



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

**SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**ANÁLISIS DE ESTABILIDAD ANTE PEQUEÑOS
DISTURBIOS DE LOS GENERADORES DE
INDUCCIÓN EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE
POTENCIA**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS.
EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**PRESENTA:
MERCEDES LÁZARO GONZAGA**



MÉXICO, D. F.

MAYO 2005



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
COORDINACION GENERAL DE POSGRADO E INVESTIGACION

ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 17:00 horas del día 28 del mes de Enero del 2005 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada Por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de la E. S. I. M. E. Para examinar la tesis de grado titulada:

"ANALISIS DE ESTABILIDAD ANTE PEQUEÑOS DISTURBIOS DE LOS GENERADORES DE INDUCCION EN SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA"

Presentada por el alumno:

LAZARO

Apellido del paterno

GONZAGA

materno

MERCEDES

nombre(s)

Con registro:

B	0	2	1	4	5	1
---	---	---	---	---	---	---

Aspirante al grado de:

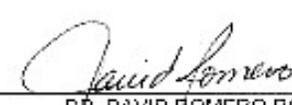
MAESTRO EN CIENCIAS

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA

Director de tesis


DR. DANIEL OLGUIN SALINAS


DR. DAVID ROMERO ROMERO


DR. CARLOS RIVERA SALAMANCA


M. EN C. TOMAS IGNACIO ASAIN QUIJARES


DR. DANIEL RUIZ VEGA


M. EN C. JESUS REYES GARCIA



SECCION DE ESTUDIOS DE
EL PRESIDENTE DEL COLEGIO


DR. FLORENCIO SANCHEZ SILVA



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
COORDINACION GENERAL DE POSGRADO E INVESTIGACION

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de México, Distrito Federal, el día 28 del mes de Enero del año 2005, el (la) que suscribe *Mercedes Lázaro Gonzaga* alumno(a) del Programa de Maestría en Ciencias con especialidad en **Ingeniería Eléctrica** con número de registro B021451, adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME Unidad Zacatenco, manifiesta que es autor(a) intelectual del presente Trabajo de Tesis bajo la dirección del *Dr. Daniel Olguín Salinas* y cede los derechos del trabajo intitulado: ***Análisis de Estabilidad ante Pequeños Disturbios de los Generadores de Inducción en Sistemas Eléctricos de Potencia***, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, graficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: Plan de Tuxtepec No. 29. Col. Barrio La Purísima Ticomán, C. P. 07320. México, D. F.

merlagon@hotmail.com ó dolguin47@yahoo.com

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Mercedes Lázaro Gonzaga

Nombre y firma

RESUMEN

En la actualidad, el análisis de estabilidad ante pequeños disturbios en los sistemas eléctricos de potencia ha cobrado gran importancia, debido al incremento de cargas eléctricas tanto dinámicas como estáticas, las cuales han provocado que en los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP), existan oscilaciones de baja frecuencia y pobre amortiguamiento originando serias limitaciones en cuanto a la transferencia de energía eléctrica hacia los usuarios, trayendo como consecuencias serios problemas de inestabilidad durante un período de operación normal.

En este trabajo, se presenta un análisis detallado de estabilidad ante pequeños disturbios de los generadores de inducción interconectados a una red eléctrica de potencia, con diferentes dispositivos que conforman al sistema como son: generadores de inducción, red de transmisión, compensación fija y controlada expresadas en forma de variables de estado.

El modelado del sistema, se hace empleando a la máquina de inducción como un generador o un equivalente de generadores de inducción, conectados a un bus infinito, aplicando dicho estudio de manera práctica, primero a un sistema de laboratorio con el Simulador Experimental de Sistemas Eléctricos de Potencia de Laboratorio que pertenece a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación en la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica; y posteriormente al caso de una planta de energía eólica (Central Eoloeléctrica de La Venta, Oaxaca), la cual forma parte del Sistema Interconectado Nacional (SIN), en estos sistemas es común el empleo de máquinas asíncronas, debido a las ventajas que conlleva su uso, manejo, mantenimiento y bajo costo.

Se compara el valor de los eigenvalores con sus respectivos eigenvectores y factores de participación en cada uno de sus modos de oscilación, para cada configuración del sistema en los casos de operación estable e inestable, comparando los resultados con un análisis en el tiempo de los modelos lineal y no lineal.

Se utilizaron dos técnicas de identificación modal para el sistema máquina bus infinito del simulador experimental: Análisis de Prony para obtener los modos de oscilación en forma directa de una respuesta en el tiempo y sensibilidad paramétrica para la identificación de la influencia de la variación de los parámetros en los modos de oscilación.

Por último, se presenta el eigenanálisis de un parque eólico real, partiendo de su equivalente dinámico con el fin de observar el comportamiento de los modos de oscilación en los generadores de inducción involucrados, en sus diferentes configuraciones como SEP.

ABSTRACT

SMALL DISTURBANCES STABILITY ANALYSIS OF THE INDUCTION GENERATORS IN ELECTRIC POWER SYSTEMS

Nowadays, the analysis of small disturbance stability in electric power systems has undertaken great importance, due to the increment of dynamic and static electric loads, which have caused low frequency and poorly damped oscillations in Electric Power Systems, (EPS). These oscillations originate serious limitations to the electric power transfer toward the users, bringing serious consequences as instability problems during normal operating state.

In this work, detailed the analysis of small disturbance stability of the induction generators interconnected an electric network is presented, with different devices that conform the system like: induction generators, transmission network, fixed and controlled compensation expressed in form of state variables.

The modeling of the system, is made using the induction machine like an induction generator or an equivalent of induction generators, connected to an infinite bus-bar, applying this study in a practical way, first to a laboratory system with the Experimental Simulator of Electric Power Systems of the Studies of Postgraduate and Research Section, in the Mechanical and Electrical Engineering School; and later to the real case of an wind farm (Central Eoloeléctrica of La Venta, Oaxaca), which is part of the National Interconnected System (NIS), in these systems it is common the employment of asynchronous machines, due to the advantages that it bears their use, handling, maintenance and low cost.

The value of the eigenvalues is compared with its respective eigenvectors and participation factors in each one of its oscillation modes, for each configuration of the system in the cases of stable and unstable operation, comparing the results with an time analysis of the lineal and non-lineal models.

Two techniques of modal identification were used for the system machine infinite bus of the Experimental Simulator: Prony Analysis in order to obtain the oscillation modes in a direct way from time response and parametric sensitivity analysis for the identification of the influence of the parameter's variation in the oscillation modes.

Finality, the eigenanalysis of a real wind farm is presented, based on its dynamic equivalent with the purpose of observing the behavior in the oscillation modes in the involved induction generators, in its different configurations as an EPS.

ÍNDICE

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS	2
CARTA CESIÓN DE DERECHOS.	3
DEDICATORIAS.	4
AGRADECIMIENTOS.	5
RESUMEN.	6
ABSTRACT.	7
ÍNDICE.	8
ÍNDICE DE FIGURAS.	11
ÍNDICE DE TABLAS.	14
SIMBOLOGÍA.	15
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN.	16
1.1 GENERALIDADES	17
1.2 OBJETIVOS.	17
1.2.1 Objetivo General.	17
1.2.2 Objetivos Particulares.	17
1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.	17
1.4 JUSTIFICACIÓN.	18
1.5 ALCANCE.	19
1.6 ESTADO DEL ARTE.	19
1.7 CONCEPTOS GENERALES.	23
1.7.1 Estabilidad en los Sistemas Eléctricos de Potencia.	23
1.7.2 Estabilidad Angular ante Grandes Disturbios	24
1.7.3 Estabilidad Angular ante Pequeños Disturbios.	25
1.8 APORTACIONES.	27
1.9 ESTRUCTURA DE LA TESIS.	28
CAPÍTULO II GENERADORES DE INDUCCIÓN Y SUS APLICACIONES.	29
2.1 INTRODUCCIÓN.	29
2.2 CONCEPTOS BÁSICOS.	29
2.3 FLUJO DE POTENCIA Y CIRCUITO EQUIVALENTE.	32
2.4 PAR INDUCIDO.	33
2.5 PAR MÁXIMO.	35
2.6 VARIACIÓN DE VELOCIDAD POR VOLTAJE DE LÍNEA.	36
2.7 GENERACIÓN EÓLICA.	37
2.7.1 Situación del Recurso Eólico en México.	38
2.7.2 Elementos de un Sistema Eoloeléctrico.	40
2.7.2.1 Potencia-Velocidad.	42
2.8 GENERACIÓN MICROHIDROELÉCTRICA.	43
2.8.1 Partes de una Central Minihidráulica.	44

