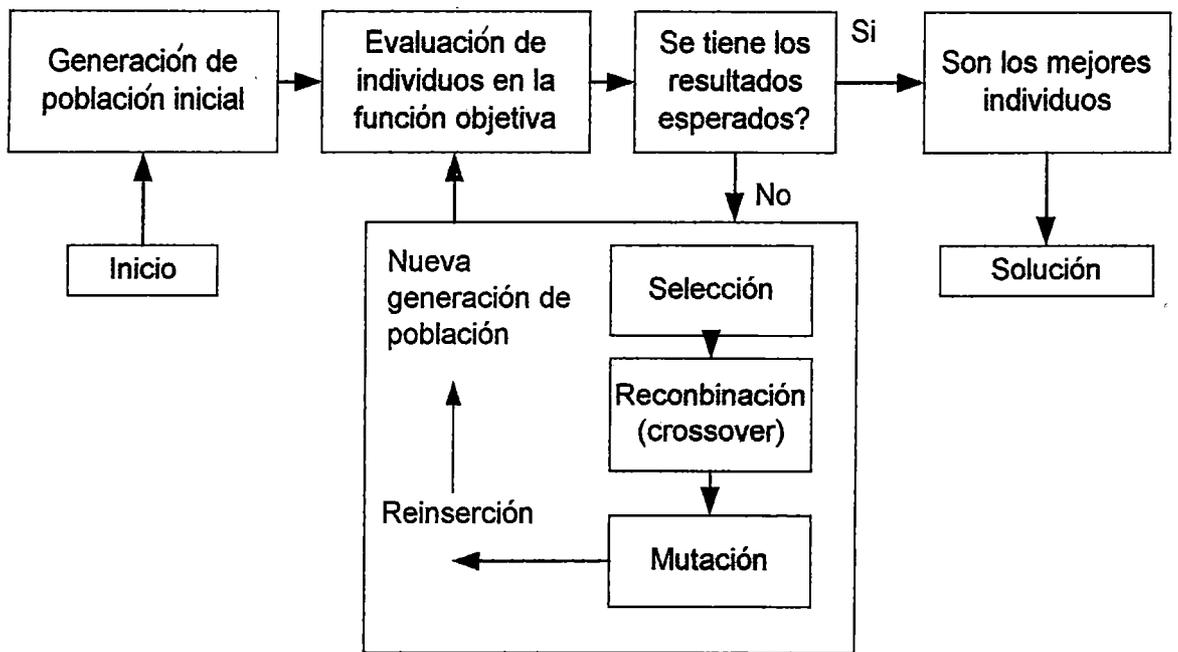


Fig. 4.16 Diagrama de flujo para el Algoritmo Genético

4.5.5 Terminación del GA

Porque el GA es un método de la búsqueda estocástico, es difícil de especificar formalmente el criterio de la convergencia. La aptitud de una población puede permanecer estática para varias generaciones antes de que se encuentre un individuo superior. Una práctica común es terminar el GA después de un número reespecificado de generaciones y luego probar la calidad de los miembros óptimos de la población en el problema. Si ninguna solución es aceptable, el GA puede reiniciarse.

4.5.6 Aplicación de Algoritmo Genético

En esta sección se ejemplifica la solución de una función con algoritmo genético de simple población, y otra función más robusta con la aplicación de algoritmo genético de multi-población.

- a) La función de prueba más simple está dada por la función 1 continuo, convexo y unimodal. Esta función es implementada en MatLab en el archivo objfun1.m. que se describe así:

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad \text{en} \quad -5.12 \leq x_i \leq 5.12$$

mínimo global $x_i = 0$ entonces $f(x) = 0$

parámetros de implementación.- se describe en el capítulo 6

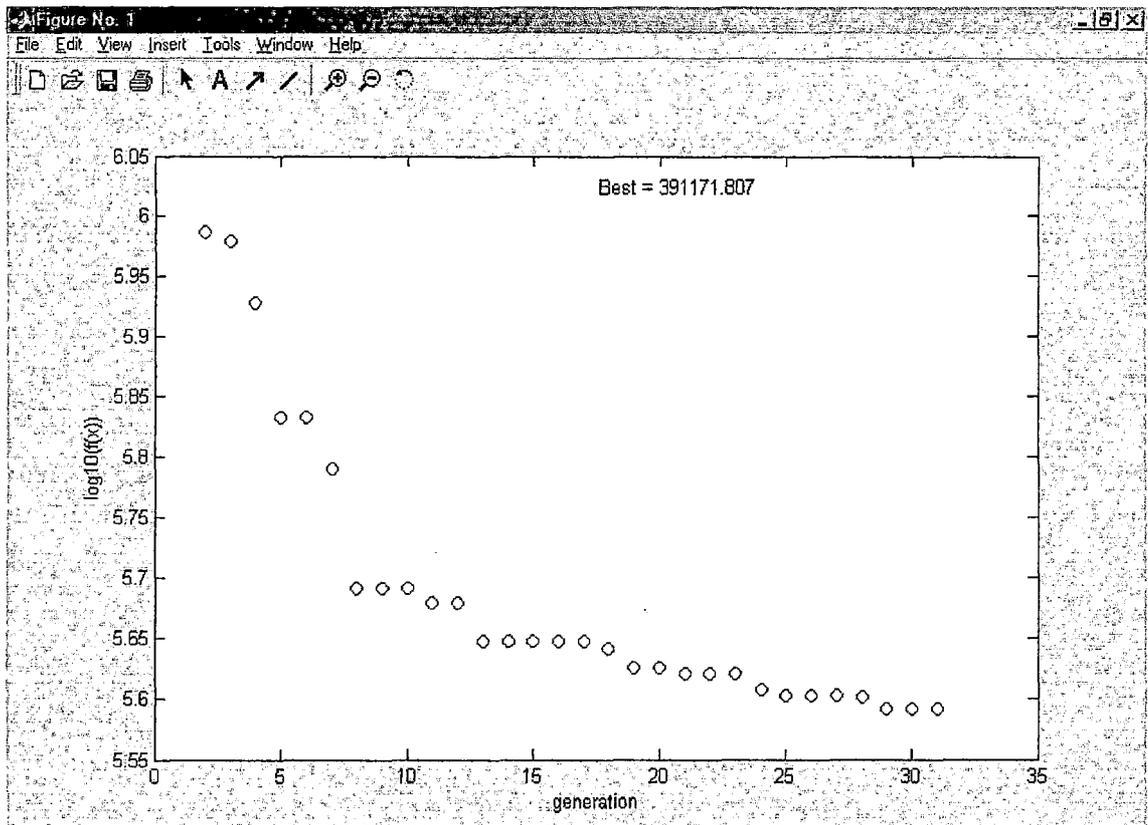


Fig. 4.17 Convergencia del algoritmo mostrando el mejor fenotipo ($f(x)$) por genotipo (x)

b) La función de un sistema robusto esta dado por la función 2 descrito de la siguiente forma:

$$x(k+1) = ax(k) - u(k) \quad k= 1, 2, \dots, N. \quad \text{Tal que} \quad x(0) = x(N)$$

la función objetiva para la minimización por consiguiente es definida:

$$f(u) = -\sum_{k=1}^N \sqrt{u(k)}$$

Una función exacta podría hallarse analíticamente como:

Ref. [21]

$$\text{Minimo} = -\sqrt{\frac{x(0)(a^N - 1)^2}{a^{N-1}(a-1)}}$$

La función ha sido desarrollada en MatLab como el archivo m-file objharv.m

parámetros de implementación.- se describe en el capítulo 6

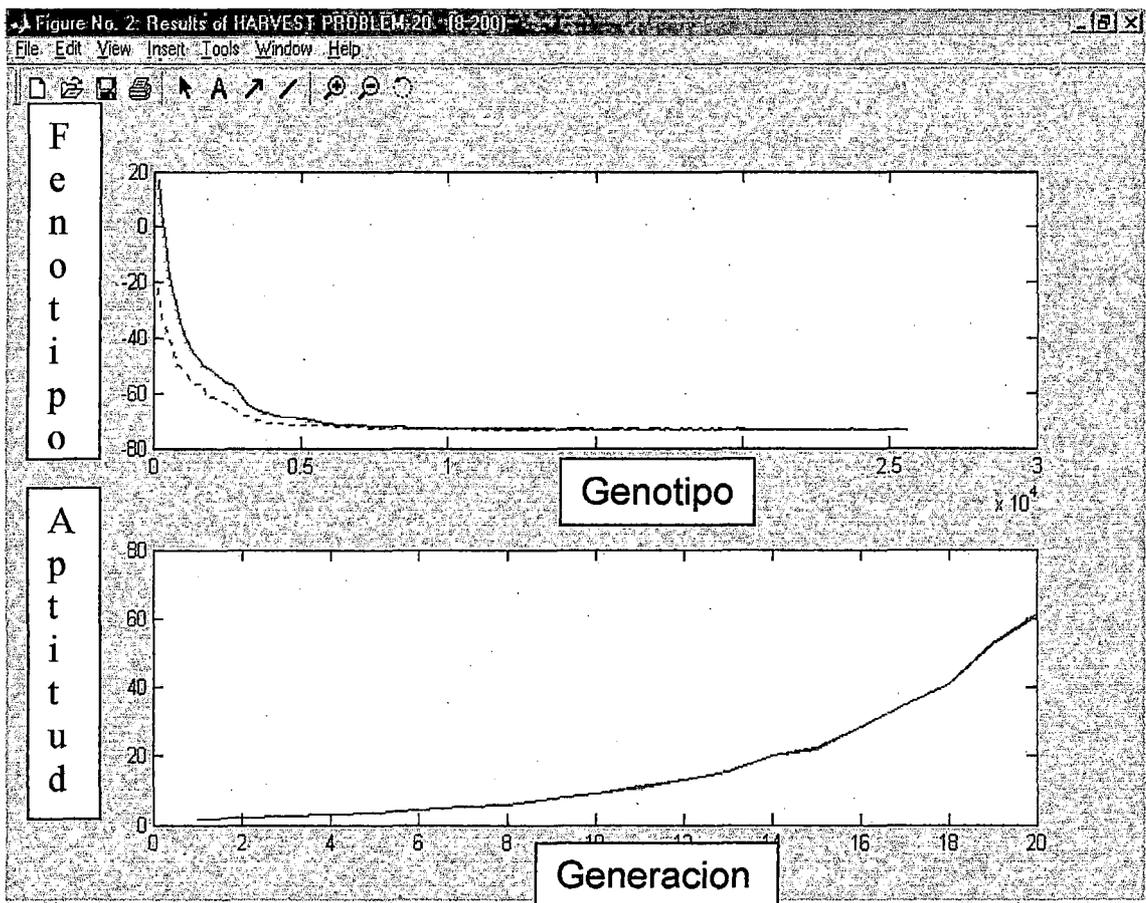


Fig. 4.18 Convergencia del GA multi-población

4.5.7 GA versus Métodos Tradicionales

4.5.7.1 *Ventajas*

En las secciones anteriores se ha desarrollado las diferentes técnicas de optimización de cualquier proceso. Podemos ver que el GA difiere sustancialmente de la búsqueda más tradicional y métodos de optimización desarrollados. Las diferencias más significantes son:

- El GA usa una población de puntos en paralelo, no un solo punto. Lo que significa que pueden identificar múltiples soluciones óptimas, haciéndolo menos sensible a quedar atrapado en mínimos/máximos locales.
- El GA no requieren información derivativa u otro conocimiento auxiliar; sólo la función objetiva y la aptitud correspondiente, nivela la influencia de las direcciones de búsqueda.
- El GA usa operadores probabilísticas, mientras que las técnicas tradicionales utilizan los operadores determinísticos.
- El GA trabaja en todos los espacios de búsqueda, incluyendo espacios multipoblacionales y multiobjetivas.

Es importante recalcar que el GA proporciona varios soluciones potenciales a un problema dado y la opción de último solución se deja al usuario.

4.5.7.2 *Desventajas*

- Pueden tardar mucho en converger, o no converger en absoluto, dependiendo de los parámetros del algoritmo que se utilicen -tamaño de la población, número de generaciones, las probabilidades, etc.
- Pueden converger prematuramente debido a una serie de problemas de diversa índole. Por ejemplo con una probabilidad de crossover y mutación muy pequeña.

4.6 **Metodología propuesta para selección de parámetros del PSS**

La parte central del trabajo es esta sección, en donde se describe la metodología propuesta para solucionar el problema de coordinar la operación de estabilizadores. En el capítulo 1 se ha descrito las diferentes técnicas de sintonización utilizadas en estudios o proyectos de estabilidad de pequeña señal o para implementar las señales estabilizantes FDS y/o PSSs. Las ecuaciones dinámicas del sistema de potencia son ecuaciones complejas no lineales. No obstante, se pueden encontrar soluciones útiles tal como se muestra en el Capítulo 2 y 3, por lo tanto, la solución propuesta se inicia con la evaluación y manipulación de la ecuación linealizada (ecuación de estado del sistema compuesta por generadores con sus respectivos controles y sistemas de excitación, líneas de interconexión, cargas estáticas) descrita por la ecuación 3.11 del capítulo 3, además se supone un sistema analizado en forma global (factores de participación, índices de controlabilidad y observabilidad) entonces se conocen los puntos en donde deben ser instalados los FDS y los PSS. , Para nuestro caso las tres centrales en cuestión cuentan con los PSS representados con modelo general del PSS. El procedimiento se describe a continuación.

4.6.1 Sensitividad de primer y segundo orden de Eigenvalor

En estudios dinámicos de sistemas de potencia y el diseño de controles el análisis de sensitividades es una herramienta muy importante. En estudios realizados sobre el comportamiento de la sensitividad de los eigenvalores de la matriz de estado han demostrado que las trayectorias de los eigenvalores son no-lineales Ref. [22]. Por otro lado, usualmente el análisis se realiza con sensitividad de eigenvalores de primer orden llevando a resultados imprecisos, por lo que es necesario realizar cálculos de orden mayor.

Para lograr plantear una función objetiva que garantice la obtención de los parámetros robustos de los PSSs. En este trabajo se desarrolla el cálculo de sensibilidad de eigenvalor de segundo orden como una ampliación de lo ya expuesto en El Capítulo 3, partimos de la expresión que representa un sistema de potencia: La ecuación (3.11) en forma compacta y acondicionada resulta.

$$\begin{bmatrix} \Delta x' \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_G & B_G \\ -C_G & Y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U \\ 0 \end{bmatrix} \Delta u \quad (4.5)$$

$$\Delta \tilde{x}' = \tilde{A} \Delta \tilde{x} + \tilde{U} \Delta \tilde{u} \quad (4.6)$$

Y la matriz de estado del sistema se define como:

$$A = A_G + B_G Y^{-1} C_G \quad (4.7)$$

donde

x : Es el vector de estado.

v : Es el vector de los voltajes de nodos de la red.

u : Es el vector de las variables de entradas de control.

Δ : Indica los valores perturbados.

\tilde{A} : Es la matriz de estado del sistema aumentado.

De la ecuación (2.13) del Capítulo 2 se introduce la matriz I , identidad resulta: $A \Phi_i = \lambda_i I \Phi_i$ donde Φ_i es el eigenvector derecho.

De la ecuación (2.14) del Capítulo 2 se introduce la matriz I , identidad

$$\text{resulta: } A^T \Psi_i = \lambda_i I \Psi_i \quad (4.8)$$

Donde Ψ_i es el eigenvector izquierdo

Se puede calcular la sensibilidad de eigenvalor de la matriz reducida y aumentada lo que en este caso nos interesa es la matriz aumentada.

4.6.1.1 Sensitividad de eigenvalor de matriz aumentada.

4.6.1.1.1 Sensitividad de eigenvalor de primer orden.

Ampliando lo descrito en el capítulo 2 procedemos así. Suponemos que la matriz aumentada es representada como:

$\tilde{A} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ -A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}$ De donde el A descrito en (4.7) resulta:

$A = A_{11} + A_{12}A_{22}^{-1}A_{21}$ con sus respectivos Φ_i y Ψ_i eigenvectores, y la matriz aumentada \tilde{A} con sus respectivas $\tilde{\Phi}_i$ y $\tilde{\Psi}_i$ eigenvectores, entonces la sensibilidad de eigenvalor de primer orden para un cambio del parámetro K en el sistema es:

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial K} = \tilde{\Psi}_i^T \frac{\partial \tilde{A}}{\partial K} \tilde{\Phi}_i \quad (4.9)$$

4.6.1.1.2 *Sensitividad de eigenvector de primer orden.*

De la ecuación (4.8) tenemos: $(\tilde{A} - \lambda_i I) \tilde{\Phi}_i = 0$ $(\tilde{A}^T - \lambda_i I) \tilde{\Psi}_i = 0$, la sensibilidad de eigenvector de primer orden para un cambio del parámetro K en el sistema es:

$$(\tilde{A} - \lambda_i I) \frac{\partial \tilde{\Phi}_i}{\partial K} = \left(\frac{\partial \tilde{A}}{\partial K} - \frac{\partial \lambda_i}{\partial K} I \right) \tilde{\Phi}_i \quad (4.10),$$

$$(\tilde{A}^T - \lambda_i I) \frac{\partial \tilde{\Psi}_i}{\partial K} = - \left(\frac{\partial \tilde{A}^T}{\partial K} - \frac{\partial \lambda_i}{\partial K} I \right) \tilde{\Psi}_i \quad (4.11)$$

sumando (4.10) y (4.11) y de las condiciones de ortogonalidad:

$$\tilde{\Psi}_i^T I \frac{\partial \tilde{\Phi}_i}{\partial K} = 0 \quad (4.12) \quad \text{y} \quad \tilde{\Phi}_i^T I \frac{\partial \tilde{\Psi}_i}{\partial K} = 0 \quad (4.13)$$

Para obtener una solución singular para la sensibilidad del eigenvector derecho, resolver (4.10) y (4.12) simultáneamente, en forma similar para la sensibilidad del eigenvector izquierdo de las ecuaciones (4.11) y (4.13).

4.6.1.1.3 *Sensitividad de eigenvalor de segundo orden.*

Diferenciando la ecuación (4.9) con respecto al parámetro K resulta:

$$\frac{\partial^2 \lambda_i}{\partial K^2} = \frac{\partial \tilde{\Psi}_i^T}{\partial K} \frac{\partial \tilde{A}}{\partial K} \tilde{\Phi}_i + \tilde{\Psi}_i^T \frac{\partial^2 \tilde{A}}{\partial K^2} \tilde{\Phi}_i + \tilde{\Psi}_i^T \frac{\partial \tilde{A}}{\partial K} \frac{\partial \tilde{\Phi}_i}{\partial K} \quad (4.14)$$

utilizando las ecuaciones (4.10), (4.11), (4.12) y (4.13) resulta:

$$\frac{\partial^2 \lambda_i}{\partial K^2} = \Psi_i^T \frac{\partial^2 \tilde{A}}{\partial K^2} \Phi_i + 2\Psi_i^T \frac{\partial \tilde{A}}{\partial K} \frac{\partial \Phi_i}{\partial K} \quad (4.15)$$

Así la sensibilidad de segundo orden del eigenvalor puede ser calculada de la sensibilidad de primer orden de los eigenvectores.

De acuerdo a los resultados obtenidos, necesitamos introducir la teoría del eigenvalor de la matriz aumentada perturbado para calcular el valor de $\frac{\partial \tilde{A}}{\partial K}$ que nos permita obtener las ecuaciones simplificadas.

4.6.1.2 *Sensitividad de eigenvalor de matriz aumentada perturbada.*

Supongamos que la matriz \tilde{A} es perturbada por \tilde{E} por lo tanto el eigenvalor y el eigenvector de la matriz $\tilde{A} + \tilde{E}$ son: $\lambda_i + \Delta\lambda_i$ y $\Phi_i + \Delta\Phi_i$, respectivamente, entonces se tiene:

$$(\tilde{A} + \tilde{E})(\Phi_i + \Delta\Phi_i) = (\lambda_i + \Delta\lambda_i)(\Phi_i + \Delta\Phi_i) \quad (4.16)$$

La perturbación del eigenvalor puede ser representada por una serie de Taylor Ref. [23] y [24] Como:

$$\Delta\lambda_i = \Delta\lambda^{(1)} + \Delta\lambda^{(2)} = s_i^{(1)} \varepsilon + s_i^{(2)} \varepsilon^2 \quad (4.17)$$

Las perturbaciones de primer orden del eigenvalor y eigenvector están dadas en (4.9) y (4.13):

$$s_i^{(1)} = \Psi_i^T \tilde{E} \Phi_i \quad (4.18)$$

$$\Delta\Phi_i = \varepsilon \sum_{k=1, k \neq i}^n \frac{(\Psi_k^T \tilde{E} \Phi_i)_{ki} \Phi_k}{(\lambda_i - \lambda_k)} \quad (4.19)$$

premultiplicando Ψ_i^T con la ecuación (4.16) resulta:

$$(\lambda_i + s_i^{(1)} \varepsilon + s_i^{(2)} \varepsilon^2)(\Psi_i^T \Phi_i + \Psi_i^T \Delta\Phi_i) = \Psi_i^T A \Phi_i + \varepsilon \Psi_i^T \tilde{E} \Phi_i + \Psi_i^T A \Delta\Phi_i + \varepsilon \Psi_i^T \tilde{E} \Delta\Phi_i \quad (4.20)$$

relacionando los eigenvalores y sus eigenvectores en (4.20) tenemos la siguiente relación:

$$s_i^{(1)} \varepsilon + s_i^{(2)} \varepsilon^2 = \varepsilon \Psi_i^T I \Phi_i + \varepsilon^2 \Psi_i^T I \Delta \Phi_i \quad (4.21)$$

Finalmente de aquí se puede definir la perturbación del eigenvalor de primer y segundo orden en forma simplificada y en función de la perturbación como:

$$\Delta \lambda^{(1)} = \Psi_i^T E \Phi_i \quad (4.22)$$

$$\Delta \lambda^{(2)} = \Psi_i^T E \Delta \Phi_i \quad (4.23)$$

el vector $\Delta \Phi_i$ se calcula resolviendo en forma simultanea las ecuaciones

$$(\tilde{A} - \lambda_i I) \Delta \Phi_i = (\Delta \lambda^{(1)} I - E) \Phi_i \quad (4.24)$$

$$\Psi_i^T I \Delta \Phi_i = 0 \quad (4.25)$$

y la perturbación se define como:

$$\tilde{E} = \tilde{A}^p - \tilde{A} \quad (4.26)$$

4.6.2 Función Objetiva

Para calcular los parámetros óptimos de los PSSs y los FDSs que mejoren el amortiguamiento de las oscilaciones electromecánicas del sistema de potencia se propone una función objetiva que es resuelta con GA:

$$\min \sum_{k=1}^k \sum_{j \in Z} \text{Re}\{\Delta \lambda_{j_k}\} \quad (4.27)$$

donde la perturbación de los eigenvalores se representa por la suma de las perturbaciones de primer y segundo orden:

$$\Delta \lambda_{j_k} = \Delta \lambda_{j_k}^{(1)} + \Delta \lambda_{j_k}^{(2)} \quad \text{donde } k = \text{conjunto de condiciones de operación, y}$$

Z = todos los eigenvalores λ_{j_k} en estudio en la k -ésima condición de operación.

Esto quiere decir minimizar la parte real de las sensibilidades del eigenvalor de ciertos modos de interés, trabajar con los eigenvalores dominantes y sus respectivos eigenvectores, de lo contrario se tendría un cálculo tedioso para un sistema grande.

4.6.3 Sintonización de PSSs y FDSs

La interacción entre estabilizadores pueden incrementar o disminuir el amortiguamiento de ciertos modos de oscilación del rotor. Para tener un desempeño adecuado de estos dispositivos es necesario realizar una coordinación adecuada y simultanea basado en una función objetiva descrito en la ecuación (27) que sirve para obtener los mejores parámetros de los estabilizadores capaces de enfrentar los eventos más extremos expuestos un SEP. Para llevar acabo la coordinación correspondiente, los PSSs en este caso, se modelan con la función de transferencia de la figura 2.5 del capítulo 2. así:

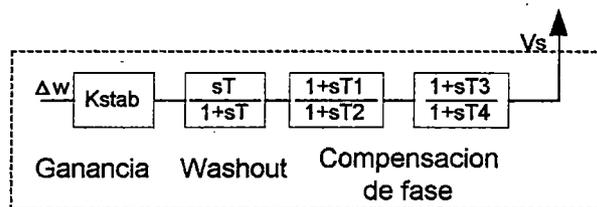


Fig. 4.19 Diagrama de bloques de un PSS con dos bloques de atraso y adelanto

$$\frac{V_s(S)}{U_s(S)} = \frac{sK_{stab} \cdot T}{1+sT} \frac{1+sT1}{1+sT2} \frac{1+sT3}{1+sT4} \quad (4.28)$$

Cada uno de los bloques ha sido descritos en el capítulo 2; para simplificar el procedimiento se considera $T1=T3$ y $T2 = T4$, T_p se selecciona en el rango de [7.5 - 15 s], con el criterio de asegurar un cambio de fase despreciable y que la ganancia contribuya al bloque de washout en el

intervalo de frecuencia de oscilación de interés. T2 se selecciona en el rango de [0.020 - 0.10 s], con el criterio de una consideración física. Por lo tanto solo se estimará T1 y Kstab. Para cada PSS, la matriz de perturbación \tilde{E} de la ecuación (4.26) se estima modificando los parámetros de los estabilizadores a partir de un conjunto de parámetros típicos basados en la experiencia.

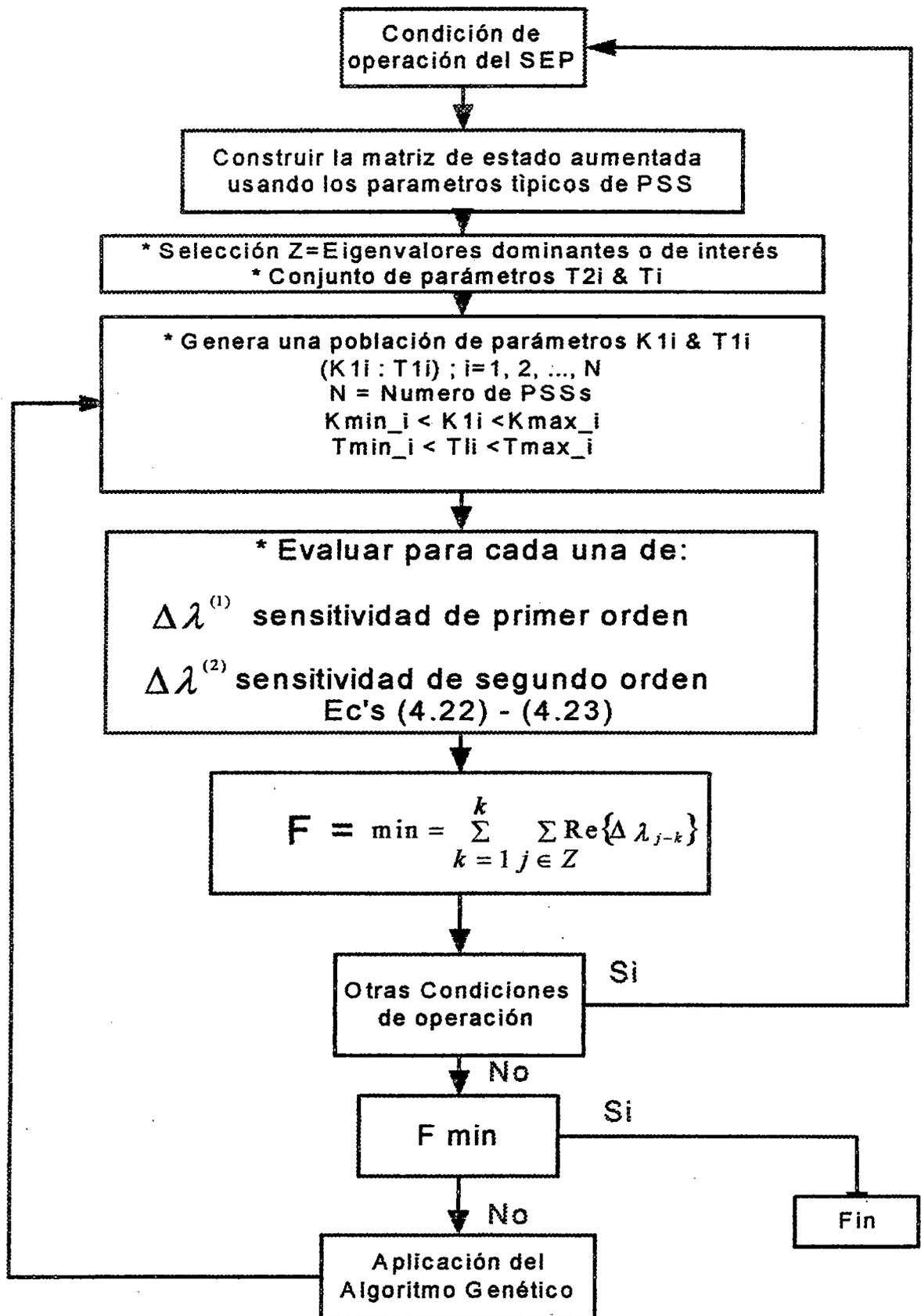


Fig. 4.20 Diagrama de Flujo del Método

4.7 Resumen

En este capítulo se resume algunos conceptos básicos y técnicas para optimizar problemas complejos con métodos Heurísticas desarrollados con algoritmos evolutivos basados en Redes Neuronales Artificiales, lógica Difusa y los Algoritmos genéticos. Estos últimos son descritos en forma detallada así como los operadores genéticos, ventajas y desventajas con respecto a métodos tradicionales.

En este trabajo la metodología desarrollada se basa en un algoritmo Genético como una técnica robusta para sintonizar estabilizadores de potencia, optimizando una función objetiva descrita por la ecuación 4.27 el cual se basa en un eigenanálisis de sensibilidad para un sistema de potencia representada por una ecuación de estado, descrito en la ecuación 4.5 debidamente sustentada en el capítulo 1 y 2; Además, para ampliar la teoría desarrollada en el capítulo 2, se realizan la representación de perturbaciones de primer y segundo orden de eigenvalores para una matriz de estado perturbada especificados en las ecuaciones 4.22 y 4.23 que dependen de sus respectivos Eigenvectores izquierdo y derecho, involucrados en la función objetiva para garantizar un resultado óptimo que se traduce en parámetros robustos de PSS que sean capaces de amortiguar los diferentes modos de oscilación electromecánica de las máquinas en un gran sistema con interconexiones de gran longitud.

4.8 Referencias

- [1] Eric I. Carroll, "*ABB Semiconductors*". AG - CH-5600 Lenzburg, Suiza, Revista 2/1999.
- [2] Arnim Herbig, "*On Load Flow Control in Electric power systems*". Doctoral Dissertation, Royal Institute of Technology Department of Electric Power Engineering Electric Power Systems, KTH Högskolestryckeriet, Stockholm 2000.
- [3] John H. Mathews, Kurtis D. Fink, "*Métodos Numéricos con MatLab*", Tercera Edición, Printice Hall, Madrid, 2 000.
- [4] D. E. Goldberg, "*Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*". Addison - Wesley, 1989.
- [5] M. Gen and R. Cheng, "*Genetic Algorithms & Engineering Design*". John Wiley & Sons, Inc. 1997.

- [6] C. C. Moore, C. J. Harris and M. Brown, "*Intelligent Control-Aspect of Fuzzy Logic and Neural Nets*". volume 6 of World Scientific Series in Robotics and Automated Systems, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Sinapore - New Jersey - London - Hong Kong, 1993.
- [7] Behnam, Bavarian. "*Neural Networks*", Electrical Engineering, Handbook, Editor-in-Chief, Richard C. Dorf, Pp. 420-429, 1993.
- [8] MatWorks, "*Fuzzy Logic Toolbox*". MatLab version 6.5 – 2003
- [9] Duarte, Oscar G., "*Sistemas de lógica Difusa. Fundamentos*". En Ingeniería e Investigación, por Apareer. 1997.
- [10] Klir, George & Yuan, Bo., "*Fuzzy Sete and Fuzzy Logic*" Prentice Hall, New Jersey, 1995
- [11] D. E. Goldberg, "*Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*". Addison Wesley Publishing Company, January 1989.
- [12] C. L. Karr, "*Design of an Adaptive Fuzzy Logic Controller Using a Genetic Algorithm*". Proc. ICGA 4, Pp. 450-457, 1991.
- [13] Michalewicz Z., "*Genetic Algorithms + Data Structures = Genetic Programs*". Third Edition, Springer Verlag, 1996.
- [14] Christopher R. Houck, Jeffery, A. Joines and Michael G. Kay, "A Genetic Algorithm for Function Optimization". A Matlab Implementation Report. North Carolina State University, Pp. 1-14.
- [15] Bäck T. and Hoffmeister F., "*Extended Selection Mechanisms in Genetic Algorithms*". Pp. 92-99, 1991.
- [16] Blickle T. and Thiele L., "A Comparison of Selection Schemes used in Genetic Algorithms". TIK Report Nr. 11, December 1995. www.tik.ee.ethz.ch/Publications/TIK-Reports/TIK-Report11abstract.html, 1995.

- [17] Baker, J. E., "*Reducing Bias and Inefficiency in the Selection Algorithm*". in, Pp. 14-21, 1987.
- [18] Mühlenbein, H., "*The Breeder Genetic Algorithm*". A Provable Optimal Search Algorithm and its Application. Colloquium on Applications of Genetic Algorithms, IEE 94/067, London, 1994.
- [19] K. A. De Jong and J. Sarma, "Generation Gaps Revisited". In *Foundations of Genetic Algorithms 2*, L. D. Whitley (Ed.), Morgan Kaufmann Publishers, 1993.
- [20] Back, T., "*Evolutionary Algorithms in Theory and Practice*". Oxford University Press, 1995.
- [21] Mühlenbein, H., Schomisch, M. and Born, J., "*The parallel genetic algorithm as function optimizer*". *Parallel Computing*, 17, pp.619-632, 1991
- [22] I.A. Hiskens, M.A. Pai., "*Sensitivity Analysis of Power System Trajectories: Recent Results*". Department of Electrical and Computer Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign 1406 West Green Street Urbana IL 61801.
- [23] H. K. Nam, Y. K. Kim, K. S. Shim, and K. Y. Lee, "*A New Eigen-Sensitivity Theory of Augmented Matrix and its Application to Power System Stability Analysis*". *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol. 15, No. 1, Pp. 363-369, Feb. 2000.
- [24] John E. Condren and Thomas W. Gedra, "*Eigenvalue and Eigenvector Sensitivities Applied to Power System Steady-State Operating Point*". School of Electrical and Computer Engineering Oklahoma State University, Stillwater, OK 74078 Pp. 2002

CAPÍTULO 5

APLICACIONES

5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan resultados de la aplicación del algoritmo genético en la sintonización de PSSs basados en la función objetivo planteado en el Capítulo 4, así mismo en la teoría básica del GA. Y el eigenanálisis de la ecuación de estado desarrollados en los Capítulos 2 y 3. El objetivo es amortiguar las oscilaciones de potencia e incrementar la región de estabilidad dinámica del sistema eléctrico, para esto se desarrolla dos aplicaciones: máquina (C.T. Aguaytia)-barra infinita y un Sistema de 5 máquinas; Tres de ellas con PSS y los otros dos solo con sistema de excitación y sus respectivos reguladores, además tres fuentes ideales como equivalentes en las barras de Paragcha 220kV, 138kV y Paramonga N 220 kV que representan al sistema centro, y en forma simplificada, con un total de 24 barras, que en suma representan el sistema centro norte del sistema eléctrico nacional Peruano.

En la primera aplicación se presentan simulaciones en el tiempo, a manera de ilustración del efecto de los sistemas de regulación (AVR) y los PSS, y el comportamiento de la máquina frente a pequeñas y grandes perturbaciones con los parámetros existentes y los parámetros encontrados mediante el GA.

En la segunda aplicación se desarrolla una evaluación de los parámetros existentes, sometiendo a 3 casos o estados de operación real, cuyos modos dominantes detectados se suprimen en forma exitosa con los nuevos parámetros encontrados aplicando el GA.

5.2 Aplicación 1: Máquina de Aguaytia-Barra Infinita (S.E. T. Maria).

5.2.1 Datos para el modelo.

Se considera los siguientes parámetros:

a. - Máquina: de Ref. [1], [2] y [3]

2 Grupos de 119.2 MVA, 13.8 kV, IN 4987 A, 2 POLOS, 3600 rpm

Generador	Ra	XL	Xd	Xq	X'd	X'q	X''d	X''q	T'do	T'qo	T''do	T''qo	H(s)
Aguaytia	0.003	0.117	2.273	2.130	0.284	0.48	0.185	0.240	6.990	0.89	0.020	0.040	4.84

Tabla 5.1 *Parámetros de la máquina de Aguaytia*

De H (Cte. de inercia), se obtiene J (kg-m²):

$$H = 5.48 \times 10^{-9} \frac{J(RPM)^2}{MVAnominal}, \quad J = 8123 \text{ kg-m}^2 \quad (5.1)$$

b. - Transformador elevador:

C ATP DATA
 C RATED POWER 100.00 MVA
 C PRIMARY VOLTAGE 220.00 KV
 C SECONDARY VOLTAGE 13.80 KV
 C FREQUENCY 60.00 HZ
 C NO LOAD LOSSES 50.30 KW
 C SHORT CIRCUIT LOSSES 125.00 KW
 C SHORT CIRCUIT IMPEDANCE 12.50 %
 C CONNECTION YNd1

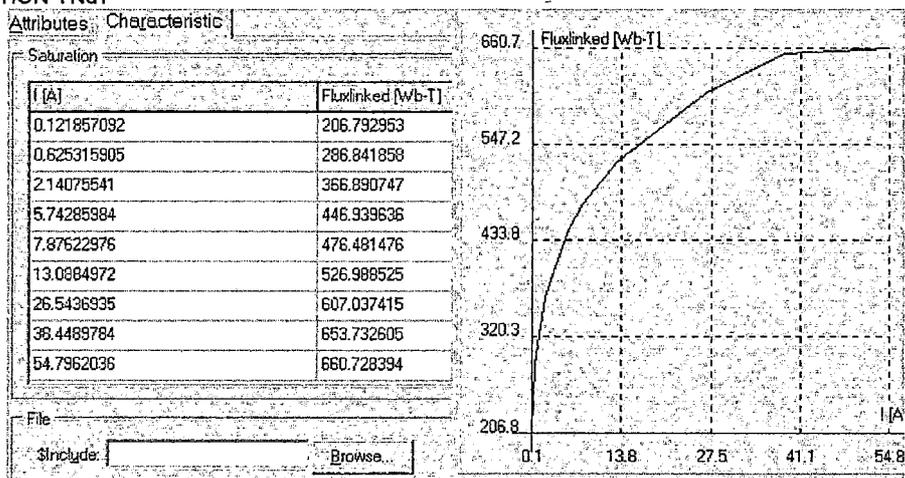


Fig. 5.1 *Curva de Magnetización del transformador / grupo de Aguaytia.*

c. - Modelo de la Línea 251:

Longitud: 73.29 Km
 Radio interno: 0.4648cm.
 Radio externo: 1.584cm.

Radio interno: 0.4648cm.
 Radio externo: 1.584cm.
 Sección Acero: 214.34
 Resistencia D.C. a 20 °C: 0.059 ohm/Km.
 Resistividad del terreno: 1200 ohm*m.

Parámetros calculados:

Para una frecuencia de 60 Hz, voltaje 220 kV

R0 [ohm]	X0 [ohm]	Rp [ohm]	Xp [ohm]	Q0 [MVA]	Qp [MVA]
17.14	133.6	4.685	36.41	7.969	11.89

Tabla 5.2 Parámetros de Línea secuencia positiva y cero.