CAPÍTULO III MODELADO MATEMÁTICO DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA.	45
3.1 INTRODUCCIÓN.	45
3.2 REPRESENTACIÓN LINEAL DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA.	45
3.3 TÉCNICAS DE ANÁLISIS MODAL.	47
3.3.1 Método de Eigenanálisis.	47
3.3.1.1 Eigenvalores.	47
3.3.1.2 Eigenvectores.	48
3.3.1.3 Matrices Modales.	49
3.3.1.4 Respuesta Libre del Sistema.	49
3.3.1.5 Formas Modales.	50
3.3.1.6 Factores de Participación.	51
3.3.1.7 Método de Sensibilidad de Eigenvalores.	51
3.4 TÉCNICAS DE IDENTIFICACIÓN MODAL.	52
3.4.1 Análisis de Fourier.	52
3.4.2 Análisis de Prony.	53
3.5 EQUIVALENTES DINÁMICOS.	55
3.6 MODELO LINEAL DEL GENERADOR DE INDUCCIÓN BUS INFINITO.	57
3.6.1 Modelo de un Generador de Inducción conectado a través de una Impedancia al Bus Infinito.	59
3.6.1.1 Modelo del Capacitor.	62
3.6.1.2 MODELO DEL COMPENSADOR ESTÁTICO DE VARs (CEV).	65
3.7 SIMULADOR DIGITAL.	68
3.7.1 Características del Simulador Digital frecuencia.for	68
3.7.2 Características del Simulador Digital tiempo.for	68
	70
CAPÍTULO IV ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL SEP DE LABORATORIO CON GENERADORES DE INDUCCIÓN.	
4.1 INTRODUCCIÓN.	70
4.2 DESCRIPCIÓN DEL PRIMER SISTEMA DE PRUEBA.	70
4.2.1 Comportamiento del Primer Sistema de Prueba.	71
4.3 DESCRIPCIÓN DEL SEGUNDO SISTEMA DE PRUEBA.	72
4.3.1 Sistema de Prueba Máquina Bus Infinito.	74
4.4 SIMULACIÓN EXPERIMENTAL.	74
4.4.1 Resultados del Sistema Máquina Bus Infinito de Laboratorio.	75
4.5 COMPORTAMIENTO DE LAS VARIABLES DEL GENERADOR DE INDUCCIÓN EN UN MODELO NO LINEAL.	77
4.6 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD ANTE PEQUEÑOS DISTURBIOS DE UN SISTEMA MÁQUINA BUS INFINITO.	81
4.6.1 Modelo de Quinto Orden.	82
4.6.1.1 Comportamientos Modales.	84
4.6.2 Modelos de Séptimo y Noveno Orden.	92
4.7 ANÁLISIS DE PRONY DE UN SISTEMA MÁQUINA BUS INFINITO.	102
4.8 MÉTODO DE SENSIBILIDAD DE LOS EIGENVALORES DE UN SISTEMA MÁQUINA BUS INFINITO.	105
4.8.1 Método de Sensibilidad variando cada parámetro del modelo de 5° orden.	106
4.8.2 Método de Sensibilidad variando solamente un parámetro del modelo de 5° orden.	108

CAPÍTULO V ANÁLISIS DE UN PARQUE EÓLICO EN LA VENTA OAXACA.	110
5.1 Introducción.	110
5.2 Central “La Venta” Oaxaca.	111
5.2.1 Características de La Central “La Venta” Oaxaca.	114
5.2.2 Análisis Ante Pequeños Disturbios de la Central “La Venta” Oaxaca.	115
CAPÍTULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	121
6.1 Conclusiones	121
6.1.1 Conclusiones del sistema de prueba.	121
6.1.2 Conclusiones del sistema de prueba de laboratorio.	121
6.1.3 Conclusiones del sistema de la Venta Oaxaca.	122
6.2 Contribuciones.	123
6.3 Sugerencias y Recomendaciones para trabajos futuros.	123
REFERENCIAS.	124
APÉNDICES.	130
A. MODELO NO LINEAL DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN.	130
B. SISTEMAS EN POR UNIDAD.	138
C. DIAGRAMAS DE FLUJO.	141
D. LISTADO DE PROGRAMAS EN FORTRAN.	146

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Comportamiento de la estabilidad en los sistemas eléctricos de potencia.	24
Figura 2.1	Diagrama Equivalente exacto por fase para una máquina de inducción trifásica como motor, referida al estator.	32
Figura 2.2	Diagrama Equivalente por fase para una máquina de inducción trifásica aplicando teorema de Thevenin.	33
Figura 2.3	Curva característica de Par Inducido v_s Velocidad Mecánica de una Máquina de Inducción rotor jaula de ardilla de 1 HP en valores reales.	35
Figura 2.4	Curva característica de la Potencia de Conversión v_s Velocidad Mecánica de una Máquina de Inducción rotor jaula de ardilla de 1 HP en valores reales.	35
Figura 2.5	Curva de variación de la resistencia del rotor sobre la característica Par v_s Velocidad Mecánica de una Máquina de Inducción con rotor devanado de 1 HP en valores reales.	36
Figura 2.6	Curva de variación del voltaje de línea sobre la característica Par v_s Velocidad Mecánica de una Máquina de Inducción.	37
Figura 2.7	Subsistemas principales de un aerogenerador de eje horizontal típico.	41
Figura 2.8	Curva hipotética para un aerogenerador Vestas V-27 225 kW.	43
Figura 3.1	Circuito de la planta eoloeléctrica con N generadores iguales.	55
Figura 3.2	Circuito equivalente de la plante eoloeléctrica La Venta, Oaxaca.	55
Figura 3.3	Circuito equivalente de una máquina de inducción monofásica.	56
Figura 3.4	Circuito de la maquina bus infinito conectada por medio de la impedancia de la red de transmisión.	60
Figura 3.5	Conexión de una máquina de inducción, bus infinito por medio de una impedancia de red con un capacitor de autoexcitación en paralelo.	62
Figura 3.6	Configuración básica de un FC-TCR, conectado a un generador.	65
Figura 3.7	Comportamiento del voltaje y corriente en un circuito máquina bus infinito con el control de voltaje de un FC-TCR en paralelo.	66
Figura 3.8	Diagrama de Flujo del simulador digital frecuencia.for.	69
Figura 3.9	Diagrama de Flujo del simulador digital tiempo.for.	69
Figura 4.1	Primer Sistema de prueba.	70
Figura 4.2	Diagrama unifilar del simulador experimental de la ESIME ZACATENCO.	72
Figura 4.3	Diagrama unifilar del generador de inducción de 1 h.p.	74
Figura 4.4.	Sistema de prueba máquina bus infinito convencional.	74
Figura 4.5	Diagrama unifilar de la conexión de los transductores de potencia activa y reactiva del arreglo de prueba del generador de inducción.	75
Figura 4.6	Potencia eléctrica en las terminales del sistema máquina Bus Infinito de laboratorio en unidades reales.	75
Figura 4.7	Potencia eléctrica en las terminales del sistema máquina Bus Infinito de laboratorio en pu.	75
Figura 4.8	Comparación de la Potencia eléctrica en las terminales del sistema máquina Bus Infinito de laboratorio en pu.	76
Figura 4.9	Puntos de operación para la condición de laboratorio CL y los puntos de equilibrio E e I, de un generador de inducción de 1 h.p.	77
Figura 4.10a	Comportamiento de la corriente para el caso de laboratorio CL.	78
Figura 4.10b	Comportamiento del voltaje terminal para el caso de laboratorio CL.	78

Figura 4.10c	Comportamiento de la potencia eléctrica para el caso de laboratorio CL.	78
Figura 4.10d	Comportamiento del deslizamiento para el caso de laboratorio CL.	78
Figura 4.10e	Comportamiento de la velocidad para el caso de laboratorio CL.	78
Figura 4.11a	Comportamiento de la corriente para un punto de equilibrio estable E.	79
Figura 4.11b	Comportamiento del voltaje terminal para un punto de equilibrio estable E.	79
Figura 4.11c	Comportamiento de la potencia eléctrica para un punto de equilibrio estable E.	79
Figura 4.11d	Comportamiento del deslizamiento para un punto de equilibrio estable E.	79
Figura 4.11e	Comportamiento de la velocidad para un punto de equilibrio estable E.	80
Figura 4.12a	Comportamiento de la corriente para un punto de equilibrio inestable I.	80
Figura 4.12b	Comportamiento del voltaje terminal para un punto de equilibrio inestable I.	80
Figura 4.12c	Comportamiento de la potencia eléctrica para un punto de equilibrio inestable I.	81
Figura 4.12d	Comportamiento del deslizamiento para un punto de equilibrio inestable I.	81
Figura 4.12e	Comportamiento de la velocidad para un punto de equilibrio inestable I.	81
Figura 4.13a	Corrientes del generador.	82
Figura 4.13b	Voltajes en el estator del generador.	82
Figura 4.13c	Comportamiento de los voltajes en el rotor del generador.	82
Figura 4.14	Comportamiento de los eigenvalores para el modelo de 5º orden.	83
Figura 4.15	Comportamiento modal de los eigenvectores derechos.	84
Figura 4.16	Comportamiento modal de los eigenvectores izquierdos.	84
Figura 4.17	Comportamiento modal de los factores de participación.	85
Figura 4.18	Comportamiento modal de los eigenvalores derechos.	87
Figura 4.19	Comportamiento modal de los eigenvalores izquierdos.	87
Figura 4.20	Comportamiento modal de los factores de participación.	87
Figura 4.21	Comportamiento modal de los eigenvalores derechos.	89
Figura 4.22	Comportamiento modal de los eigenvalores izquierdos.	89
Figura 4.23	Comportamiento modal de los factores de participación.	89
Figura 4.24	Comportamiento modal de los eigenvalores derechos.	91
Figura 4.25	Comportamiento modal de los eigenvalores izquierdos.	91
Figura 4.26	Comportamiento modal de los factores de participación.	91
Figura 4.27	Comportamiento de la reactancia capacitiva para la compensación del nodo de generación en el modelo de 9º orden.	94
Figura 4.28	Comportamiento de eigenvalores del modelo de 9º orden cuando se varía el valor de la reactancia capacitiva.	96
Figura 4.29	Comportamiento de los eigenvalores del sistema variando la impedancia de red.	98
Figura 4.30a	Eigenvalores del modo 1 variando la impedancia de red.	98
Figura 4.30b	Eigenvalores del modos 2 y 3 variando la impedancia de red.	98
Figura 4.30c	Eigenvalores del modos 4 y 5 variando la impedancia de red.	99
Figura 4.30d	Eigenvalores del modos 6, 7, 8 y 9 variando la impedancia de red.	99
Figura 4.31a	Forma modal de los eigenvectores derechos del modo 1.	99
Figura 4.31b	Forma modal de los eigenvectores derechos del modo 2 y 3.	99
Figura 4.31c	Forma modal de los eigenvectores derechos del modo 4 y 5.	100
Figura 4.31d	Forma modal de los eigenvectores derechos del modo 6 y 7.	100
Figura 4.31e	Forma modal de los eigenvectores derechos de los modos 8 y 9.	100
Figura 4.32a	Factores de Participación del modo 1.	101
Figura 4.32b	Factores de Participación de los modos 2 y 3.	101