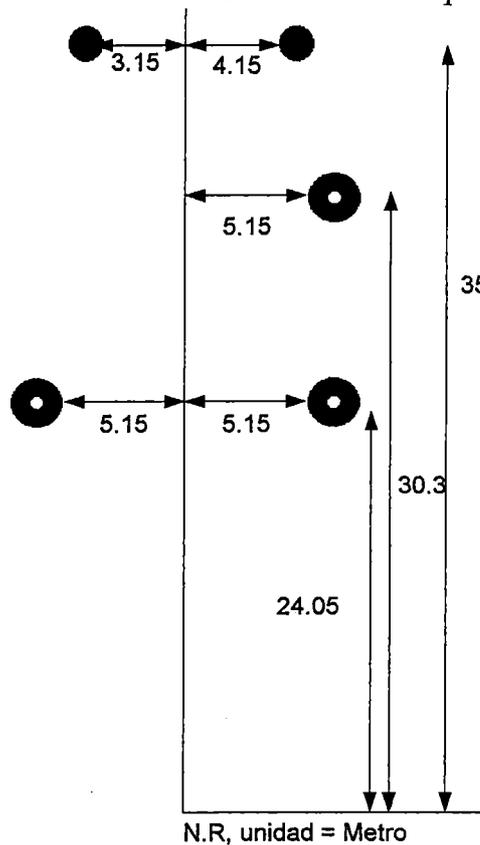


Fig. 5.2 Disposición geométrica de los conductores.

d. - Barra Infinita: de [3]

S.E. T MARIA 220kV, (Total: Pcc3φ/1φ = 980.37 /877.548) - Estiaje-Mínima 2003

NºFASES	MVA/100	X/R	NOMBRE	KV	SEC: 0(ohm+jmH)	SEC: POS(ohm+jmH)
3	4.4999	1.6219	TINGMARI	220	28.064+j110.970	20.722+j88.9933
1	4.1196	1.5672	TINGMARI	220		

Tabla 5.3 Datos para el sistema equivalente en la S.E. T. Maria

e. - Modelo del sistema Excitatriz con AVR

Parámetros: De [2] y [3]

Parámetros del Sistema Excitatriz

VGEN	VREF	TR	KA	TA	TE	VMAX	VMIN	KF	TF
13800 V	1	0.023	105	0.003	0.3	8.33	-6.66	0.029	2.6

Tabla 5.4 Parámetros del Sistema Excitatriz con AVR

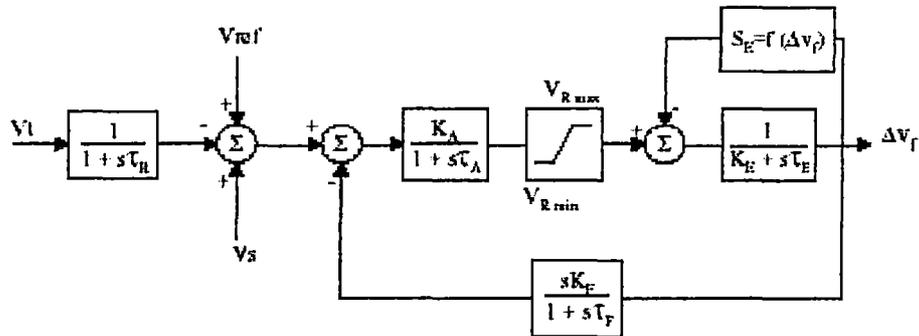


Fig. 5.3 Modelo del Sistema de excitación con control básico.

f. - Modelo del PSS: de Ref. [2]

PSS Canal Potencia						PSS Canal Frecuencia					
KP	TP	T1	T2	T3	T4	KW	TW	T1	T2	T3	T4
20	1.5	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	1.5	0	0.03	0.00	0.00

Tabla 5.5 parámetros del PSS con dos canales

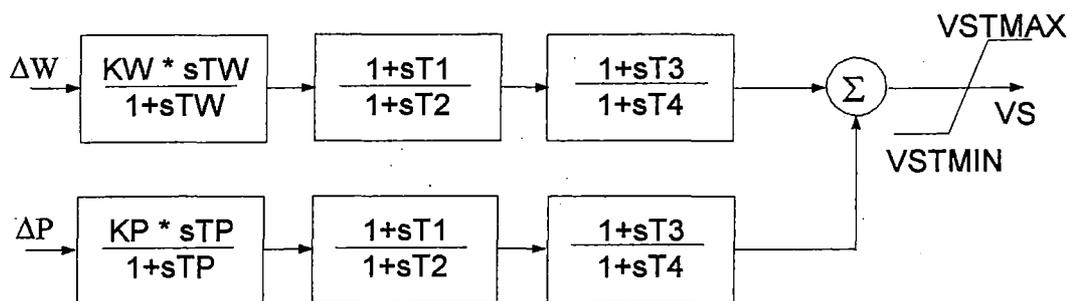


Fig. 5.4 Modelo del PSS de dos canales.

5.2.2 Representación del modelo en ATP-Draw.

El esquema de la planta es representado por una máquina equivalente conectada a una barra infinita en la S.E. Tingo Maria. Mediante la Línea 251 de 73.29 Km.

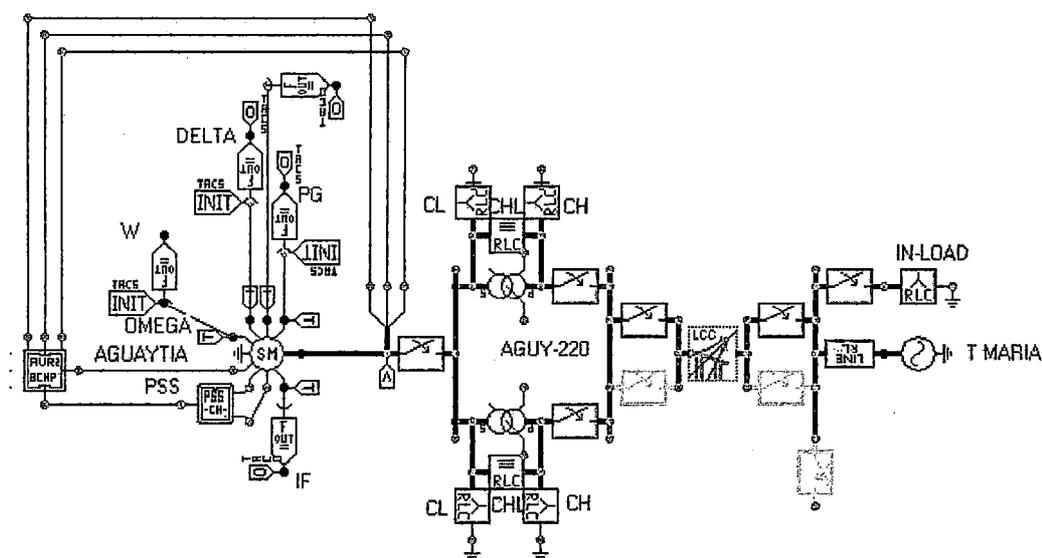


Fig. 5.5 Sistema C.T. Aguaytia- Barra Infinita.

5.2.3 Condiciones de Operación

Caso Base: En Estiaje - Mínima 2003 el grupo de la central despacha en promedio 153.08 MW y 2.84 MVAR.

Condición operativa 1

Caso 1:

Recierre en la barra T Maria, apertura a los 0.001s y recierre a los 0.21s (12 ciclos), operando la máquina en vacío por 0.199segundos.

Caso 2:

Falla trifásica en la barra T Maria

Caso 3:

Se incrementa el voltaje en terminales en 10%, la reactancia de la Línea incrementa en 52.3% y la resistencia en 49.2%

Caso 4:

Se disminuye la magnitud de potencia entregada en 10%, la reactancia de la Línea disminuye en 47.7% y la resistencia disminuye en 50%.



5.2.4 Resultado de simulaciones para los casos 1, 2, 3 y 4.

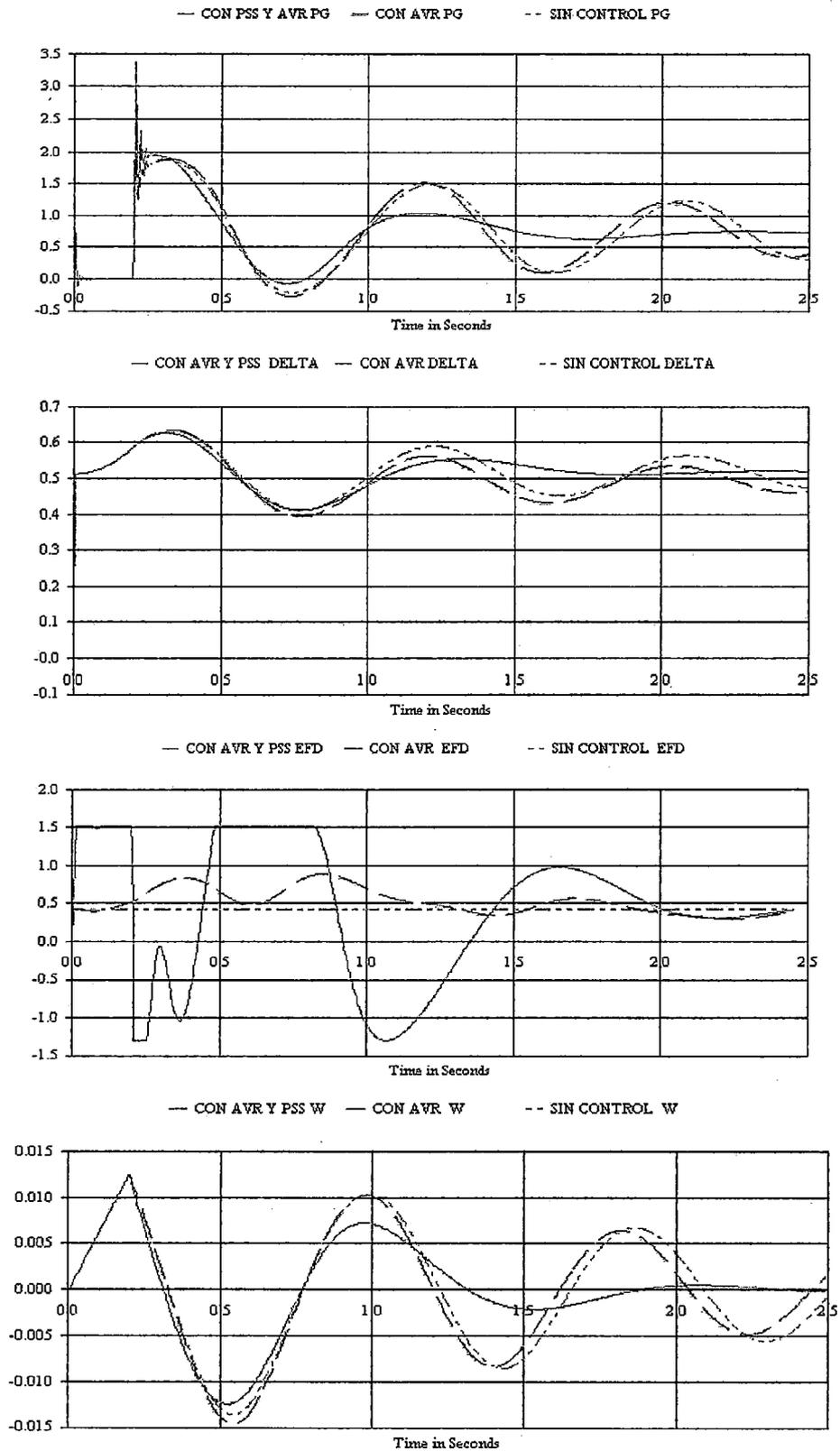


Fig. 5.6 Caso 1. En pu: Potencia eléctrica, Ángulo de par(Grad. Electr.) Efd., Desviación angular.

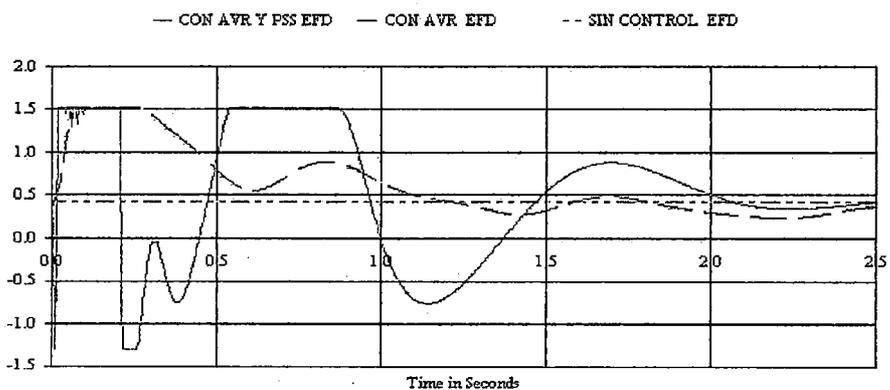
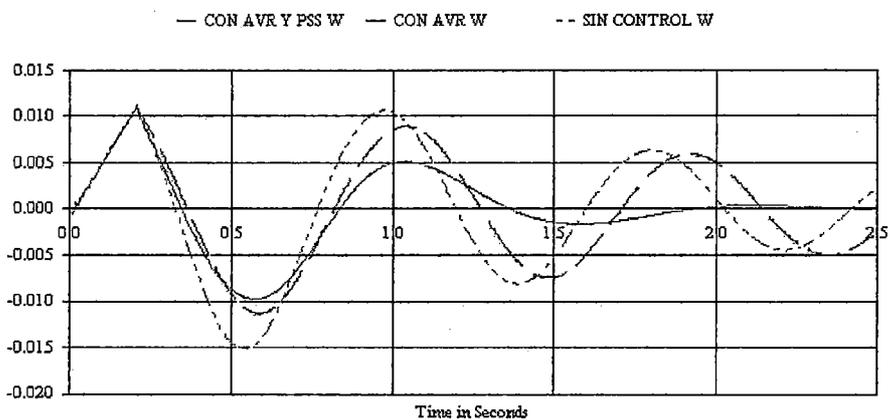
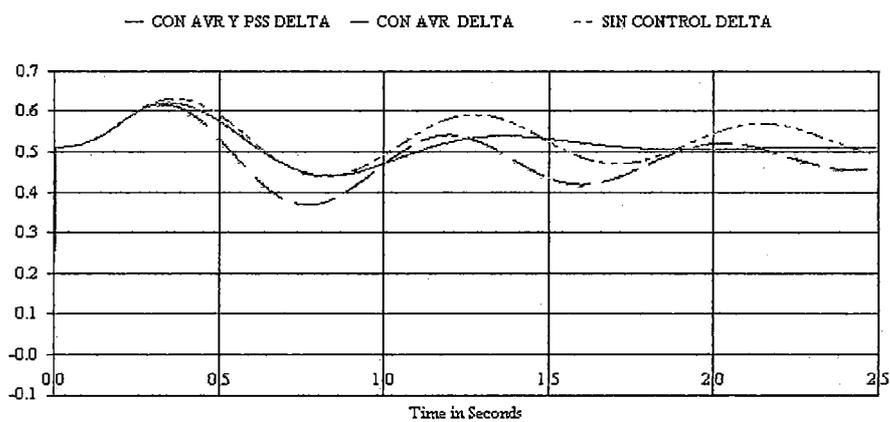
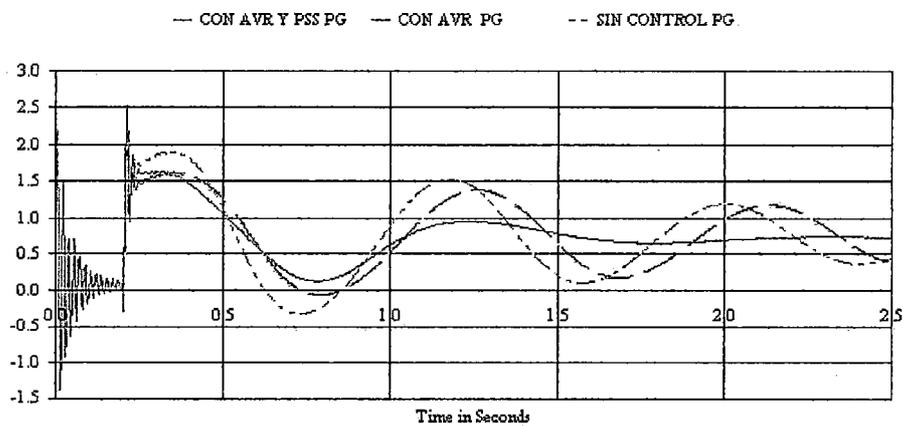


Fig. 5.7 Caso 2. En pu: Potencia eléctrica, Ángulo de par(Grad. Electr.) , Desviación angular y Efd.

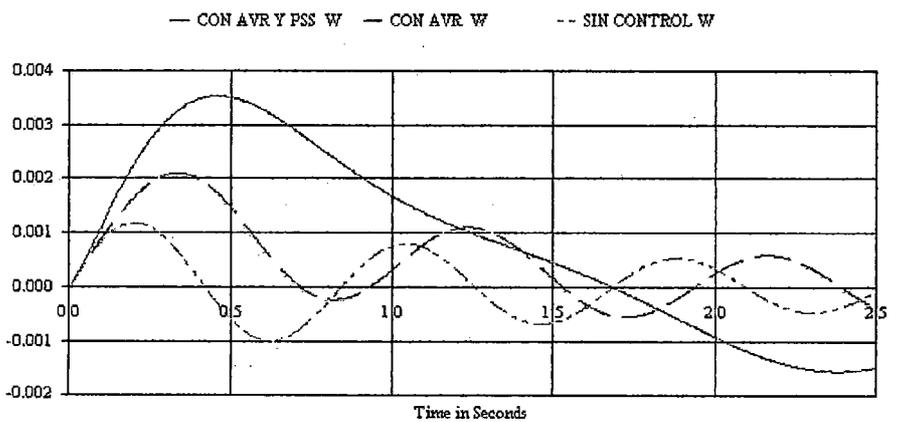
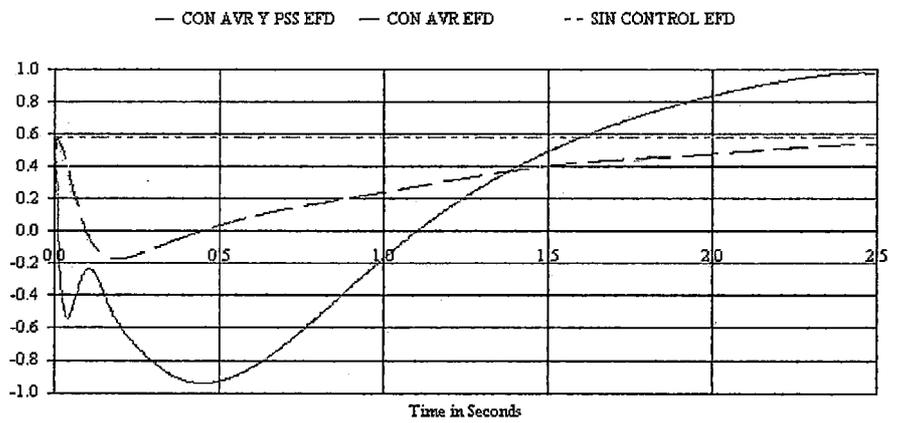
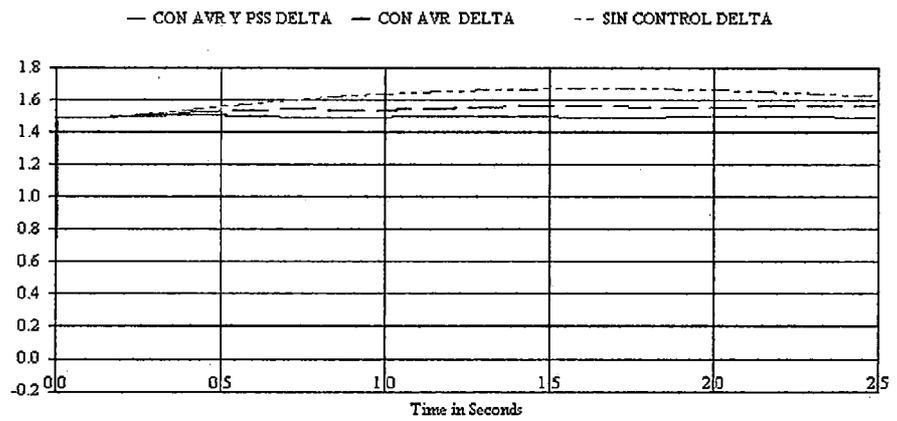
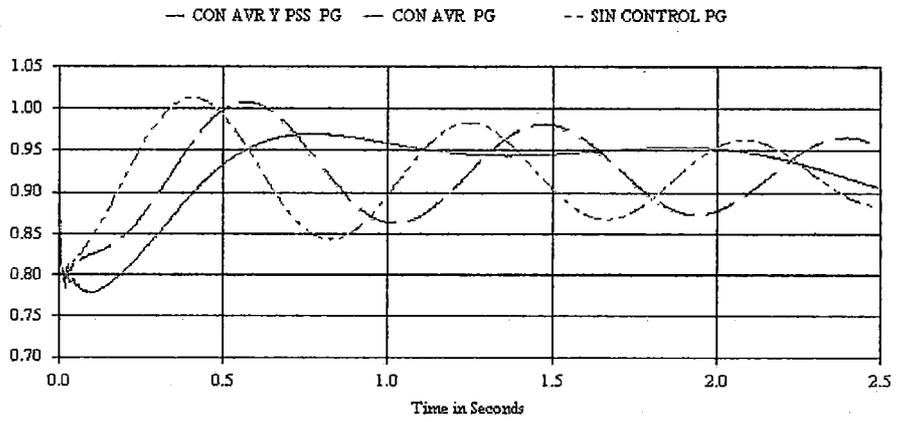


Fig. 5.8 Caso 3. En pu: Potencia eléctrica, Ángulo de par(Grad. Electr.), Efd, Desviación angular.

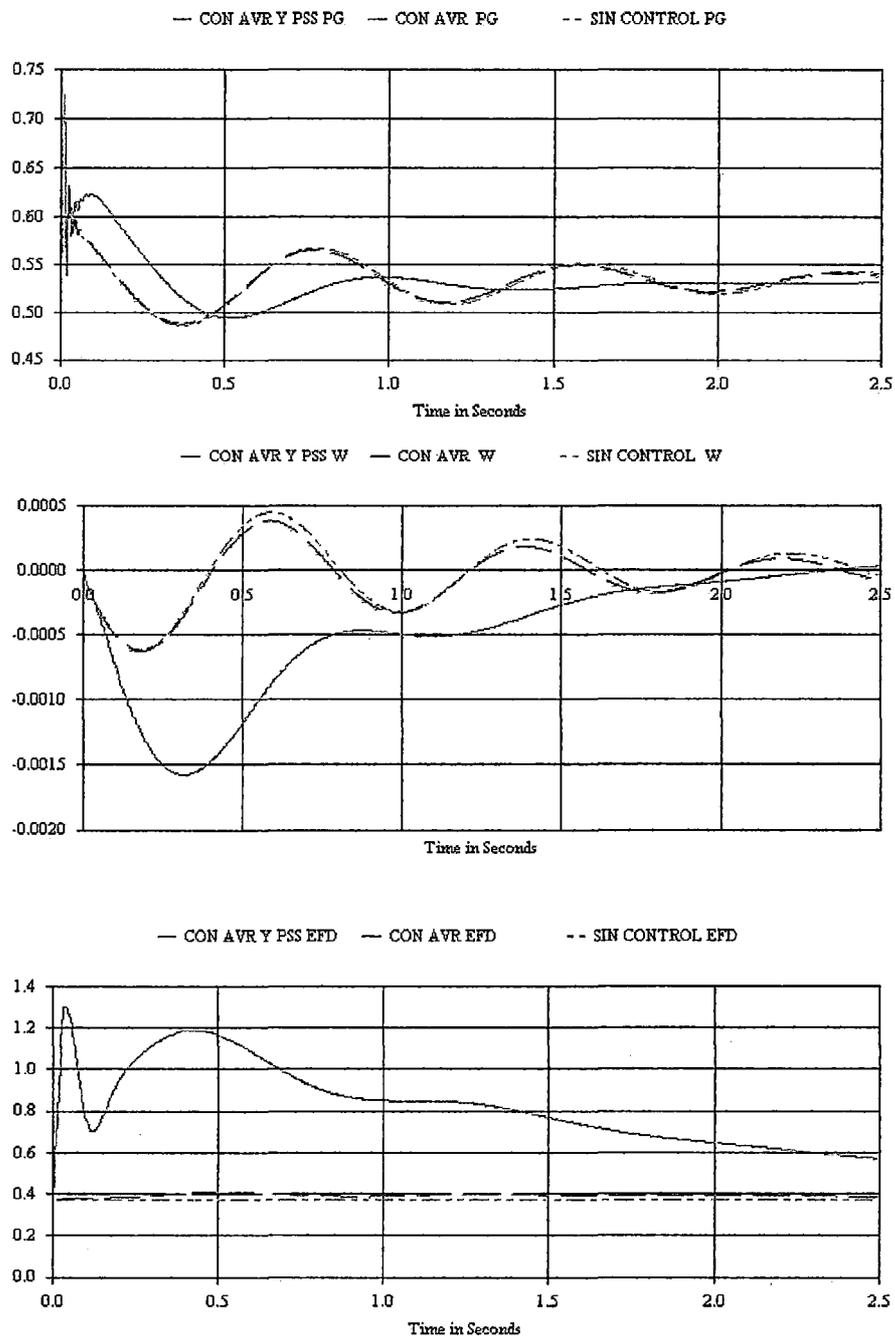


Fig. 5.9 Caso 4. En pu: Potencia eléctrica, Efd. y Desviación angular.

En los resultados se evidencia la influencia del AVR y el PSS en el comportamiento de la máquina en respuesta positiva a las diferentes perturbaciones sometidas al sistema en estudio, a diferencia de la respuesta de la máquina sin PSS solo en el caso 3 tiene una respuesta inadecuada existiendo una pérdida de sincronismo del sistema.

5.2.5 Determinación de modos naturales de la Máquina de Aguaytia sin PSS

De los siguientes datos de flujo de potencia y los datos de la máquina
Tabla 5.1 (Parámetros de máquina):

SN potencia nominal (power base, MVA)	:238.4
PN potencia activa nominal maquina, MW	:202.64
UN voltaje nominal (voltaje base, kV)	:13.8
Pop MW	:153.08
Qop MVAR	:2.84
Uop KV	:13.8
Theta grados	:129.66

Se obtiene:

Eigenvalores

-76.732
-49.994
-0.26013
-0.74287 + 0.89292i
-0.74287 - 0.89292i
-4.9247

Modo	-76.732	-49.994	-0.26013	-0.74287 + 0.89292i
Frecuencia	0	0	0	0.14211
Damping	1	1	1	0.63956

Tabla 5.6 Modos, Frecuencia natural, y coeficiente de amortiguamiento Caso Base sin Estabilizador

5.2.6 Análisis de respuesta con PSS y AVR (parámetros existentes)

La matriz de estado se construye a partir de la Ecuación 2.50a del Capítulo 2. cuyos elementos se ha obtenido de las ecuaciones linealizadas, tal como se muestra en dicho Capítulo.

Los valores de las potencias son los mismos, es decir se construye la matriz a partir del mismo flujo de potencia, el archivo del programa en código MatLab se adjunta en el Apéndice C.

Eigenvalores:

-100
-31.141
-4.9854
3.16 + 0.86337i
3.16 - 0.86337i
-0.66414 + 0.86786i
-0.66414 - 0.86786i
-0.090418

Análisis de los modos:

Modo	-100	-31.141	-4.9854	3.16 + 0.86337i	-0.66414 + 0.86786i
Frecuencia	0	0	0	0.13741	0.13812
Damping	1	1	1	-0.96464	0.60773

Tabla 5.7 Modos, Frecuencia natural, y coeficiente de amortiguamiento Caso Base con Estabilizador y parámetros existentes

5.2.7 Análisis con parámetros optimizados con el GA

De los casos en evaluación el modo de interés para el caso base es $-0.74287 \pm 0.89292i$, para los casos 1, 2, 3 y 4 los modos de interés son:

Condición	λ_1
Caso 1	$-0.62534 \pm 1.6038i$
Caso 2	$0.047925 \pm 1.1424i$
Caso 3	$0.86409 \pm 2.5473i$
Caso 4	$-1.0235 \pm 0.94792i$

Tabla 5.8 Modos electromecánicos de interés sin Estabilizador

Sintonización

Para obtener parámetros robustos se han tomado en consideración diferentes condiciones de operación, los casos han sido detallados en la sección 5.2.3, de los modos de interés de la *Tabla 5.8*; Se propone mejorar el amortiguamiento del sistema máquina-barra infinita, mediante la búsqueda óptima de parámetros robustos tomando las siguientes consideraciones:

Los límites inferior y superior de los parámetros del estabilizador que se utilizan en los algoritmos de optimización son: $K_{stab} \in [-2, -0.5]$, $T_1 \in [0.02, -0.08]$, $T_1 = T_3$, $T_2 = T_4 = 0.015 \in [0.010, -0.1 \text{seg.}]$, $T = 7.5 \in$

[7.5 - 15], y los parámetros del AVR son: $KA = 35$, $TA = 0.02$, el rango del K_{stab} . Y T1 son seleccionados de acuerdo al criterio basado en la experiencia.

Al resolver la *Ecuación 4.27* del Capítulo 4 por medio del algoritmo genético (GA) tomando en consideración los modos de interés de la *Tabla 5.8* se obtiene el conjunto de parámetros que se muestran en la *Fig. 5.10*

Para este proceso de búsqueda se ha corrido varias veces el programa obteniéndose una mejor convergencia para 40 individuos por parámetro y una evolución por 30 generaciones sucesivas, la convergencia se obtiene a partir de la generación 19 y el GA selecciona a los individuos correspondientes al N° 12 de la generación 30 por alcanzar el mejor valor objetivo.

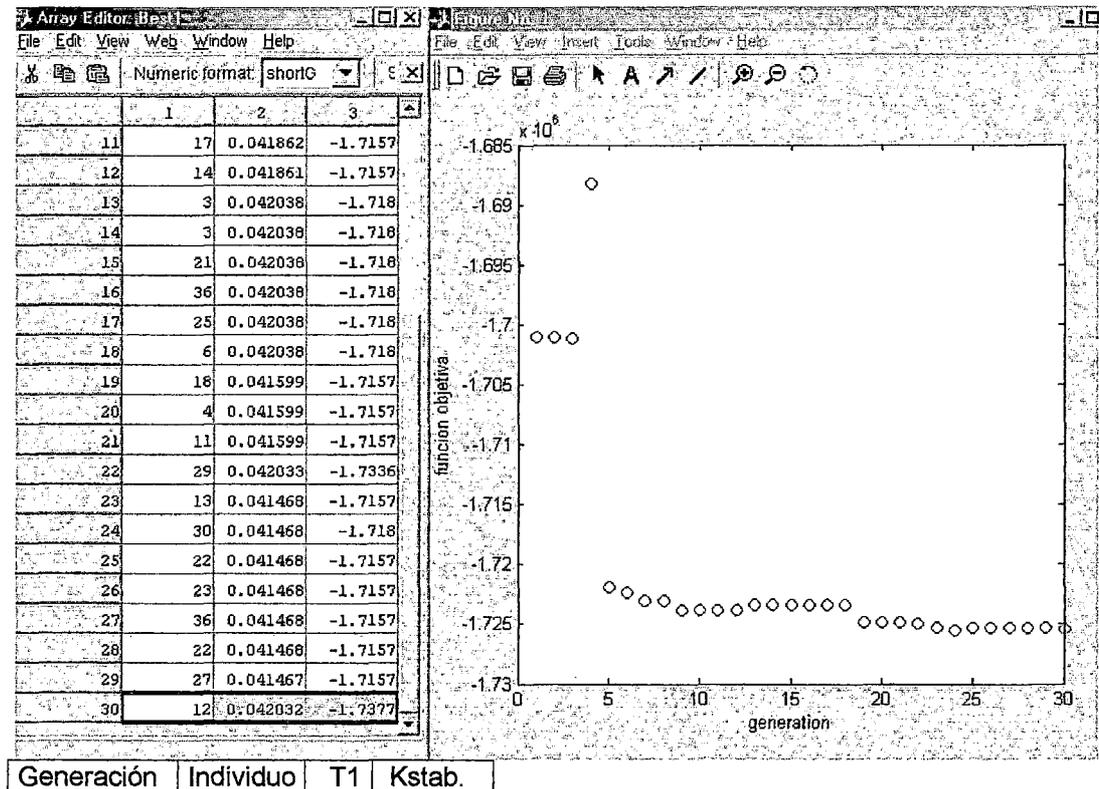


Fig. 5.10 Parámetros seleccionados por cada generación, convergencia de la función objetivo del GA.

Los parámetros seleccionados son:

Kstab.	T1=T3	T2=T4	T
-1.7377	0.042032	0.015	7.5

Tabla 5.9 Parámetros del estabilizador obtenido por medio del algoritmo genético

5.2.8 Simulaciones en el tiempo de los parámetros encontrados

Los parámetros obtenidos con el GA. Para el PSS de la máquina de Aguaytia, se prueban en los casos más críticos (2 y 3) planteados en la sección 5.2.3

Resultados:

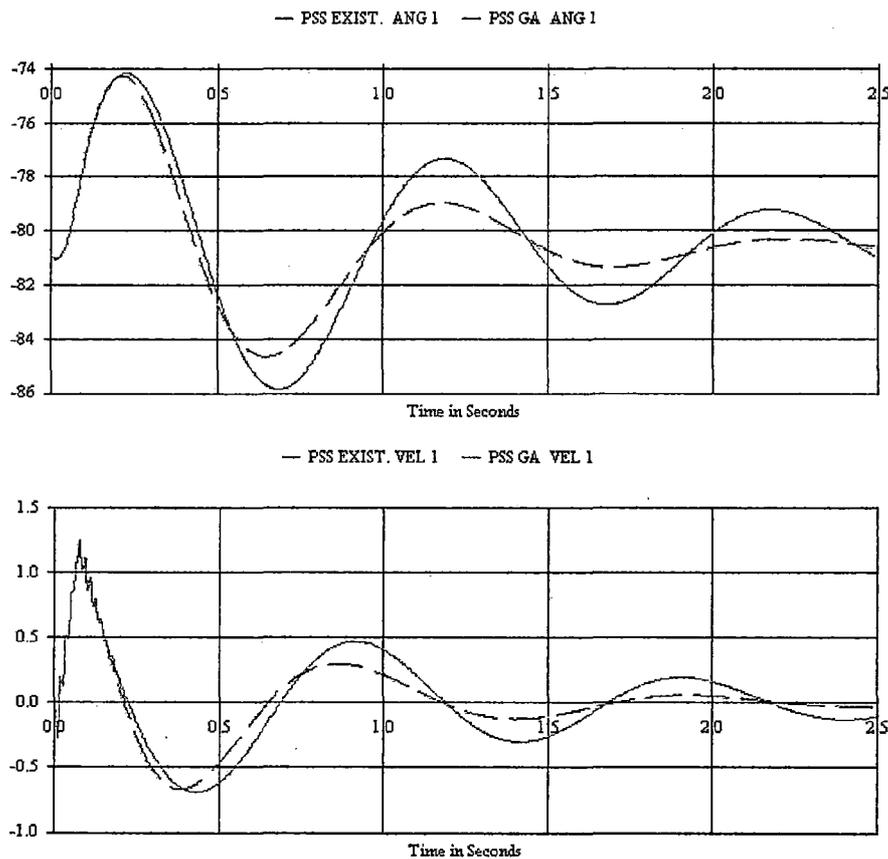


Fig. 5.11 Caso 2 Ángulo de par, Desviación de la Velocidad

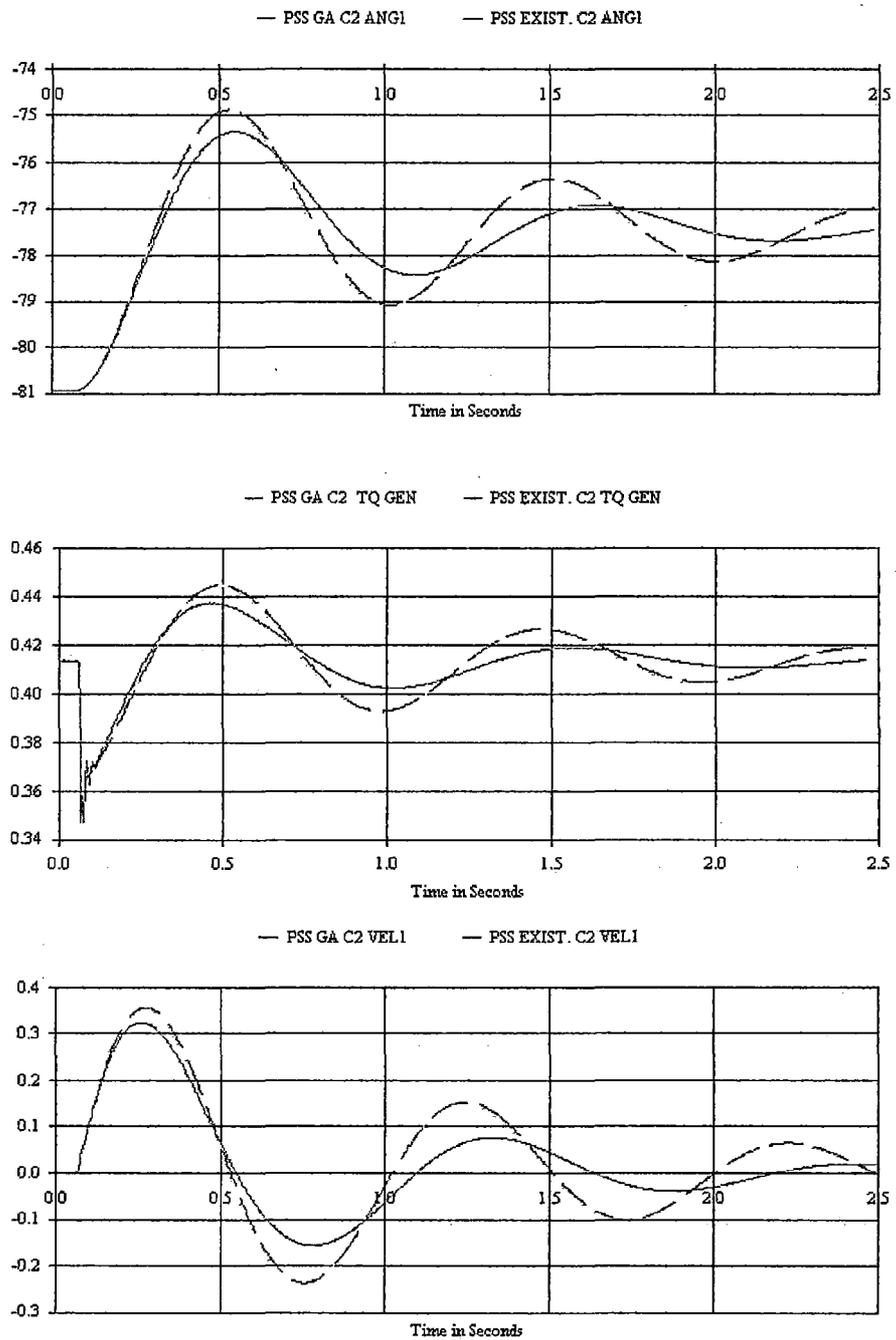


Fig. 5.12 Caso 3 en pu. Ángulo de par eléctrico, Torque electrodinámico y desviación de la velocidad.

5.2.9 Discusión de Resultados

La metodología propuesta y aplicada en este ejemplo para mejorar el comportamiento transitorio del sistema eléctrico, se basa en una herramienta evolutiva, que de acuerdo a los resultados se mejora

enormemente la respuesta de la máquina frente a perturbaciones provocadas, en este ejemplo se trata de probar la metodología para dar paso a una evaluación de un sistema complejo y completo, con casos de fallas reales, tiempos estándares de actuación de los sistemas de protección etc.

5.3 Aplicación 2: Sistema de 5 Máquinas: Aguaytia, C. Pato Carhuaquero, Cahua, Talara y 24 barras.

5.3.1 Datos para el modelo:

a. - Máquinas: de Ref. [1], [2] y [3]

Generador	Ra	XL	Xd	Xq	X'd	X'q	X''d	X''q	T'do	T'qo	T''do	T''qo	H(s)
Aguaytia	0.003	0.117	2.273	2.130	0.284	0.48	0.185	0.240	6.990	0.89	0.020	0.040	4.84
C. Pato	0.0236	0.180	1.00	0.737	0.351		0.197	0.231	4.279		0.117	0.070	1.49
Cahua	0.0236	0.180	1.315	0.700	0.370		0.220	0.250	6.000		0.117	0.070	2.23
Carhuaquero	0.0028	0.180	1.140	0.670	0.240		0.200	0.300	4.400		0.117	0.070	2.78
Talara	0.003	0.117	2.273	2.130	0.284	0.48	0.185	0.240	6.990	0.89	0.020	0.040	4.84

Tabla 5.10 Principales Parámetros de los Generadores

b. - Equivalentes: de Ref. [3]

Parámetros Equivalentes

NºFASE*	MVA/100	X/R	NOMBRE	KV	SEC: 0(ohm+jmH)	SEC: POS(ohm+jmH)
3	4.4999	1.6219	TINGMARI	220	28.064+j110.970	20.722+j88.9933
1	4.1196	1.5672	TINGMARI	220		
3	6.1660	2.0852	PARAGSH2	220	26.944+j129.769	12.444+j68.8309
1	4.6959	1.9451	PARAGSH2	220		
3	3.8201	2.1918	PARAGSHA	138	7.5413+j39.6150	7.5855+j44.1017
1	3.9324	2.1216	PARAGSHA	138		
3	5.4095	1.6319	PARAMONU	220	33.845+j117.596	17.139+j74.1907
1	4.3914	1.4719	PARAMONU	220		
3	1.1827	1.0941	GUADALUP	220	778.83+j2020.70	101.22+j293.764
1	1.9377	1.0021	GUADALUP	220		

*: 3=Trifásica, 1=Monofásica, MVA/100=Potencia de corto circuito, X/R=Relación en pu.

Tabla 5.11 Parámetros de las fuentes equivalentes Estiaje-Mínima 2003.

c. - Modelos Del sistema excitatriz (AVR) y PSS: de Ref. [1] y [4]

Los modelos utilizados son el IEEEEST para el PSS, el EXBAS y el EXP1C1 para el sistema de excitación, todas de la librería de modelos de la referencia [4], cuyos esquemas se ilustran en el Apéndice B. Estos modelos

han sido desarrollados en el ATP-Draw mediante el lenguaje MODELS propio del programa.

Parámetros de los modelos según la Ref. [1]

Parámetro Modelo	Carhuaq.	C. Pato	Cahua	Aguay=Talara
	EXP1C1	EXP1C1	EXP1C1	EXBAS
TR	0.025	0.010	0.01	0.023
KA	25.0	11.6	15.0	354.9
TA1/TA(EXBAS)	2.00	1.720	6.0	0.010
VR1	6.40	5.250	7.200	--
VR2	-5.760	-4.20	-6.48	--
TA2/TB(EXBAS)	0.00	0.019	0.035	0.043
TA3/TC(EXBAS)	0.00	0.00	0.350	0.190
TA4	0.00	0.00	0.00	--
VRMAX	99.00	99.00	6.00	8.33
VRMIN	-99.00	-99.0	-5.40	-6.66
KF	0.00	0.00	0.00	0.029
TF1	1.00	1.0	1.00	0.043
TF2	0.00	0.00	0.00	0.190
EFDMAX	6.40	6.50	99.00	--
EFDMIN	-5.760	-5.20	-99.00	--
KE	0.00	0.00	1.00	1.00
TE	0.00	0.00	1.00	0.30
E1	0.00	0.00	6.00	6.240
SE(E1)	0.00	0.00	0.00	0.170
E2	0.00	0.00	4.500	8.330
SE(E2)	0.00	0.00	0.00	0.182
KP/KD(EXBAS)	1.00	1.25	0.00	0.00
KI	0.00	0.00	0.00	0.00
KC	0.20	0.20	0.00	0.20
TF	---	--	--	2.600

Tabla 5.12 Parámetros de los sistemas de excitación según la Ref. [1]

Parámetro Modelo	Aguaytia=Talara	C. Pato
	IEEEEST	IEEEEST
A1	0.03	0.011
A2	0.00	0.00
A3	0.00	0.00
A4	0.00	0.00
A5	0.00	0.00
A6	0.00	0.00
T1	0.00	1.143
T2	0.00	2.00
T3	0.00	0.00
T4	0.00	0.00
T5	1.50	4.40
T6	1.50	4.40
KS	-0.952	-0.363
LSMAX	0.085	0.050
LSMIN	-0.085	-0.050

Tabla 5.13 Parámetros de los PSS según la Ref. [1]

d. - Despacho

DESPACHO ÉPOCA ESTIAJE MÍNIMO 2003 – EMTF

NOMBRE UNIDAD	TIPO	BARRA	POTENCIA			FACTOR DE
	UNIDAD		MW	MVAR	MVA	POTENCIA
AGUAYTIA	AGUAY14	AGUAY_14	153.08	2.84	153.11	1.00
CAHUA	HGC	HGC_10	27.38	5.95	28.02	0.98
CARHUAQUERO	PGC	PGC_10	33.63	0.89	33.64	1.00
CPATO	HGHNEW18	HGH_13.8	68.62	13.70	69.97	0.98
EQ. PARAMONGA N	...	PARAMO N_220	46.77	5.87	47.14	0.99
EQ. PARARAG_220	...	PARARAG_220	26.56	2.43	26.67	1.00
EQ. PARAG 138	...	PARAG_138	8.46	0.34	8.46	1.00
TALARA	TALARA	TALARA_220	58.25	4.10	58.39	1.00
TOTAL			422.73	36.13	425.40	0.99

Tabla 5.14 Despacho de potencia de las máquinas.

El Modelamiento de líneas y transformadores se describe en el capítulo 6. La demanda Estiaje-Mínima 2003, las compensaciones shunt y los SVC se detalla en el Apéndice D. En este trabajo no se incluye los sistemas de Gobernadores por no tener influencia en la respuesta rápida de las máquinas. Para los efectos de una mejor comprobación de la respuesta de los controles en la primera parte se simula el re-cierre trifásico, esto no indica la presencia de recloser trifásico en el SEIN, por que solo se cuenta con recloser monofásico.

5.3.2 Condiciones de operación

CASO BASE: El sistema opera en estado estable con una generación y demanda indicadas en las tablas respectivas.

Condición 1

CASO 1 (C1): Falla monofásica con re-cierre trifásico No exitosa en la L.T. 240 Chiclayo-Carhuaquero; Eventos: se produce la falla a los 0.001s, con un despeje en 0.05833s (3.5 ciclos), con un re-cierre a los 0.45s (27 ciclos), y apertura definitiva en 0.50833s (30.5 ciclos)

CASO 2 (C2): Salida intempestiva de la C.T. Talara; Eventos: Salida intempestiva a los 0.05s (3 ciclos)

CASO 3 (C3): Falla monofásica con re-cierre trifásica No exitosa en la L.T. 238 Chiclayo-Piura; Eventos: se produce la falla a los 0.001s, con un despeje en 0.05833s (3.5 ciclos), con un re-cierre a los 0.45s (27 ciclos), y apertura definitiva en 0.50833s (30.5 ciclos)

CASO 4 (C4): Ingreso de la carga en Machala (Ecuador) de 40 MW, 15MVAR después de la energización de la línea Zorritos-Machala.

CASO 1A (C1A): Falla Monofásica con recierre monofásica No exitosa en la L.T. 240 Chiclayo-Carhuaquero; Eventos: se produce la falla a los 0.05s (3 ciclos), con un despeje a los 0.1s, y se re-cierra a los 0.55s (30 ciclos), y apertura trifásica definitiva en 0.575s

CASO 3A (C3A): Falla Monofásica con recierre monofásica No exitosa en la L.T. 238 Chiclayo-Piura; Eventos: se produce la falla a los 0.05s (3 ciclos), con un despeje a los 0.1s, y se re-cierra a los 0.55s (30 ciclos), y apertura trifásica definitiva en 0.575s.

Las máquinas están codificadas como sigue:

- Máquina 1: Carhuaquero.
- Máquina 2: Cahua.
- Máquina 3: C. Pato.
- Máquina 4: Aguaytia.
- Máquina 5: Talara.

La leyenda en las figuras está codificada de la siguiente forma:

Ejemplo: PG1C2 = Potencia en la máquina 1, Caso 2

5.3.3 Resultados de simulación con parámetros de control existentes

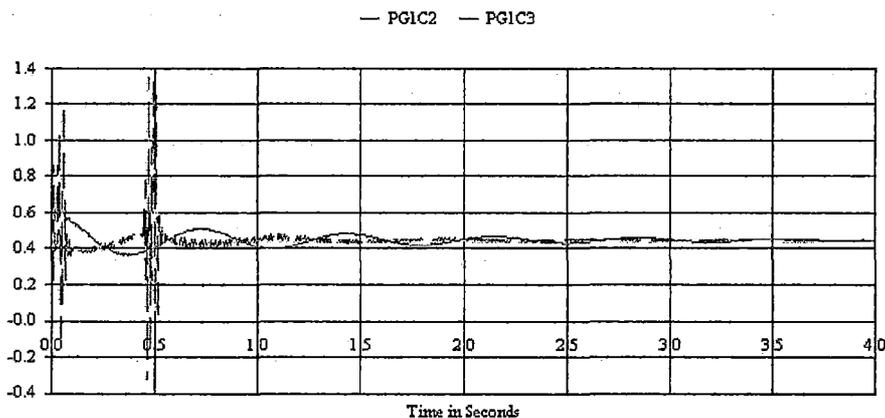


Fig. 5.13 En pu. Potencia del generador 1 Caso 2 y 3

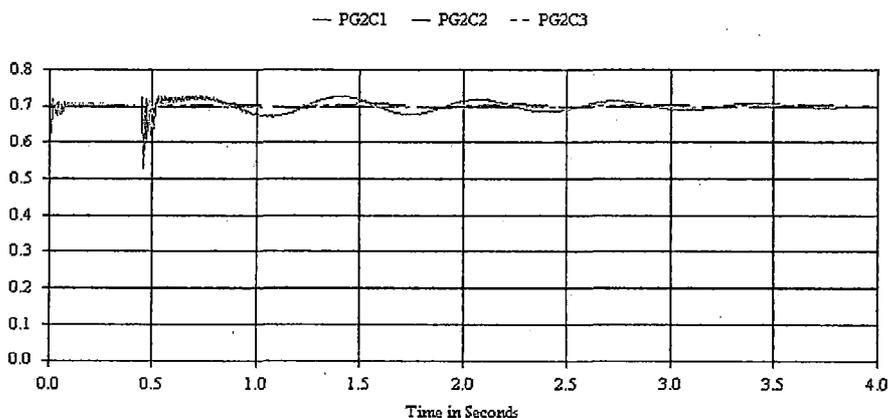


Fig. 5.14 En pu. Potencia del generador 2 Caso 1, 2 y 3

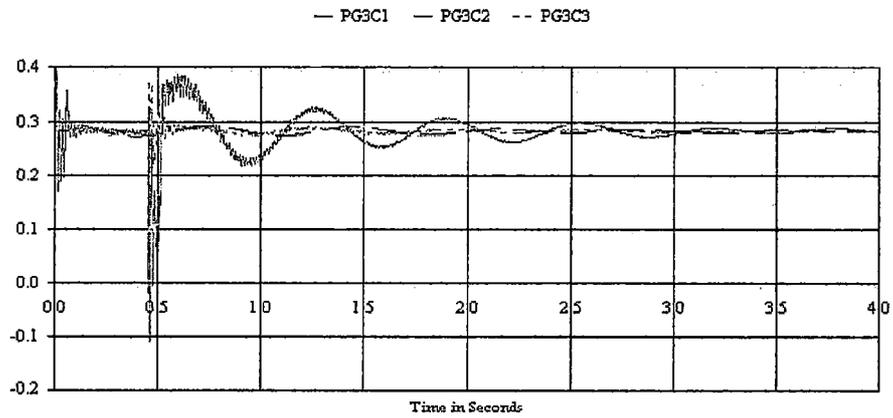


Fig. 5.15 En pu. Potencia del generador 3 Caso 1, 2 y 3

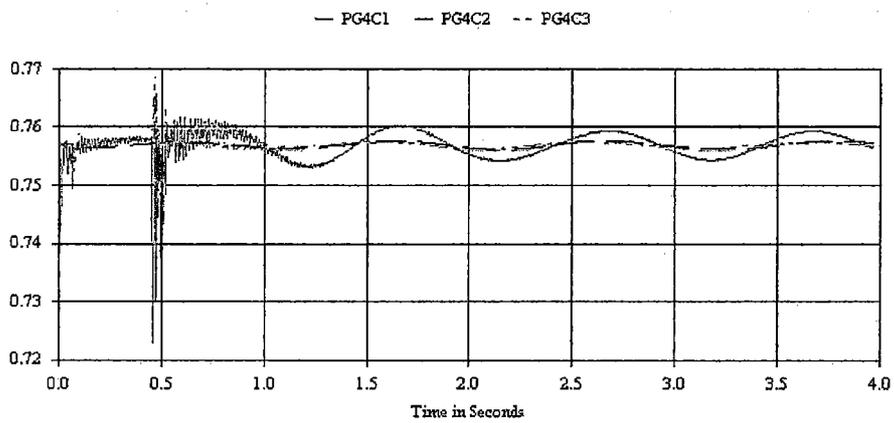


Fig. 5.16 En pu. Potencia del generador 4 Caso 1, 2 y 3

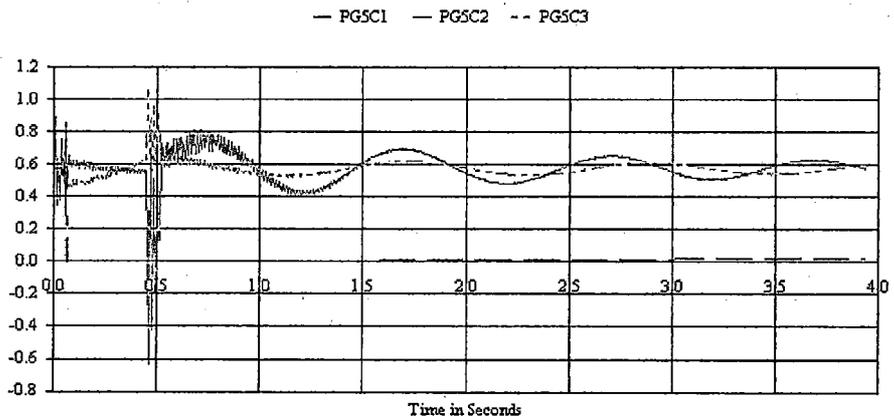


Fig. 5.17 En pu. Potencia del generador 5 Caso 1, 2 y 3

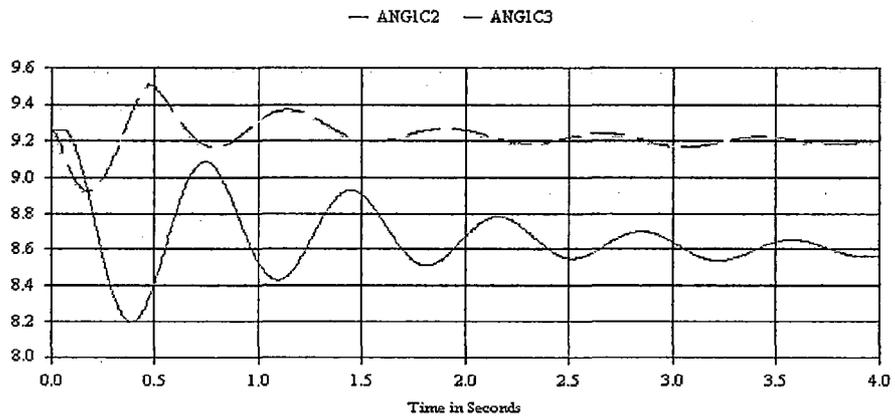


Fig. 5.18 En grados eléctricos. Ángulo de par del generador 1 Caso 2 y 3

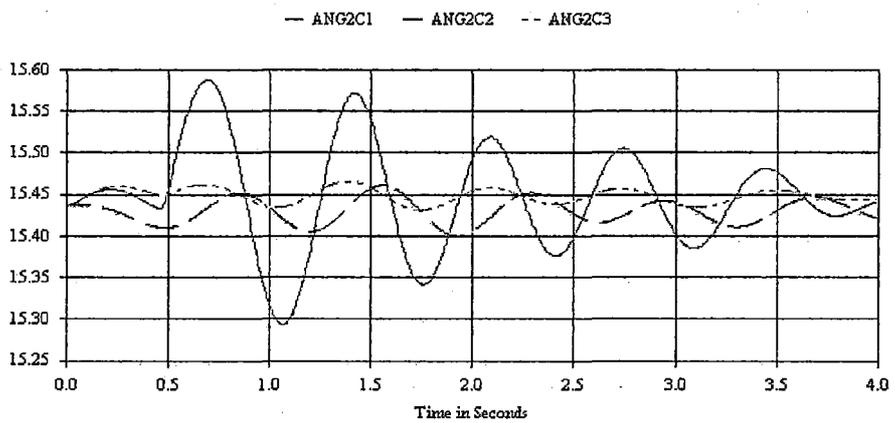


Fig. 5.19 En grados eléctricos. Ángulo de par del generador 2 Caso 1, 2 y 3

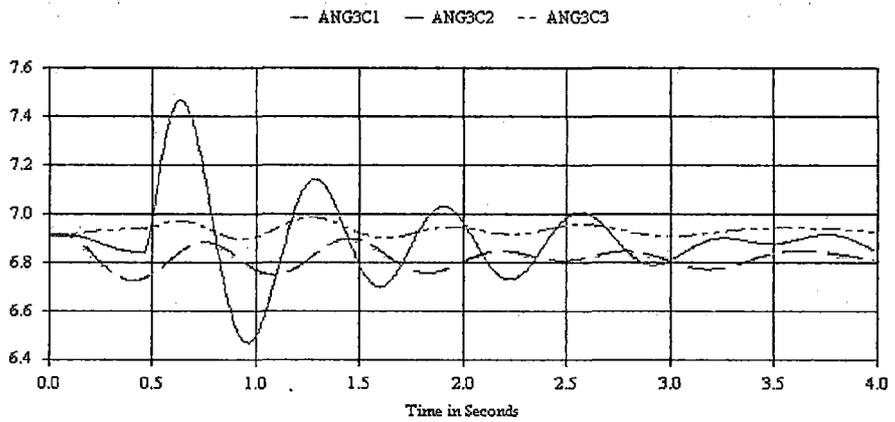


Fig. 5.20 En grados eléctricos. Ángulo de par del generador 3 Caso 1, 2 y 3

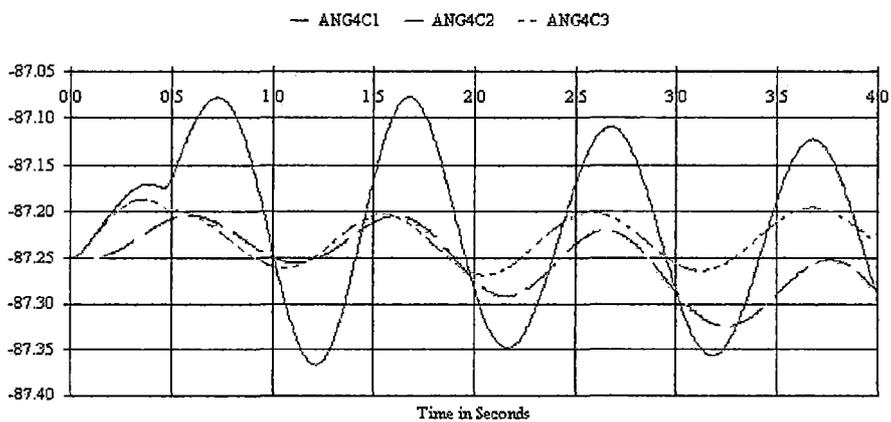


Fig. 5.21 En grados eléctricos. Ángulo de par del generador 4 Caso 1, 2 y 3

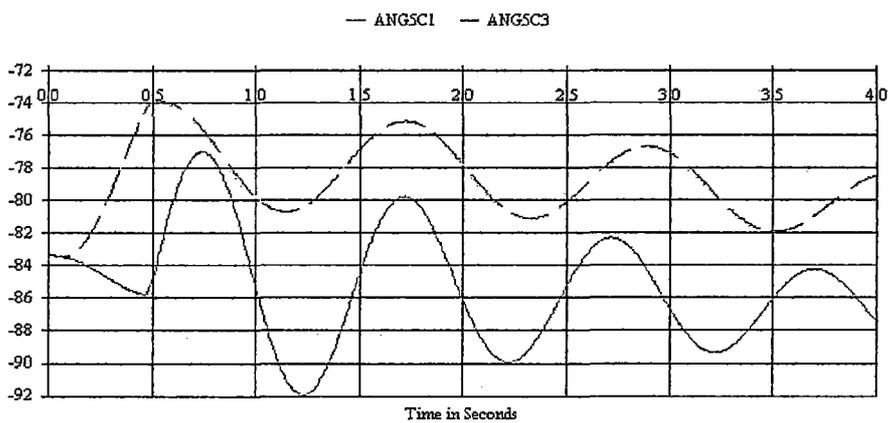


Fig. 5.22 En grados eléctricos. Ángulo de par del generador 5 Caso 1, 3

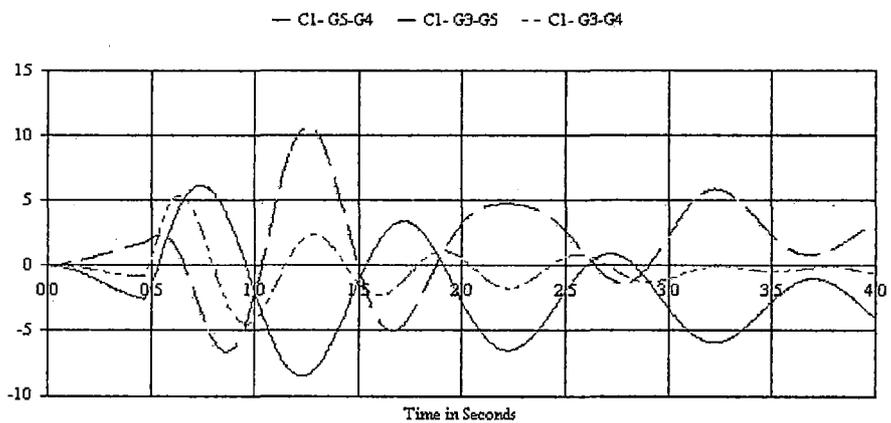


Fig. 5.23 En grados eléctricos. Diferencia angular entre máquinas Caso 1,

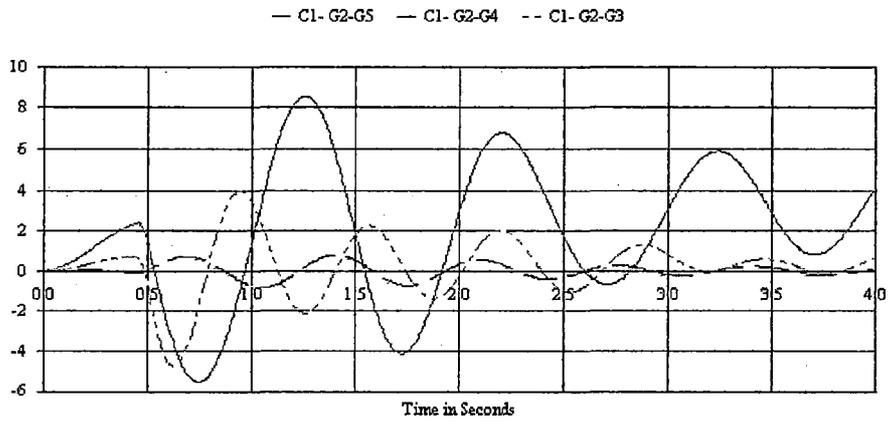


Fig. 5.24 En grados eléctricos. Diferencia angular entre máquinas Caso 1,

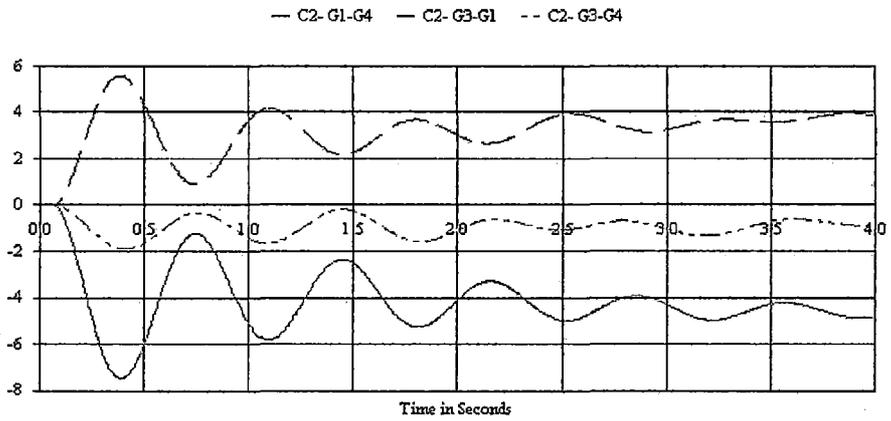


Fig. 5.25 En grados eléctricos. Diferencia angular entre máquinas Caso 2

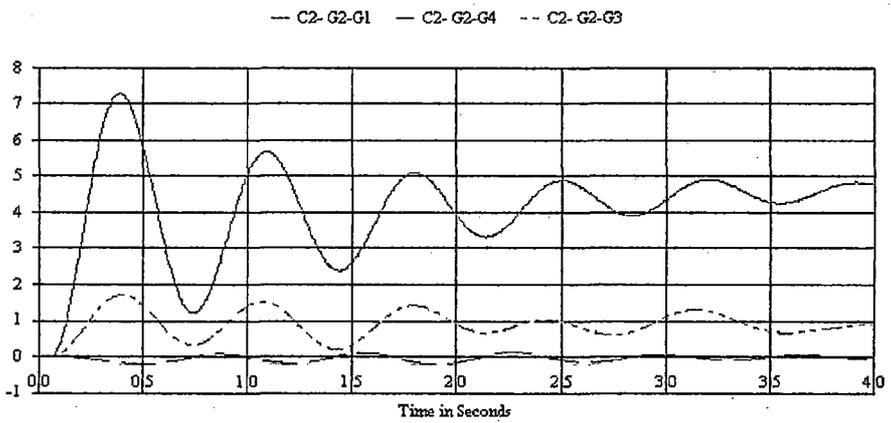


Fig. 5.26 En grados eléctricos. Diferencia angular entre máquinas Caso 2

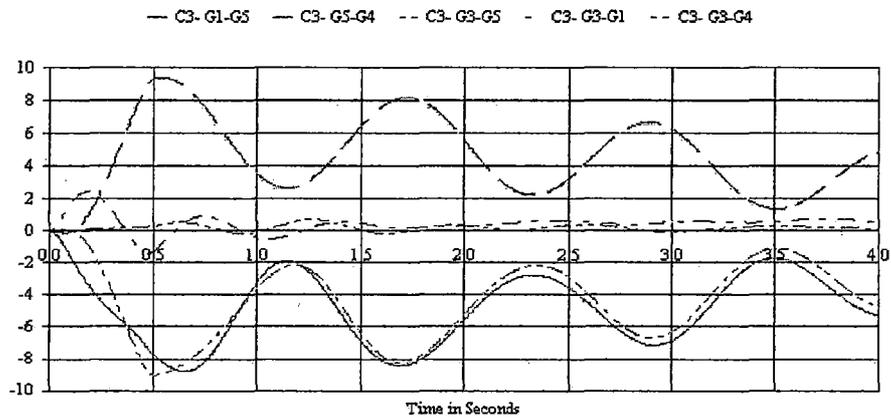


Fig. 5.27 En grados eléctricos. Diferencia angular entre máquinas Caso 3

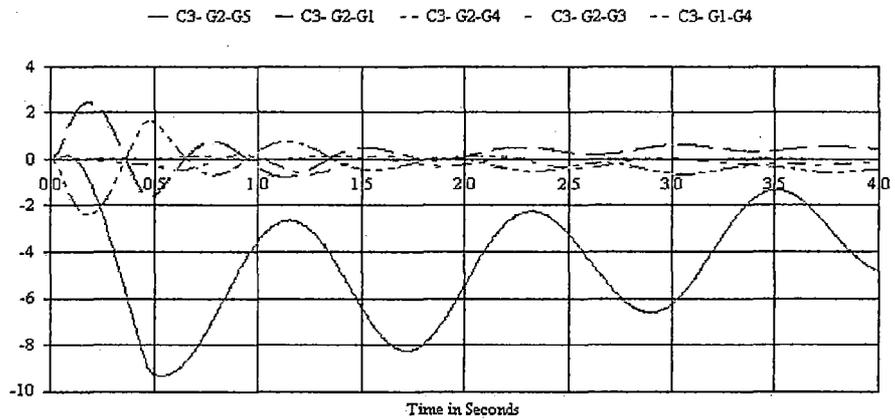


Fig. 5.28 En grados eléctricos. Diferencia angular entre máquinas Caso 3,

5.3.4 Determinación de modos naturales sin PSS

Eigenvalores

-36.719
-7.2252
-20.865
-20.865
-0.025362
-0.025362
-0.42400+7.472007i
-0.42400-7.472007i
-0.0043738 +1.3656e-013i
-0.0043738 -1.3656e-013i
-0.0043738
-0.26101+4.3527021i
-0.26101-4.3527021i
-0.27100+10.7056023i
-0.27100-10.7056023i

3.8029e-012 +5.8317e-012i
3.8029e-012 -5.8317e-012i
-0.15812 + 0.0045258i
-0.15812 - 0.0045258i
-0.16572 + 0.0047955i
-0.16572 - 0.0047955i
-35.45623102
-0.42131+4.6190131i
-0.42131-4.6190131i

Eig[24x1]

Análisis de los modos:

Modo	-36.719	-35.4562	-0.424+7.472i	-0.261+4.353i	-0.271+10.71i	-0.421+4.619i
Frecuencia	0	0	1.189	0.693	1.7045	0.7351
Damping	1	1	0.057	0.060	0.0861	0.0591

Tabla 5.15 Modos, frec. De oscilación, coeficiente de amortiguamiento sin PSS.

5.3.5 Análisis con parámetros existentes de PSS y AVR, modos de oscilación

Eigenvalores

0
0
-1.26E+06
-38.974 + 2.8632i
-38.974 - 2.8632i
-22.162 + 2.5438i
-22.162 - 2.5438i
-38.962 + 2.8632i
-38.962 - 2.8632i
-22.148 + 2.5438i
-22.148 - 2.5438i
-0.1061+ 4.5853i
-0.1061- 4.5853i
-137.98 + 2.7397i
-137.98 - 2.7397i
-137.94 + 2.7388i
-137.94 - 2.7388i
-0.3952 + 7.4701i
-0.3952 - 7.4701i

-170.78 + 1.2769i
-170.78 - 1.2769i
-0.741 + 10.8872i
-0.741 - 10.8872i
-0.382 + 7.2681i
-0.382 - 7.2681i
0
-36.719

Eig [34x1]

Análisis de los modos:

Modo	-1.26e+6	-36.719	-0.106+ 4.585i	-0.395 + 7.47i	-0.74 + 10.88i	-0.382 + 7.268i
Frecuencia	0	0	0.7297	1.1888	1.7316	1.1567
Damping	1	1	0.02311	0.0528	0.0678	0.0524

Tabla 5.16 Modos, frecuencia de oscilación, coeficiente de amortiguamiento con PSS.

5.3.6 Análisis con parámetros optimizados con el GA

Los modos de interés para el caso base son:

λ_1	λ_2	λ_3
$-0.261 \pm 4.353i$	$-0.271 \pm 10.71i$	$-0.421 \pm 4.619i$

Donde λ_1 y λ_3 involucran a las centrales de Talara, Carhuaquero, Cañón del Pato contra Aguaytia, Cahua y el Sistema Centro.

Para los casos 1, 2 y 3 los modos de interés son:

Condición	λ_1 y λ_2
Caso 1	$-0.2610 \pm 4.3527i$
Caso 2	$-0.3952 \pm 7.4701i$
Caso 3	$-0.1261 \pm 4.5953i$

Tabla 5.17 Modos de interés para los tres casos.

Sintonización

Para el diseño de los estabilizadores robustos se consideran diferentes condiciones de operación mencionados en la primera parte de esta sección los modos de interés detallados en la *Tabla 5.17* son los elementos de partida para el proceso de búsqueda de acuerdo a la *Ecuación 4.27* dicho

modos de interés se propone mejorar el amortiguamiento del sistema eléctrico, mediante la búsqueda óptimo de parámetros robustos teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

Los parámetros T y T2=T4 del PSS se asume

Generador	T	T2
3	7.5	0.0015
4	7.5	0.015
5	7.5	0.015

Tabla 5.18 Parámetros de PSS asumidos para los tres generadores.

El modelo del PSS es el general de dos canales ilustrado en la Fig. 5.4

Los parámetros del AVR son:

Generador	KA	TA
1	35	0.02
2	20	0.003
3	35	0.02
4	35	0.02
5	35	0.02

Tabla 5.19 Parámetros de los AVR.

El modelo del AVR utilizado para todas las máquinas es el EXPIC1, con los datos respectivos de la tabla 5.12 y 5.19.

Los límites inferior y superior de los parámetros de los estabilizadores que se utilizan en los algoritmos de optimización son:

$K_{stab} \in [-2, 3.5]$,

$T1 \in [0.01, 0.9]$ donde $T1 = T3$

Al resolver la *Ecuación 4.27* del Capítulo 4 por medio del algoritmo genético (GA) se busca 6 variables, $T1_i$ y K_{stab}_i donde $i = 1, 2, 3$.

Para este proceso de búsqueda se ha corrido varias veces el programa obteniéndose una mejor convergencia para 40 individuos por parámetro y una evolución por 40 generaciones sucesivas, la convergencia se obtiene a partir de la generación 6, y se toma como los más robustos a los individuos correspondientes al N° 5 de la generación 26 por alcanzar el mejor valor objetivo con una convergencia continua.

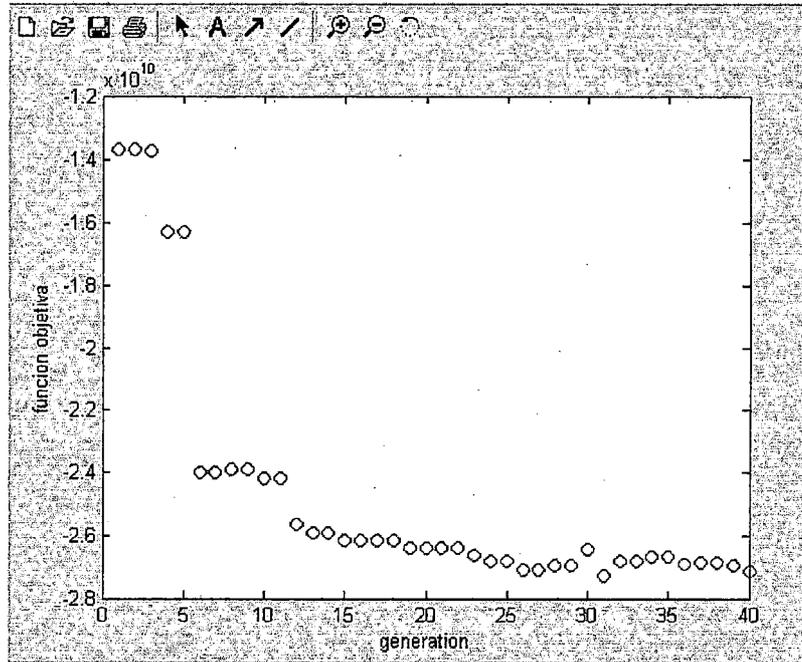


Fig. 5.29 Convergencia de la función objetiva

Array Editor: Best!							
File Edit View Web Window Help							
Numeric format: shortG Size: 40 by: 7							
	1	2	3	4	5	6	7
21	4	0.10789	-1.1349	0.10252	3.0777	0.084135	-1.8006
22	15	0.10789	-1.1349	0.10252	3.0777	0.084135	-1.8006
23	19	0.10789	-1.129	0.10824	-0.39443	0.044545	-1.1672
24	13	0.10789	-1.1271	0.10252	1.6036	0.062405	-2.2141
25	13	0.10789	-1.1271	0.10252	1.6036	0.062405	-2.2141
26	5	0.10762	-1.1134	0.07085	3.3905	0.074106	-1.5117
27	31	0.10762	-1.1134	0.07085	3.3905	0.074106	-1.5117
28	22	0.10762	-1.1134	0.076041	3.3905	0.072786	-1.5117
29	22	0.10762	-1.1134	0.076041	3.3905	0.072786	-1.5117
30	22	0.10789	-1.0723	0.10252	3.1129	0.062933	-1.1672
31	12	0.10727	-1.1114	0.03522	3.0777	0.062933	-1.1437
32	35	0.1078	-1.0723	0.095044	3.1129	0.055982	-1.2302
33	39	0.1078	-1.0723	0.095044	3.1129	0.055982	-1.2302
34	23	0.1078	-1.1212	0.10243	3.3905	0.055982	-1.2302
35	10	0.1078	-1.1212	0.10243	3.3905	0.056422	-1.2302
36	29	0.1078	-1.1369	0.10358	-0.39052	0.055982	-1.1833
37	32	0.1078	-1.0723	0.10252	3.3905	0.05607	-1.2302
38	5	0.1078	-1.0723	0.10252	3.3905	0.05607	-1.2302
39	39	0.1078	-1.002	0.10243	3.3788	0.062757	-1.2302
40	6	0.1078	-1.0723	0.10824	-0.39052	0.051848	-2.2625
Genera.	Indiv.	G1-T1	G1-K	G2-T1	G2-K	G3-T1	G3-K

Fig. 5.30 Parámetros de PSSs obtenidos con el GA por cada generación.

De la generación 26

Estabilizador	$K_{stab.}$	T	$T1=T3$	$T2=T4$
C. Pato	3.3905	7.5	0.07085	0.0015
Aguaytia	-1.1134	7.5	0.10762	0.015
Talara	-1.5117	7.5	0.074106	0.015

Tabla 5.20 Parámetros de los PSS.

5.3.7 Simulaciones en el tiempo ATP-Draw

Los parámetros robustos obtenidos (Tabla 5.20) mediante el GA se prueban en los casos ya detallados en la sección anterior. Cuyos resultados se presentan en las siguientes figuras en comparación con los resultados con parámetros convencionales de PSSs.