Figura 4.32c	Factores de Participación de los modos 4 y 5.	101
Figura 4.32d	Factores de Participación de los modos 6 y 7.	101
Figura 4.32e	Factores de Participación de los modos 8 y 9.	101
Figura 4.33	Comportamiento de la respuesta en el tiempo de la potencia eléctrica en un modelo lineal de 5° orden.	103
Figura 4.34	Comportamiento de eigenvalores de un sistema de 5° orden.	105
Figura 4.35	Comportamiento de la variación de los modos 1,2 en función de la variación de todos los parámetros de la máquina de inducción.	107
Figura 4.36	Trayectorias de los modos del generador de inducción de 1 h.p., variándolos de manera directa.	107
Figura 4.37	Trayectorias de los modos del generador de inducción de 1 h.p., variándolos con el método de sensibilidad	108
Figura 4.38	Comparación entre la variación del valor de la X_1 .	109
Figura 5.1	Zona geográfica de La Ventosa, Oaxaca.	110
Figura 5.2	Sistema Interconectado de la Zona de Tehuantepec, Oaxaca.	112
Figura 5.3	Central eoloeléctrica de La Venta, Oaxaca, (CFE).	113
Figura 5.4	Sistema de prueba de La Venta Oaxaca.	114
Figura 5.5	Circuito equivalente de la planta de Generación Eoloeléctrica “La Venta”, Oaxaca.	115
Figura 5.6	Comportamiento de los eigenvalores del modelo de 5° orden para 6 y 8 polos de los generadores Vestas.	116
Figura 5.7	Comportamiento de eigenvalores del modelo de 7° orden para 6 y 8 polos de los generadores Vestas*.	116
Figura 5.8	Comportamiento de eigenvalores del modelo de 9° orden para 6 y 8 polos de los generadores Vestas*.	116
Figura 5.9a	Comportamiento Modal en función del eigenvector derecho en función del modo 1.	117
Figura 5.9b	Comportamiento Modal en función del eigenvector derecho en función de los modos 2 y 3.	117
Figura 5.9c	Comportamiento Modal en función del eigenvector derecho en función de los modos 4 y 5.	117
Figura 5.9d	Comportamiento Modal en función del eigenvector derecho en función de los modos 6 y 7.	117
Figura 5.9e	Comportamiento Modal en función del eigenvector derecho en función de los modos 8 y 9.	117
Figura 5.10a	Comportamiento de los Factores de Participación de l modo 1.	119
Figura 5.10b	Comportamiento de los Factores de Participación de los modos 2 y 3.	119
Figura 5.10c	Comportamiento de los Factores de Participación de los modos 4 y 5.	119
Figura 5.10d	Comportamiento de los Factores de Participación de los modos 6 y 7.	119
Figura 5.10e	Comportamiento de los Factores de Participación de los modos 8 y 9.	119
Figura 5.11	Eigenvalores del generador de 6 polos variando su X_c .	121
Figura 5.12	Eigenvalores del generador de 8 polos variando su X_c .	121
Figura 5.13	Eigenvalores del generador de 6 polos variando su deslizamiento.	122
Figura 5.14	Eigenvalores del generador de 8 polos variando su deslizamiento.	122
Figura A.1	Sistema Máquina Bus Infinito.	132
Figura A.2	Relación entre los ejes de las fases del estator y rotor con los ejes del marco de referencia dq.	133

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Fenómenos oscilatorios y sus rangos típicos de frecuencias indicando niveles de modelado en diferentes componentes.	26
Tabla 2.1	Capacidad Efectiva Instalada en el 2000.	38
Tabla 2.2	Comparación de la velocidad del viento medio anual (V_v anual) en varios lugares del mundo.	39
Tabla 2.3	Resumen nacional de la minihidráulica.	44
Tabla 3.1	Ventajas y Desventajas del Análisis de Fourier.	53
Tabla 4.1	Parámetros del SEP del aerogenerador en p.u.	70
Tabla 4.2	Comparación de los resultados del programa de frecuencia.for con los resultados de la referencia.	71
Tabla 4.3	Parámetros del SEP de prueba en unidades reales de la figura 4.2.	73
Tabla 4.4	Condiciones de operación inicial para el generador de 1 h.p.	82
Tabla 4.5	Comportamiento de los eigenvalores del generador de 1 HP.	83
Tabla 4.6	Variación de la capacitancia para excitación de la máquina.	94
Tabla 4.7	Comportamiento de los eigenvalores del generador de 1 HP.	95
Tabla 4.8	Comportamiento de los eigenvalores del generador de 1 HP, variando el valor del capacitor, en el modelo de 9° orden.	95
Tabla 4.9	Comportamiento de los eigenvalores del generador de 1 HP, variando el valor de la impedancia de red, en el modelo de 9° orden.	97
Tabla 4.10	Comparación de los factores de amortiguamiento y frecuencia correspondientes al generador de 1 HP en un modelo de 5° orden en y los obtenidos con Prony.	104
Tabla 4.11	Eigenvalores correspondientes al generador de 1 HP en un modelo de 5° orden con los valores base.	106
Tabla 4.12	Variación de los parámetros del generador de inducción de 1 HP.	106
Tabla 4.13	Comportamiento de los eigenvalores con un incremento de un 25% en cada parámetro del sistema.	106
Tabla 4.14	Variación de la reactancia de dispersión en la X1 del generador de inducción.	108
Tabla 4.15	Variación de los eigenvalores de la reactancia de dispersión en la reactancia del estator del generador de inducción a diferentes porcentajes.	108
Tabla 5.1	Parámetros del SEP del aerogenerador en unidades reales.	114
Tabla 5.2	Comportamiento de los eigenvalores de los generadores Vestas de 6 y 8 polos.	115
Tabla 5.3	Comportamiento de los eigenvalores de los generadores Vestas de 6 y 8 polos en función de la variación de la reactancia capacitiva que representa el banco de capacitores.	121
Tabla 5.4	Comportamiento de los eigenvalores de los generadores Vestas de 6 y 8 polos en función de la variación del deslizamiento.	122

SIMBOLOGÍA

SEP	Sistema Eléctrico de Potencia
SIN	Sistema Interconectado Nacional.
n_{des}	Velocidad de deslizamiento en rpm
n_m	Velocidad del rotor en rpm
n_{sinc}	Velocidad de sincronismo del campo magnético del estator en rpm.
f_e	Frecuencia del Sistema en Hertz.
P	Número de Polos de la máquina
S	Deslizamiento de la máquina de inducción en %
ω	Velocidad angular (rad/seg)
f_r	Frecuencia del rotor de la máquina en Hertz.
P_g	Potencia promedio por fase en Watts
I_1	Corriente en el estator en Amperes.
I_2	Corriente en el rotor Amperes.
V_1	Voltaje en el estator en Volts.
V_2	Voltaje en el rotor en Volts.
R_1	Resistencia en el Estator en Ohms.
R_2	Resistencia en el Rotor en Ohms.
X_1	Reactancia en el Estator en Ohms.
X_2	Reactancia en el Rotor en Ohms.
R_{Th}	Resistencia de Thevenin en Ohms.
X_{Th}	Reactancia de Thevenin en Ohms.
Z_{Th}	Reactancia de Thevenin en Ohms.
τ_{ind}	Par inducido en N·m.
P_{ag}	Potencia en el entrehierro en watts.
Δx	Vector de estados de orden n.
Δy	Vector de salida de orden m.
Δu	Vector de control de entradas de orden r.
A	Matriz Característica del Sistema de orden nxn.
B	Matriz de Estradas del Sistema de orden nxr.
C	Matriz de Salidas del Sistema de orden mxn.
D	Matriz de Estradas de Control del Sistema de orden mxr.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN.

1.1 GENERALIDADES.

El fenómeno de estabilidad en los sistemas eléctricos de potencia, siempre se ha considerado como un problema importante, desde años atrás, ya que cuando este tipo de sistemas se encuentran en servicio, los operadores siempre tienen que cuidar que se mantengan operando en condiciones normales de operación, por lo que su manejo debe de ser confiable y seguro. Sin embargo, debido al empleo de varios factores como es el incremento de carga, han provocado una modificación en su estructura, tamaño y comportamiento, lo cual ha traído como consecuencia, que sean más complejos en cuanto a su manejo y análisis; provocando, a su vez, la evolución y creación de nuevos equipos para su estudio, además de la implementación de nuevas técnicas para su manejo y el empleo de fuentes de energías alternativas para abastecerlos [1,2,3,4,5].

Cuando el problema de estabilidad en los sistemas eléctricos de potencia existe, este es clasificado en base a tres variables importantes, que son: *el voltaje de los nodos*, *la frecuencia del sistema* o bien *el ángulo de carga de los generadores* [3,6], de acuerdo con la magnitud del disturbio, se puede hablar principalmente de dos estudios de estabilidad en los sistemas eléctricos de potencia: *estabilidad a grandes disturbios* y *estabilidad ante pequeños disturbios* [1,3,4].