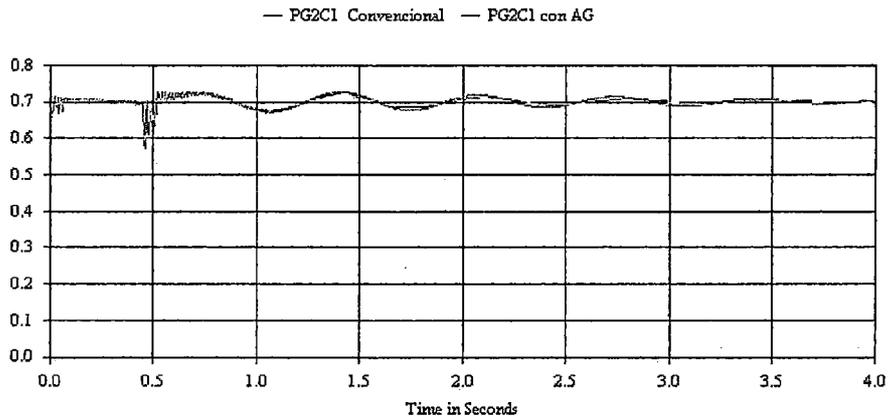


Fig. 5.31 Caso 1: Comportamiento de la potencia en Mq. Cahua

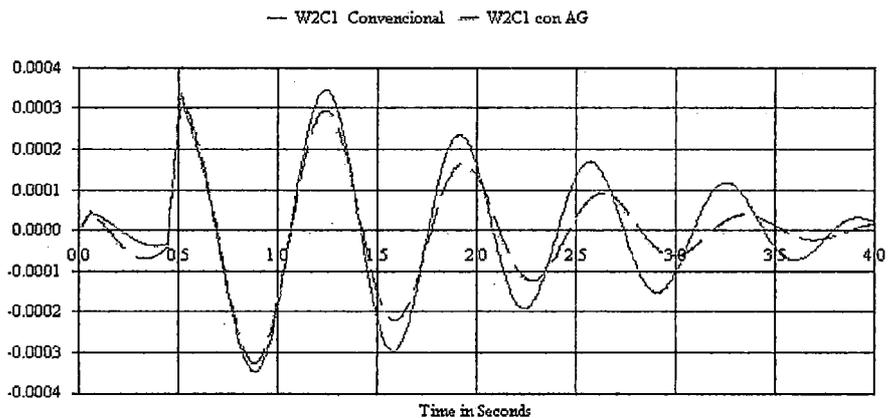


Fig. 5.32 Caso 1: Comportamiento de la desviación de velocidad en Mq. Cahua

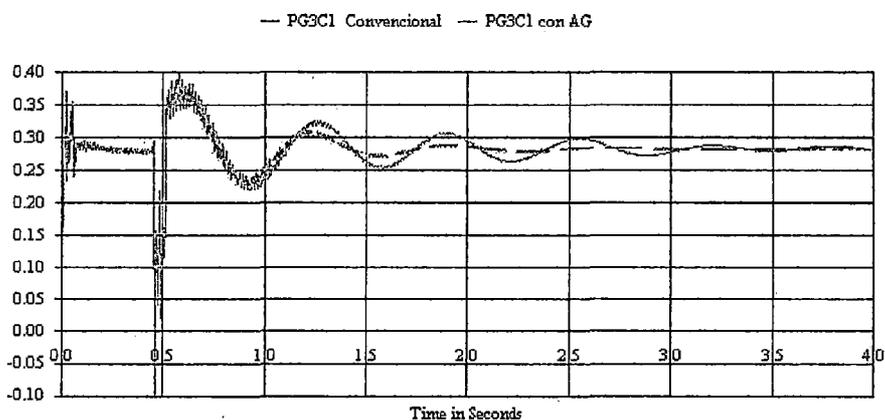


Fig. 5.33 Caso 1: Comportamiento de la potencia en Mq. C. Pato

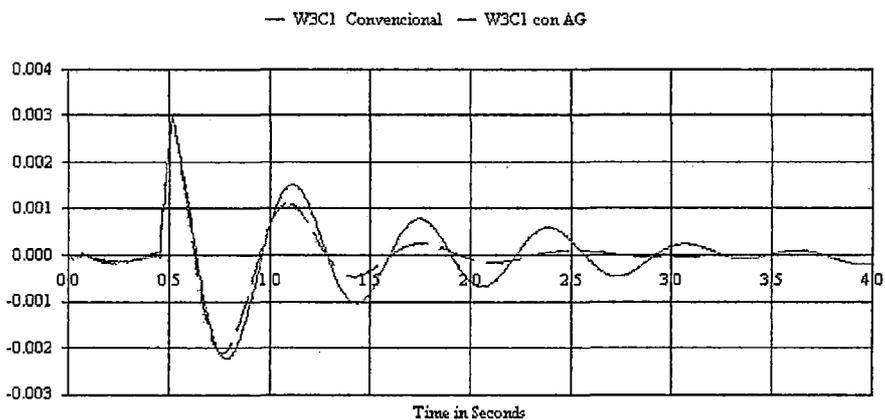


Fig. 5.34 Caso 1: Comportamiento de la desviación de velocidad en Mq. C. Pato

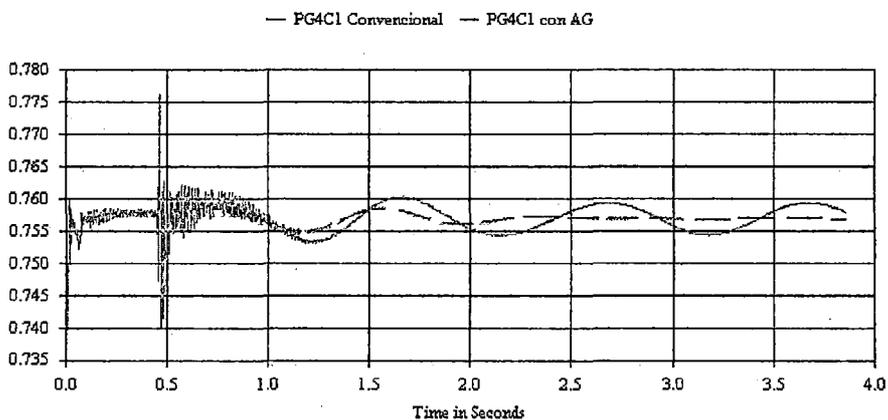


Fig. 5.35 Caso 1: Comportamiento de la potencia en Mq. Aguaytia

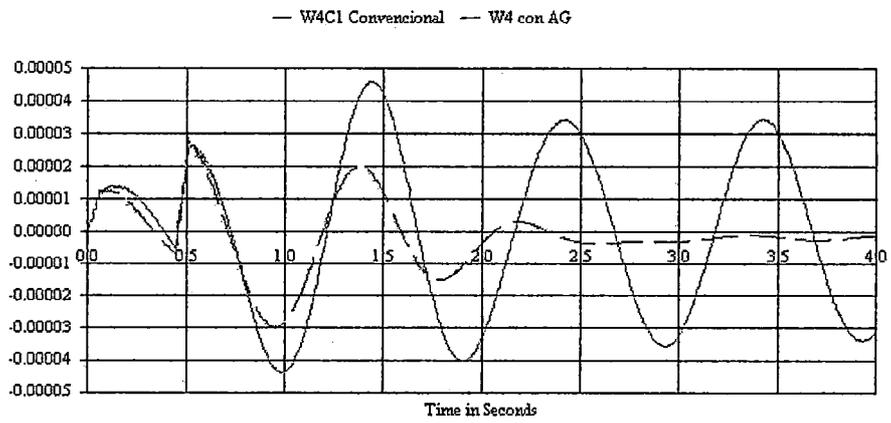


Fig. 5.36 Caso 1: Comportamiento de la desviación de velocidad en Mq. Aguaytia

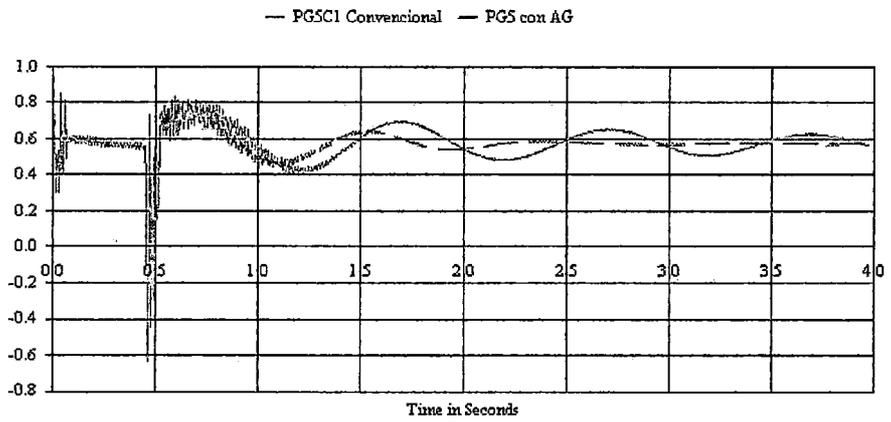


Fig. 5.37 Caso 1: Comportamiento de la potencia en Mq. Talara

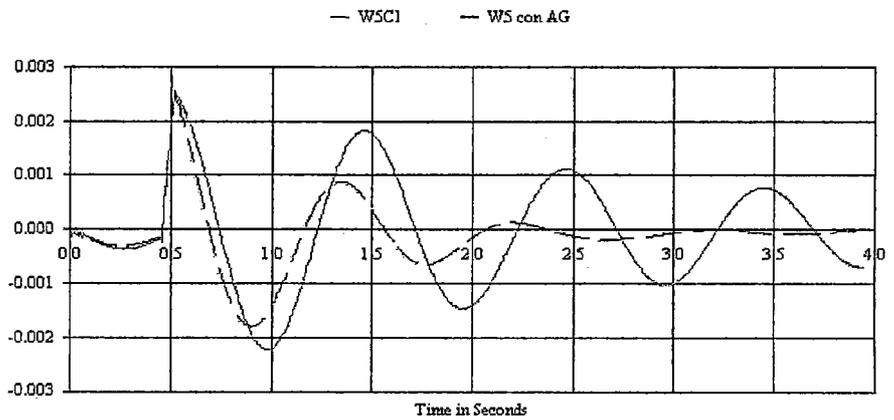


Fig. 5.38 Caso 1: Comportamiento de la desviación de velocidad en Mq. Talara

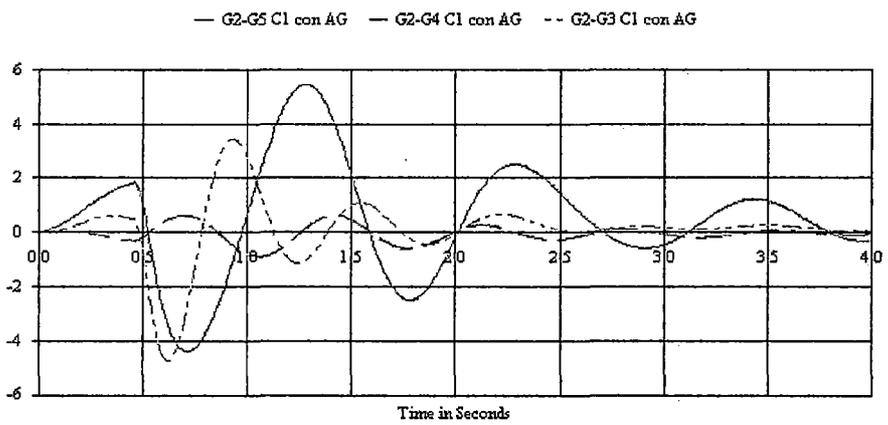
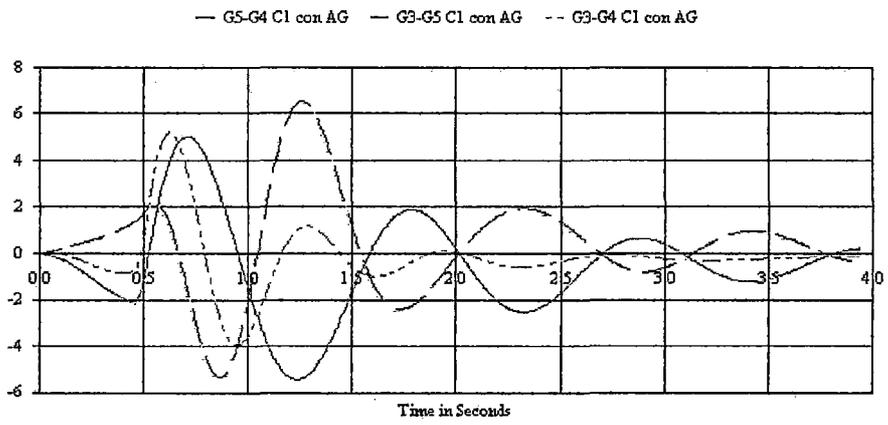
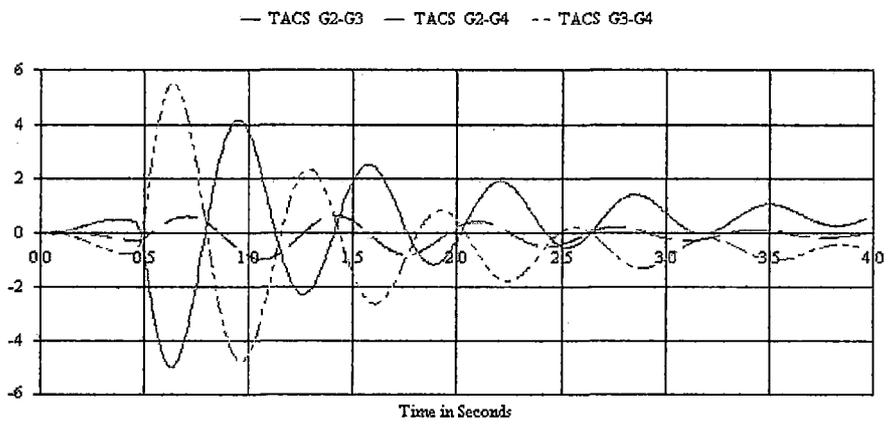


Fig. 5.39 Caso 1: Diferencia angular entre máquinas

Caso 2

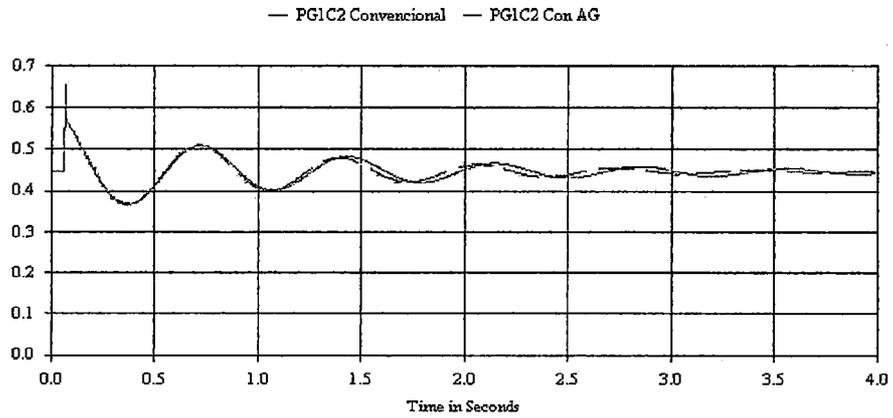


Fig. 5.40 Caso 2: Comportamiento de la potencia en Mq. Carhuaquero

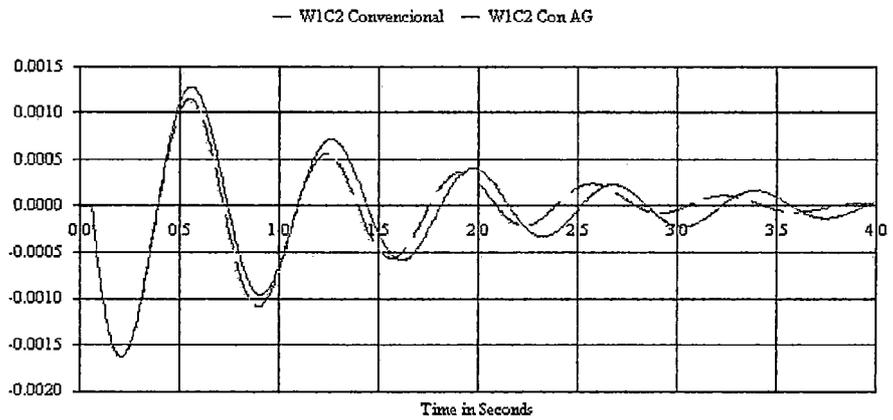


Fig. 5.41 Caso 2: Comportamiento de la desviación de velocidad en Mq. Carhuaquero

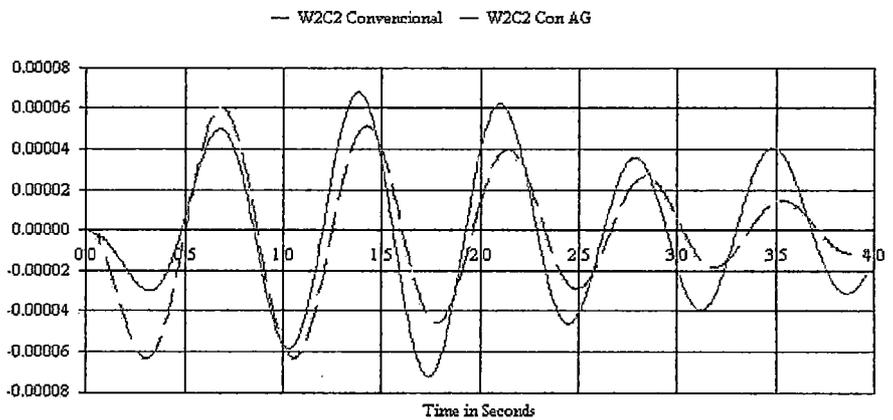


Fig. 5.42 Caso 2: Comportamiento de la desviación de velocidad en Mq. Cahua

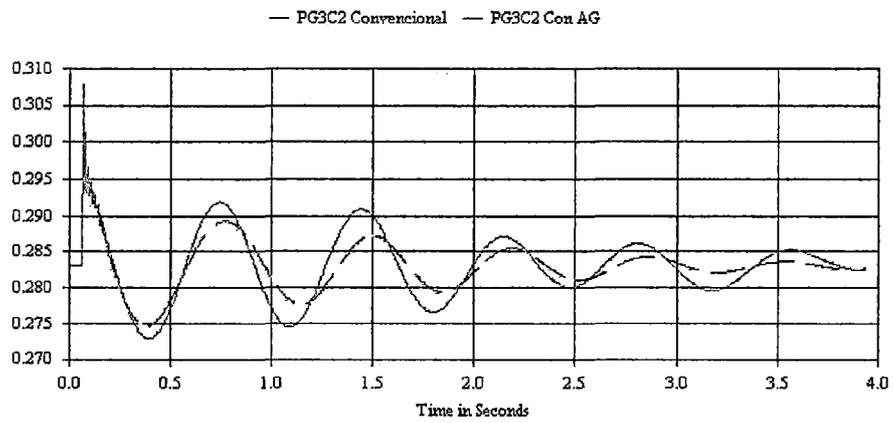


Fig. 5.43 Caso 2: Comportamiento de la potencia en Mq. C. Pato

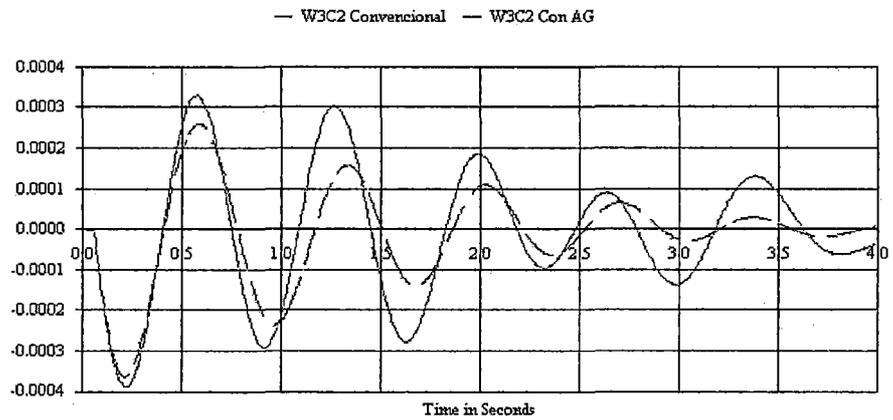


Fig. 5.44 Caso 2: Comportamiento de la desviación de velocidad en Mq. C. Pato

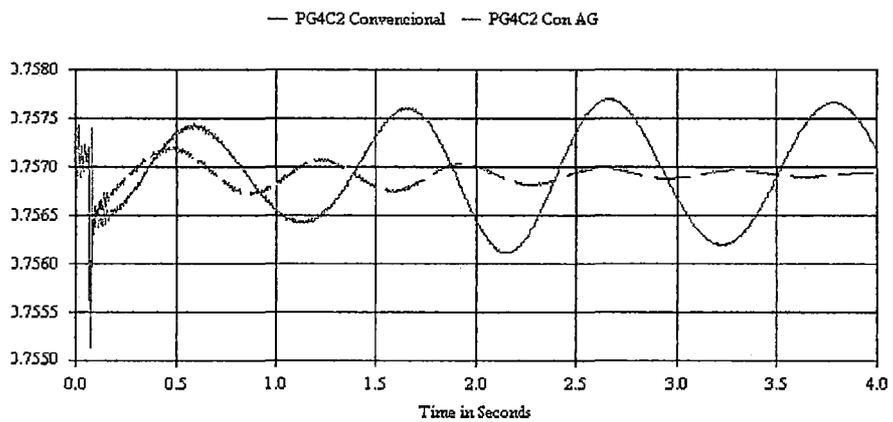


Fig. 5.45 Caso 2: Comportamiento de la potencia en Mq. Aguaytia

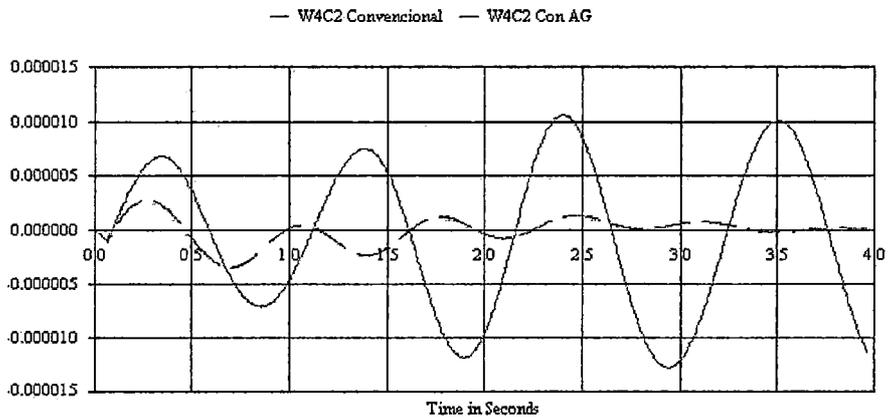


Fig. 5.46 Caso 2: Comportamiento de la desviación de velocidad en Mq. Aguaytia

Caso 3

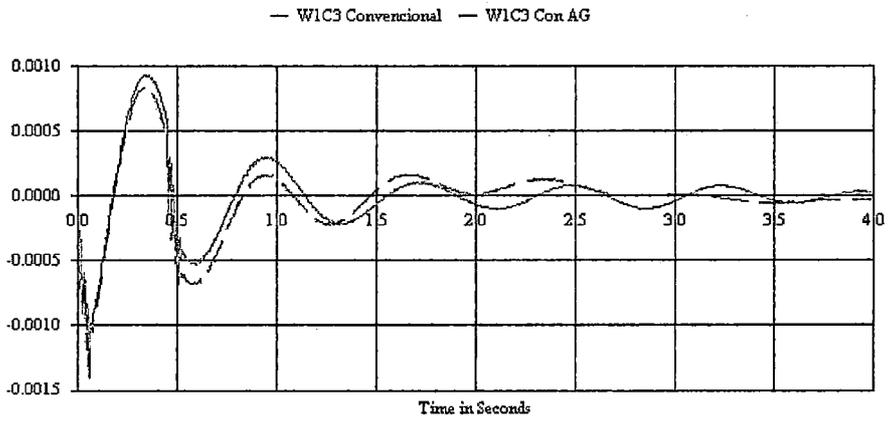


Fig. 5.47 Caso 3: Comportamiento de la desviación de velocidad en Mq. Carhuaquero

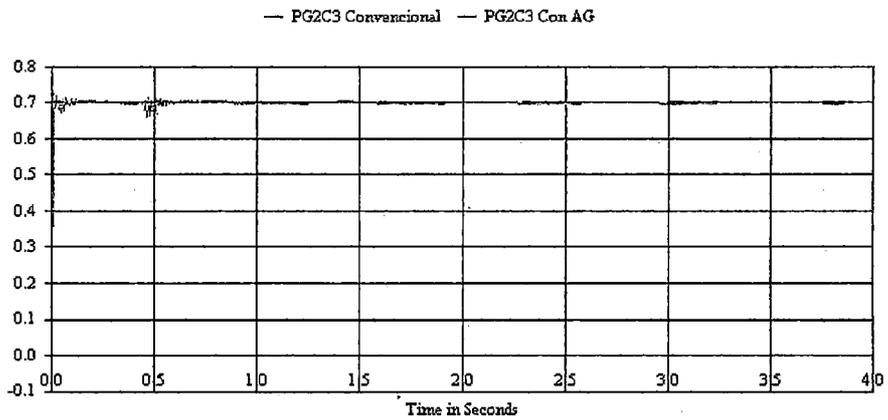


Fig. 5.48 Caso 3: Comportamiento de la potencia en Mq. Cahua

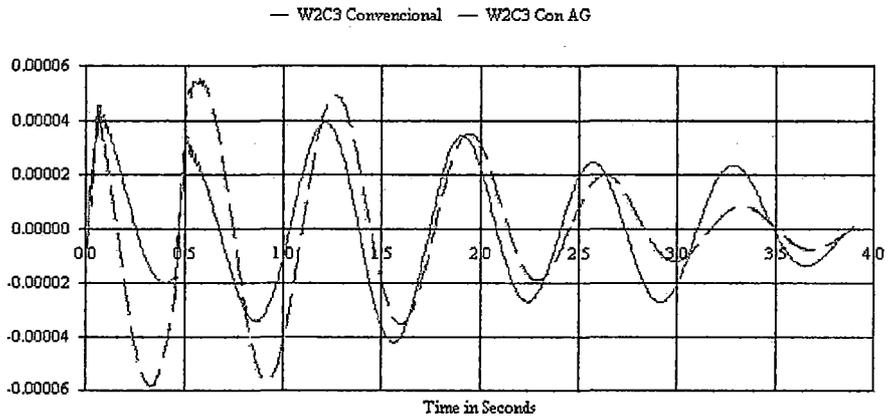


Fig. 5.49 Caso 3: Comportamiento de la desviación de velocidad en Mq. Cahua

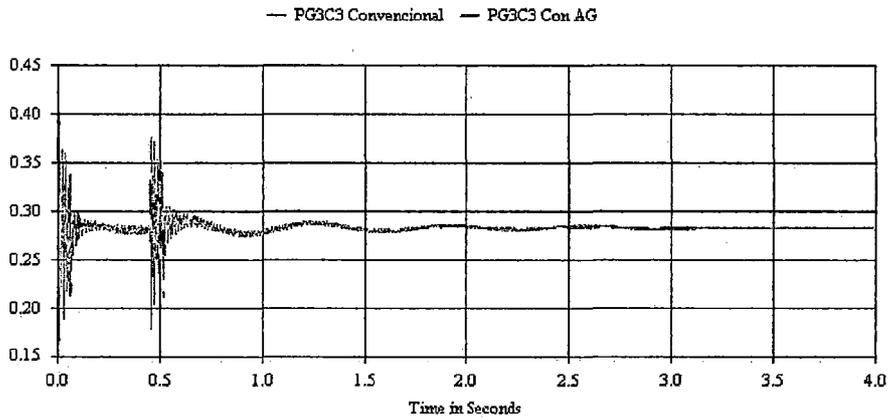


Fig. 5.50 Caso 3: Comportamiento de la potencia en Mq. C. Pato

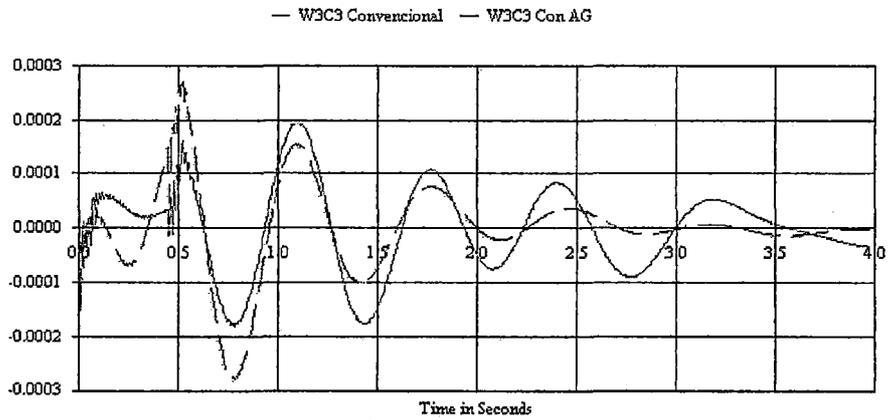


Fig. 5.51 Caso 3: Comportamiento de la desviación de velocidad en Mq. C. Pato

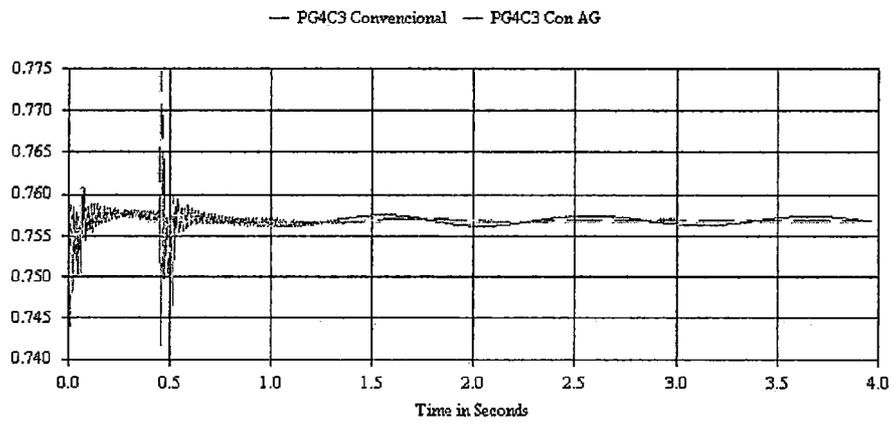


Fig. 5.52 Caso 3: Comportamiento de la potencia en Mq. Aguaytia

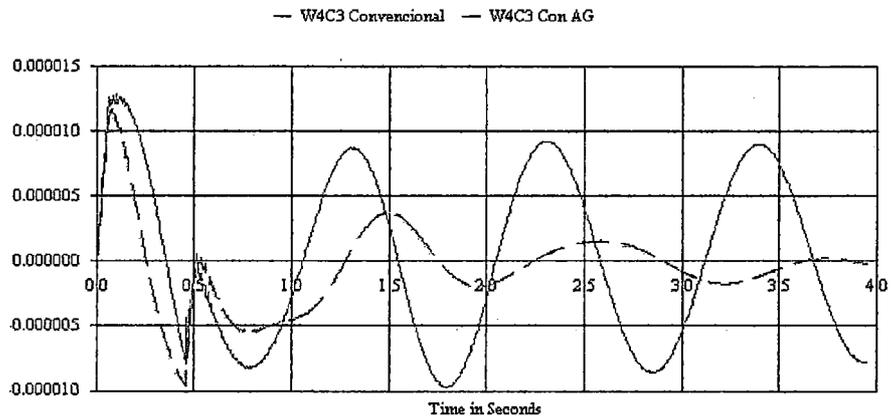


Fig. 5.53 Caso 3: Comportamiento de la desviación de velocidad en Mq. Aguaytia

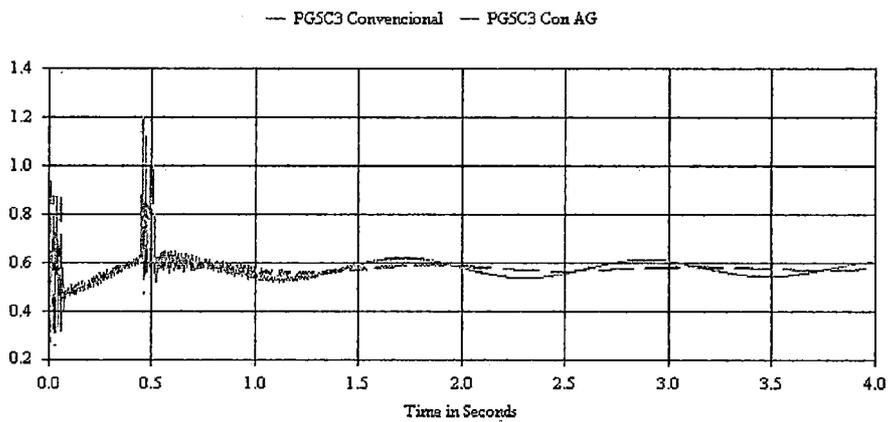


Fig. 5.54 Caso 3: Comportamiento de la potencia en Mq. Talara

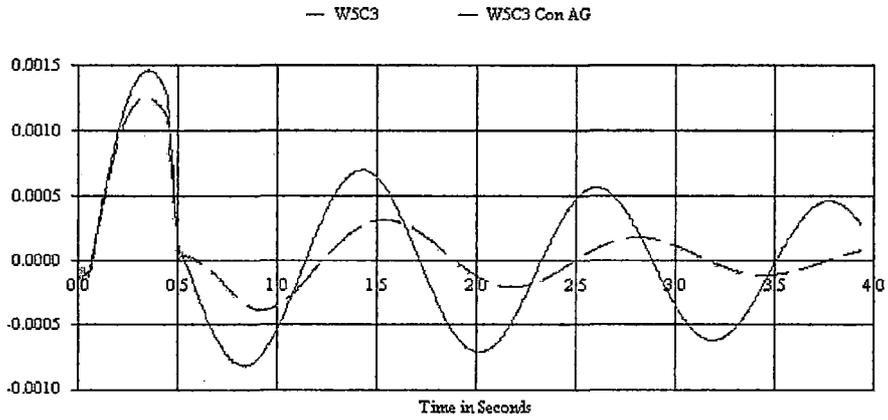


Fig. 5.55 Caso 3: Comportamiento de la desviación de velocidad en Mq. Talara

Caso 4

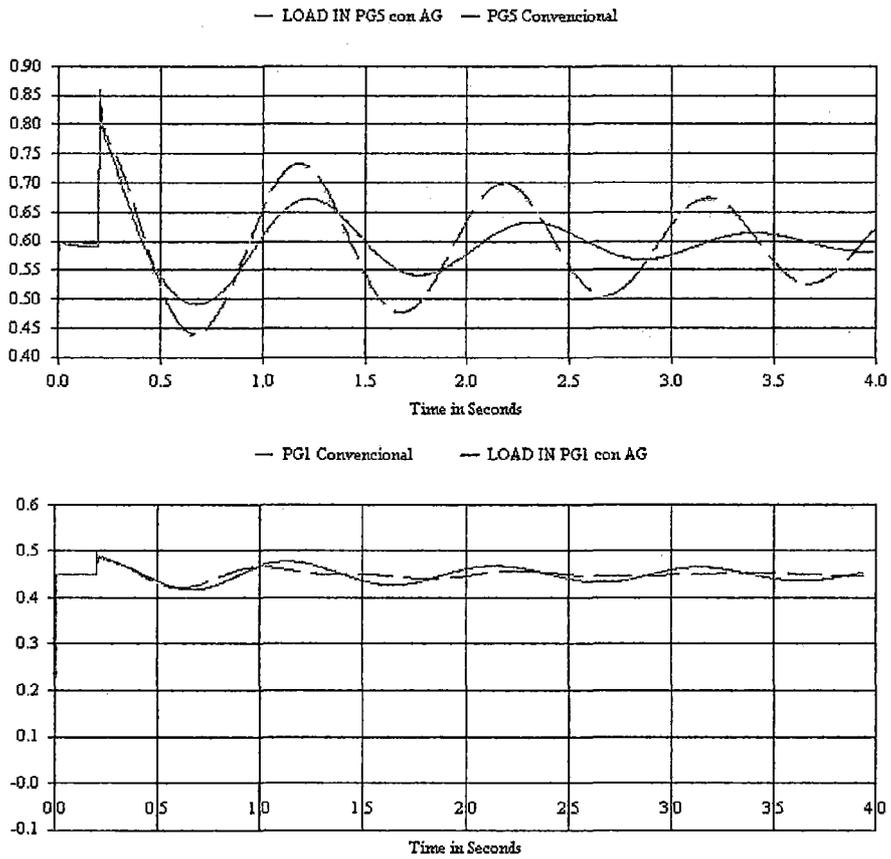


Fig. 5.56 Caso 4: Comportamiento de las potencias en las Máquinas

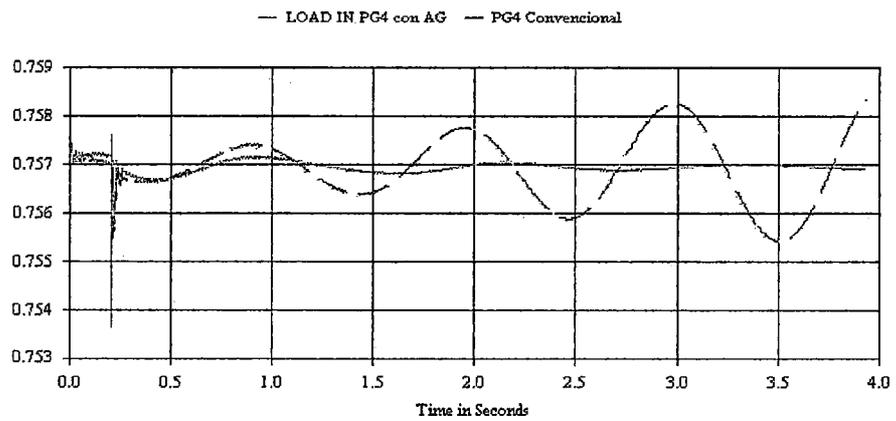
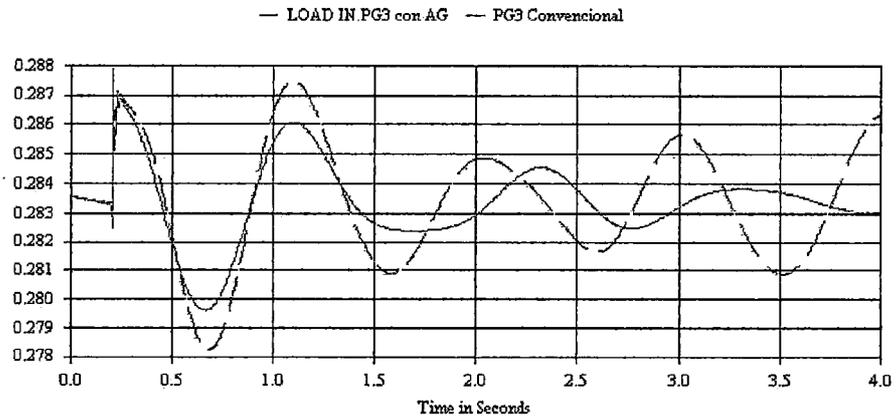


Fig. 5.57 Caso 4: Comportamiento de las potencias en las Máquinas

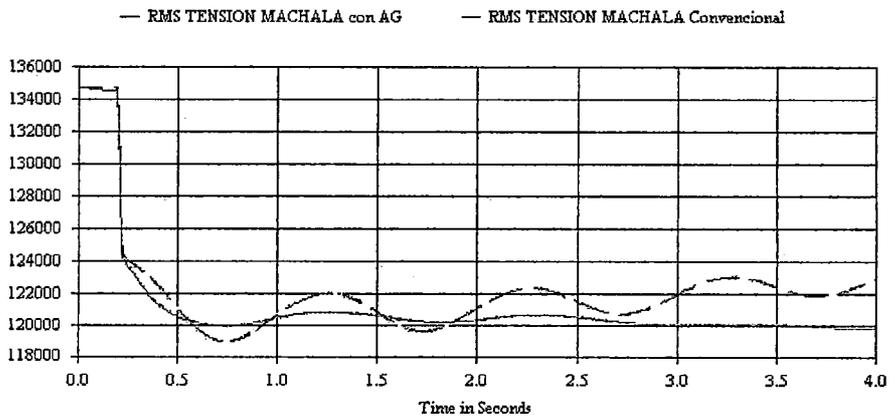
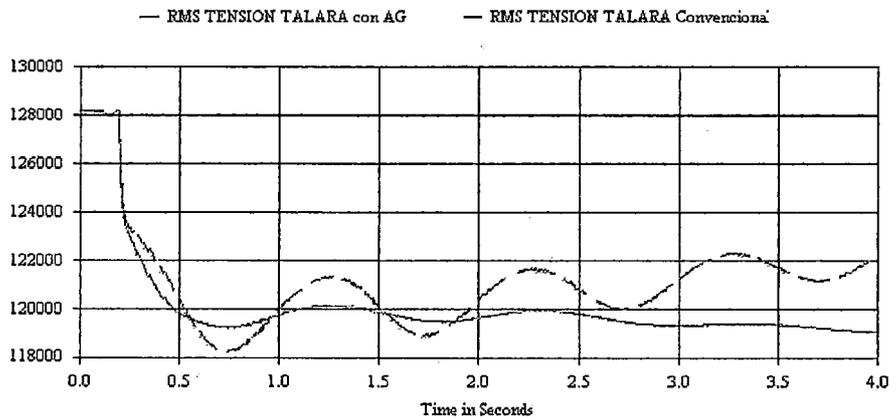


Fig. 5.58 Caso 4: Comportamiento de tensión RMS en Barras de Talara y Machala

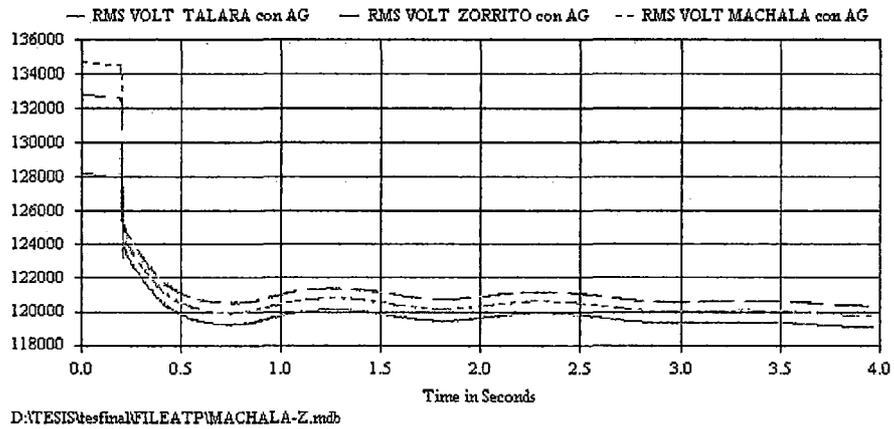


Fig. 5.59 Caso 4: Comportamiento de las tensiones en RMS en las Barras de Talara, Zorritos y Machala después de la energización.

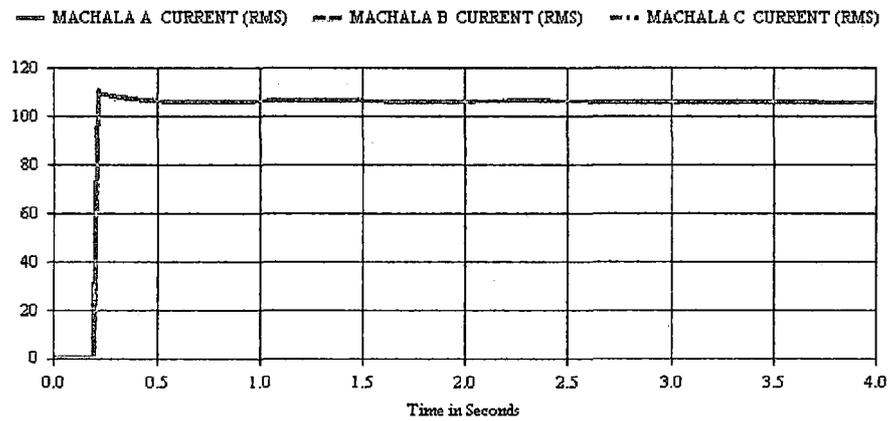


Fig. 5.60 Caso 4: Comportamiento de la Corriente en RMS en la Barra de Machala

Caso 1A y 3A

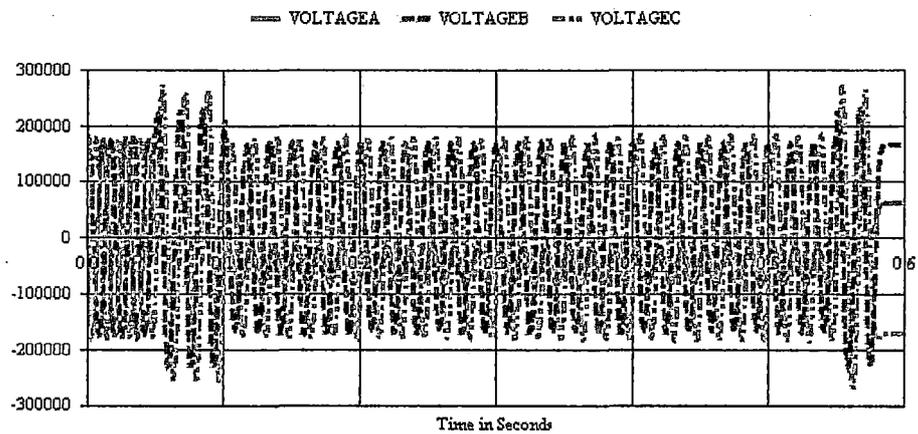


Fig. 5.61 Caso 1A: Comportamiento de la tensión de la Línea 240

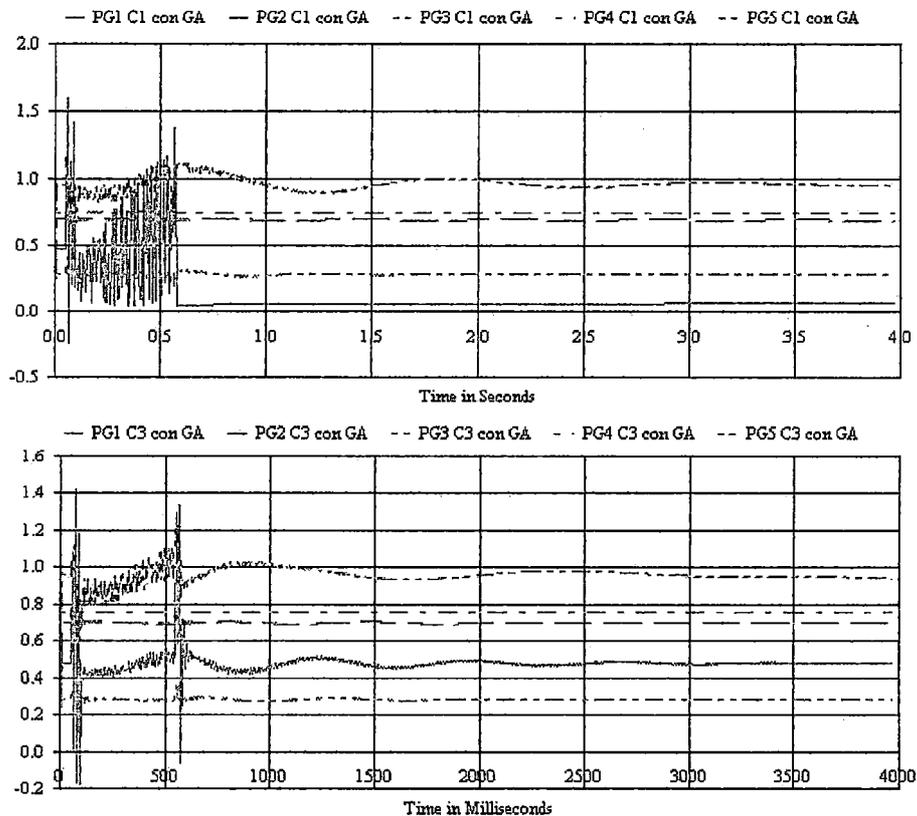


Fig. 5.62 Caso 1A y 3A: Comportamiento de la potencia en las máquinas

5.4 Discusión de Resultados

Como se aprecia en los resultados mostrados, el comportamiento inicial con los parámetros existentes según la Ref. [1] es superada tremendamente, amortiguándose cualquier tipo de oscilaciones en tiempo corto, resultado de la robustez de los parámetros obtenidos mediante la búsqueda aleatoria del GA para todos los casos de fallas simulados en esta aplicación (con características reales). Es importante señalar que el comportamiento de las máquinas que no tienen PSS es mejorado por el comportamiento robusto del sistema en conjunto, tal es el caso de Carhuaquero y Cahua, además se observan, para el caso 3, la máquina de Talara queda aislado y con los nuevos parámetros de PSS permanece en estado de operación óptima.

En el caso 4, por encontrarse medianamente distante (131 Km Zorritos a Machala) del sistema a la carga en Machala, en los resultados se observa las sobretensiones en el orden de 234 kV. En Machala con la Línea en vacío y una respuesta negativa frente al ingreso de la carga con una caída de tensión por debajo del set-point y posteriores oscilaciones quedando afectado directamente las máquinas de Talara, C. Pato y Aguaytia, superándose con los nuevos parámetros de PSSs.

5.5 Resumen

En este Capítulo se presentó el análisis de sistemas de potencia aplicando la metodología propuesta en este trabajo, en la primera parte se desarrolla la evaluación de la máquina de Aguaytia-Barra infinita a manera de valorar los efectos de los AVR y PSS, seguido por la evaluación de los resultados obtenidos por el método para su respectiva validación. En la aplicación 2 se logra obtener los resultados esperados mejorando el amortiguamiento frente a perturbaciones del sistema, la robustez de la metodología se logra analizando diferentes condiciones de operación cuyos modos de interés son seleccionados para trabajar tomando en cuenta estos modos para el cálculo de las sensitividades de primer y segundo orden que depende únicamente de los eigenvectores izquierdo y derecho de acuerdo a la función objetiva planteada en el Capítulo 4.

5.6 Referencias

- [1] CESI, RETE-A3/012472. “Informe Final Esquemas de rechazo de carga por subfrecuencia y por Mínima Tensión y de rechazo de Generación por sobre frecuencia”. COES-Perú, Marzo 2003
- [2] CESI. RETE-A2/041068. “Informe: Central Turbogas de Aguaytia (Perú)”. Para COES-Perú. 27 Enero 2003
- [3] SIEMENS PTD. “Proyecto de Modernización del sistema de protección del SICN, Cálculo de Flujo de Carga y Corto Circuito”. ETECEN, Nov. 2002.
- [4] PSS/E™ 26 “PROGRAM OPERATION MANUAL: VOLUMEN I”. PTI. U.S.A December 1998
- [5] Daniel W. Durbak, P.E., Louis N. Hannett “Initial Studies for the Interconnection of Cia. Minera Antamina Into the Aguaytia Energy del Peru SR Ltda./SICN 220 kV System at Vizcarra Substation”. Prepared for EDEGEL. PTI. Report No. 34-99 -June 25, 1999
- [6] László Prikler, Hans Kr. Høidalen “ATPDraw for Windows 3.1x/95/NT version 1.0,” User’s Manual Release No. 1.0.1 November 1998
- [7] Laurent Dubé, “USERS GUIDE TO MODELS IN ATP”, April 1996

CAPÍTULO 6

DESCRIPCIÓN DEL MODELAMIENTO EN ATP-DRAW Y MATLAB

6.1 INTRODUCCIÓN

En la última década, la ingeniería eléctrica ha sido facilitado enormemente gracias a la presencia de los paquetes de simulación de las redes eléctricas, siguiendo con esta tendencia, cada paquete de software tiene sus propias características y aplicaciones, mientras los usuarios cada día descubren nuevas necesidades que muchas veces no son satisfechas por los paquetes existentes, entonces existe la necesidad de utilizar dos o tres paquetes que se complementen para lograr eficiencia en el trabajo. En esta sección se describe el Modelamiento adecuado de los SEP, diseño de nuevos componentes y la interacción del ATP-Draw con el MatLab.

6.2 ATP-Draw, Descripción del programa

6.2.1 Alternative Transients Program (ATP).

Es un programa de fenómenos transitorios electromagnéticos más utilizados en simulaciones de transitorios y modelos no convencionales de componentes de sistema de potencia en el mundo; El desarrollo de este Programa se inicia con el *Dr. Hermann DOMMEL* en los 60s y luego con *Scott Meyer* con la versión M39 del programa EMTP (Electro Magnetic Transients Program), cedido a *Bonneville Power Administration (BPA)*, el cual fue como base de trabajo para *Frey y Althammer* (Brown Boveri, Switzerland), en Munique, Alemania. Existen programas similares así como el EMTDC, MICROTRAN, EMTP de EPRI, etc. Con la diferencia que el ATP es el único paquete de software libre disponible en cualquier parte del mundo, por tanto es necesario asignar al usuario con una licencia

de uso. El programa esta creado con lenguaje Borland Pascal 7.0 requiere el DBOS para poder ser ejecutado y se basa en la integración trapezoidal para resolver las ecuaciones diferenciales.

6.2.2 ATP-Draw.

Es un programa para el ambiente operativo DOS, en Borland Delphi 2.0, aunque emula un ambiente del tipo Windows, siendo imprescindible el uso del ratón. Está anunciado por su creador **Hans Kristian Høidalen** *Norwegian University of Science and Technology* una nueva versión, la cual si será para Windows. La versión más reciente del ATPDRAW es la 3.26, y es la última que se desarrollará para el ambiente DOS. En el ATP-Draw, existen más de 70 componentes estándares (Fuentes, transformadores, descargadores, ramas RLC, Tiristores, GTOs, IGBTs etc.) y 28 objetos TACS disponibles, pero además es posible incorporar modelos creados con MODELS ó con la opción 'DATA BASE MODULE' del ATP (componentes de control, protección, medida, HVDC, FACTS, etc.)

6.2.3 Instalación.

En forma resumida se sigue los siguientes pasos:

- 1) Ejecutar el archivo Autoexec.bat adjunto en el CD. Añadir la ruta que tiene el directorio 'atpdraw3' y 'armafit'
- 2) Descomprimir directamente el zip al disco duro manteniendo la estructura de directorios.

6.2.4 Modelamiento de Generadores Máquina Sincrona 59

En el ATP existen dos Componentes estándares que representan a la máquina sincrona real (SM) por sus siglas en ingles, el modelo SM58 (type-58) , es resuelto directamente en coordenadas de fase, y el modelo SM59 (type-59) , es resuelto mediante la transformación de PARK (Frame d-q.)

En este trabajo se utiliza el modelo SM59, para el cual resumo la base teórica para una adecuada comprensión tanto de los datos de ingreso, proceso, y la salida.

MODELO INICIAL DE LA MÁQUINA

El modelo actual de la máquina sincrona fue adicionado al EMTP en la década de los 70 por *Carlsen* Ref. [1], Consecuencia de una necesidad de realizar estudios de resonancia subsincrona (SSR), desde entonces el modelo ha sido actualizada y renovada constantemente en aras de perfeccionamiento. Hasta mediados de la década de los 90, existían apenas dos modelos capaces de representar una máquina sincrona, el modelo SM59 es una máquina universal, por lo tanto, es posible modelar tipos de máquinas usando el mismo componente (por ser un modelo de máquina generalizada). No obstante las contribuciones a este modelo se basan en las mismas ecuaciones del primer modelo.

El Modelamiento matemático se basa en las siguientes configuraciones: Componentes dinámicos de la máquina sincrona SM59 multi-masa (hasta 7 masas) disponible en ATP DOS para estudios de oscilaciones torsionales o resonancia subsincrona (SSR), sin embargo en el ATP-Draw solo se dispone de la máquina simple masa y no saturable.

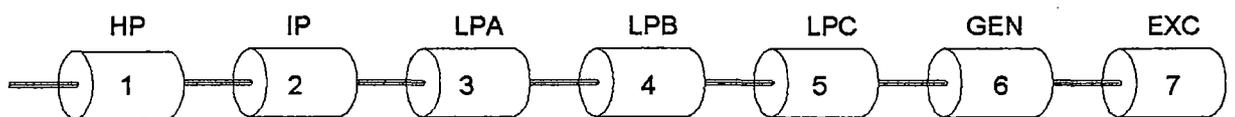


Fig. 6.1 Unidades de Turbina-Generador

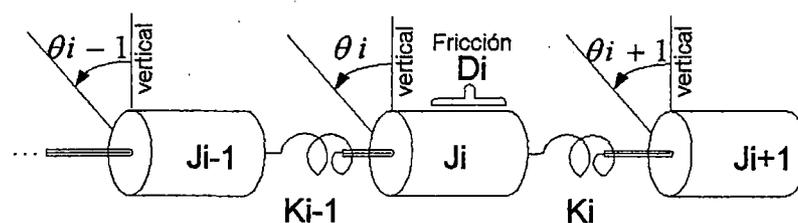


Fig. 6.2 Turbina-Generador componentes de alrededor de la masa.

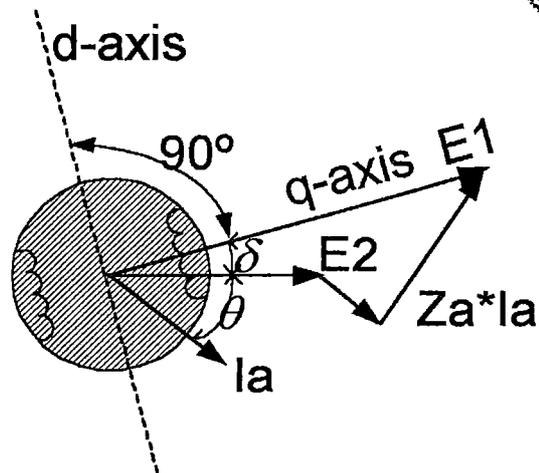


Fig. 6.3 Diagrama vectorial del MS59

Siendo $\theta_m = \omega t$ la posición de la máquina y ω la velocidad. Para llevar a una matriz constante se utiliza la transformación de Park's.

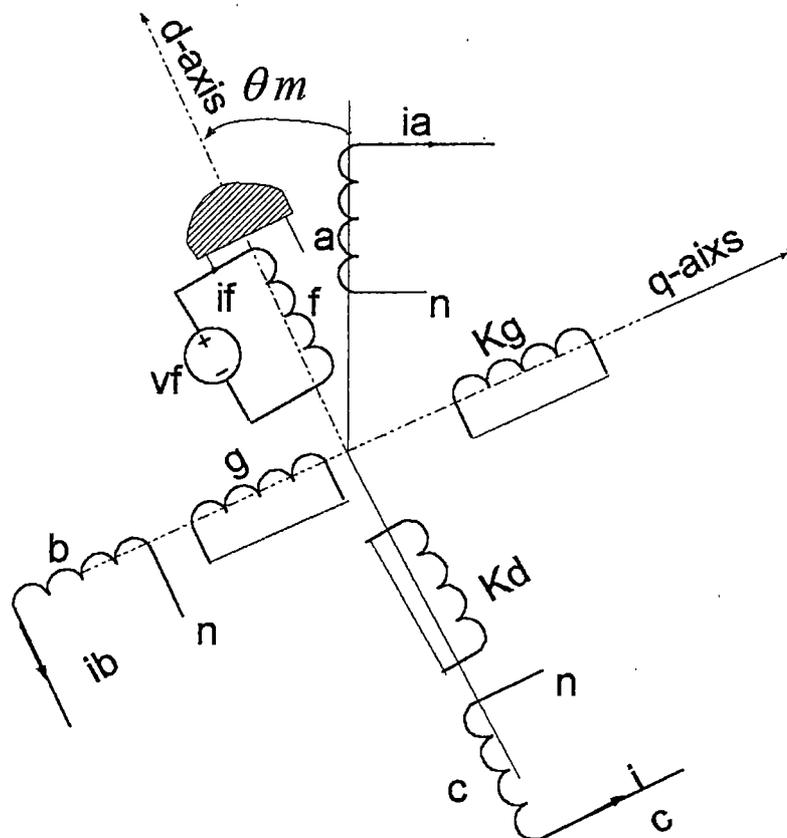


Fig. 6.4 Disposición de los devanados en una maquina generalizada.

Donde :

- n : Conexión al neutro en caso de que los arrollamientos de la armadura estuviesen conectados en Y a través de líneas R-L.
- θ_m : Ángulo mecánico del rotor (el Ángulo entre el eje d del rotor y el eje de la armadura en fase A.
- ia, ib, ic : Corrientes de armadura.

- if : Corriente de campo (corriente en el devanado N°1 en el eje directo del rotor.
- f, kd : Bobinado N°1 y N°2 en el eje directo del rotor.
- g, kq : Bobinado N°1 y N°2 en el eje de cuadratura del rotor.

Con una rotación en estado estable representado por:

$$\frac{d\theta_m}{dt} = -\left(\frac{2}{NP}\right) * 2\pi FREQ \quad (6.1)$$

De la Fig. 6.4 planteamos las siguientes ecuaciones:

$$v_d = -R_a i_d - \frac{d\lambda_d}{dt} - \lambda_q \frac{d\theta}{dt} \quad (6.2)$$

$$v_q = -R_a i_q - \frac{d\lambda_q}{dt} + \lambda_d \frac{d\theta}{dt} \quad (6.3)$$

$$v_o = -(R_a + 3R_n) i_o - \frac{d\lambda_o}{dt} \quad (6.4)$$

$$v_f = -R_f i_f - \frac{d\lambda_f}{dt} \quad (6.5)$$

$$0 = -R_g i_g - \frac{d\lambda_g}{dt} \quad (6.6)$$

$$0 = -R_{kd} i_{kd} - \frac{d\lambda_{kd}}{dt} \quad (6.7)$$

$$0 = -R_{kq} i_{kq} - \frac{d\lambda_{kq}}{dt} \quad (6.8)$$

$$T_{em} = \frac{NP}{2} (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \quad (6.9)$$

Reacomodando para obtener los valores de los flujos:

$$\begin{bmatrix} \lambda_d \\ \lambda_q \\ \lambda_o \\ \lambda_f \\ \lambda_g \\ \lambda_{kd} \\ \lambda_{kq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 & L_{af} & 0 & L_{akd} & 0 \\ 0 & L_q & 0 & 0 & L_{ag} & 0 & L_{akg} \\ 0 & 0 & L_o & 0 & 0 & 0 & 0 \\ L_{af} & 0 & 0 & L_f & 0 & L_{fkd} & 0 \\ 0 & L_{ag} & 0 & 0 & L_g & 0 & L_{gkd} \\ L_{akd} & 0 & 0 & L_{fkd} & 0 & L_{kd} & 0 \\ 0 & L_{akg} & 0 & 0 & L_{gkg} & 0 & L_{kg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \\ i_f \\ i_g \\ i_{kd} \\ i_{kq} \end{bmatrix} \quad (6.10)$$

Representamos la transformada de Park's

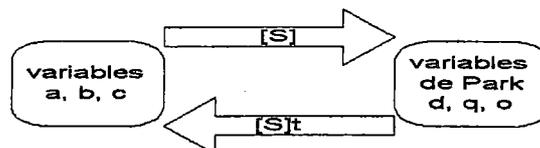


Fig. 6.5 Diagrama de Bloques para la transformación de Park's

Donde [S] está representada por:

$$[S] = \sqrt{\frac{2}{3}} * \begin{vmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \text{sen}(\theta) & \text{sen}(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \text{sen}(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{vmatrix} \quad (6.11)$$

Además se tienen:

$$\bar{Y}_{coil} = \begin{bmatrix} y_a \\ y_b \\ y_c \end{bmatrix} \quad (6.10)$$

$$\bar{Y}_{park} = \begin{bmatrix} y_d \\ y_q \\ y_o \end{bmatrix} \quad (6.12)$$

$$\bar{Y}_{park} = [S]\bar{Y}_{coil} \quad , \quad [S]^{-1} = [S]^T \quad (\text{ortogonal}) \quad (6.13)$$

Ecuaciones mecánicas básicas de la máquina:

$$\begin{aligned} T_k^{mech} - T_{em} = & H J_k \frac{d^2 \theta_k}{dt^2} + D_k \frac{d \theta_k}{dt} + DSR_M \left(\frac{d \theta_k}{dt} - 2\pi f \right) + DSM_{k,k+1} \left(\frac{d \theta_k}{dt} - \frac{d \theta_{k+1}}{dt} \right) \\ & + DSM_{k-1,k} \left(\frac{d \theta_k}{dt} - \frac{d \theta_{k-1}}{dt} \right) + HSP_{k,k+1} (\theta_k - \theta_{k+1}) + HSP_{k-1,k} (\theta_k - \theta_{k-1}) \end{aligned} \quad (6.14)$$

Donde:

J : Matriz diagonal de momento de inercia.

D : Matriz tridiagonal de coeficientes de amortiguamiento.

DSR : Coeficiente de amortiguamiento propio a la desviación de la velocidad $T_i = DSR(W_i - W_s)$

Donde: T_i torque de amortiguamiento bajo consideraciones de la masa número i , W_i es la velocidad angular de la masa, y W_s es la velocidad mecánica sincrona

DSM : Coeficiente de amortiguamiento mutuo de las masas, esta dado en función de la diferencia de velocidades de masas $i: i+1$. $T = DSM(W_i - W_{i+1})$

HSP : Constante de elasticidad entre las masas $i: i+1$. es to es utilizado en el modelamiento de turbina-máquina.

DSD : Coeficiente amortiguamiento propio a la velocidad absoluta. $T_i = DSDW_i$

Donde: T_i torque de amortiguamiento asociado ala masa numero i , y W_i es la velocidad angular absoluta de esta masa.

La ecuación (6.13) generalmente se utiliza hasta el segundo término de los sumandos, es decir incluyendo la constante de inercia y la constante de amortiguamiento.

6.2.4.1 Máquina síncrona 59 controlado

En el programa se dispone de dos modelos de SM59 estos son: SM59 controlada y no controlada de simple masa y no saturable. En ambos casos la información que requiere se clasifica en 7 clases de registros:

Clase 1: Se registra la ubicación, tensión, frecuencia y Ángulo para un tiempo inicial=0.

Clase 2: Opción para declarar el tipo de conexión en Triangulo, no obstante el programa asigna por defecto conexión en estrella. El PARAMETER FITTING (FM), señala al programa de como debe interpretar los parámetros eléctricos que se ingresan en el registro clase 3; Es como las clásicas reactancias y constantes de tiempo transitorios y subtransitorios permanentes o como inductancias en el sistema de coordenadas de Park.

Clase 3: Describen las características nominales de los parámetros eléctricos de la máquina.

Clase 4: Describen las características nominales de los parámetros mecánicos de la máquina, de las distintas masas que conforman el conjunto rotante de la máquina.

Clase 5: Para seleccionar el tipo de información relacionada con las variables de la máquina que serán almacenadas para su análisis respectivo.

Clase 6: La parte importante de este trabajo por involucrar el intercambio de la información entre la máquina y los controles a través de los TACS (sistema de excitación).

Clase 7: Opcional, indica la conexión en paralelo con otra máquina.

Los datos de la tarjeta de ingreso se puede obtener mediante el HELP del programa

Con respecto de los nodos de control a través de los TACS o MODELS se tiene la siguiente ilustración:

The figure shows a schematic diagram of a synchronous machine control system on the left, labeled 'AGUAYTIA'. It includes components like AVR, PSS, SM, RLC, and a motor symbol. To the right is a screenshot of the 'Component: Sm59_fc.sup' parameter window. The window has an 'Atributos' tab and a table of parameters.

DATA	VALUE	NODE	PHASE	NAME
Volt	11267.85	OUT	ABC	VT
Freq	60	TACS1	1	VFO
Angle	151.2	TACS2	1	OMEGA
Poles	2	TACS3	1	TQ
SMOVTQ	1	TACS4	1	
SMOVTQ	1	TACS5	1	
RMVA	238.4	TACS6	1	
RKV	13.8	TACS7	1	

Below the table, there are fields for 'Group No: 0', 'Label: AGUAYTIA', and 'Comment: EQ. AGUAYTIA 238.4MVA, 13.8KV'. There are also checkboxes for 'Hide' and 'Lock'. At the bottom, there are buttons for 'OK', 'Cancel', and 'Help'.

Fig. 6.6 MS59 Controlado con AVR, sistema de excitación Dinámica, PSS data IN. y nodos de control.

Se dispone de 8 nodos de intercambio de datos. (control y/o lectura de datos) para el ejemplo de la central de Aguaytia se tiene los siguientes:

TACS1 = Nodo TACS. Tipo de mando: 21 controla VFO, voltaje de campo

TACS2 = Nodo TACS. Tipo de mando: 19 extrae dato OMEGA, velocidad angular que alimenta al PSS canal $\Delta\omega$

TACS3 = Nodo TACS. Tipo de mando: 14 extrae dato TQ, torque electromagnética \diamond pot. Eléctrica que alimenta al PSS canal ΔP

Para el resto de los nodos remítase al Help del programa

6.2.4.2 Máquina sincrónica 59 no controlada

En este caso la máquina no dispone de nodos de control o extracción de datos, sin embargo dispone de las mismas tarjetas para el ingreso de datos.

6.2.5 Modelamiento de Transformadores trifásicos de 3 devanados

En esta parte del Modelamiento de las redes eléctricas se debe tener especial atención en la información técnica de los transformadores de potencia, principalmente en los datos obtenidos de las pruebas de vacío, corto circuito y el grupo de conexión del transformador. Para procesar los datos mencionados se dispone de una implementación de las rutinas TRAFOS3 y TRAFOS2.EXE desarrollado por el Ing. ORLANDO HEVIA – (Santa Fe-Argentina), esta rutina transforma dichos datos para ser ingresados a las tarjetas del componente estándar de transformadores de tres y dos devanados.

6.2.5.1 Cálculos Previos de parámetros con rutina de O Hevia

Se procede de la siguiente manera:

1. - Con los parámetros de placa y de prueba se modela en Wtrafo3.exe y se debe disponer de los siguientes datos:
 - a) Tensiones nominales de los devanados en kV.
 - b) Potencia nominal en MVA, dependiendo de los casos ya sea en ONAN, ONAF u OFAF.
 - c) Tensiones de corto circuito en una misma base: $V_{cc}(\%)$ AT-BT, AT-TERC, BT-TERC.
 - d) Grupo de conexión.
 - e) Corriente de vacío en Amp.
 - f) Pérdidas en el cobre en kW: AT/BT, AT/TERC, BT/TERC.
 - g) Pérdidas en el Hierro en kW.
 - h) Valores de la carga en el secundario en kW, kVAR
 - i) Valores de la carga en el terciario en kW, kVAR
 - J) Adicionalmente se debe de ingresar el nombre de la barra.

2. - Se obtiene como resultado un archivo como “nombre*.pch” con los parámetros para ingresar al programa, a través de atributos y características de dicho modelo del transformador;

6.2.5.2 Interpretación de los Archivos *pch

Se obtiene la siguiente disposición de los datos:

- | | |
|--|---------------|
| a) Corriente magnetizante en Amp. | Io |
| b) Flujo para la corriente Io en Wb. | Fo |
| c) Resistencias de los devanados en Ohm. | Rp, Rs, Rt |
| d) Inductancias de los devanados en mH. | Lp, Ls, Lt |
| e) Tensiones en los devanados por fase en kV | Vrp, Vrs, Vrt |
| f) 9 pares ordenados de la curva de magnetización, cuyos valores son en RMS o Amp. y Wb-T. | |

Como ejemplos se tiene:

Modelamiento del Transformador de 3 devanados: T12-211 y T18-11 ubicados en el SE. de Trujillo Norte

```

C ATP DATA
C PRIMARY RATED POWER          100.0000 MVA
C SECONDARY RATED POWER        100.0000 MVA
C TERTIARY RATED POWER         100.0000 MVA
C PRIMARY VOLTAGE              220.0000 KV
C SECONDARY VOLTAGE            138.0000 KV
C TERTIARY VOLTAGE             10.0000 KV
C FREQUENCY                    60.0000 HZ
C NO LOAD LOSSES               42.4000 KW
C SC LOSSES [1-2]              252.9000 KW
C SC LOSSES [2-3]              100.5000 KW
C SC LOSSES [1-3]              97.5000 KW
C SC IMPEDANCE [1-2]           6.7200 %
C SC IMPEDANCE [2-3]           21.9700 %
C SC IMPEDANCE [1-3]           30.4500 %
C CONNECTION Y Y D
C RESISTANCE RG                 1141509.3750 OHM
C      1           2           3           4           5           6
C 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
$UNITS,      60.0000,      0.0000
C TRANSFORMER                  io(A)   Fo(Wb-T) Nombre  RG
TRANSFORMER                    0.2660  248.15  TRUJTA  1.14+6
C 1111111111111111111122222222222222222222
0.266049713E+00 0.248151550E+03
0.136524773E+01 0.344210236E+03
0.467389584E+01 0.440268890E+03
0.125383453E+02 0.536327576E+03
0.171961155E+02 0.571777771E+03
0.285760231E+02 0.632386230E+03
0.579526558E+02 0.728444946E+03
0.839453812E+02 0.784479126E+03
0.119636162E+03 0.793643433E+03
9999
C 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C AAAAAABBBBBB                R(ohm) L(mH) KV(L-N)
1TRUJ1A                        0.6048 36.773 127.02
2TRUJ2A                        0.2437 1.680 79.674
3TRUJ3ATRUIJ3B                 .0008 0.6856 10.000

```

```

C 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
  TRANSFORMER TRUJTA                                TRUJTB
  1TRUJ1B
  2TRUJ2B
  3TRUJ3BTRUJ3C
C 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C AAAAAABBBBBB 11111222222333333
  TRANSFORMER TRUJTA                                TRUJTC
  1TRUJ1C
  2TRUJ2C
  3TRUJ3CTRUJ3A
C
C CARGA 23.4000 MW + J 17.7000 MVAR
C
      TRUJ2A                                517.661038.7
      TRUJ2B                                TRUJ2A
      TRUJ2C                                TRUJ2A
C CAPACITANCES TO GROUND FOR THE TRIANGLE
      TRUJ3A                                0.0100
      TRUJ3B                                TRUJ3A
      TRUJ3C                                TRUJ3A
C -----
$UNITS, -1.0000, -1.0000

```

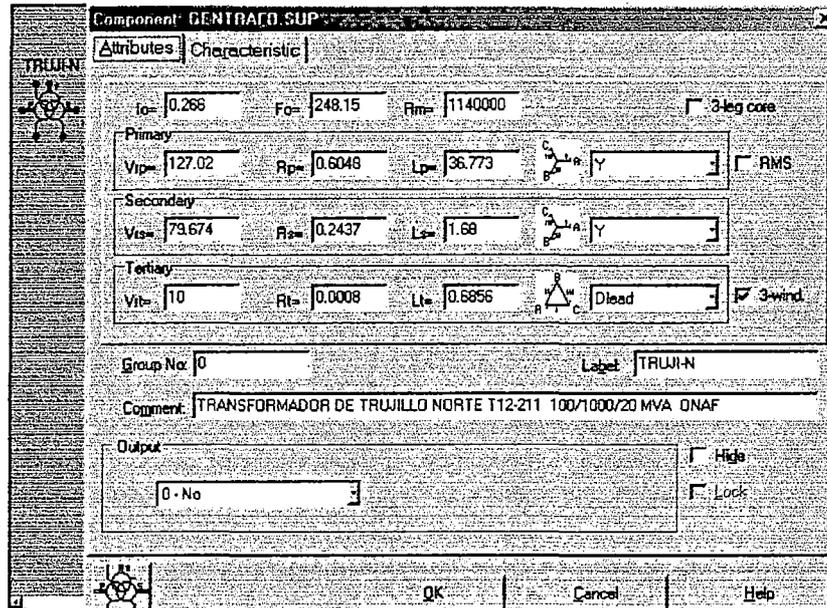


Fig. 6.7 Ingreso de atributos y características

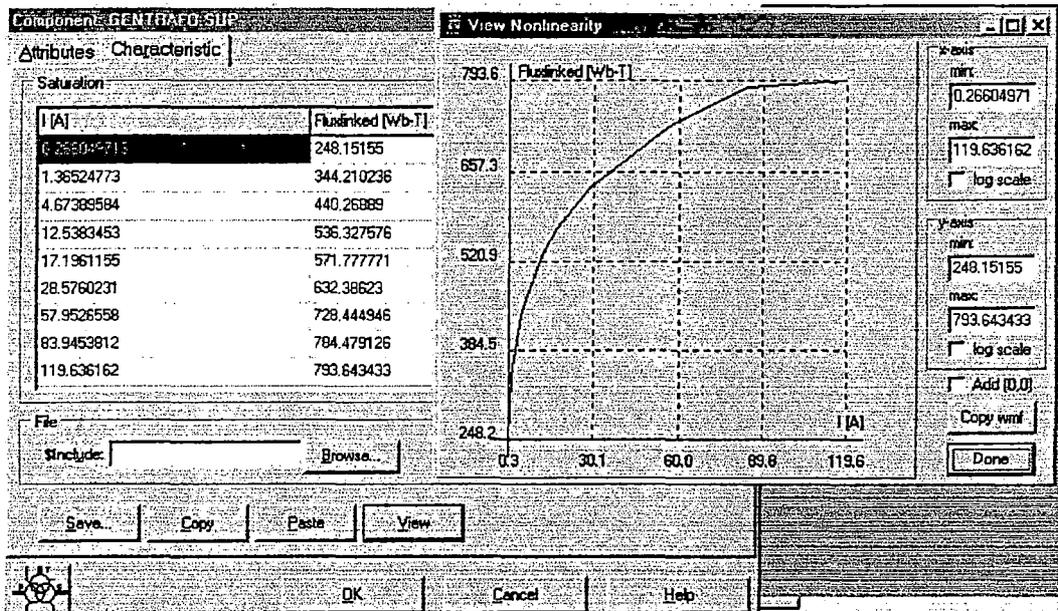


Fig. 6.8 Curva de saturación del transformador de 3 devanados ubicado en la SE. de Trujillo Norte

6.2.6 Modelamiento de Líneas de Transmisión.

El ATP-Draw posee diferentes elementos que representan modelos de líneas para cada necesidad, entre los más principales tenemos:

- 1) Modelo PI.
- 2) Modelo de parámetros distribuidos constantes (o de K. C. Lee)
- 3) Modelos dependientes de la frecuencia basados en la descomposición modal (LCC)
 - a) SEMLYEN SETUP
 - b) JMARTI SETUP
- 4) TAKU NODA SETUP model.

En este trabajo se utiliza el modelo de JMARTI SETUP. Que aproxima la impedancia característica y la constante de propagación. Este modelo de parámetros variables es el más utilizado en líneas aéreas.