Este trabajo, se enfoca principalmente al análisis de estabilidad ante pequeños disturbios de la máquina de inducción como generador, empleando la configuración del sistema máquina bus infinito o bien partiendo para este análisis de un equivalente dinámico de generadores, agregando los modelos matemáticos de los dispositivos que conforman al sistema eléctrico de potencia para este estudio, como pueden ser: la red de transmisión, los capacitores en paralelo o un Compensador Estático de VARs (CEV). El desarrollo se hace con la ayuda de un análisis en la frecuencia aplicando el método de eigenanálisis mediante un programa de computadora digital para analizar el comportamiento de la estabilidad ante pequeños disturbios de todo el sistema y se llevo a cabo tanto para un sistema de Laboratorio en el Simulador Experimental de Sistemas Eléctricos de Potencia de la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación (SEPI), en la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME), Unidad Zacatenco [7,8,9,10], como para el análisis de un SEP equivalente de una Central Eoloeléctrica localizada en La Venta, Oaxaca; que se encuentra en el SIN [11,12,13], en ambos sistemas se hace un análisis del comportamiento de sus eigenvalores con sus respectivos eigenvectores y factores de participación en cada uno de sus modos de oscilación destacando los casos de variación de velocidad, red de transmisión y

compensación del sistema, donde en cada uno se muestra una condición estable e inestable para este tipo de sistemas.

1.2 OBJETIVOS.

1.2.1 Objetivo General.

Analizar la interacción de los generadores de inducción en el comportamiento dinámico de los sistemas eléctricos de potencia; principalmente en el análisis de estabilidad ante pequeños disturbios, empleando diferentes configuraciones del sistema máquina bus infinito.

1.2.2 Objetivos Particulares.

- ✓ Desarrollo de un programa digital para el análisis de estabilidad ante pequeños disturbios (tanto en el tiempo como en la frecuencia) de un sistema eléctrico de potencia con generadores de inducción.
- ✓ Comprobación experimental de un sistema eléctrico de potencia de laboratorio, de los eigenvalores con sus respectivos eigenvectores y factores de participación en el modo de oscilación de la potencia eléctrica por medio de técnicas de identificación modal (Análisis de Prony) y eigenanálisis, para un caso de modo estable y otro inestable; analizando el efecto de la estabilidad ante pequeños disturbios que pueden llegar a tener estos sistemas.
- ✓ Efectuar estudios de sensibilidad de los eigenvalores de un sistema eléctrico de potencia con generadores de inducción a través de eigenanálisis y técnicas de sensibilidad paramétrica.
- ✓ Hacer un análisis de estabilidad ante pequeños disturbios de generadores de inducción que conforman a la Central Eoloeléctrica de La Venta, Oaxaca.

1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.

Uno de los grandes problemas dinámicos en los sistemas eléctricos de potencia de nuestro país, es la inestabilidad que este tipo de sistemas pueden llegar a tener, debido a la producción de oscilaciones electromecánicas de baja frecuencia, provocadas por pequeñas perturbaciones, siendo causadas por cambios normales en la operación diaria de las redes eléctricas, que a su vez, producen desbalances en la potencia mecánica y eléctrica; principalmente, en los rotores de las máquinas síncronas, que es, cuando estas oscilan en forma relativa unas con otras [2,5,6,15,16]; pero debido a que en los últimos años, la producción de energía eléctrica se hace con el aprovechamiento de algunas energías alternativas; surge la necesidad del empleo de otro tipo de máquinas en la producción de energía eléctrica, como es el caso de las máquinas de inducción, las cuales tienen como ventajas: bajo costo por unidad, construcción robusta y simple, menor costo en su mantenimiento, ausencia de la fuente separada o externa de corriente directa para la excitación del campo magnético, además de un fácil control de las unidades generadoras

[3,4,5,7,8,9,10,12,13,14,17,18,19,20,23]; es por ello, que el análisis de estabilidad ante pequeños disturbios para este trabajo, se hace con el empleo de este tipo de máquinas y sistemas.

No obstante, existen también otro tipo de disturbios más severos como la producción de bajas oscilaciones en los sistemas eléctricos de potencia como en voltaje o frecuencia, que se asocian con la presencia de grandes fallas dentro del SEP, como es el *colapso de voltaje* que son considerados como grandes disturbios para el sistema, debido a varios factores como: las crisis energéticas, propiciadas por la eventual escasez de fuentes de energía no renovables [7,10,19,20,23,24,25,26]; debido al crecimiento de la población en estos últimos años y como consecuencia al incremento de cargas eléctricas; surge la necesidad de proteger a los sistemas eléctricos de potencia, de pequeñas perturbaciones que han surgido últimamente en función del voltaje y de forma angular, y que en la actualidad son consideradas ya como perturbaciones críticas en condiciones normales de operación; es por ello, que en este trabajo se aborda el análisis de los generadores de inducción en la estabilidad ante pequeños disturbios de un sistema eléctrico de potencia [2,3,4,12,13,14,16,18,19,20,29,30,31,32,33].

1.4 JUSTIFICACIÓN.

Debido al gran consumo de la energía eléctrica que existe en la actualidad, las plantas de generación y sistemas de distribución de manera convencional; en la actualidad, ya no es suficiente mantener este consumo, por lo que se ha tenido que recurrir al desarrollo de la generación eléctrica, a través de energías alternativas; es por ello que se han desarrollado diversos sistemas de generación natural o renovable, para este fin; sin embargo, el impulso dado al desarrollo de la tecnología asociada al aprovechamiento de las energías renovables a partir de la década de los setenta, ha permitido que diversas tecnologías en fase experimental se conviertan en un producto capaz de competir en el mercado y ganar terreno a otras alternativas que operan con combustibles fósiles, además no hay que olvidar que su costo es muy bajo comparado con los sistemas de generación convencional, tal es el caso de la energía eólica [7,11,12,13,26,33].

En México se cuenta con la Central Eoloeléctrica en la Venta, Oaxaca; que entra en operación en 1994 por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), con una capacidad instalada de 1.5 MW y una capacidad adicional en aerogeneradores y aerobombas de aproximadamente 2.4 MW, conforme al Balance Nacional de Energía de 1997 [25,81]. Creando decenas de miles de puestos de trabajo y generando miles de millones de ingresos anuales. El ritmo de cambio y avance ha sido vertiginoso en esta nueva industria. El conocimiento del recurso energético eólico en México está a nivel exploratorio y de reconocimiento. Las mediciones realizadas principalmente por el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) y algunas otras entidades o empresas, han servido para confirmar la existencia de vientos técnicamente aprovechables y económicamente viables en diversas regiones [36,37,81]. Sin embargo, en estos sistemas, el uso de los

generadores de inducción es indispensable, tanto en este tipo de sistemas o subsistemas y pueden llegar a operar en forma aislada o bien en forma de interconectar al SEN [11,12,13,81]. Es por ello, que en las áreas de planeación y operación de los SEP, es importante desarrollar herramientas para el análisis dinámico de manera teórico y experimental, viendo la influencia y el efecto de la interacción de los generadores de inducción en la dinámica de los sistemas eléctricos de potencia.

1.5 ALCANCE.

Se hizo un programa de computadora digital, para el análisis de estabilidad ante pequeños disturbios de un sistema máquina bus infinito de laboratorio pero con la diferencia de la agregación de diferentes modelos de los componentes que conforman al SEP; además, del desarrollo de un equivalente dinámico de generadores de un parque eólico de la Central Eoloeléctrica en La Venta, Oaxaca.

1.6 ESTADO DEL ARTE.

El comienzo de los primeros estudios de tipo dinámico en la estabilidad de los sistemas eléctricos de potencia se presentaron con la operación en paralelo de generadores síncronos, en la tercera década del siglo pasado, siendo la producción de las oscilaciones sostenidas en el rotor, provocadas por el par mecánico pulsante de los primomotores que se agravaba al entrar en resonancia con la frecuencia electromecánica del generador, el cual originó la preocupación por el estudio del tipo dinámico en los sistemas eléctricos de potencia [1,2,3,4,5,6,12,13,15,27,38].

Cabe mencionar que dentro de un estudio de estabilidad ante pequeños disturbios es común encontrar problemas de oscilaciones del tipo electromecánicas provocadas por pequeñas variaciones en el sistema y que estas variaciones son de baja frecuencia, las cuales son producto de los cambios normales en una operación cotidiana en los sistemas de potencia eléctrica, pero estas pequeñas variaciones provocan a su vez, desbalances en la potencia mecánica y en la potencia eléctrica, lo cual produce una oscilación relativa en los rotores de las máquinas que conforman los sistemas de generación eléctrica.

Para realizar un estudio de estabilidad ante pequeños disturbios primeramente se considera el *movimiento libre del sistema*, dicha respuesta es obtenida calculando los eigenvalores de la matriz característica del sistema (matriz A); para el desarrollo de un análisis de estabilidad ante pequeños disturbios, existen métodos en el dominio de la frecuencia o en el tiempo, como: *técnicas de análisis modal y técnicas de identificación modal (análisis de Prony) e integración numérica* [4,28,39,40,41], donde a su vez la aplicación de estas metodologías para su desarrollo, son tratados de manera lineal, los cuales, nos proporcionan información del comportamiento de las variables que intervienen en el sistema de forma oscilatoria y también del comportamiento global de este [4,5,13,19]. El empleo de las técnicas de análisis lineal nos permite determinar la fuente y naturaleza de las oscilaciones y el desarrollo de posibles

medidas correctivas, o bien, la agregación de dispositivos al sistema para mejorar su comportamiento en situaciones de inestabilidad.