6.2.6.1 Interpretación de Setup J-Marti

Para una mejor ilustración nos apoyamos con las siguientes gráficas extraídos del modelo de Línea 251TMARIA-AGUYTIA 73.29 km

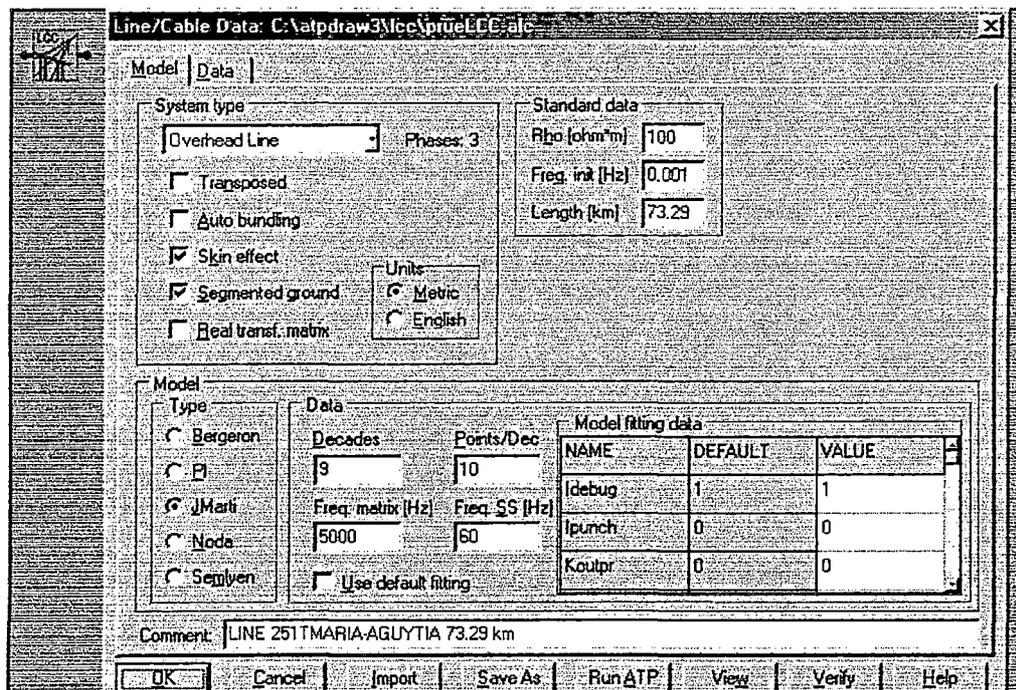


Fig. 6.9 Ingreso de atributos y características de JMARTI SETUP

Como se observa en la figura, se sigue los siguientes pasos: a) Se elige el tipo de sistema a modelar, en esta caso se trata de una Línea aérea, b) si la Línea es transpuesta indicar en transpose (es necesario para obtener perfiles de tensión equilibrada) c) Auto bundling, si es indicado es habilitado en forma automática las características del aislamiento (El setup, no es recomendable para el Modelamiento de cables), d) Seg. Ground, indica que cable de guarda es aterrado en forma distribuida, e) Skin effect, considera el efecto skin en los conductores, f) Real traes. Matriz, se considera que la matriz de transformación es real, los eigenvectores de la matriz de transformación son rotados alrededor del eje real para que la parte imaginaria sea despreciada (Recomendable para estudios transitorios), g) FREC. INIT, frecuencia inicial para el cual la rutina procesa a partir de dicho valor (Es necesario iniciar desde un valor pequeño para obtener parámetros de línea semejantes al modelo PI), h) Rho., Resistividad del terreno al pie de

torre(Es muy importante ingresar valores apropiados para obtener parámetros de línea que se ajusten a la realidad), i) Length, longitud de la Línea, j) en el modelo de JMARTI se debe de indicar las décadas y la cantidad de puntos por década a graficar, la frecuencia para la matriz de transformación generalmente es la del sistema.

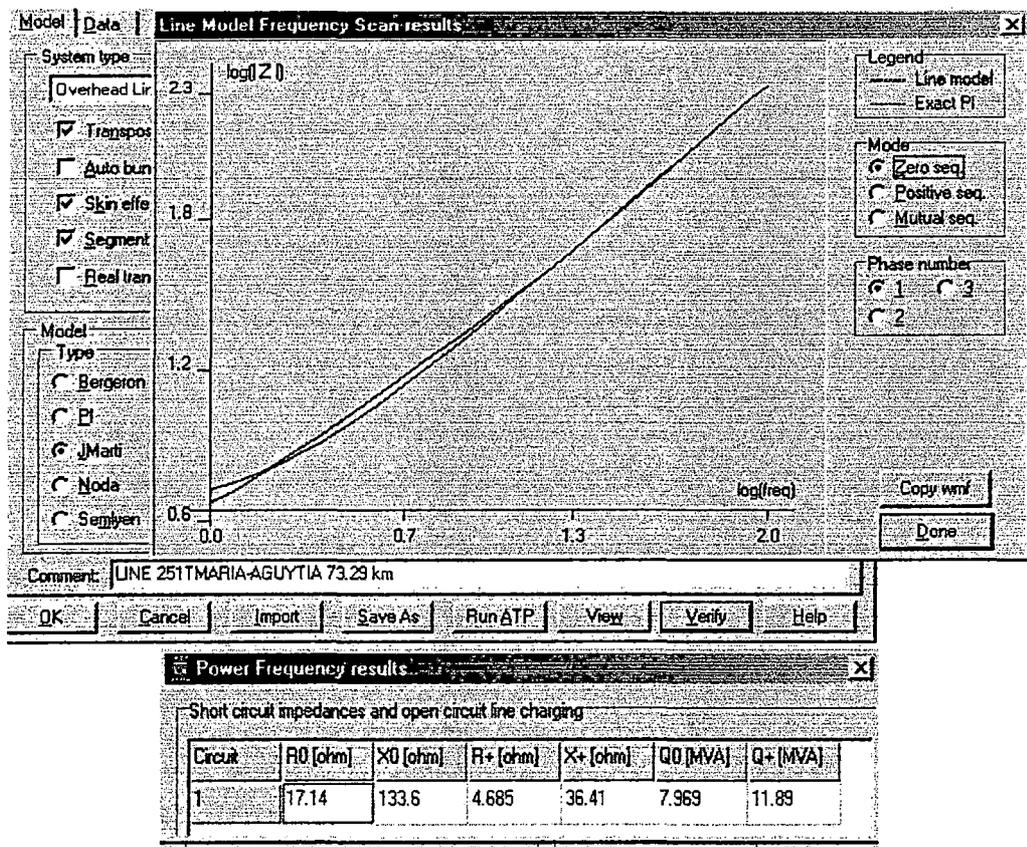


Fig. 6.10 Resultado del cálculo de parámetros de la Línea, Comparación del comportamiento del modelo con respecto al modelo tipo PI

Se puede apreciar los parámetros eléctricos y la capacidad activa y reactiva de la Línea calculados a partir de las características eléctricas y disposición geométrica de los conductores, además se aprecia el comportamiento de Z con respecto a la frecuencia tanto para secuencia positiva y cero de la Línea comparado con el modelo exacto PI.

6.2.6.2 Interpretación de los archivos *pch

Luego de ejecutar la rutina se genera automáticamente los siguientes archivos: *ATP, *LIS, *LIB, y uno intermedio *pch. Que enseguida se muestra el ejemplo de Línea 251TMARIA-AGUYTIA 73.29 km y se identifican los parámetros

```
BEGIN NEW DATA CASE
JMARTI SETUP
$ERASE
BRANCH IN__AOUT__AIN__BOUT__BIN__COUT__C
LINE CONSTANTS
METRIC
  VMid= Altura del conductor en medio tramo  $h = (VTOWER + 2 VMID)/3$ ,
  Prom.
C < Sk>< Rcc ><>          < Diam >< Horiz>< VTow >< VMid >
  10.353  0.059 4          3.168  5.15  30.3  20.19
  20.353  0.059 4          3.168  5.15  24.05  13.94
  30.353  0.059 4          3.168 -5.15  24.05  13.94
  0 0.5    4. 4            2.08  4.15  35.   25.49
  0 0.5    4. 4            2.08 -3.15  35.   25.49
BLANK CARD ENDING CONDUCTOR CARDS
Resistividad                long. L.   Dec.
Punto/Dec.
  100.      5.E3(frec. Matriz)      73.29   1
1-9
  100.      60.(Frec.S-S(Hz))      73.29   1
1-9
  100.      0.001(Frec.Ini)        73.29   1   9 10
1-9
```

6.2.7 TACS, Descripción de. (Transient Analysis of Control Systems)

El programa dispone de dos alternativas básicas Para una simulación de sistemas de control o para modelar elementos no convencionales representados por los TACS y MODELS (General Purpose Simulation Tool), que serán descritas en la próxima sección; estas herramientas fueron desarrolladas por *Laurent Dubé* para interactuar entre dos sistemas dinámicos de control y componentes de redes eléctricas siendo los controles descritos en forma de diagrama de bloques de componentes básicos de funciones de transferencia o programados en FORTRAN las expresiones lógicas y algebraicas, estas ecuaciones son resueltas en dominio del tiempo mediante la integración trapezoidal, se puede

implementar todo tipo de control hasta los dispositivos modernos así como los FACTS, HVDC, DRIVERS, relés de protección, etc.

6.2.7.1 Desarrollo de Controladores utilizando los TACS

Para efectos del trabajo se desarrolla elementos de control de excitación, y el estabilizador del sistema de potencia, así como se muestra en el siguiente diagrama de bloques.

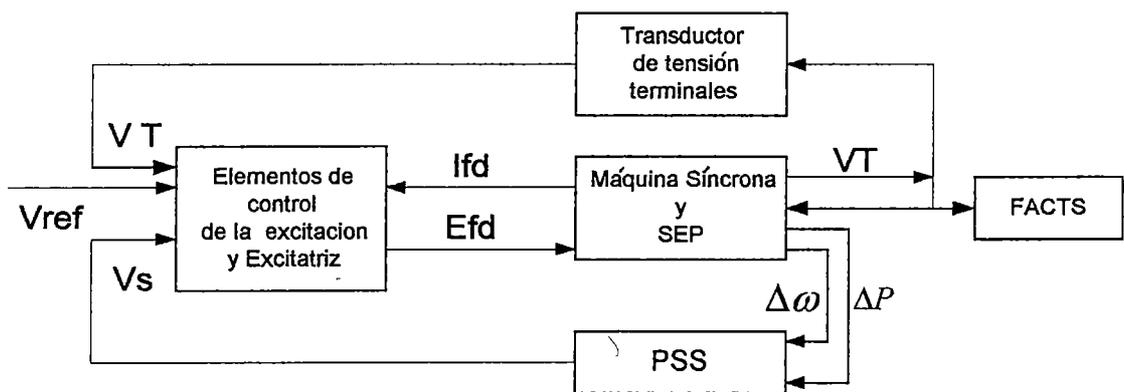


Fig. 6.11 Diagrama de Bloques para el control de la SM59

La representación en el programa se muestra en la siguiente figura.

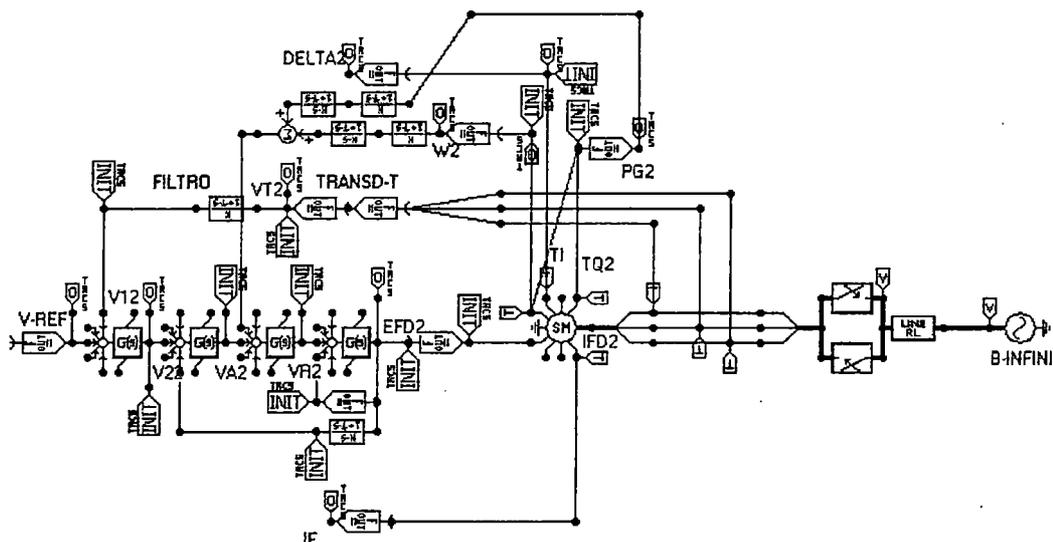


Fig. 6.12 Modelo representado en ATP-Draw (CT Aguaytia)

Las combinaciones de los elementos a utilizar dependen de las necesidades o el dispositivo a diseñar, en este caso la etapa de control del regulador de

tensión, señales estabilizantes para la central turbogas de Aguaytia se ilustra en la siguiente Fig. de Ref. [11].

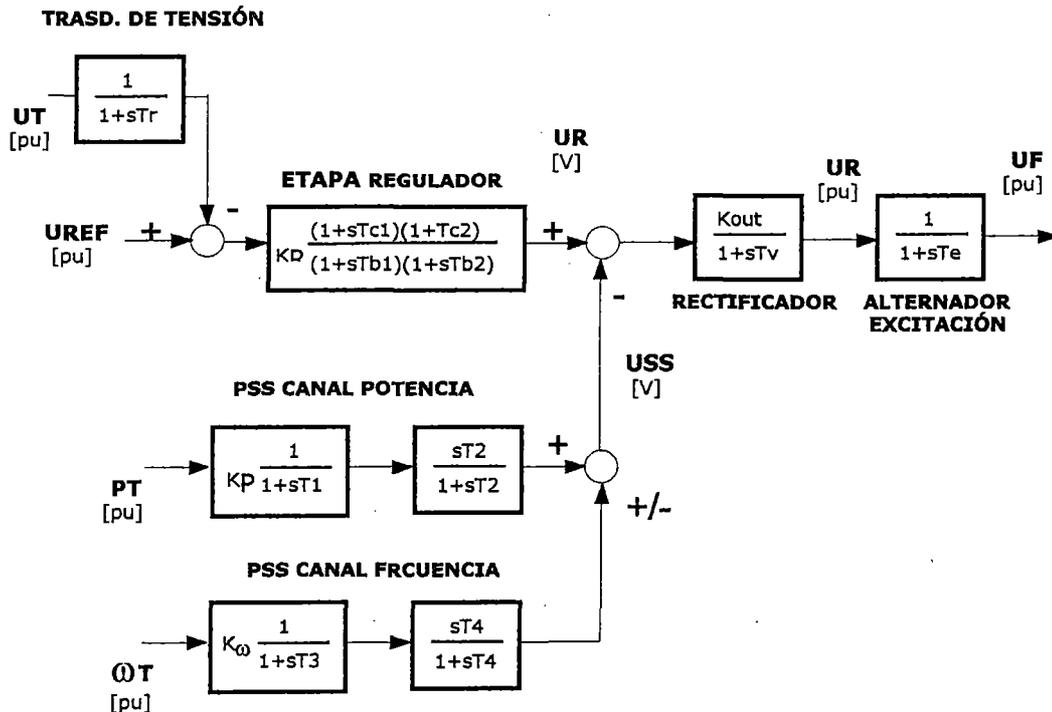


Fig. 6.13 Esquema a bloque del lazo principal del regulador de tensión

De las Figuras 6.13-14 se describe el sistema excitatriz, que esta compuesto de:

- a) Modelo general de funciones de transferencia correspondiente a TACS que tiene su salida como

$$OUT(s) = Gain * \sum(inputs) * (N_0 + N_1 * s + N_2 * s^2 \dots) / (D_0 + D_1 * s + D_2 * s^2 \dots)$$

Con posibilidades de soportar una función de transferencia de 7mo orden hasta con 5 entradas de señales codificados con 1 si es señal positiva, 2 si es señal negativa y 3 si se trata de una señal discreta.

- b) Compuesto de filtros pasa altos y pasa bajos, que tiene una salida como $OUT = K * s / (1 + \tau * s)$. Y $OUT = K / (1 + \tau * s)$ respectivamente.
- c) Inicializadores, que toma valores ingresados para $t=0$.

El nodo que alimenta la señal procesada debe codificarse con 21 si se trata de controlar el voltaje de campo y 22 si se trata de controlar la potencia mecánica suministrada a la máquina.

En general la interfase TACS-SM59 tal como se ha indicado en la sección 6.2.4.1 es como sigue:

Código	Parámetro
90	Voltaje
91	Corriente
92	Variables SM59
IN/OUT	Parámetro SM59
71	Controla Vfo
72	Controla P. Mec.
73	Extrae Variable Elec.
74	Extrae Variable Mec.

Tabla 6.1 Descripción de los Códigos de interfase.

6.2.7.2 Programación Fortran en TACS para el PSS

Existen modelos de PSS que requieren programar y se tiene que hacer en Fortran, por ejemplo el modelo IEEEEST de Power Technologies, Inc. Todo requerimiento de programación se hace mediante el elemento general para Fortran



por ejemplo para los transductores se tiene:

$\Delta w = (\text{OMEGA2} - \text{OMEGAR}) / \text{OMEGAR}$: Estima la desviación de velocidad
 $\text{PG} = \text{TQ2} * \text{OMEGA2}$: Estima la potencia eléctrica
 $\text{VT} = \text{SQRT}(\text{SCVT2}) / 10000.0$: Valor por unidad de la tensión borne
 $\text{DELTA} = (\text{NPP} * \text{TITA} - \text{OMEGAR} * \text{TIMEX} - \text{PI} / 2) * 180.0 / \text{PI}$: Ángulo eléctrico, etc.

Las variables *Omega*, *Omegar*, *Unity*, etc. son variables propios del programa.

Se tiene el modelo IEEEEST de [12]

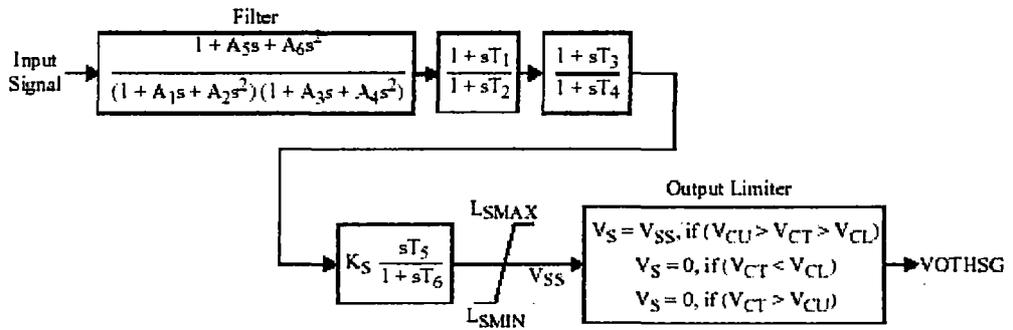


Fig. 6.14 Diagrama de bloques del PSS modelo IEEEEST.

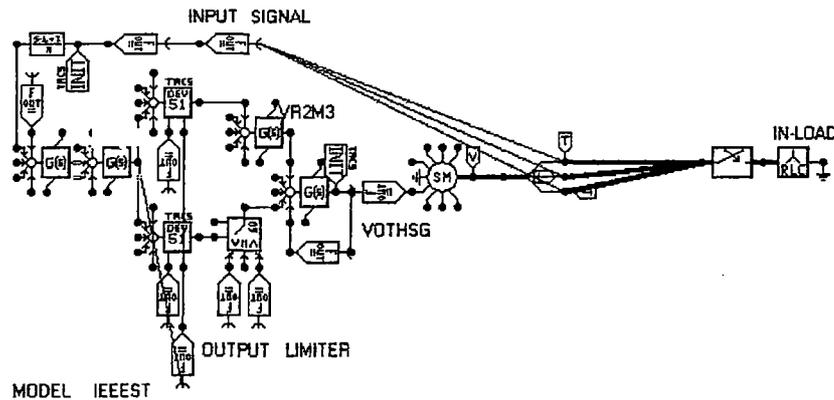


Fig. 6.15 Modelo representado en ATP-Draw

Se ha utilizado el modelo general fortran para decidir la señal de salida en función de VCU, VCT, VCL. En los cuales las señales permanecen cuantificadas como VS=VSS, VS=0 y son transferidas a través del elemento estándar 60 de los TACS.

6.2.7.3 *Ventajas y desventajas de los TACS, posibilidades de desarrollar Prototipos.*

Mediante los TACS se puede desarrollar cualquier tipo de elementos o dispositivos de control, el usuario avanzado que inicia con el diseño de sus propios dispositivos, es preferible que lo haga con los TACS, una vez dominado estos, le será mucho más fácil entender el MODELS.

En la ingeniería se requiere de nuevos elementos con características de acuerdo a las necesidades, esta herramienta es adecuado para simular estos dispositivos, en este caso, un ejemplo ilustrativo, he diseñado el control de

un enlace AC-DC-AC cuya aplicación es múltiple por ejemplo, en los clásicos control vectorial de un motor de inducción de acuerdo a las necesidades de la industria, para una interconexión dc a través de BACK TO BACK, a los dispositivos FACTS (UPFC, IPFC), etc.

La estrategia de control esta basado en la siguiente figura.

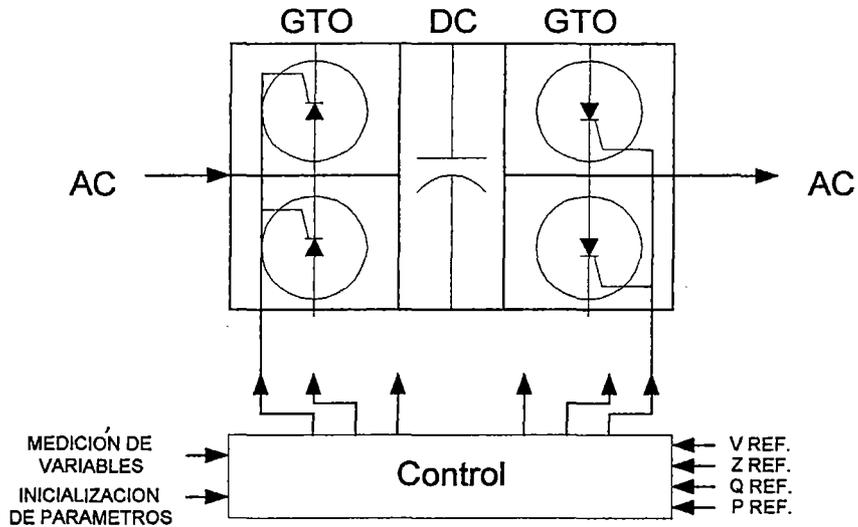


Fig. 6.16 Diagrama esquemático del convertidor AC-DC-AC

La representación en el ATP-Draw se ilustra en parte, en la siguiente Fig.

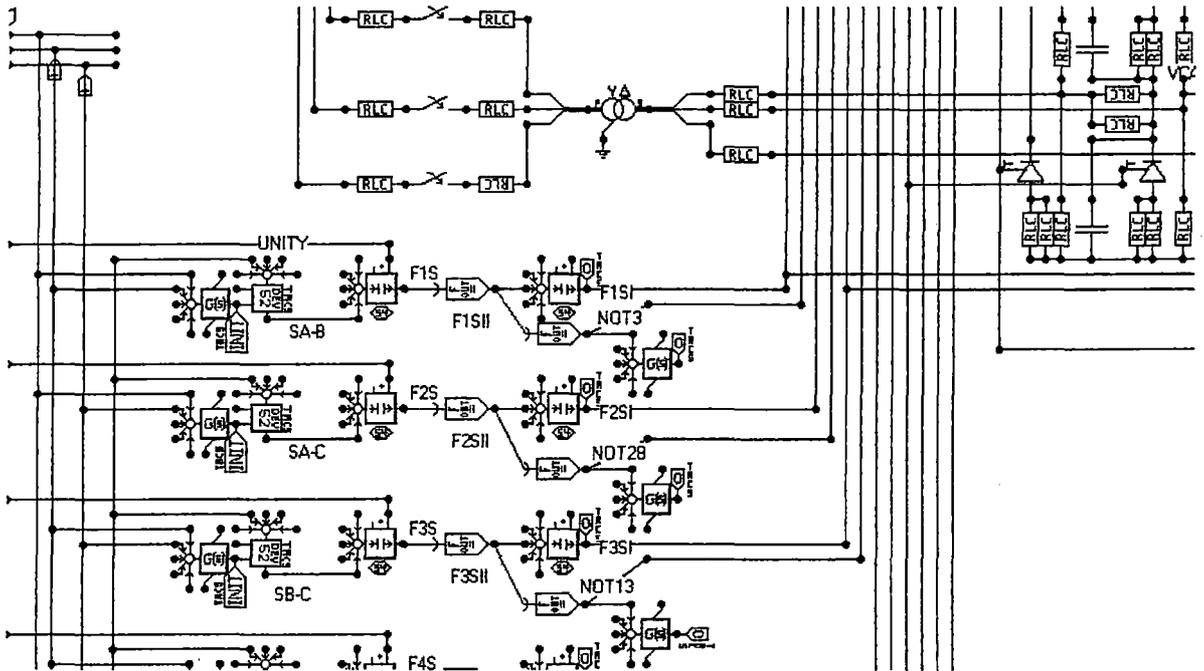


Fig. 6.17 Diseño del control de AC-DC-AC mediante el TACS (Parte de un sistema BACK to BACK de 24 pulsos)

Se trata de control de conmutación de los GTO para una conversión de 24 pulsos, basándose en los parámetros de referencia.

En este caso se utilizan los elementos estándares 52 y 54 complementados con la programación FORTRAN, a través de los elementos generales 88, el Ángulo de disparo α y el intervalo de disparo μ es controlada por el elemento 54.

Parte de los resultados se muestran en la siguiente Fig.

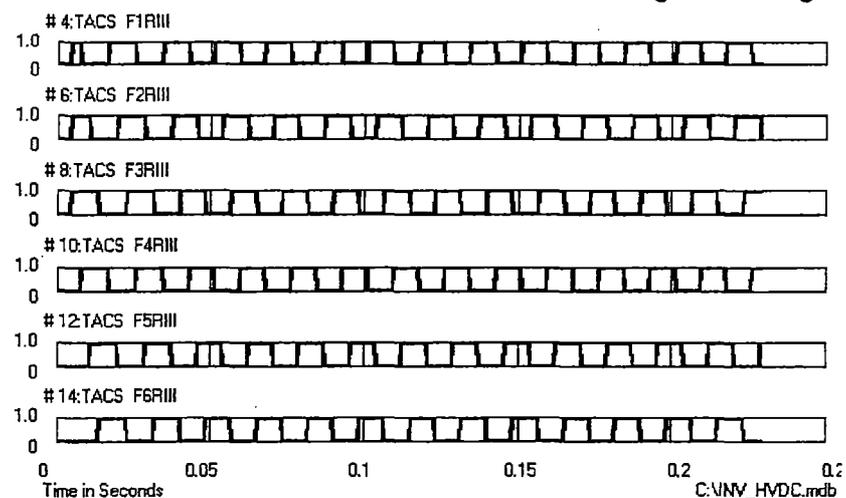


Fig. 6.18 Algunos pulsos de disparo de conmutación para los GTO

En resumen Las características más importantes de los TACS son:

- Gramática formateada.
- Representación en diagrama de bloques.
- Representación de dispositivos físicos.
- Operaciones lógicas y algebraicas mediante las expresiones FORTRAN.
- Transformada z.

Las desventajas consisten en la dificultad para el acceso a los datos o cambio de estos, por ser en algunos casos diagramas complejos, corriendo el riesgo de realizar cambios en el componente equivocado, para evitar esto se requiere estar familiarizado y conocer cada componente del dispositivo.

6.2.8 MODELS; Descripción

Es una herramienta de complemento al programa para modelar sistemas complejos y no convencionales, a través de un potente lenguaje de programación propio del sistema, que supera ampliamente a los TACS por ser flexible y poseer un lenguaje que puede representar cualquier dispositivo desde analógicos hasta digitales; Si se compara las figuras 6.6 y 6.12 los cuales representan al mismo control del SM59 mediante MODELS y TACS respectivamente, las diferencias son evidentes.

El sistema dispone de las siguientes funciones o comandos de Ref. [15]:

WHILE-ENDWHILE, FOR-ENDFOR, DO-REDO-ENDDO, SEQUENCE
ENDSEQUENCE, IF-ENDIF, COMBINE-ENDCOMBINE y TIMESTEP, siendo esta última el que permite la representación de un "time step". Y tiene la siguiente estructura para la programación. Ref. [15] y [16]

MODEL (nombre del modelo)

DATA (Define los datos de entrada)

CONST (Define las constantes que serán utilizados en la función de transferencia)

HISTORY (Define la historia pasada de las variables)

DELAY CELLS (Reserva para una posterior grabación de los valores de history)

VAR (define las variables a calcular)

INIT- ENDINIT (Define las magnitudes de las variables de inicialización)

EXEX-ENDEXEX (Define el inicio y la terminación de la sección ejecutable)

ENDMODEL (Define el final)

Las herramientas de programación han sido categorizadas por **Laurent Dubé** de la siguiente forma:

Arrays : El proceso de como se trabajo con arrays en MODELS.

Cálculos :Representación de ecuación diferencial, integral y la transformada de Laplace.

Control : Control de sentencias y lasos de: if, do, for and while.

Delay : Control de retrasos en tiempo.

Expresiones: Operadores y expresiones de Series.

Funciones : Funciones en MODELS.

History&Init : Inicialización de variables.

Limits : Limites en expresiones

Resident : Función Residentes y constantes. Otros.

Se indica en forma de ejemplo cada una de los mencionados:

```
1) a[1..3] := 0 -- grupo asignado write("[0, 0, 0] : ", a[1], ' ', a[2], ' ', a[3])
2) VAR y[1..5], x
   x:=t>0 -- logical function. x=0;t<timestep and x=1;t>=timestep
   Laplace(y[1]/x) := 1|s0 / 1|s1 -- y[1](s)/x(s) = 1/s
   y[2] := integral(x) -- y[2](t)=y[1](t)
   Laplace(y[3]/x) := 1|s1 / 1|s0 -- y[3](s)/x(s) = s
   y[4] := deriv(x) -- diferencial aproximada para y[4] y y[3]
   Laplace(y[5]/y[2]) := 1|s1 / 1|s0 -- y[5]=x
3) a0 := delay(b0, 2) -- returns value of b0(t-2)
   a1 := delay(b1, 1.3, 0) -- = b1(t-1.3) (interpolation degree =0)
   a2 := delay(a2, 6) -- returns value of a2(t-6)
   a3 := delay(b3, d) -- returns value of b3(t-d) (lin. interpolation)
   b3 := a3
4) y := derivpol ( D-polynomial ) | x { limits } para diferencial
   y := integral ( x ) { limits }, para el calculo integral
5) FUNCTION fun1(x1, x2) := x1 +x2
   FUNCTION fun2(x1, x2 {dffit: 0}, x3) :=x1 +x2 +x3 -t.
6) IF t=timestep THEN --
   FOR k:=-10 to 0 DO
   write("Values of y[1..5] at t=' , k, ' : ',
        histval(y[1],k), ' ', histval(y[2],k), ' ', histval(y[3],k), ' ',
        histval(y[4],k), ' ', histval(y[5],k)
```

Las características más importantes se resumen en: de Ref. [17]

- Gramática no formateada.
- Definición de variables y funciones.
- Estructura jerárquica; descomposición de un modelo en submodelos.
- Posibilidad de ramificación en condicional y bucles.
- Conexión a rutinas externas.
- Posibilidad de compilado convirtiéndose el dispositivo diseñado en parte interna del programa para una aplicación específica.

6.2.8.1 Programando en MODELS para el AVR (Modelo EXBAS de PTI) y PSS (Modelo IEEEEST de PTI)

Las reglas para la edición de un programa son las siguientes consideraciones:

- Los transductores de parámetros son similares al de los TACS, es decir 1 para medir la corriente, 2 para la tensión.
- Todos los nudos accesibles de un dispositivo MODELS son monofásicos.
- Verificar que el tipo de variables que se asigna a cada nudo es el correcto, se representa mediante la numeración del 0 al 6 que se especifica en el campo denominado TYPE en la pantalla de entrada de datos.
- Para cada nudo se debe especificar un tipo de variable:

Model node:

Type 0=Output.

1=Input corriente (i)

2=Input voltaje (v)

3=Input estado del interruptor (switch)

4=Input variables de máquina (mach)

5=TACS variables (tacs)

6=Parte imaginario del voltaje en estado estable (imssv)

7= Parte imaginario de la corriente en el interruptor en estado estable (imssi)

8=Output de otro modelo.

Para el caso de estudio se ha desarrollado el dispositivo de la figura 6.14

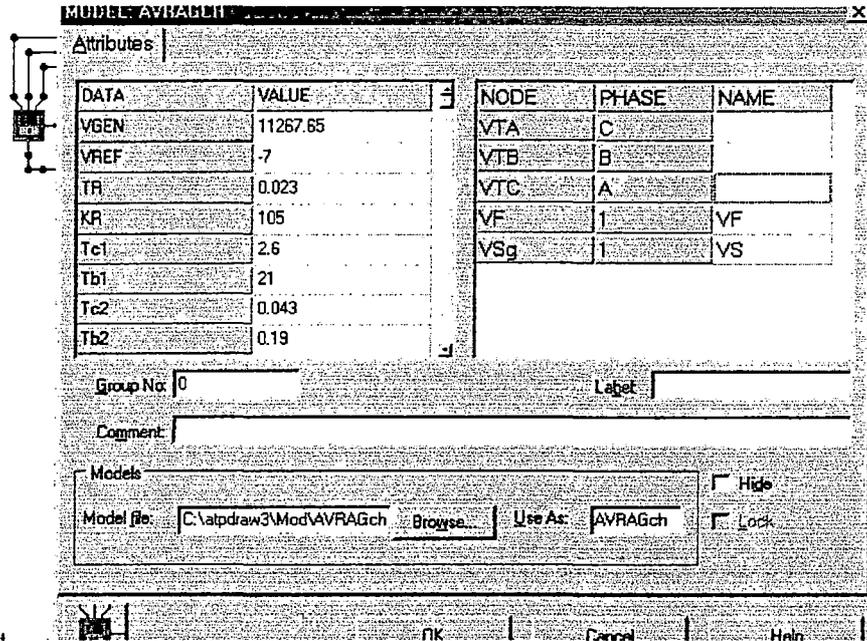


Fig. 6.19 Sistema Excitatriz Dinámica con AVR en MODELS

```

MODEL EXPIC1CH
DATA VGEN VREF TR KA TA1 TA2 TA3
      VRMAX VRMIN TE KE SE KF TF1
VAR VSQA VSQB VSQC VMS VRMS VT VT1 VT2 VA
      VR E0 EFD1 EFD VB VE
INPUT VTA VTB VTC
OUTPUT EFD
HISTORY VT{DFLT:1.} VA{DFLT:0.} VR{DFLT:0.} VB{DFLT:0.} EFD{DFLT:0.}
      VE{DFLT:0.}
INIT VRMS:=1 VT:=1 VA:=0 VR:=0
      VB:=0 EFD:=1 VE:=0 EFD1:=0
ENDINIT
EXEC
      VSQA:=VTA*VTA VSQB:=VTB*VTB VSQC:=VTC*VTC
      VMS:=VSQA+VSQB+VSQC VRMS:=SQRT(VMS)/VGEN
      CLAPLACE(VT/VRMS):=1|S0/(1|S0+TR|S1)
      VT1:=VREF-VT-VB
      VT2:=KA*VT1
      VE:=KE+SE
      E0:=VR-VE
COMBINE AS CASE1
      CLAPLACE(VA/VT2):=(1|S0+TA1|S1)/(1|S1)
      CLAPLACE(VR/VA){DMAX:VRMAX DMIN:VRMIN}:=(1|S0+TA3|S1)/(1|S0+TA2|S1)
      CLAPLACE(VB/VR):=(KF|S1)/(1|S0+TF1|S1)
      CLAPLACE(EFD1/E0):=1|S0/(TE|S1)
ENDCOMBINE
      EFD:=1+EFD1
ENDEXEC
ENDMODEL

```

Este dispositivo tiene entradas de tensión VT de bornes de máquina, la señal proveniente del PSS VSS, el algoritmo procesa para inyectar la señal al circuito de campo de la máquina.

En el caso del PSS se tiene:

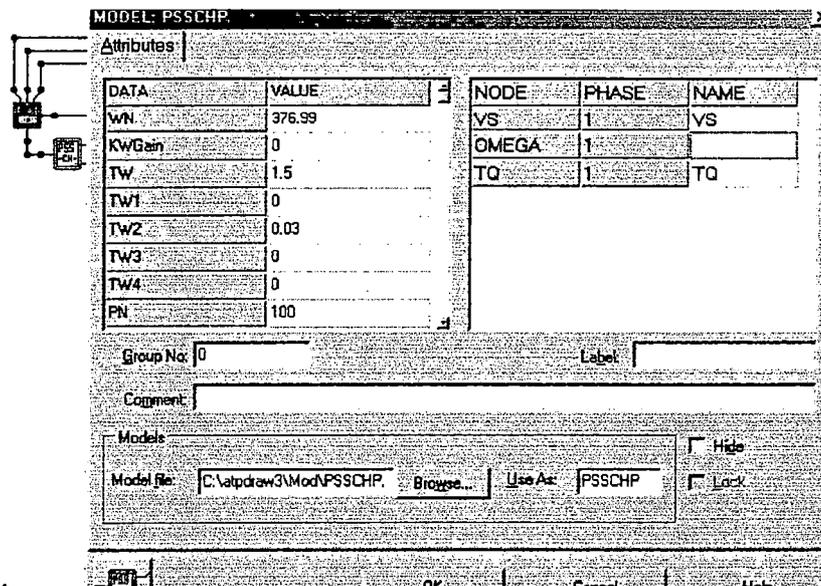


Fig. 6.20 PSS en MODELS.

Las señales de entrada son para los dos canales del PSS: Omega (Rad/seg) y TQ torque electrodinámico (Mega N.m), que son procesadas para obtener Δw y ΔP Respectivamente, la señal de salida VS suministra al sistema de excitación mediante el código 8.

6.2.8.2 *Ventajas y desventajas de los MODELS, posibilidades de desarrollar Prototipos*

Los dispositivos que se pueden desarrollar con los MODELS, muchos por no decir todas, solo dependen del usuario y su nivel de conocimiento de programación orientado a objetos, se requiere de mucha practica para el dominio de estos y obtener resultados adecuados. Por ejemplo, los dispositivos de protección digital son una realidad representado

enteramente en código MODELS, divididos en cuatro secciones: un filtro pasa-bajo de tercer orden, un convertidor analógico-digital que muestra 8 veces por ciclo, un detector que emplea un algoritmo de Fourier para recuperar la información fasorial a frecuencia de operación, y una unidad de medida, con la característica de distancia del relé, la interfase entre estas se toma con un retardo real para enviar una señal de uno a otro extremo de una línea y se encuentra entre 8 y 12 milisegundos; Con respecto a los transformadores de medida y protección es en suma una dificultad que se debe superar, debido a que no existen en el programa modelos con las características semejantes a estas.

El siguiente proyecto consiste, en la automatización virtual del sistema con MODELS y TACS. Con interfase con el MatLab, En donde el sistema eléctrico Nacional implementado en el ATP es monitoreado para actuar con respuestas adecuadas en caso de algún tipo de perturbación en la red, esta respuesta de los actuadores es decidida basándose en algoritmos desarrollados en MODELS, un sistema automatizado completamente significa en primer lugar el control absoluto sobre la máquina (generador) basado en sistema inteligente (algoritmo evolutivo), mediante los sistemas de excitación y los compensadores de Damping, los controles del motor primo; En los primeros, ya se tienen dispositivos autoadaptables por ejemplo de la firma ABB los APSS. En segundo lugar tener el control absoluto de la transferencia de potencia a través de las líneas de transmisión, esto implica tener control sobre la potencia reactiva, reactancia de la Línea. Los que cumple esta labor son nada menos que los dispositivos FACTS de última generación basados en la electrónica de potencia en combinación con los algoritmos inteligentes de control, la siguiente figura resume de alguna manera lo que se ha textualizado.

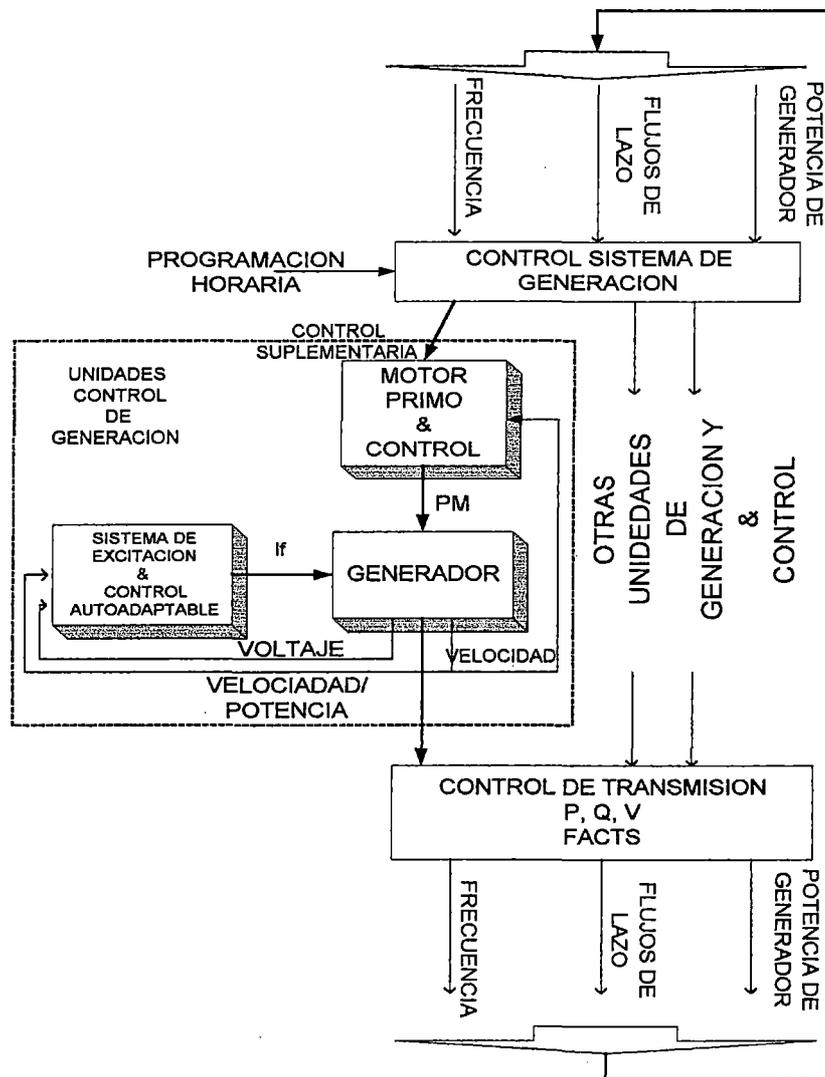


Fig. 6.21 Control Inteligente de un SEP.

Con respecto a la calidad de energía se ha desarrollado un dispositivo Speed Drive ajustable de 6 pulsos Ref. [18] un modelo de carga para efectos de estudio de armónicos en el sistema (distribución) lo que a continuación se describe:

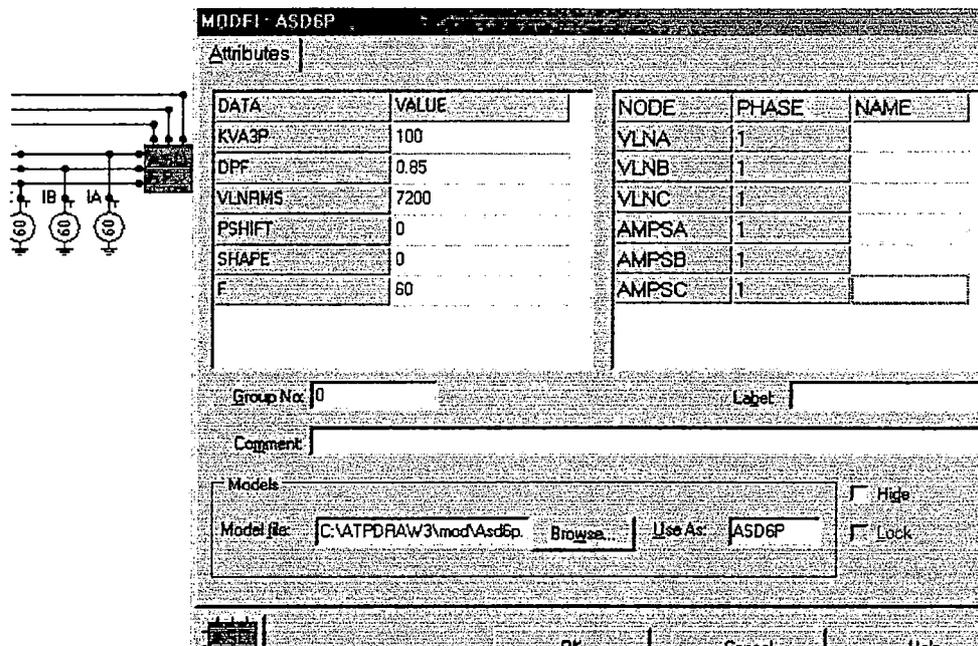


Fig. 6.22 Speed Drive Ajustable de 6 pulsos.

Tiene los siguientes datos de entrada:

- KVA3P. Potencia aparente trifásica kVA.
- DPF. Desplazamiento de fdp = 1.0 (1.0 suministro de voltaje, y 0.80 para suministro de corriente)
- VLNRMS. Voltaje nominal L-L, L-N (V) = 7200
- PSHIFT. Desfasaje del transformador modelado internamente dependiendo del tipo de conexión.
- SHAPE se tiene 3 opciones
 - 0 para inyección de corriente
 - 1 para inyección de voltaje a una potencia máxima de operación.
 - 2 para inyección de voltaje a baja potencia de operación.

Los resultados se muestran en la siguiente Fig.

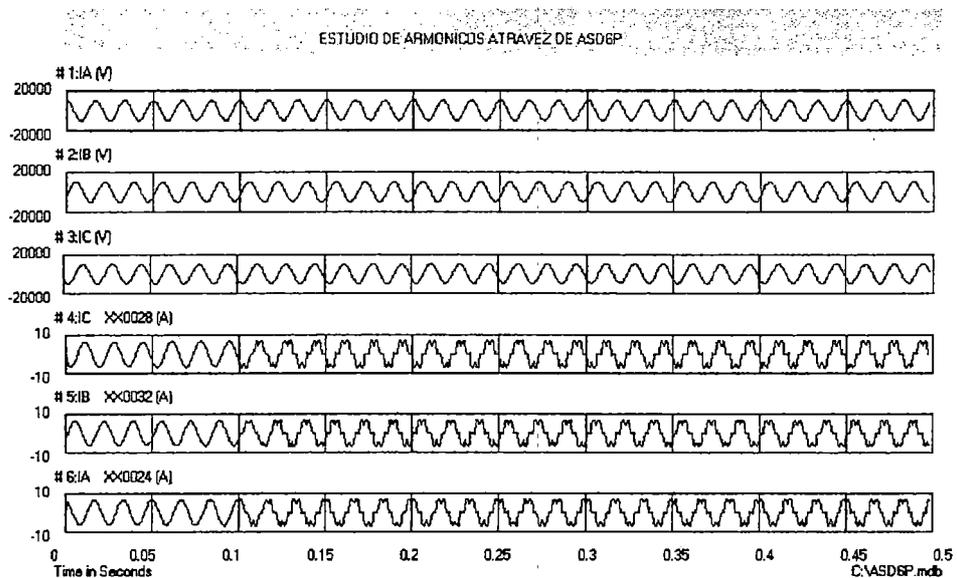


Fig. 6.23 Resultados del ADS6P.

Este modelo representa una carga no lineal y/o una fuente de armónicos variable.

6.2.9 Utilización del ANALYZER

El ATP-Analyser, es un programa para Windows basado en la capacidad de lectura de los archivos *.PL4 del ATP. Archivos COMTRADE, del tipo analógico o digital, y tablas de archivos ASCII; El comportamiento de las variables son graficadas en dominio del tiempo o frecuencia, ya sea en forma superpuesta o separada uno o más señales, también es posible observar en el plano cartesiano x-y en forma de vectores, todas estas señales son llevadas a un ploteador sin ningún inconveniente.

Se pueden desarrollar el proceso de interpolación ubicando el punto de coincidencia de la frecuencia a través de la aproximación cúbica o cuadrática a cualquier tipo de archivos mencionados, es decir, los distintos archivos no siempre han sido ejecutados para la misma frecuencia de ploteo ni el delta de tiempo, entonces el programa se encarga de llevarlo a la misma frecuencia de ploteo para el caso de comparación. Se puede

realizar comparaciones no solamente de variables de un mismo archivo sino de variables de dos o más archivos distintos, además de esto se puede procesar dichas variables de archivos distintos como por ejemplo calcular la potencia real en función de la señal de corriente y tensión, para luego ser grabadas en el formato o con la extensión que uno desea así como COMTRADE, ASCII en diferentes versiones, o como ATP. *PL4 en binary o ASCII data, el programa esta limitado a 254 variables o canales de señal, es de distribución gratuita protegido por los derechos de autor por BPA – USA institución que ha financiado para el desarrollo del programa.

6.2.9.1 Procesamiento de Datos en el Analyzer

Los datos son procesados mediante las operaciones matemáticas de las variables, es decir se puede sumar señales o realizar cualquier tipo de operación predefinida en el programa, llevando a una nueva señal almacenable para su posterior uso.

En algunos casos los archivos se pueden encontrar a diferentes tiempos de ploteo, estos son transformados a un mismo tiempo para su posterior operación esto es aplicado por ejemplo en el caso de la transformada de Park en el cual se requiere que una misma señal este en fase para efectuar dicha transformada entonces lo que hace es poner en fase multiplicando con la frecuencia que se requiere poner en fase dichas señales.

De la misma forma desarrolla transformaciones de un plano complejo o polar al plano rectangular o viceversa.

Así mismo puede hacerse recortes de segmentos de señales e insertarlos a otra señal para efectos de comparación. El programa es un completo analizador de gráficos, permite realizar distintas operaciones para obtener un trabajo de acuerdo a los requerimientos.

Lo más resaltante es que el programa realiza la transformación de Park es decir la señal en R-I lleva a d-q-0 o viceversa, además de ello la señal fundamental es llevada a señal de secuencia cero, positiva, negativa o viceversa.

6.2.9.2 Utilización de Archivos *PLA. ,Generación de Archivos Comtrade, casos de comparación

En esta sección se procesa las señales del archivo CesiAG.pl4 cuyo contenido es el Modelamiento de la máquina de Aguaytia-barra infinita, para efectos del estudio de estabilidad de señal pequeña, o resultados de la respuesta del AVR y el PSS a las oscilaciones consecuencia de los diferentes estados de operación. Los archivos Comtrade (C37.111 1999) han sido estandarizadas por la IEEE orientando a la realización y análisis de pruebas en los dispositivos de control, protección, etc. Estos dispositivos reproducen el comportamiento de los parámetros almacenados en el archivo COMTRADE con tres extensiones HDR, CFG y DAT (Header, Configuration y Date) y simulan la respuesta.

6.3 MatLab, Descripción del Programa

Es un entorno integrado de trabajo para el análisis y la computación matemática interactivo con más de 500 funciones matemáticas, técnicas científicas implementadas, para el uso en la ingeniería o cualquier otra área de la ciencia. Por la amplitud del paquete, en este trabajo abordaremos solo lo que nos interesa por el momento

6.3.1 Descripción de los Comandos de Álgebra Lineal Numérica de interés

El álgebra lineal es una herramienta muy poderosa para la representación de modelos o sistemas, en MatLab todas las representaciones numéricas o de variables se hacen mediante las matrices, para el tema en cuestión nos interesa la aplicación de las ecuaciones o representaciones de estado de

cualquier sistema dinámico que en este caso un sistema eléctrico, que permite resolver con mucha facilidad las variables de estado a la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_g \end{bmatrix}_{27 \times 1} = \begin{bmatrix} A_g + A_{red} \end{bmatrix}_{27 \times 27} \begin{bmatrix} x_g \end{bmatrix}_{27 \times 1} + \begin{bmatrix} B_g \end{bmatrix}_{27 \times 6} \begin{bmatrix} U_g \end{bmatrix}_{6 \times 1} \quad (6.15)$$

El comando a utilizar para resolver la solución no trivial de la matriz de estado es a través de

$$[V,D] = \text{eig}(A) \quad (6.16)$$

Que devuelve los eigenvalores = D y el eigenvector derecho de la matriz de estado. En el caso del trabajo que nos ocupa se trata de calcular los eigenvalores dominantes de la matriz aumentada de estado cuya solución se logra mediante:

$$[V,D] = \text{eigs}(A,n) \quad (6.17)$$

Que devuelve los n eigenvalores dominantes con sus respectivos eigenvectores derecho, cuyos eigenvectores izquierdo se obtiene mediante:

$$[V,D] = \text{eigs}(A,n) \text{ y } V_{\text{izquierdo}} = \text{conj}(V) \quad (6.18)$$

6.3.2 Programación en MatLab

La programación es otra de las bondades del paquete, ofrece un lenguaje de programación propio mucho más versátil que el Fortran, C++, Java e inclusive más versátil que el Visual C++, debido a que el MatLab cuenta con el comando elaboradas nivel científico, por lo tanto para la ingeniería es el lenguaje adecuado por el nivel técnico que contiene.

Entonces, la tarea del programador es enlazarlos estas funciones disponibles con bucles universales que contienen todos los lenguajes de programación y obtener el programa para las funciones requeridas. Otra de las ventajas que tiene es el programa desarrollado en *.m se desarrolla en funciones que se pueden utilizar por cualquier otro archivo y estos se pueden compilar convirtiendo el archivo en un paquete independiente, es

decir las posteriores aplicaciones no requiere del paquete MatLab instalado en su PC.

6.3.3 Diseño del GA(Genetic Algorithm)

El GA esta implementada con las siguientes 8 Funciones:

1. -Función *crtbp.m* (Crea la población inicial de acuerdo a los limites y el número de variables).
2. -Función *fobjtiva.m* (Es la función objetiva que se crea dependiendo del problema)
3. -Función *fval.m* (Es la función que evalúa los individuos de la población inicial).
4. -Función *ranking.m* (Es la función que le asigna una aptitud correspondiente a cada individuo luego de evaluar en la función objetiva)
5. - Función *select.m* (Es la función que se encarga de seleccionar a los mejores individuos mediante el método de la ruleta)
6. - Función *recombin.m* (Es la primera Función operador genético que realiza el cruzamiento)
7. - Función *mutate.m* (Es la segunda Función operador del GA que se encarga de la mutación)
8. - Función *reins.m* (Es la tercera función del GA que se encarga de reinsertar los individuos a la nueva generación)

En cada una de las funciones se ha diseñado sus respectivas variantes de acuerdo a las diferentes técnicas que se tiene.

Por ejemplo para la creación de la población inicial se ha diseñado las siguientes funciones:

Función *crtbase.m* (crea un vector de base)

Función *crtrp.m* (una población inicial de valor real)

Función *crtbp.m* (crea arbitrariamente una población inicial discreta y en forma aleatoria basado en los rangos prefijados)

Las 8 funciones están enlazadas en el siguiente archivo.

Código en MatLab file: *genes.m*

% Aplicación de SAG, for optimizen PSS in the machine of SEIN : Perú,
% developed by B.CHUCO for get engineer electrical degree. UNAC-November - 2003

```

% data input for the usuary
NIND = 40;      % Number of individuals per subpopulations
MAXGEN =20;    % maximal Number of generations
GGAP = 0.8;    % Generation gap, how many new individuals are created

SEL_F = 'sus'; % Name of selection function
XOV_F = 'xovsp'; % Name of recombination function for individuals
MUT_F = 'mut'; % Name of mutation function for individuals
OBJ_F = 'tesis'; % Name of function for objective values
% Get boundaries of objective function
% boundaries for variables
% lower upper bound
% G4T1 G4K G3T1 G3K G5T1 G5K;G4T1 G4K G3T1 G3K G5T1 G5K
FieldDR = [0.02 -3 0.02 -0.5 0.02 -2.5;0.110 -1 0.11 3.5 0.11 -1];
% Number of variables of objective function, in OBJ_F defined
NVAR = size(FieldDR,2);
% Build fielddescription matrix
PRECI = 10; % Presicion of binary representation
FieldDD = [rep([PRECI],[1, NVAR]);...
           FieldDR;...
           rep([1; 0; 1 ;1], [1, NVAR])];
% Create population
Chrom = crtbp(NIND, NVAR*PRECI);
% reset count variables
gen = 0;
Best = NaN*ones(MAXGEN,1);
Best1 = NaN*ones(MAXGEN,7);
% fitness=NaN*ones(MAXGEN,1);
% Iterate population
while gen < MAXGEN,

% Calculate objective function for population
%ObjV = feval(OBJ_F,bs2rv(Chrom, FieldDD));
ps1=bs2rv(Chrom, FieldDD);
for i=1:NIND
    ps=[ps1(i,1) ps1(i,2) ps1(i,3) ps1(i,4) ps1(i,5) ps1(i,6)];
    ObjV(i,1) = feval(OBJ_F,ps);
    [Best(gen+1,1),ix] = min(ObjV);
    %plot((Best),'ro')
    Best1(gen+1,1)=ix;
    Best1(gen+1,2)=ps1(ix,1);
    Best1(gen+1,3)=ps1(ix,2);
    Best1(gen+1,4)=ps1(ix,3);
    Best1(gen+1,5)=ps1(ix,4);
    Best1(gen+1,6)=ps1(ix,5);
    Best1(gen+1,7)=ps1(ix,6);
end
%drawnow;
% Fitness assignement to whole population
FitnV = ranking(ObjV);
%fitness(gen+1,1)=FitnV(ix,1);
subplot(2,1,1),plot((fitness),'ro'); xlabel('generation'); ylabel('aptitud');
% Select individuals from population
SelCh = select(SEL_F, Chrom, FitnV, GGAP);

```

```

% Recombine selected individuals (crossover)
  SelCh=recombin(XOV_F, SelCh);
% Mutate offspring
  SelCh=mutate(MUT_F, SelCh);

% Insert offspring in population replacing parents
  Chrom = reins(Chrom, SelCh);
  gen=gen+1;
  plot((Best),'ro'); xlabel('generation'); ylabel('funcion objetiva');
  drawnow;
end
% End

```

La función*se evalúa en la siguiente función

Código en MatLab file: tesis.m

```

function ObjVal = tesis(ps,swite)
% Dimension of objective function
  Dim = 6;
% Compute population parameters
  [Nind,Nvar] = size(ps);
% Check size of Chrom and do the appropriate thing
% if Chrom is [], then define size of boundary-matrix and values
if Nind == 0
  % return text of title for graphic output
  if swite == 2
    ObjVal = ['function 1-' int2str(Dim)];
% return value of global minimum
elseif swite == 3
  ObjVal = 0;
% define size of boundary-matrix and values
else
  % lower and upper bound, identical for all n variables
  ObjVal = [0; 30];
  ObjVal = ObjVal(1:2,ones(Dim,1));
end
% if Dim variables, compute values of function
elseif Nvar == Dim
  % function 1, sum of xi^2 for i = 1:Dim (Dim=30)
  % n = Dim, -5.12 <= xi <= 5.12
  % global minimum at (xi)=(0) ; fmin=0
  %ObjVal =sum((alt .* alt)');
  ObjVal = almam(ps); % both lines produce the same
% otherwise error, wrong format of Chrom
else
  error('size of matrix Chrom is not correct for function evaluation');
end
% End of function

```

La función objetiva esta centralizado en la siguiente función

Código en MatLab file : alma.m (for case, single machine)
function [min] = alma(ps)


```

Tppdo=msdata(:,5); Xq=msdata(:,6); Xpq=msdata(:,7); Xppq=msdata(:,8);
Tpqo=msdata(:,9); Tppqo=msdata(:,10); ra=msdata(:,11); Xl=msdata(:,12);
H=msdata(:,13); D=0.85;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
TA = avrdata(:,1); KA = avrdata(:,2);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Compute initial conditions -----%
ld = Xl;
Md = Xd - Xl;
lq = Xl;
Mq = Xq - Xl;
omegao = 120*pi;

% machine terminal voltage
UoR = U*cos(theta);
UoI = U*sin(theta);
% machine node injection current
IoR = (Po*UoR + Qo*UoI) / (UoR*UoR + UoI*UoI);
IoI = (Po*UoI - Qo*UoR) / (UoR*UoR + UoI*UoI);
% q-axis position;
thetao = atan((UoI+omegao*(Mq+lq)*IoR+ra*IoI)/(UoR+ra*IoR-omegao*(Mq+lq)*IoI));
% Park voltages and currents
udo = (UoR*sin(thetao)) - (UoI*cos(thetao));
uqo = (UoR*cos(thetao)) + (UoI*sin(thetao));
ido = ((IoR*sin(thetao)) - (IoI*cos(thetao)))*(100/SN);
iqo = ((IoI*sin(thetao)) + (IoR*cos(thetao)))*(100/SN);
Tj=2*H/(2*pi*60);
Epdo=udo+ido*ra-Xpq*iqo;
Epqo=uqo+ido*Xpd+ra*iqo;
Yg=1/(ra^2+Xpd*Xpq);
F1=(Epdo+(Xpq-Xpd)*iqo)*Yg; F2=(Epqo+(Xpq-Xpd)*ido)*Yg;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
a11=-(1+(Xq-Xpq)*Yg*Xpd)/Tpqo; a12=((Xq-Xpq)*Yg*ra)/Tpqo;
a14=((Xq-Xpq)*Yg*(Xpd*uqo+ra*udo))/Tpqo;
a21=-((Xd-Xpd)*Yg*ra)/Tpdo;
a22=-((1+(Xd-Xpd)*Yg*Xpq)/Tpdo; a24=-((Xd-Xpd)*Yg*(Xpq*udo-ra*uqo))/Tpdo;
a31=-((ido+F1*ra-F2*Xpd)/Tj; a32=-((iqo+F1*Xpq+F2*ra)/Tj;
a34=-((F1*(Xpq*udo-ra*uqo)+F2*(Xpd*uqo+ra*udo))/Tj;
a76=T1/(T2-T1); a77=T2/(T2-T1); %T1=T3;
a87=T1/(T4-T1); a88=T4/(T4-T1);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
A=[ a11 a12 0 a14 0 0 0 0;
    a21 a22 0 a24 1/Tpdo 0 0 0;
    a31 a32 D/Tj a34 0 0 0 0;
    0 0 1 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 -1/TA 0 0 KA/TA;
    0 0 Kstab 0 0 -1 0 0;
    0 0 0 0 0 a76 a77 0;
    0 0 0 0 0 0 a87 a88]; end;
Código en MatLab file : Función mutata.m
% developed by B. Chuco for tuning PSS - UNAC-Perú
function NewChrom = mutata(MUT_F, OldChrom, FieldDR, MutOpt, SUBPOP);

```

```

% First step, Check parameter consistency
if nargin < 2, error('Not enough input parameter'); end

% Identify the population size (Nind) and the number of variables (Nvar)
[Nind,Nvar] = size(OldChrom);

if nargin < 3, IsDiscret = 1; FieldDR = [];
elseif isempty(FieldDR), IsDiscret = 1; FieldDR = [];
elseif isnan(FieldDR), IsDiscret = 1; FieldDR = [];
else
    [mF, nF] = size(FieldDR);
    if nF ~= Nvar, error('FieldDR and OldChrom disagree'); end
    if mF == 2, IsDiscret = 0;
    elseif mF == 1, IsDiscret = 1;
    else error('FieldDR must be a matrix with 1 or 2 rows'); end
end

if nargin < 4, MutOpt = NaN; end

if nargin < 5, SUBPOP = 1;
elseif nargin > 4,
    if isempty(SUBPOP), SUBPOP = 1;
    elseif isnan(SUBPOP), SUBPOP = 1;
    elseif length(SUBPOP) ~= 1, error('SUBPOP must be a scalar'); end
end

if (Nind/SUBPOP) ~= fix(Nind/SUBPOP), error('OldChrom and SUBPOP disagree'); end
Nind = Nind/SUBPOP; % Compute number of individuals per subpopulation

% Select individuals of one subpopulation and call low level function
NewChrom = [];
for irun = 1:SUBPOP,
    ChromSub = OldChrom((irun-1)*Nind+1:irun*Nind,:);
    if IsDiscret == 1, NewChromSub = feval(MUT_F, ChromSub, MutOpt, FieldDR);
    elseif IsDiscret == 0, NewChromSub = feval(MUT_F, ChromSub, FieldDR, MutOpt); end
    NewChrom=[NewChrom; NewChromSub];
end
% End of function

```

6.4 Simulink Power Systems-Descripción de

Es un paquete de software orientado a modelar, simular y analizar sistemas dinámicos lineales y no lineales, discretos analógicos e híbridos mediante la utilización del diagrama de bloques, para esto dispone de *graphical user interface* (GUI). Permite la incorporación de los algoritmos y controles que se hayan desarrollado por el usuario a través de los s-functions.

Permite además la visualización de los resultados mientras el programa ejecuta el modelo, esto facilita el cambio de parámetros cuando sea necesario en pleno proceso para corregir desviaciones, facilitando la creación de escenas e imágenes en movimiento en un entorno de realidad virtual de 3 dimensiones, los resultados del proceso se almacenan en MATLAB workspace para su posterior análisis.

En este trabajo lo que nos interesa es introducirnos a uno de varios Blocksets de SIMULINK, se trata de *Power Systems Blockset* que permite modelar y simular en SIMULINK sistemas eléctricos de potencia así como en generación, transmisión, distribución con sus respectivos controles, sistemas HVDC, FACTS, etc.

Esta herramienta nos permite desarrollar dispositivos virtuales que interactúan con dispositivos físicos en un proceso, esta sección es denominada como **prototipaje** en el cual **MatLab** dispone de las siguientes aplicaciones:

Real-Time Windows Target: permite ejecutar en tiempo real los modelos de simulink en Windows, durante este proceso podemos interactuar con una gran variedad de tarjetas de I/O, lo cual nos permite controlar sensores, actuadores y otros dispositivos para poner a prueba el diseño y validar nuestros sistemas desarrollados en tiempo-real.

Real-Time Target: Permite añadir bloques I/O a simulink, generar códigos con Real-Time Workshop y transferir a un segundo PC, este proceso facilita a un más el prototipaje rápido, pues estos actuarían como target y host.

1.- Modelando sistemas dinámicos

El programa cuenta con una librería de modelos estándar o bloque estándar y mediante el editor gráfico se complementa el resto (Interconexión entre estos), sino puede diseñar su propio modelo de acuerdo a las necesidades.

2.- Diagrama de Bloques. – Es una representación ilustrativa de un sistema dinámico a modelar, esto consiste de bloques (discretos o continuos) interconectados con líneas que representan un elemento de un sistema dinámico que genera una salida según sea el caso, las líneas representan conexiones entre entradas y salidas de bloques que en ellos se efectúa un proceso de estado dependiente de las representaciones numéricas o algoritmos que contenga (sistemas de funciones), un estado es una variable que determina una salida del bloque cuyos valores dependen de valores previos o señales de entrada (parámetros). Cada una de estos podría contener de subsistemas que tienen la misma estructura para que en conjunto forme el sistema completo.

3.- Control en SIMULINK

Para efectos del trabajo, esta sección orienta básicamente aplicado al control, para ello se inicia con criterios básicos fortaleciendo paulatinamente.

Esta sección es una colección de funciones para el modelado, análisis, y diseño de control automático e interactivo para ello se dispone desde métodos clásicos hasta modernas (root locus, loop shaping, pole placement, stady-space LQR/LQG regulación, soporta sistemas LTI (sistemas lineales invariantes en el tiempo), SISO (salida única/entrada única), MIMO (entradas múltiple/salidas múltiple), y diversos tipos de conversión). Permite el análisis sencillo de polos, ceros o raíces y ganancia, graficando en función del tiempo y de frecuencia.

6.4.1 Aplicación en control y Modelamiento de SEP

Se trata de un Circuito RLC de respuesta interactivo, con este ejemplo se demuestra de como se puede desarrollar el control virtual, instrumentación virtual, etc. En esencia se trata de una relación interactiva de parámetros

físicos de circuitos RLC en general y el tiempo y respuesta en frecuencia de estos.

Pueden investigarse cuatro configuraciones normales del circuito:

- * Red de RLC pasa-bajo
- * Red de RLC pasa-alto
- * Red de RLC pasa-banda (Band-pass)
- * Red de RLC para-banda (Band-stop)

Se guarda como un LTI con respuesta en tiempo y frecuencia usando el sistema del Mando Toolbox. En todos los casos, el circuito RLC se expresa como un sistema del 2do-orden con retraso-libre estable para valores reales y positivos de R, L, y C.

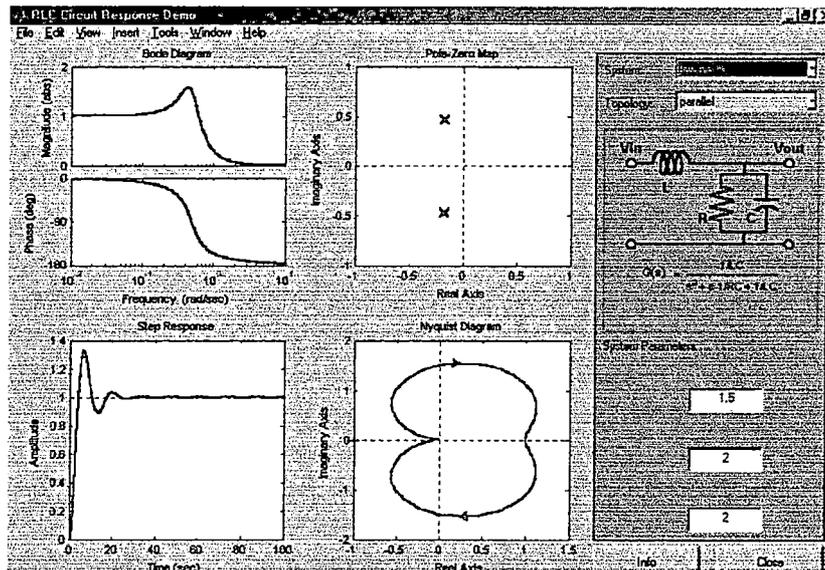


Fig. 6.24 Respuesta en tiempo real para Low pass-Parallel.

Este programa permite interactuar con el usuario a través de *system* (low and high pass, pass and stop band), *Topology* (series and parallel), *system parameters* (R, L, C). con respuesta en tiempo real.

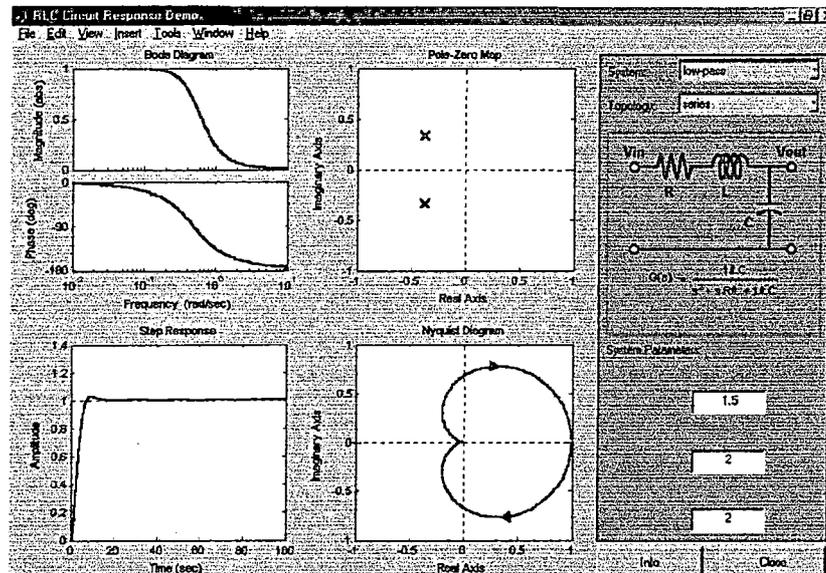


Fig. 6.25 Respuesta en tiempo real para Low pass-Series.

la construcción del diagrama de bloques consiste en disponer elementos de powerlib, para construir circuitos como:

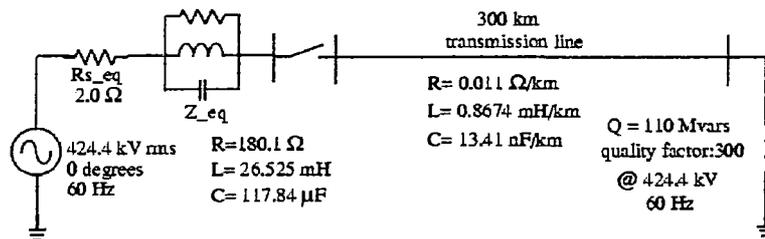


Fig. 6.26 Modelo del sistema eléctrico simple

cuya representación en Simulink es:

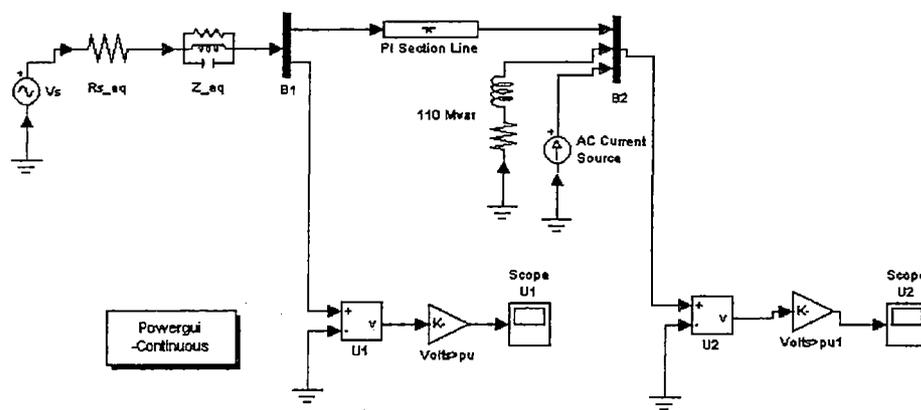


Fig. 6.27 Representación del modelo en Simulink

los resultados se pueden analizar con las siguientes alternativas:

- 1) Usando el Powergui (graphical user interface)

- 2) Salidas en steady-state system
 - 3) Analizar el circuito con la función power2sys
 - 4) Analizar el circuito en dominio de la frecuencia.
- De 1 y 2) los resultados son:

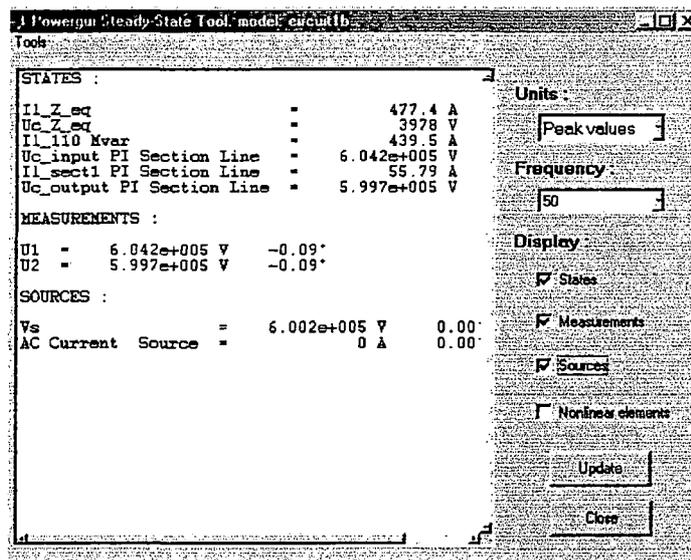


Fig. 6.28 Analizador Powergui del Simulink

En los cuales se muestra los estados, los valores medidos, y los suministros o fuentes.

De 3) se procede de la siguiente manera, para el análisis de state-space: Se ejecuta la siguiente función:

`[A,B,C,D,x0,states,inputs,outputs]=power2sys('circuit1b');`

Donde A, B, C, D son las matrices de la ecuación de estado, cuyos elementos se calculan directamente con la función *power2sys* así:

States =

Il_110 Mvars
 Uc_input PI Section Line
 Il_sect1 PI Section Line
 Uc_output PI Section Line
 Il_Z_eq
 Uc_Z_eq

Inputs =

U_Vs
 I_AC Current Source

Outputs =

U_U1
 U_U2 de:
 C=

0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	1

B=

0	0
4243	0
0	0
2.45E+05	0
0	0
0	4.91E+05

A=

0	37.7	0	0	0	0
-8486.1	-4290.2	0	-4243	0	0
0	0	-1.2566	0	0	-0.23024
0	-2.45E+05	0	-2.45E+05	-4.91E+05	0
0	0	0	3.9415	-12.369	-3.9415
0	0	4.91E+05	0	4.91E+05	0

Cuyos eigenvalores se tiene:

-2.50E+05
-9.921 + 1443.9i (=229 Hz)
-9.921 - 1443.9i
-22.725 + 556.99i (=89 Hz)
-22.725 - 556.99i
-2.2918

De este, se observa las frecuencias de oscilaciones para este pequeño sistema.

De 4 se tiene los siguientes procedimientos:

Se declara el siguiente algoritmo:

```
freq=0:1500;
w=2*pi*freq;
[mag1,phase1]=bode(A,B,C,D,2,w);
semilogy(freq,mag1(:,2));
```

Para obtener la impedancia en función de frecuencia en un rango de 1:1500; para una sección de la Línea tipo pi.

En forma análoga para 10 secciones de la Línea y hacer la comparación, a partir del siguiente algoritmo:

```
[A,B,C,D]=power2sys('circuit1');
[mag10,phase10]=bode(A,B,C,D,2,w);
semilogy(freq,mag1(:,2),freq,mag10(:,2));
```

Resultados:

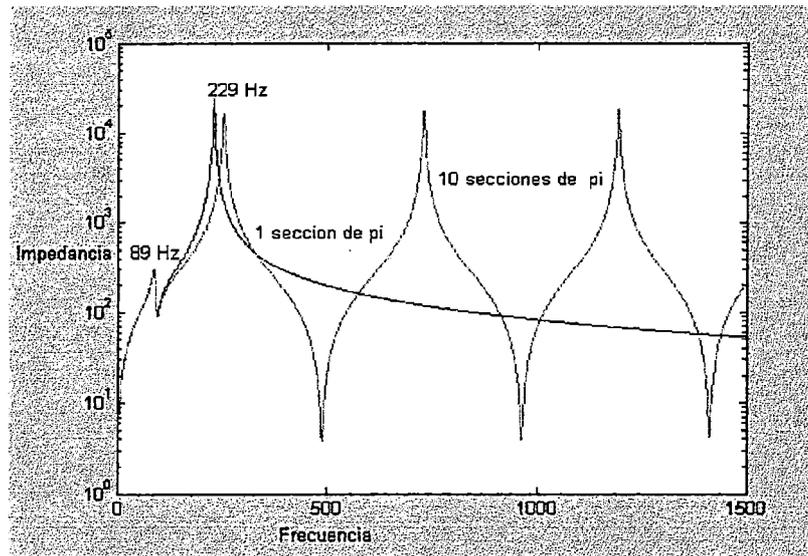


Fig. 6.29 Resultados de la impedancia en función de la frecuencia.