Este trabajo se refiere a un estudio de estabilidad ante pequeños disturbios con generadores de inducción con una aplicación en sistemas eólicos, es por ello que se dará una breve reseña histórica acerca de su desarrollo que hay tanto en la SEPI-ESIME-ZACATENCO, así como en otros trabajos realizados previamente.

En 1969, Robert H. Nelson, Thomas A. Lipo y Paul C. Krause [42], Realizó un análisis de estabilidad a una máquina de inducción simétrica, aplicando el método de lugar de las raíces durante la aplicación de un pequeño disturbio en un punto de operación dado, destacando los límites de estabilidad e inestabilidad en las variables de estado de dicho modelo.

En 1980, N. Gunaratnam y D. W. Novotny [43], Realiza un análisis comparando los valores de los eigenvalores dominantes de los transitorios de estator de la máquina de inducción tanto del modelo completo como del modelo reducido de la misma máquina. En 1981, O. Wasynczuk [22], habla del comportamiento dinámico de algunos generadores con turbinas eólicas, examinando los métodos para mejorar la conducta dinámica durante fluctuaciones de viento aleatorias. E. N. Hinrichsen y P. J. Nolan [44], describen la dinámica y estabilidad de un generador eólico, empleando generadores síncronos y generadores de inducción. Y. L. Abdel-Magid y I. M. Ei-Amin [45], realizan un estudio sobre estabilidad dinámica en generadores para turbinas eólicas en condiciones de variación de carga, empleando un sistema máquina bus infinito. En 1988, la IEEE, edita una serie de propuestas recomendadas para interconexión de pequeños sistemas de conversión de energía eólica [46], teniendo en cuenta algunas medidas de protección, instalación y operación para las mismas.

En 1991, Kinh D. Pham [47], realiza estudios acerca del uso de la máquina de inducción como generador en la aplicación de cogeneración, destacando principalmente las ventajas de su costo, mantenimiento y construcción, además de algunas características que destacan en este tipo de máquinas para su funcionamiento y empleo como es la necesidad de la potencia reactiva para su excitación, el sobrevoltaje, la producción de armónicos, además también habla de los factores que requiere para su interconexión con una red más grande, tratando los problemas de flujos de carga, corto circuito, estabilidad, estudios de coordinación de los dispositivos de protección y requerimiento de relevadores de protección. R. M. Hilloowala y A. M. Sharaf [48], presentan un modelado dinámico de un sistema de generación eólica con generadores de inducción con excitación separada, tomando la velocidad variable a una frecuencia constante. En este año, X. S. Chen [49], presenta el modelo matemático de la máquina de inducción como generador en el marco de referencia arbitrario deduciéndolo a partir del modelo presentado por Krause [18], conectándolo a un bus infinito, realizando simulaciones de tipo dinámico con fallas por corto circuito (falla trifásica, de línea a línea, de línea a tierra, y de fase abierta en las terminales

del generador), por último se propone un método general simplificado para el análisis del comportamiento del generador en estado estacionario. En 1992, A. G. Bakirtzis [51], describe un método probabilístico para la evaluación de la confiabilidad de los sistemas aislados de energía eólica. Liang Zhixiang [52], hace una comparación entre los generadores síncronos y asíncronos en base a un estudio de estabilidad transitoria tomando como referencia el comportamiento de un generador síncrono convencional, para ello se toma diferentes puntos de operación como en fallas de corto circuito. Luego S. P. Singh [53], presenta las características del comportamiento del voltaje de diferentes máquinas de inducción en varios puntos de operación como generador de inducción con un capacitor como excitación separada, haciendo un análisis del comportamiento de la capacitancia requerida de manera digital usando un algoritmo con el método de Newton-Raphson y con un circuito equivalente, formando un sistema en variables de estado de la máquina, manteniendo su excitación para un valor de voltaje constante con diferentes valores de carga. Se presentan las características del equipo con que cuenta la Central Eoloeléctrica La Venta, Oaxaca [11], así como las posibles localidades con que cuenta la República Mexicana y algunos otros posibles proyectos en que la Comisión Federal de Electricidad ha participado con este tipo de energía renovable. Con el empleo de las nuevas energías alternativas como son la eólica y la solar, G. S. Stavrakakis y G. N. Kariniotakis [54,55], desarrollan un algoritmo general para la determinación exacta de sistemas aislados eólico-fotovoltaicos, teniendo dos casos de estudio: el modelo de un sistema de potencia general del tipo multimáquinas y el segundo caso de la implementación del algoritmo con generadores de inducción para sistemas eólico-solar. Yoshinori Sakamoto [56], describe el funcionamiento de los generadores de inducción con excitación separada paramétrica, centrándose en el comportamiento de la carga, potencia, factor de potencia, eficiencia y contenido armónico, entre otros factores que estos llegan a manejar, así como la representación de un circuito equivalente modificado para la determinación de sus parámetros teniendo un uso más efectivo de las energías renovables. B. Connor [57], hace un estudio del funcionamiento y valoración de las turbinas eólicas con velocidad variable de manera teórica. Jan Svensson [58], diseña, analiza y simula un controlador de ángulo de potencia usando una fuente inversora en una aplicación de voltaje en un sistema de generación eólica, el cual es perfeccionado y comparado con un control de ángulo proporcional. En este mismo año, R. S. Pena [59,60], realiza una investigación de tipo experimental usando un generador de inducción de doble alimentación en un sistema aislado con soporte de carga, posteriormente se diseña un control de velocidad para este tipo de generadores, usando un convertidor Modulador de Ancho de Pulso (PWM) para alimentar a una carga aislada en un sistema eólico con velocidad variable, empleando un control vectorial en el estator de la máquina. Anders Grauers [61], presenta un método para calcular el promedio de la eficiencia del eje de la turbina para tres sistemas eólicos de 500kW, cada uno con diferentes tipos de generador en dicho sistema. Bogdan S. Borowy [62], realiza el monitoreo de datos con un sistema de monitoreo de adquisición de datos de la respuesta

dinámica de un sistema de conversión de energía eólica aislado con un banco de baterías para su almacenamiento cuando se tienen rachas de viento favorables. Pankaj K. Sen [17], habla de todas las aplicaciones, así como las ventajas y desventajas que tienen los generadores de inducción.

En 1998, Li Wang y Jian-Yi Su [63], presentan una aproximación simple y directa, basada en un sistema de quinto orden de un generador de inducción excitación separada, aplicándole un método de sensibilidad de eigenvalores para determinar ambos valores de capacitancia tanto máximo como mínimo requeridos para un sistema aislado aplicándole varios valores de carga. En China, Wu Xueguang [65], se realiza un estudio sobre el comportamiento eólico, tomando en cuenta los modelos de los sistemas de conversión de energía eólica para realizar un análisis dinámico de análisis de potencia. Pero debido a la gran demanda que tienen las plantas de generación híbrida. R. Chedid, H. Akiki y Saifur Rahman [66], presentan una técnica de apoyo de decisión como ayuda para un estudio de mercados de los factores que influyen en el diseño de un sistema de potencia híbrido eólico-solar para conexiones a la red. Hernán De Battista y Ricardo Julián Mantz [67] proponen un modo de control del rizo del par en sistemas de conversión de energía eólica con recuperación de la potencia-deslizamiento. Miguel A. Mayosky y Gustavo I. E. Cancelo [68], presentan un control adaptivo para un sistema de conversión eólica, usando una red base radial. En 1999, Sergio Daher [69], presenta un sistema de excitación para un generador de inducción tipo jaula de ardilla comercial trifásico con un sistema aislado de almacenamiento basado en conversión de energía eólica. Shashank Wekhande [70], propone un control de velocidad simple con regulación de voltaje generado, así como la regulación de la corriente de excitación de la máquina, utilizando generadores de inducción de excitación separada, basado en un controlador de PWM y un lazo cerrado con IGBT. En el 2000, Ezzeldin S. Abdin y Wilson Xu [71], presentan el modelado y diseño de control para un sistema de conversión eólica empleando generadores de inducción. Z. Chen [82], presenta un controlador lógico difuso por medio de electrónica de potencia para la variación de la velocidad en los sistemas de conversión de energía eólicos; más adelante, Daniel Sbarbaro y Ruben Peña [30], presentan una estrategia para estimar el comportamiento no lineal de la velocidad del viento observada desde un sistema de potencia eólico pequeño. Sung-Chun Kuo [72], presenta un nuevo esquema desarrollado en estado estacionario de un generador de inducción trifásico de excitación separada alimentado a un motor de inducción como carga local para un estudio de estabilidad dinámica. En el 2001, Charles Lemogo Kana [73], muestra un sistema administrador de conversión de energía eólica, por medio de un microcontrolador, para evitar posibles fallas de tipo mecánico o eléctrico, cuando se llega a manejar de manera manual. Sung Chun Kuo [21], presenta las respuestas transitorias y dinámicas de estabilidad de un sistema aislado con generador de inducción, alimentando a un motor de inducción. Claudio L. Souza [31], hace un análisis de estabilidad transitoria entre máquinas de inducción y máquinas síncronas, dando a conocer sus ventajas y desventajas en cada máquina, esto es en tanto al tipo de excitación que cada una

ocupa, eficiencia, factor de potencia, contribución de falla al sistema, características de velocidad y carga además de la producción de armónicos de cada una. En este mismo año, Elmer Santos Mora [7,8,9,10], presenta un estudio del comportamiento en estado dinámico de un generador de inducción con un sistema máquina-bus infinito por medio de una falla trifásica a la mitad de la línea de transmisión de manera teórica y experimental; además hace un estudio del efecto de los generadores de inducción en la estabilidad transitoria en un sistema eléctrico de potencia, resaltando las ventajas que existen en las máquinas asíncronas sobre las máquinas síncronas cuando se emplean energías alternativas como sistemas de generación. En el 2002, Ali M. Eltamaly [74], presenta una nueva fórmula matemática para el cálculo de los valores máximo y mínimo de la capacitancia requerida para la auto-excitación de los generadores de inducción en un sistema de generación eólico. M. Machmoum [75], presenta una estrategia de control para un sistema de generación eólico con máquina de inducción de doble alimentación variando la velocidad. En el 2003, Seung-Ho Song [76], realiza la implementación y control de un convertidor de potencia AC-DC-AC, con variación de velocidad en un sistema de conversión de generación eólica empleando máquina síncrona. En 2004, A. B. Raju [77], desarrolla un procedimiento para estimar los parámetros de velocidad óptimos de la turbina del generador eólico, para tener un rendimiento más alto del factor de capacidad, mediante las curvas de potencia normalizada de la probabilidad de Weibull, función de densidad y datos de velocidad del viento. K. L. Shi [78], presenta una nueva estrategia de control impulsando directamente a la turbina eólica con generador síncrono con magnetismo permanente. Kiran Nandigam [79], presenta un modelo para estabilidad y flujos de potencia para turbinas eólicas empleando generadores de inducción con el fin de no tener ningún error del tipo numérico para este tipo de estudios, dicho estudio se hace tomando en cuenta el valor del deslizamiento y potencia reactiva.

En México, el problema de la estabilidad ante pequeños disturbios se empezó a analizar en las últimas dos décadas del siglo pasado [5,14,27,38,80].

1.7 CONCEPTOS GENERALES.

1.7.1 Estabilidad en los Sistemas Eléctricos de Potencia.

El estado estacionario de un sistema eléctrico de potencia, nunca llega a mantenerse, debido a que siempre existen cambios continuos de tipo normal (cambios de carga) o anormal (fallas), por lo que el concepto de *Estabilidad* en los sistemas eléctricos de potencia, se define como la habilidad que tiene un SEP, en volver a recobrar sus condiciones normales de operación (estado de equilibrio dinámico), en la mayoría de las variables del sistema, después de estar sujeto a una perturbación física, en una condición de operación inicial dada [3,94].

Las condiciones normales y anormales que pueden suceder en una condición de operación favorable en un SEP, se encuentran determinados por la ocurrencia de disturbios que alteren el estado de equilibrio de

las variables que intervienen en dicho sistema provocando un evento inesperado; un *disturbio*, es considerado como una perturbación que puede llegar a afectar la operación del sistema en condiciones normales o al mismo equipo; dependiendo del origen de la perturbación en un SEP, y lo que pueda llegar a ocasionar en el SEP, el problema de estabilidad se puede clasificar de acuerdo a un problema del tipo angular (pequeños disturbios), en función de la frecuencia o del voltaje (grandes disturbios); en donde, conforme a la magnitud o al tiempo de duración que estos tengan, además del origen de su causa; podemos decir que la *inestabilidad* de un SEP esta determinado por este tipo de perturbaciones [1,3,79,86,94], después de que por ninguna razón regresa a su estado normal de operación.

En la actualidad, existen diversos comportamientos de estabilidad en los sistemas eléctricos de potencia, tanto de tipo dinámico como estacionario, estos son ocasionados por diversas causas que son proporcionadas por estos sistemas como pueden ser: tamaño, uso, localidad o arquitectura e incluso el tipo de disturbio que pueden llegar a ocurrir en dichos sistemas, los cuales son considerados como factores importantes para un estudio de estabilidad ya sea de tipo transitorio, o bien ante pequeños disturbios, conforme sea el caso, una clasificación más a detalle del problema de estabilidad que ocurren en las redes eléctricas, es mostrada en la figura 1.1.

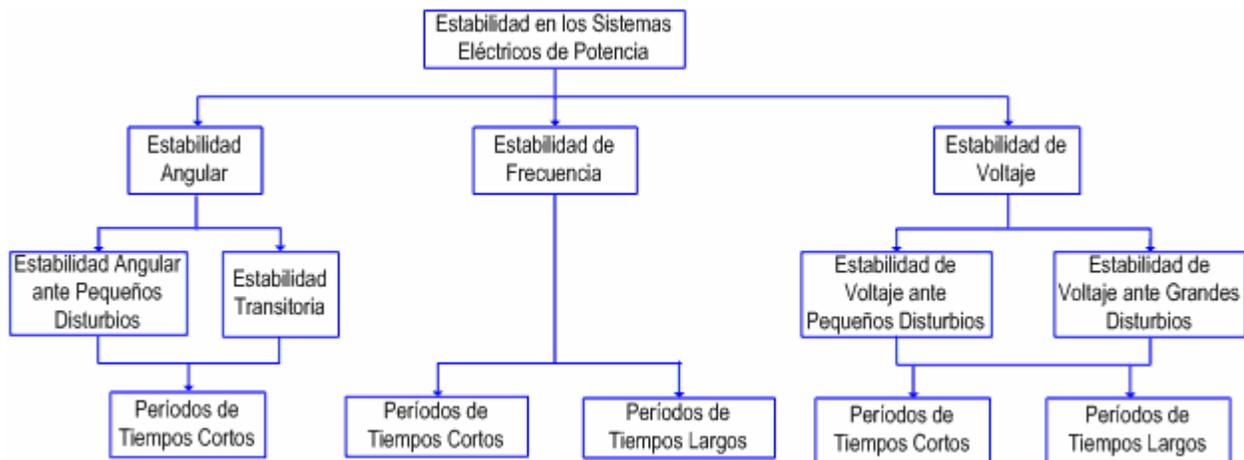


Figura 1.1. Comportamiento de la estabilidad en los sistemas eléctricos de potencia [3,6,94].

1.7.2 Estabilidad Angular ante Grandes Disturbios.

La estabilidad angular del rotor ante grandes disturbios, normalmente se refiere a la habilidad del sistema de mantenerse en sincronismo cuando se encuentra sujeto a una disturbio severo, como un corto circuito en una línea de la transmisión. El tiempo de duración de un disturbio para estabilidad transitoria es normalmente de 3 a 5 segundos; pero puede extenderse de 10 a 20 segundos para los sistemas muy grandes con oscilaciones dominantes de inter-área [3,94].

1.7.3 Estabilidad Angular ante Pequeños Disturbios.

Un *pequeño disturbio* o una *pequeña señal*, también conocida como *estabilidad angular del rotor*, es considerada como la habilidad que tiene un SEP en mantenerse en sincronismo estando bajo un pequeño disturbio, los cuales son considerados lo suficientemente pequeños que permiten proponer un análisis de sistemas de ecuaciones linealizadas. La *estabilidad angular ante pequeños disturbios*, depende del estado de operación inicial del sistema, donde puede resultar dos formas de inestabilidad: incremento del ángulo del rotor a través de un modo no oscilatorio y no periódico, debido a la falta de sincronismo del par; o bien, cuando la amplitud de las oscilaciones del rotor se incrementan debido a que el amortiguamiento en el par no es suficiente [3,4,5,19,94]. La *estabilidad angular ante pequeños disturbios en los SEP*, se asocia comúnmente con insuficiente amortiguamiento en las oscilaciones. La duración de un pequeño disturbio va del orden de 10 a 20 segundos siguiendo al disturbio.

Debido al crecimiento de la población a nivel mundial, ha provocado que el incremento de los subsistemas de transmisión y generación, causen que las operaciones de la red eléctrica sean de manera muy limitada [3,5,6,27], por lo que cuando se tienen respuestas de un sistema eléctrico de potencia ante disturbios aleatorios, por lo regular se comportan de naturaleza oscilatoria; sin embargo, existen sus excepciones como algunos fenómenos del tipo transitorio, en este caso se estará hablando de oscilaciones provocadas por colapsos de voltaje, exceso de generación (alta frecuencia) o bien exceso de carga (baja frecuencia), los cuales son considerados como fallas severas; sin embargo, estas pueden ser liberadas al desconectar aquellos elementos que se encuentren ocasionando este tipo de problemas, donde tiende a amortiguarse en un lapso de tiempo en segundos, debido al amortiguamiento inherente del sistema o bien por la acción de los dispositivos de control que intervienen en dicho sistema [3,4,6,14,27].

Aunque en ocasiones aparecen oscilaciones sin ninguna falla aparente en el sistema, este tipo de oscilaciones disminuyen y pueden controlarse por la acción de cambios de operación o ajustes en los elementos de control para reaparecer intermitentemente bajo condiciones críticas de operación, las cuales solamente son detectadas como fallas de mucha menor magnitud que las anteriores, a lo que este tipo de oscilaciones son periódicas y pueden caracterizarse por períodos de tiempo grandes. Para el estudio de los *procesos oscilatorios* que intervienen en los sistemas eléctricos de potencia son primeramente descritos de manera *cualitativa*, de acuerdo al fenómeno que los origina y *cuantitativa*, de acuerdo a las características de la oscilación observada, esto es, mediante su frecuencia o bien, del amortiguamiento de la oscilación, sin embargo; cabe señalar que el comportamiento dinámico del sistema esta determinado por los modos de oscilación, los cuales reflejan la compleja interacción entre elementos dinámicos y la naturaleza de los diferentes procesos de conversión de energía que caracterizan a un sistema eléctrico de potencia [3,4,14,15], en la tabla 1.1, se muestran algunos fenómenos oscilatorios más representativos. Hay que tomar en cuenta, que algunos fenómenos de estudios más recientes como aquellos que se derivan de

oscilaciones subsíncronas entre la red de transmisión y algunos elementos de control como los compensadores estáticos de VARs y algunos otros dispositivos, pueden requerir de algunas redefiniciones en esta tabla. Sin embargo, los *modos de oscilación* de naturaleza electromecánica son vistos como resultado de la energía cinética que se transfiere a través de la red como consecuencia de un disturbio en el sistema que afecta a los generadores en forma desigual [3,4,5,80].