Se sabe que:

$v = 1/(\text{sqrt}(L*C)) = 293.208 \text{ km/seg}$. Por lo tanto el tiempo de propagación para una Línea de 300Km es $T = 300/293,208 = 1.023 \text{ ms}$ y la frecuencia de la primera Línea (una sección pi) es $f_1 = 1/4T = 244 \text{ Hz}$. Una línea de parámetros distribuidos podría tener infinitos modos cada $244 + n * 488 \text{ Hz}$ ($n = 1, 2, 3...$). La Línea de 10 secciones, los primeros 3 modos se muestran en la Fig. (244Hz, 732Hz, and 1220 Hz).

Para obteniendo la impedancia en función de frecuencia a partir de un medidor, se agrega el medidor de Z y resulta:

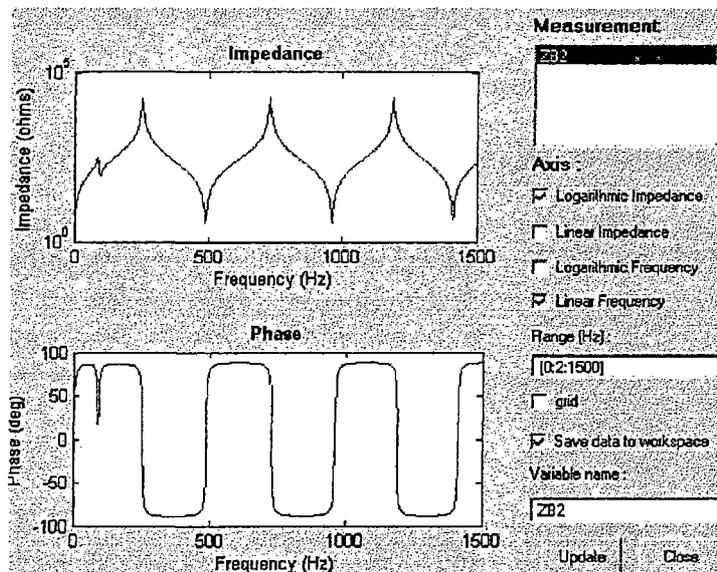


Fig. 6.30 Resultados desde un medidor

se observa que se obtiene los mismos resultados en ambos casos, ahora se tiene la simulación para el estado transitorio, manipulando a través de powergui el estado inicial de los valores llevando a cero

Es importante recordar la selección adecuada de parámetros de simulación. En estado estable generalmente se selecciona el **ode45** en estado transitorio como la última parte hasta ahora descrito se selecciona **ode23tb**, y la tolerancia relativa se debe seleccionar de acuerdo a las necesidades.

6.5 Resumen

En este Capítulo, se ha desarrollado en forma simplificada todo lo necesario para iniciar la exploración en estas tres grandes herramientas el Atp-Draw, el MatLab y el Simulink, debe entenderse que este trabajo no intenta desarrollar un manual de usuario sino dar las pistas necesarias para iniciar sobre una base la exploración de estas herramientas, cabe recalcar que el lenguaje MODELS es una herramienta poderosa que podría utilizarse para estudios de nuevos prototipos en dispositivos electrónicos de potencia y controladores inteligentes.

6.6 Referencias

- [1] Canadian/American EMTP User Group, "*Alternative Transients Program (ATP) Rule Book*", Co-Chairmen W. S. Meyer and T. Liu, Portland, Oregon, 1995 (atp@agora.rain.com).
- [2] H. K. Høidalen, "*ATPDRAW Version 3.0 User Manual*". Norwegian Electric Power Research Institute, Trondheim, Norway, January 25, 1996 (/www.ee.mtu.edu/atp/).
- [3] C. B. Lucasius and G. Kateman, "*Towards Solving Subset Selection Problems with the Aid of the Genetic Algorithm*", In *Parallel Problem Solving from Nature 2*, R. Männer and B. Manderick, (Eds.), pp. 239-247, Amsterdam: North-Holland, 1992.
- [4] Juan A. Martinez Velasco. "*Simulación de dispositivos Custom Power*". Departament d'Enginyeria Elèctric Universitat Politècnica de Catalunya Diagonal 647 08028 Barcelona, España
- [5] M.M.A. Salama, A.Y. Chikhani y M.A. Bayoumi. "*Fault-current limiter with thyristorcontrolled impedance (FCL-TCI)*", Paper 92 SM 565-2 PWRD, 1992 IEEE/PES Summer Meeting, Seattle, Julio 12-16, 1992.
- [6] J.A. Martinez, "*Power quality analysis using electromagnetic transients programs*", Proc. of 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Atenas, Octubre 14- 16, 1998.
- [7] A. H. Wright, "*Genetic Algorithms for Real Parameter Optimization*", In *Foundations of Genetic Algorithms*, J. E. Rawlins (Ed.), Morgan Kaufmann, pp. 205-218, 1991.
- [8] Z. Michalewicz, "*Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*". Springer Verlag, 1992.
- [9] J.A. Martinez Velasco y J. Martin Arnedo, "*Desarrollo de una libreria modular para análisis de calidad de servicio mediante el EMTP*", Rev. Iberoamericana del ATP, vol. 1, no. 3, Septiembre 1999.
- [10] T. Bäck, F. Hoffmeister and H.-P. Schwefel, "*A Survey of Evolution Strategies*", Proc. ICGA 4, pp. 2-10, 1991.

- [11] CESI. RETE-A2/041068, "*Informe: Central Turbogas de Aguaytia(Perú)*", Para COES-Perú. 27 Enero 2003.
- [12] Power Technologies, INC. "*Program Application Guide*", Volumen II, F-6, Online Documentation PSS/E-26.2, U.S.A., December 1998.
- [13] J.A. Martinez Velasco. "*Modelling and simulation of power electronics systems using the EMTP*", EES-UETP Course on Custom Power Technologies, 40 páginas, Barcelona, Junio 15-18, 1998.
- [14] D. Whitley, K. Mathias and P. Fitzhorn, "*Delta Coding: An Iterative Search Strategy for Genetic Algorithms*", Proc. ICGA 4, pp. 77-84, 1991.
- [15] J. E. Baker, "*Adaptive Selection Methods for Genetic Algorithms*", Proc. ICGA 1, pp. 101-111, 1985.
- [16] H.K. Høidalen. "*Lightning induced voltages in low-voltage systems*". PhD thesis, ISBN 82-471-0177-1, University of Trondheim 1997.
- [17] H.K. Høidalen, "*Calculation of Lightning-induced Overvoltages using MODELS* ", Proc. int. conf on Power Syst. Transients IPST'99, June 20-24, Budapest.
- [18] Dr. W. Mack Grady, "*A Guide for Performing Selected Power Quality Studies in Distribution Systems Using ATPDRAW, ATP, TPLOT, and ATPCON in Conjunction with ABB Feederdesign Cadpad Data*", Version 2, PacifiCorp One Utah Center, OUC 2000, 201 South Main Salt Lake City, Utah 84140, October 1997
- [19] J.A. Martinez Velasco, "*Modelling and simulation of power electronics systems using the EMTP*", EES-UETP Course on Custom Power Technologies, 40 páginas, Barcelona, Junio 15-18, 1998.
- [20] J.A. Martinez, "*Power Quality Analysis Using Electromagnetic Transients Programs*", Proc. of 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Atenas, Octubre 14- 16, 1998.
- [21] *MODELS in ATP Rule Book*. August 1995.

- [22] IEEE Std. 519-1992, *IEEE. "Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems"*. IEEE Industry Applications Society and Power Engineering Society, New York, 1993.
- [23] Akhrif, O., F.A. Okou, L.A. Dessaint, and R. Champagne, "*Application of a Multivariable Feedback Linearization Scheme for Rotor Angle Stability and Voltage Regulation of Power Systems*," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 14, No. 2, May 1999, pp. 620-628.



CONCLUSIONES

El trabajo presentado esta orientada a la aplicación de nuevas técnicas de optimización en la sintonización de los PSS, la continuidad en el desarrollo tecnológico apunta al diseño de dispositivos de control autoadaptables basados en algoritmos evolutivos, lo cual significa en el caso de los PSS, dispositivos capaces de valorar las condiciones y los parámetros de operación del sistema en tiempo real, para auto-sintonizarse en forma continua y responder adecuadamente cuando sea necesario. Sin embargo en el sistema eléctrico nacional, son muy pocas las posibilidades de estar a la par con estos desarrollos.

Uno de los principales objetivos que se busca, es mejorar el comportamiento dinámico de los SEP a través del incremento del amortiguamiento mediante los PSS, para reducir las oscilaciones de potencia. La operación de los PSS convencionales, se logra optimizar en forma eficiente, aplicando el algoritmo genético en la búsqueda aleatoria de los mejores parámetros de los estabilizadores, a través de una función objetiva basada en la sensibilidad de primer y segundo orden de los eigenvalores, obteniéndose en consecuencia estabilizadores robustos capaces de operar en un amplio rango de condiciones operativas del sistema aun mientras cambien los parámetros externos tales como instalación de nuevas plantas generadoras.

La metodología propuesta se emplea en el Capítulo 5 para el cual se considera diferentes condiciones de operación, pequeñas y grandes perturbaciones, y se busca mejorar la respuesta del SICN a través de la sintonización óptima de los estabilizadores de la C.T. Aguaytia, C.H. C. Pato, C.T. Talara; empleando modelos de pequeña señal y estudios de estabilidad transitoria, efectuándose simulaciones en el tiempo tanto con los parámetros existentes y los parámetros optimizados.

La diferencia de los resultados obtenidos, es mas que evidente al mostrar la pérdida de sincronismo de las máquinas de Aguaytia y Talara para los casos 1, 2, y 3. Y la oscilación que se presenta en el caso 3 para la máquina de C. Pato contra Cahua y Aguaytia, así mismo, la pérdida de sincronismo de la máquina de Talara en el caso 4, al ingresar la carga de 40MW + j15 MVAR en Machala; Son superadas en forma contundente con los parámetros optimados.

RECOMENDACIONES Y CONTRIBUCIONES

- A fin de obtener resultados óptimos en el proceso de sintonización de los PSSs y FDSs en forma simultánea, se debe trabajar con la ecuación de estado que represente al sistema global, tales como los generadores, líneas de transmisión, cargas dinámicas o estáticas, dispositivos de control (FACTS, PSS, AVR, etc.), y los sistemas HVDC. Ya que al sintonizar en forma individual mediante la aplicación de señales de impulsos a las máquinas mediante el sistema excitatriz, estos quedan limitados a pequeñas regiones de operación (capaces de amortiguar solo algunos modos de oscilación), llevando a sintonizar cada vez que existan cambios en los parámetros del sistema.
- Se recomienda la aplicación del GA, en cualquier proceso de optimización, tales como el despacho económico, minimización de pérdida de energía, etc. Ya que esta herramienta trabaja con una población inicial de soluciones potenciales, y evolucionan a través de sucesivas generaciones mediante los operadores genéticos.
- En estudios detallados de fenómenos transitorios se recomienda el empleo del ATP-Draw combinando con el procesador de datos MatLab, por tener el primero, una gran capacidad de simulación y modelación, y el segundo, cuenta con las herramientas analíticas y de procesamiento de datos, interactuando estas dos poderosas herramientas a través de ficheros de entrada y salidas de datos. Aplicándose no solo para estudios de fenómenos transitorios sino, en estudios en general.
- En los diferentes estudios desarrollados para el buen funcionamiento del SEIN a través de COES, se ha detectado la diversificación de la data, ya sea de las máquinas, líneas de transmisión y controles (AVR, PSS). Lo cual indica que en el Sistema Eléctrico Peruano no se tiene una única base de datos actualizados que permita llegar a resultados adecuados en dichos estudios. Esta variación de datos incluye la *pagina web* (sección *red data*) de COES (última visita: diciembre-2003).
- Los aportes más importantes de este trabajo son: la metodología flexible para el proceso de la sintonización de PSS en forma simultánea; La integración de un algoritmo genético en un programa de simulación digital para la aplicación en los sistemas eléctricos de potencia a fin de optimizar el proceso propuesto, o cualquier otro proceso.

APÉNDICE A

ELEMENTOS DE LA MATRIZ DE ESTADO

$$a_{12} = -\left[\frac{(X_q - X'_q)Y_g R_a}{T'_{qo}} \right] \quad a_{14} = -\left[\frac{(X_q - X'_q)Y_g(X'_q V_{do} + R_a V_{qo})}{T'_{qo}} \right]$$

$$a_{21} = -\left[\frac{(X_d - X'_d)Y_g R_a}{T'_{do}} \right] \quad a_{22} = -\left[\frac{1 + (X_d - X'_d)Y_g X'_q}{T'_{do}} \right]$$

$$a_{24} = -\left[\frac{(X_d - X'_d)Y_g(X'_q V_{do} - R_a V_{qo})}{T'_{do}} \right] \quad a_{31} = -\left[\frac{i_{do} + F_1 R_a - F_2 X'_d}{T_j} \right]$$

$$a_{32} = -\left[\frac{i_{qo} + F_1 X'_q + F_2 R_a}{T_j} \right] \quad a_{34} = -\left[\frac{F_1(X'_q V_{do} - R_a V_{qo}) + F_2(X'_d V_{qo} + R_a V_{do})}{T_j} \right]$$

$$c_{11} = -\left[\frac{(X_q - X'_q)Y_g(-X'_d \text{sen} \delta_o + R_a \text{cos} \delta_o)}{T'_{qo}} \right] \quad c_{12} = -\left[\frac{(X_q - X'_q)Y_g(X'_d \text{cos} \delta_o + R_a \text{sen} \delta_o)}{T'_{qo}} \right]$$

$$c_{21} = -\left[\frac{(X_d - X'_d)Y_g(X'_q \text{cos} \delta_o + R_a \text{sen} \delta_o)}{T'_{do}} \right] \quad c_{51} = -\frac{k_A V_{TRO}}{T_A \sqrt{V_{TR}^2 + V_{TI}^2}}$$

$$c_{22} = -\left[\frac{(X_d - X'_d)Y_g(-X'_q \text{sen} \delta_o + R_a \text{cos} \delta_o)}{T'_{do}} \right] \quad c_{52} = \frac{k_A V_{TIO}}{T_A \sqrt{V_{TR}^2 + V_{TI}^2}}$$

$$c_{31} = \left[\frac{F_1(R_a \text{sen} \delta_o + X'_q \text{cos} \delta_o) + F_2(-X'_d \text{sen} \delta_o + R_a \text{cos} \delta_o)}{T_j} \right]$$

$$c_{32} = \left[\frac{-F_1(R_a \text{cos} \delta_o - X'_q \text{sen} \delta_o) + F_2(X'_d \text{cos} \delta_o + R_a \text{sen} \delta_o)}{T_j} \right]$$

$$a_{87} = -\frac{T_1}{T_2 - T_1}, \quad a_{88} = \frac{T_2}{T_2 - T_1}, \quad a_{98} = -\frac{T_3}{T_4 - T_3}, \quad a_{99} = \frac{T_4}{T_4 - T_3}$$

$$z_{11} = Y_g(R_a \text{sen} \delta_o - X'_d \text{cos} \delta_o) \quad z_{12} = Y_g(X'_q \text{sen} \delta_o + R_a \text{cos} \delta_o) \quad z_{21} = Y_g(-R_a \text{cos} \delta_o - X'_d \text{sen} \delta_o)$$

$$z_{22} = Y_g(-X'_q \text{cos} \delta_o + R_a \text{sen} \delta_o)$$

$$w_{11} = Y_g[-R_a + (X'_d - X'_q) \text{cos} \delta_o \text{sen} \delta_o]$$

$$w_{12} = -Y_g[X'_d \text{cos}^2 \delta_o + X'_q \text{sen}^2 \delta_o]$$

$$w_{21} = -Y_g[X'_d \text{sen}^2 \delta_o + X'_q \text{cos}^2 \delta_o]$$

$$w_{22} = Y_g[-R_a + (X'_q - X'_d) \text{cos} \delta_o \text{sen} \delta_o] \quad z_{14} = Y_g(-R_a V_{Io} + X'_d V_{qo} \text{cos} \delta_o + X'_q V_{do} \text{sen} \delta_o) - I_{Io}$$

$$z_{24} = Y_g(-R_a V_{Ro} + X'_d V_{qo} \text{sen} \delta_o + X'_q V_{do} \text{cos} \delta_o) + I_{Ro}$$

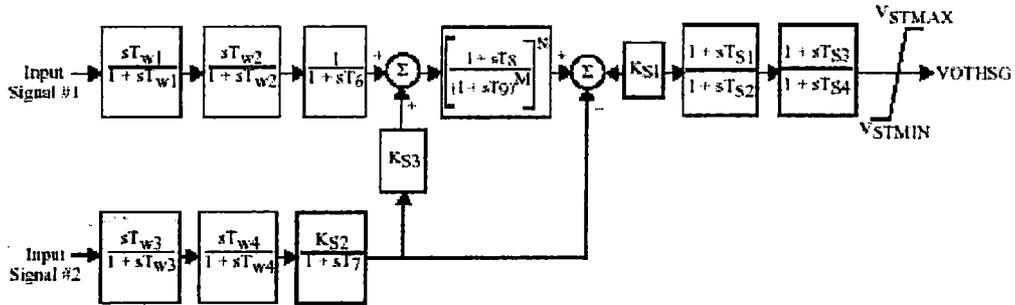
APÉNDICE B

MODELOS DE LOS CONTROLES UTILIZADOS

PSS

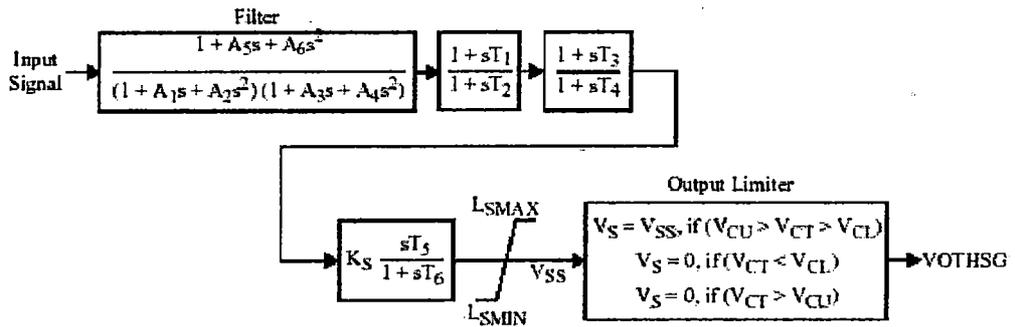
MODELO

'PSS2A', I, ICS1, REMBUS1, ICS2, REMBUS2, M, N, T_{w1} , T_{w2} , T_6 , T_{w3} , T_{w4} , T_7 , K_{S2} , K_{S3} , T_8 , T_9 , K_{S1} , T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , V_{STMAX} , V_{STMIN}



MODELO

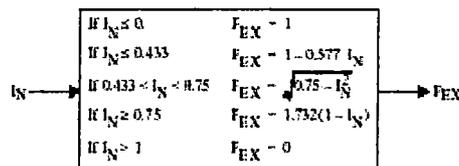
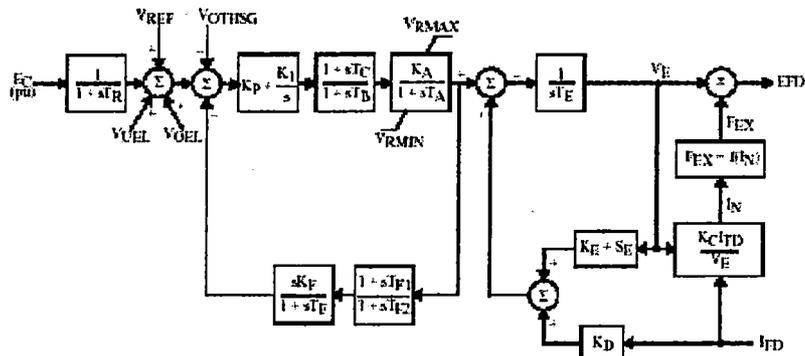
'IEEEST', I, ICS, IB, A_1 , A_2 , A_3 , A_4 , A_5 , A_6 , T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_5 , T_6 , K_S , L_{SMAX} , L_{SMIN} , V_{CU} , V_{CL}



SISTEMA EXCITATRIZ

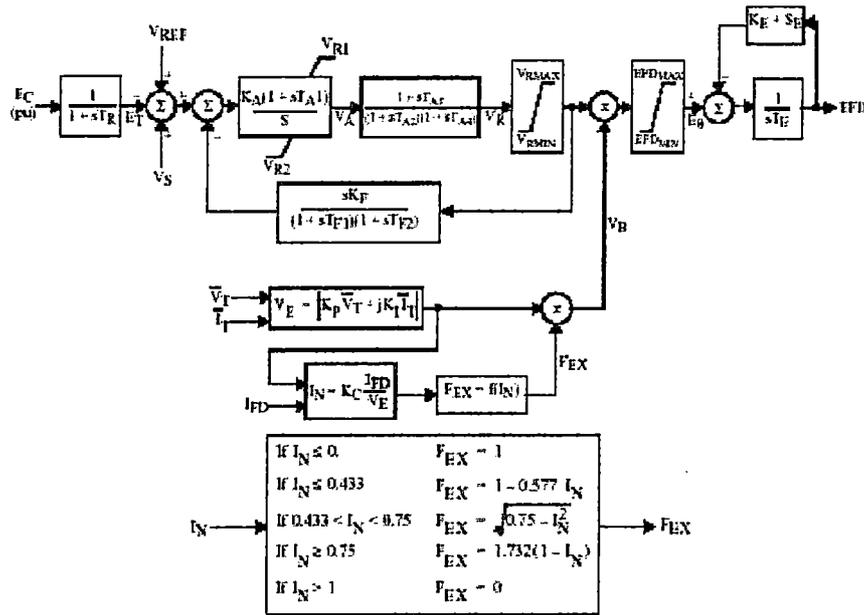
MODELO

'EXBAS', I_{TR} , K_P , K_I , K_A , T_A , T_B , T_C , V_{RMAX} , V_{RMIN} , K_F , T_F , T_{F1} , T_{F2} , K_E , T_E , K_C , K_D , E_1 , $S_E(E_1)$, E_2 , $S_E(E_2)$



SISTEMA EXCITATRIZ

BUS, EXPIC1, TR, KA, TA1, VR1, VR2, T_{A2} , T_{A3} , T_{A4} , V_{RMAX} , V_{RMIN} , K_F , T_{F1} , T_{F2} , E_{FD}^{MAX} , E_{FD}^{MIN} , K_e , T_e , E_1 , SE_1 , E_2 , SE_2 , K_P , K_I , K_C



Parámetro Modelo	Carhuaq.	C. Pato	Cahua	Aguay=Talara
	EXPIC1	EXPIC1	EXPIC1	EXBAS
TR	0.025	0.010	0.01	0.023
KA	25.0	11.6	15.0	354.9
TA1/TA(EXBAS)	2.00	1.720	6.0	0.010
VR1	6.40	5.250	7.200	--
VR2	-5.760	-4.20	-6.48	--
TA2/TB(EXBAS)	0.00	0.019	0.035	0.043
TA3/TC(EXBAS)	0.00	0.00	0.350	0.190
TA4	0.00	0.00	0.00	--
VRMAX	99.00	99.00	6.00	8.33
VRMIN	-99.00	-99.0	-5.40	-6.66
KF	0.00	0.00	0.00	0.029
TF1	1.00	1.0	1.00	0.043
TF2	0.00	0.00	0.00	0.190
EFDMAX	6.40	6.50	99.00	--
EFDMIN	-5.760	-5.20	-99.00	--
KE	0.00	0.00	1.00	1.00
TE	0.00	0.00	1.00	0.30
E1	0.00	0.00	6.00	6.240
SE(E1)	0.00	0.00	0.00	0.170
E2	0.00	0.00	4.500	8.330
SE(E2)	0.00	0.00	0.00	0.182
KP/KD(EXBAS)	1.00	1.25	0.00	0.00
KI	0.00	0.00	0.00	0.00
KC	0.20	0.20	0.00	0.20
TF	--	--	--	2.600

Parámetros existentes de los AVR

APÉNDICE C

MatLab Program: Determina Parámetros Iniciales de la Máquina

C.1 condinit.m

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%  
% File Name: condinit.m  
% Proposito: Calcula condiciones iniciales y parámetros internos de la máquina%  
% para el desarrollo de la matriz de estado a partir de los parametros externos%  
% Notas:  
%  
% 1. Input Data  
%  
% Este programa usa los parametros externos de la máquina y  
% los constantes de tiempo  
%  
% ra stator resistance, pu  
% Xl stator leakage inductance, pu  
% Xd d-axis synchronous reactance, pu  
% Xdp d-axis transient reactance, pu  
% Xdpp d-axis sub-transient reactance, pu  
% Xq q-axis reactance, pu  
% Xqpp q-axis transient reactance, pu  
% Xqpp q-axis sub-transient reactance, pu  
% Tpdo d-axis open circuit transient time constant, sec  
% Tppdo d-axis open circuit sub-transient time constant, sec  
% Tpqo q-axis open circuit transient time constant, sec  
% Tppqo q-axis open circuit sub-transient time constant, sec  
%  
% Nota: Matlab usa ' como una característica de transposición de una matriz. %  
% por lo tanto, para la variables, "p" denota "prima" y "pp" "doble prima" %  
%  
% del flujo de potencia:  
%  
% SN potencia nominal (potencia base, MVA)  
% PN potencia entregada a la maquina, MW  
% UN voltge nominal (voltage base, kV)  
% Po Polf/PN en pu  
% Qo Qolf/PN en pu
```

```

% U Ulf/UN en pu
% theta angulo del voltage, grados
%
% 2. Output
%
% ra stator resistance, pu (dado, NO calculado)
% ld d-axis armature flux, pu
% Md d-axis mutual inductance, pu
% rD d-axis damper winding resistance, pu
% lD d-axis damper winding reactance, pu
% rf rotor field resistance, pu
% lf rotor field inductance, pu
% lq q-axis armature flux, pu
% Mq q-axis mutual inductance, pu
% rQ1 first q-axis damper winding resistance, pu
% lQ1 first q-axis damper winding reactance, pu
% rQ2 second q-axis damper winding resistance, pu
% lQ2 second q-axis damper winding reactance, pu
%
% Este programa calcula las condiciones iniciales:
%
% UoR real axis machine terminal voltage, pu
% UoI imaginary axis machine terminal voltage, pu
% IoR real axis machine node injection current, pu
% IoI imaginary axis machine node injection current, pu
% thetao q-axis position, degrees
% udo d-axis voltage, pu
% uqo q-axis voltage, pu
% ido d-axis current, pu
% iqo q-axis current, pu
% lambdaado d-axis mutual flux
% lambdaaqo q-axis mutual flux
% ifo field excitation current, pu
% lambdaQ1o first q-axis damper winding flux
% lambdaQ2o second q-axis damper winding flux
% lambdaado d-axis damper winding flux
% lambdaafo field flux
% cmo shaft torque, pu
% efdo field excitation voltage, pu
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

% Inicio del programa-----%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Primera parte %
% Parámetros de la máquina de Aguaytia convertidos de externos a internos %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Entrada de datos-----%
% Parámetros de la Máquina(Externo) %
Xd = 1.8; Xpd = 0.3; Xppd = 0.25; Xq = 1.7; Xpq = 0.55; Xppq = 0.25;
ra = 0.0025; Xl = 0.2; Tpdo = 8.0; Tppdo = 0.03; Tpqo = 0.4; Tppqo = 0.05;
inputd = [Xd Xpd Xppd Tpdo Tppdo];
inputq = [Xq Xpq Xppq Tpqo Tppqo];
inputmut = [ra Xl];
%-----End entrada de datos %
% 4-winding calculations -----%
% d-axis values begin-----%
omegao = 120*pi;
Tpd = Xpd*(Tpdo/Xd);
Tppd = Xppd*(Tppdo/Xpd);
dB1 = (Tpdo + Tppdo)*omegao;
dB2 = (Tpd + Tppd)*omegao;
dC1 = (Tpdo*Tppdo)*(omegao*omegao);
dC2 = (Tpd*Tppd)*(omegao*omegao);
ld = Xl;
Md = Xd - Xl;
dX = (Md*ld)/Xd;
dP = (dB1/Md) - (dB2/dX);
dQ = (1/dX) - (1/Md);
dB = dC2 - dC1*(ld/Xd);
dRAD = sqrt(1 - (4*dB*ld*dQ*dQ)/(dX*dP*dP));
dV1 = (-0.5*dP*(1+dRAD))/dQ;
dV2 = (-0.5*dP*(1-dRAD))/dQ;
dV = [dV1; dV2];
dU1 = (dB*ld)/(dX*dV1);
dU2 = (dB*ld)/(dX*dV2);
dU = [dU1; dU2];
dZ1 = (dB*ld) + (Md*dV1)*(dB2+(dP/dQ));
dZ2 = (dB*ld) + (Md*dV2)*(dB2+(dP/dQ));
dE1 = (dC1 - (dZ1/dX))/(Md*(dU1-dV1));
dE2 = (dC1 - (dZ2/dX))/(Md*(dU2-dV2));
dE = [dE1; dE2];
drf1 = 1/dE1;

```

```

drf2 = 1/dE2;
drf = [drf1; drf2];
dalf = (Tpd*Md - Tpdo*dX)/(Tpdo-Tpd);
darf = (Md+dalf)/(Tpdo*omegao);
%
% selección del valor de rf
dummyd1 = abs(darf-drf1);
dummyd2 = abs(darf-drf2);
if dummyd1 < dummyd2
    selectiond = 1;
else
    selectiond = 2;
end
dF = ((dB2+(dP/dQ))/dX) - (dE(selectiond));
rD = 1/dF;
lD = rD*(dU(selectiond));
rf = drf(selectiond);
lf = rf*(dV(selectiond));
%
% d-axis output
outputd = [Md ld rf lf rD lD];
%-----End of d-axis calculations %
% q-axis values begin-----%
Tpq = Xpq*(Tpqo/Xq);
Tppq = Xppq*(Tppqo/Xpq);
qB1 = (Tpqo + Tppqo)*omegao;
qB2 = (Tpq + Tppq)*omegao;
qC1 = (Tpqo*Tppqo)*(omegao*omegao);
qC2 = (Tpq*Tppq)*(omegao*omegao);
lq = Xl;
Mq = Xq - Xl;
qX = (Mq*lq)/Xq;
qP = (qB1/Mq) - (qB2/qX);
qQ = (1/qX) - (1/Mq);
qB = qC2 - qC1*(lq/Xq);
qRAD = sqrt(1 - (4*qB*lq*qQ*qQ)/(qX*qP*qP));
qV1 = (-0.5*qP*(1+qRAD))/qQ;
qV2 = (-0.5*qP*(1-qRAD))/qQ;
qV = [qV1; qV2];
qU1 = (qB*lq)/(qX*qV1);
qU2 = (qB*lq)/(qX*qV2);

```

```

qU = [qU1; qU2];
qZ1 = (qB*lq) + (Mq*qV1)*(qB2+(qP/qQ));
qZ2 = (qB*lq) + (Mq*qV2)*(qB2+(qP/qQ));
qE1 = (qC1 - (qZ1/qX))/(Mq*(qU1-qV1));
qE2 = (qC1 - (qZ2/qX))/(Mq*(qU2-qV2));
qE = [qE1; qE2];
qrQ1 = 1/qE1;
qrQ2 = 1/qE2;
qrQ = [qrQ1; qrQ2];
qalQ1 = (Tpq*Mq - Tpco*qX)/(Tpco-Tpq);
qarQ1 = (Mq+qalQ1)/(Tpco*omegao);
% selection of rQ value
dummyq1 = abs(qarQ1-qrQ1);
dummyq2 = abs(qarQ1-qrQ2);
if dummyq1 < dummyq2
selectionq = 1;
else
selectionq = 2;
end
qF = ((qB2+(qP/qQ))/qX) - (qE(selectionq));
rQ2 = 1/qF;
lQ2 = rQ2*(qU(selectionq));
rQ1 = qrQ(selectionq);
lQ1 = rQ1*(qV(selectionq));
% q-axis output
outputq = [Mq lq rQ1 lQ1 rQ2 lQ2];
%-----End of q-axis calculations %
%-----End of External Value to Internal Value Conversion %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Segunda Parte %
% Initial Conditions Calculation %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Input Values -----%
% De Flujo de Potencia Load Flow
UN = 13.8.0;
PN = 100.0;
SN = 119.2.0;
Polf = 85.0;
Qolf = 5.0;
Ulf = 13.8.0;
theta = 153.0;

```

```

Po = Polf/SN;
Qo = Qolf/SN;
U = Ulf/UN;
%-----End of Load Flow Values Input %
% Calculo de condiciones iniciales -----%
% machine terminal voltage == Voltage terminal de la máquina
UoR = U*sin(theta);
UoI = U*cos(theta);
%
% machine node injection current == inyeccion de la corriente por la maquina
IoR = (Po*UoR + Qo*UoI) / (UoR*UoR + UoI*UoI);
IoI = (Po*UoI - Qo*UoR) / (UoR*UoR + UoI*UoI);
% q-axis position
thetao = atan((UoI+omegao*(Mq+lq)*IoR+ra*IoI)/(UoR+ra*IoR-omegao*(Mq+lq)*IoI));
% Park voltages and currents == transformacion de Park
udo = (UoR*sin(thetao)) - (UoI*cos(thetao));
uqo = (UoR*cos(thetao)) + (UoI*cos(thetao));
ido = ((IoR*sin(thetao)) - (IoI*cos(thetao)))*(100/SN);
iqo = ((IoR*cos(thetao)) + (IoI*sin(thetao)))*(100/SN);
% mutual fluxes
lambdaado = (-1.0/omegao)*(uqo + ra*iqo + omegao*ld*ido);
lambdaaqo = (-1.0/omegao)*(udo + ra*ido - omegao*lq*iqo);
% field excitation current
ifo = (lambdaado/Md) - ido;
% winding fluxes
lambdaQ1o = lambdaaqo;
lambdaQ2o = lambdaQ1o;
lambdado = lambdaado + ifo;
lambdafo = (lambdaado + (lf*ifo));
% shaft torque == en el eje
cmo = ((-lambdaado*iqo) + (lambdaaqo*ido))*(100/SN);
% field excitation voltage == voltage de excitacion
efdo = -Md*ifo;
%-----End of Initial Values Calculations %
%-----End of Program %
%-----%
% fiee unac bchp
%-----%

```

APÉNDICE D

		DEMANDA EN ESTIAJE MINIMA 2003				Z=	V*V						
		CENTRO NORTE					P-iQ						
Nº	NOMBRE	kVnom	V(pu)	kV	P(MW)	Q(MVAR)	S(MVA)	fdp	R(ohm)	X(ohm)	L(mH)	Z(ohm)	
1	CAHUA	132	1.03	136	0.2	0.10	0.22	0.89	73940.5	36970.2	98064.3	82668.0	
2	HUANUCO	10	1.00	10	3.17	1.48	3.50	0.91	25.9	12.1	32.1	28.6	
3	PARAMONGA EXISTENTE	132	1.00	132	27.25	5.00	27.70	0.98	618.6	113.5	301.1	628.9	
4	PARAMONGA N	220	1.00	220	5.85	1.50	6.04	0.97	7763.1	1990.5	5279.9	8014.2	
5	SETRUJINOR	138	1.01	139.4	25.93	6.06	26.63	0.97	710.4	166.0	440.4	729.5	
6	SETRUJINOR	138	1.01	139.4	25.93	6.06	26.63	0.97	710.4	166.0	440.4	729.5	
7	CHIM TO CHIMBOTE S	138	1.01	139.4	25.95	6.48	26.75	0.97	704.7	176.0	466.8	726.3	
8	CHIM TO CHIMBOTE N	138	1.01	139.4	25.95	6.48	26.75	0.97	704.7	176.0	466.8	726.3	
9	CHIM TO SIDER	138	1.01	139.4	27.39	6.85	28.23	0.97	667.5	166.9	442.6	688.1	
10	CHIM TO SIDER	138	1.01	139.4	27.39	6.85	28.23	0.97	667.5	166.9	442.6	688.1	
11	HUALL TO CARAZ	138	1.05	144.9	5.45	2.48	5.99	0.91	3191.6	1452.3	3852.3	3506.5	
12	HUALL TO CPATO	138	1.05	144.9	5.45	2.48	5.99	0.91	3191.6	1452.3	3852.3	3506.5	
13	TMARIA TO AUCAY	138	0.95	131.1	0.2	0.10	0.22	0.89	68748.8	34374.4	91178.8	76863.5	
14	TMARIA TO TOCA	138	0.95	131.1	0.89	0.40	0.98	0.91	16066.2	7220.8	19153.2	17614.2	
15	TMARIA TO TMARIA10	220	0.95	209	1.98	0.89	2.17	0.91	18353.0	8249.6	21882.1	20121.8	
16	CAJAMARCA	220	1.02	224.4	14.23	5.00	15.08	0.94	3149.8	1106.7	2935.7	3338.6	
17	VIZC TO ANTA	220	1.02	224.4	81.76	20.44	84.28	0.97	579.7	144.9	384.4	597.5	
18	TALA TO ZORR	220	1.03	226.6	9	6.00	10.82	0.83	3949.8	2633.2	6984.6	4747.1	
19	TALARA	220	1.03	226.6	16.5	6.00	17.56	0.94	2748.5	999.5	2651.1	2924.6	
20	GUADALUPE TO CP	220	1.03	226.6	27.12	6.00	27.78	0.98	1805.0	399.3	1059.2	1848.6	
21	PIURA TO	220	1.03	226.6	31.12	15.42	34.73	0.90	1324.7	656.4	1741.1	1478.4	
22	CHICL TO SECHO	220	1.03	226.6	26.55	12.50	29.35	0.90	1583.1	745.3	1977.0	1749.8	
TOTAL					415.3	124.6	433.5	1.0					

COMPENSACION REACTIVA FIJO Y AUTOMATICO

BARRA	C:Reac.Pow.		Vnom:	Rtd. Current	Rtd. Reac.Pow.	C:Current	L:Reac.Pow.	L:Current	C:Cap.	L (mH)	REACTANCIA
	Mvar-	Mvar	kV	A	Mvar-	A	Mvar	A	uF		ohm
T MARIA138	0	10	138	41.84			0	0.00	# DIV/0		# DIV/0
HUANUCO138	0	10	138	41.84			0	0.00	# DIV/0		# DIV/0
CHIM 13.8	0	15	13.8	627.55			0	0.00	# DIV/0		# DIV/0
CHIM 13.8	0	20	13.8	836.74			0	0.00	# DIV/0		# DIV/0
TALARA220	20	0	220	52.49	20	52.49				6418.7	2419.83
T MARIA 220	30	0	220	78.73	30	78.73				4279.4	1613.33
GUADALUPE220	20	0	220	52.49	20	52.49				6418.7	2419.83
PIURAO 220	20	0	220	52.49	20	52.49				6418.7	2419.83
PARAM.N220	40	0	220	104.97	40	104.97				3209.6	1210.03
VIZCARRA220(SVC)	45	90	220	0.00	0	0	40	105.16	2.2	# DIV/0	
TRUJILLON138(SVC)	20	30	138	0.00	0	0	15	62	2.1	# DIV/0	