Tabla 1.1. Fenómenos oscilatorios y sus rangos típicos de frecuencias indicando niveles de modelado en diferentes componentes [4].

FUENTE	FENÓMENO DE INTERÉS					
	Auto excitación (10-60 Hertz.)	Interacción torsional con la red (5-60 Hertz.)	Sistema de excitación (1-10 Hertz.)	Interacción Electromecánica (0.5-3 Hertz.)	Efectos Turbina Gobernador (< 1 Hertz.)	Estabilidad Monotónica (0 Hertz)
Dinámica de estator	R	R				
Dinámica de los devanados de amortiguamiento	R	R	D	D		
Dinámica del devanado de campo	R	R	R	R	R	R
Dinámica torsional de la máquina		R				
Dinámica excitador estabilizador	R		R	R	R	R
Dinámica Turbina-generador				D	R	
Dinámica de la red	R	R				
Dinámica de la carga			D		D	
Dinámica de los generadores de inducción	D	D		D		

R: Requerido

D: Deseable

Las oscilaciones electromecánicas pueden clasificarse cualitativamente de acuerdo al fenómeno que las produce o cuantitativamente, esto es en relación a las características como la frecuencia de oscilación, amortiguamiento, en *Oscilaciones Espontáneas*, *Oscilaciones Transitorias* y *Oscilaciones Forzadas* [3,4,5,14,80]. Las oscilaciones del tipo electromecánico de naturaleza esencialmente espontánea, han sido observadas en muchos sistemas eléctricos. Con frecuencia permanecen con amplitud constante por períodos de tiempo de varios minutos forzando a cambios en las condiciones de operación. La falta de amortiguamiento del sistema produce que vuelvan a ocurrir intermitentemente, en especial bajo condiciones críticas de operación. Las oscilaciones de baja frecuencia en el orden de fracciones de Hertz se asocian con variaciones periódicas de energía cinética que resultan de un disturbio que afecta en forma desigual a los generadores del sistema. Las oscilaciones de origen electromecánico se han clasificado tradicionalmente en cuatro categorías [3,4,5,14,80]:

- a) *Modos locales*, asociados con un generador aislado que oscila con un sistema de gran dimensión exhibiendo frecuencias del orden de 0.8 a 1.8 Hertz.
- b) *Modos intra-planta*, por ejemplo denotando la oscilación entre dos generadores de una misma planta con frecuencias típicas del orden de 2.5 Hertz.
- c) *Modos inter-área o inter-sistema*, que resultan de la interacción entre dos grupos de generadores interconectados por enlaces de poca capacidad exhibiendo frecuencias del orden de 0.2 a 0.5 Hertz.
- d) *Modos asociados a sistemas longitudinales*.

1.8 APORTACIONES.

Las aportaciones más importantes de este trabajo son:

- Se realizó una investigación y aplicación de los métodos de análisis ante pequeños disturbios tanto en el dominio del tiempo como en la frecuencia, de un sistema máquina bus infinito de generadores de inducción con variables de estado tanto en función de corrientes como de flujos electromagnéticos.
- Se efectuó un estudio digital del comportamiento del generador de inducción ante un análisis de estabilidad ante pequeños disturbios, empleando un sistema máquina-bus infinito.
- Se hizo un análisis completo de estabilidad ante pequeños disturbios empleando técnicas de análisis modal, como el eigenanálisis y el análisis de Prony, además de un estudio de sensibilidad paramétrica de primer orden sobre el comportamiento de los parámetros que intervienen tanto en la máquina de inducción como generador, además de los parámetros que intervienen en el arreglo final del sistema de estudio real.
- Se desarrolló un simulador digital para el análisis ante pequeños disturbios de un parque eólico utilizando equivalentes dinámicos.

Los artículos publicados sobre algunos tópicos de este trabajo fueron:

- ✓ Lázaro G. Mercedes, Asiaín O. Tomas, Olguín S. Daniel, *Estabilidad ante Pequeños Disturbios de un Generador de Inducción – Bus Infinito*. Séptimo Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas. IPN-SEPI ESIME, Noviembre 2003.
- ✓ Lázaro G. Mercedes, Asiaín O. Tomas, Olguín S. Daniel, *Análisis de Estabilidad ante Pequeños Disturbios de un Generador de Inducción*. IEEE RVP-AI/2004, Julio 2004.
- ✓ Lázaro G. Mercedes, Olguín S. Daniel, *Sensibilidad de los Eigenvalores de un Sistema Eléctrico de Potencia incluyendo Generadores de Inducción*. Octavo Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas. IPN-SEPI ESIME, 15-19, Noviembre 2004.

1.9 ESTRUCTURA DE LA TESIS.

A continuación se da una breve descripción de la estructura de cada capítulo que integra esta tesis:

En el Capítulo 1, se dan los objetivos, la descripción del problema así como la justificación que envuelve el desarrollo del tema de tesis, además del alcance que se llega a abarcar en este trabajo, se habla también del desarrollo del estudio de estabilidad ante pequeños disturbios a lo largo de la historia y de los trabajos más recientes que hay sobre éste, así como el uso, diseño y aplicación de los generadores de inducción con la energía eólica y otros dispositivos; se dan algunos conceptos importantes para la introducción del tema; por último se dan algunas aportaciones significativas que se obtuvieron en el desarrollo de este trabajo, además de la estructura de la tesis.

En el Capítulo 2, se habla acerca de los generadores de inducción y su aplicación con las energías alternativas, en este caso la energía eólica y la energía hidráulica.

En el Capítulo 3, se describe el modelo matemático del SEP empleado para el desarrollo del tema de tesis, se muestran las ecuaciones que fueron utilizadas para la descripción física de cada dispositivo que integra al SEP usado. Además se muestra las ecuaciones linealizadas de la máquina de inducción como generador, además de la red de transmisión, y de los dispositivos que conforman aun CEV del tipo FC-TCR (Compensador estático de VARs controlado por tiristores con un reactor variable y capacitor fijo).

En el Capítulo 4, se presentan un esquema del simulador experimental que se desarrollo en el laboratorio de la SEPI-ESIME ZACATENCO, así como una explicación de los dispositivos que conforman a dicho sistema.

En el Capítulo 5, se presenta una aplicación del análisis de estabilidad ante pequeños disturbios a un parque eólico que se encuentra en la Venta, Oaxaca por medio del simulador digital.

Finalmente en el Capítulo 6, se dan las conclusiones y recomendaciones obtenidas durante el desarrollo del presente trabajo.

En el apéndice A, se muestra el modelo del generador de inducción no lineal.

En el apéndice B, se muestran los sistemas en por unidad con lo datos de las máquinas utilizadas.

En el apéndice C, se muestran los diagramas de flujos del programas *frecuencia.for*.

En el apéndice D se muestran el archivo de entrada y de salida así como los códigos fuente de los programas utilizados en FORTRAN.

CAPÍTULO II

GENERADORES DE INDUCCIÓN Y SUS APLICACIONES.

2.1 INTRODUCCIÓN.

En este capítulo, se describe la importancia de la generación de energía eléctrica empleando generadores de inducción por medio de energías renovables como son: la energía eólica e hidráulica; así como de las características de su funcionamiento con las que trabaja una máquina de inducción, además de los tipos que existen de acuerdo a su construcción.

En años anteriores, el uso de la máquina de inducción se usaba como motor y formaba parte significativa en un SEP como carga. Sin embargo, para el empleo de los sistemas eoloeléctricos, se pueden utilizar cualquier tipo de máquinas eléctricas como generadores (síncronos, de corriente directa, imanes permanentes, reluctancia, asíncronos o de inducción) [19,20,23,24]. En la actualidad, los sistemas de generación eoloeléctrica y microhidroeléctrica emplean comúnmente máquinas de inducción debido a las ventajas que ofrecen estos sistemas en cuanto a su uso o empleo, como pueden ser: tamaño físico y peso mucho menores con respecto a otro tipo de generadores, aun siendo de la misma capacidad, construcción robusta y simple, que influye en su costo y mantenimiento, debido a que carecen de escobillas; cuando son de rotor jaula de ardilla, estas presentan alta resistencia mecánica ante vibraciones y fuerzas centrífugas, permitiendo mayor rigidez; además carecen de fuente de excitación de corriente directa para alimentar el campo magnético; no requieren de sistemas de regulación o dispositivos de control muy sofisticados y su conexión al bus infinito es muy sencilla; es por ello, que este tipo de máquinas proporciona confianza y economía en cuanto a su empleo [7,19,20,23,24].

2.2 CONCEPTOS BÁSICOS.

Cuando ocurre una falla trifásica como corto circuito o circuito abierto en las cercanías de una máquina de inducción conectada en un SEP, su velocidad decrece o aumenta al liberar la falla, su velocidad regresa al estado normal si el sistema es estable; pero si el sistema no es estable, entonces se detendrá [7,18,83]. A diferencia de la máquina síncrona, la máquina de inducción no gira a velocidad de sincronismo, por lo que se denomina *máquina asíncrona*; a la diferencia entre la velocidad mecánica de sincronismo del campo magnético del estator y la velocidad mecánica del rotor, se le llama *velocidad de deslizamiento*; la cual, se define por la ecuación (2.1) [7,10,18,23,38,83].

$$n_{des} = n_{sinc} - n_m \quad (2.1)$$

donde:

n_{des} = Velocidad de deslizamiento en r.p.m.

n_m = Velocidad del rotor en r.p.m.

n_{sinc} = Velocidad de sincronismo del campo magnético del estator en r.p.m.

Que a su vez esta dada por:

$$n_{sinc} = \frac{120f_e}{P} \quad (2.2)$$

donde:

f_e = Frecuencia del sistema en Hertz.

P = Número de polos de la máquina

A la diferencia entre la velocidad de sincronismo del estator y la velocidad del rotor en por ciento se le denomina *deslizamiento* (S); siendo representada por la ecuación (2.3) [38,83]. Esta ecuación también se puede expresar en términos de la velocidad angular ω (rad/seg), ecuación (2.4) [7,18,19,23,38,83].

$$S = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} (\times 100\%) \quad (2.3)$$

$$S = \frac{\omega_{sinc} - \omega_m}{\omega_{sinc}} (\times 100\%) \quad (2.4)$$

donde:

ω_m = Velocidad del rotor en rad/seg

ω_{sinc} = Velocidad de sincronismo del campo magnético del estator en rad/seg.

Una máquina de inducción cuando trabaja como motor tiene un límite finito superior de velocidad; su rotor gira a la velocidad de sincronismo y las barras del rotor se encuentran estacionarias con relación al campo magnético y no hay voltaje inducido, por lo que no existe corriente en el rotor, el par sería cero, y la velocidad del rotor decaería lentamente como resultado de las pérdidas por fricción. Por este motivo, el motor solamente puede tener una velocidad cercana pero nunca igual a la de sincronismo. Sin embargo, para que la máquina de inducción trabaje como generador, la velocidad mecánica del rotor debe de ser mayor al valor de la velocidad mecánica de sincronismo, hasta que esta velocidad se encuentre a un valor aproximado al de su potencia nominal, por diseño. Existen tres tipos de rotores con los que una máquina de inducción puede funcionar como motor o generador: rotor jaula de ardilla, rotor devanado y rotor de barra profunda [7,10,18,38,83].

- *Rotor jaula de ardilla.* Consta de una serie de barras conductoras dispuestas dentro de ranuras troqueladas en la cara del rotor y unidas en cada extremo por anillos de corto circuito [18,38,83].
- *Rotor devanado.* Tiene una parte completa de arrollamientos de tres fases que son imágenes de los arrollamientos del estator. Los arrollamientos del rotor son conectados a escobillas por medio de los anillos rozantes. Además, sus corrientes son accesibles en las escobillas, donde pueden examinarse y si se desea se puede insertar una resistencia extra en el circuito del rotor para modificar su velocidad y para controlar las corrientes de arranque [18,38,83].
- *Rotor Barra Profunda.* Contiene de una resistencia variable que combina las características de alto par de arranque y baja corriente de arranque en una máquina de inducción como motor clase D con las características de alta frecuencia y bajo deslizamiento en condiciones normales de un motor de clase A [18,38,83].

Los rotores de doble jaula de ardilla tienen la desventaja de que son más caros que el rotor jaula de ardilla sencillo, pero son más baratos que el rotor devanado; debido a que tienen alto par de arranque con baja corriente de arranque y buena eficiencia en condiciones de operación normal a un costo más bajo, sin necesidad de anillos rozantes y las escobillas [38,83].

La máquina de inducción carece de un devanado de campo y generalmente se construye con rotor devanado o rotor jaula de ardilla. Cuando los devanados del estator de una máquina de inducción se conectan a una fuente externa trifásica de corriente alterna, esta crea un campo magnético rotatorio el cual gira a la velocidad síncrona de la máquina. Si la máquina de inducción actúa como motor o como generador va a depender solamente del valor de la velocidad del rotor [7,8,10,38,83].

Ahora, si el rotor gira a la velocidad de sincronismo $S = 0$; indica que el rotor está parado o en estado estacionario, $S = 1$. Todas las velocidades normales de los motores se encuentran dentro de este rango. En el caso de una máquina de inducción gire a una velocidad mecánica en el rotor de valor menor que la velocidad de sincronismo, se dice que la máquina de inducción trabaja como motor; teniendo un valor de deslizamiento positivo; pero cuando la velocidad mecánica en el rotor es llevado por un primomotor a una velocidad arriba de la velocidad de sincronismo, la máquina de inducción trabaja como generador, teniendo un valor de deslizamiento negativo [7,17,18,38,83]. Ahora, cuando la máquina de inducción se encuentra trabajando por arriba del valor de su velocidad de sincronismo, se encuentra entregando potencia activa, aunque sigue consumiendo potencia reactiva del sistema [7,23,83].

Debido a que una máquina de inducción trabaja induciendo tensiones y corrientes en el rotor de la máquina, algunas veces se le conoce como transformador rotante; pero a diferencia de un transformador, la frecuencia entre el estator y el rotor no es la misma; por lo que solamente cuando se encuentre en condiciones de rotor bloqueado, dichas frecuencias serán iguales, por el contrario si el rotor gira a la

misma velocidad que el estator, su frecuencia será cero, dicha frecuencia se puede expresar como en la ecuación (2.5) [7,18,38,83]; donde, f_r es la frecuencia del rotor de la máquina en Hertz.

$$f_r = S f_e \quad (2.5)$$

2.3 FLUJO DE POTENCIA Y CIRCUITO EQUIVALENTE.

Debido a que el rotor no está conectado directamente a una fuente de alimentación, la potencia que cruza por el entrehierro magnéticamente antes de ser convertida en forma eléctrica es la única fuente de energía que se encuentra circulando por el rotor, es por ello que la potencia promedio que cruza por el entrehierro debe ser igual a la suma de las pérdidas resistivas del rotor disipadas como calor y la potencia de conversión en forma mecánica, expresando de esta manera a la potencia promedio por fase (P_g), que cruza por el entrehierro en la ecuación (2.6), así mismo se muestra el circuito equivalente por fase de la máquina de inducción en la figura 2.1 [7,18,38,83].

$$P_g = (I_2)^2 \frac{R_2}{S} = (I_2)^2 R_2 + (I_2)^2 \frac{(1-S)}{S} R_2 \quad (2.6)$$

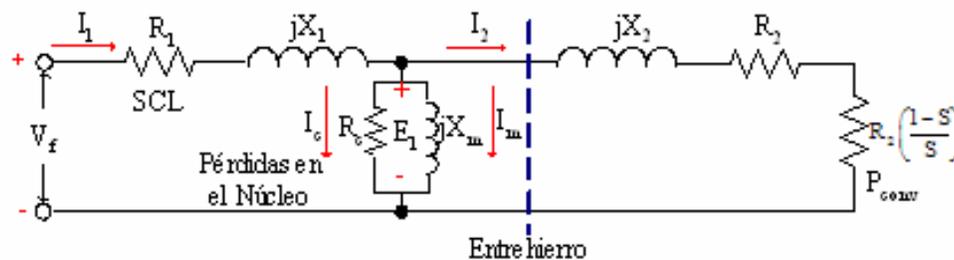
donde:

S = Deslizamiento de la máquina de inducción en %

P_g = Potencia promedio por fase en Watts.

I_2 = Corriente en el rotor en Amperes.

R_2 = Resistencia en el rotor en Ohms.



Donde las variables para la máquina de inducción son:

R_1 = Resistencia del estator en Ohms.

R_2 = Resistencia del rotor en ohms.

R_c = Resistencia de pérdidas en el núcleo en Ohms.

X_1 = Reactancia del estator en ohms.

X_2 = Reactancia magnetizante en Ohms

I_1 = Corriente del estator en Amperes.

I_2 = Corriente del rotor en Amperes.

I_m = Corriente de magnetización.

S = Deslizamiento en decimales.

P_{conv} = Potencia convertida por la máquina en Watts.

Figura 2.1. Diagrama Equivalente exacto por fase para una máquina de inducción trifásica como motor, referida al estator [38,83].

2.4 PAR INDUCIDO.

Se puede evaluar el par inducido de la máquina τ_{ind} , en función de la velocidad, dividiéndola entre el valor de la velocidad angular, ecuaciones (2.7) y (2.8), además este se puede definir como el par generado por la conversión de potencia eléctrica en mecánica, aunque este par difiere del par real, como se analizó anteriormente, ver figura 2.2 [7,38,83].

$$\tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m} \quad (2.7)$$

$$\tau_{ind} = \frac{P_{ag}}{\omega_{sinc}} \quad (2.8)$$

Donde:

τ_{ind} = Par inducido en N·m.

P_{ag} = Potencia en el entrehierro en watts.

La potencia del entrehierro es la misma que cruza por el espacio desde el circuito del estator hasta el circuito del rotor y es igual a la potencia absorbida en la resistencia R_2/S , estas expresiones se presentan en (2.9) y (2.10), esta última, es el valor de la potencia total en el entrehierro [7,38,83].

$$P_{ag,1\phi} = I_2^2 \frac{R_2}{S} \quad (2.9)$$

$$P_{ag} = 3I_2^2 \frac{R_2}{S} \quad (2.10)$$

Donde:

$P_{ag,1\phi}$ = Potencia en el entrehierro por fase en watts.

P_{ag} = Potencia en el entrehierro trifásica en watts.

Si de las ecuaciones (2.9) y (2.10) se determina I_2 ; entonces se conoce la potencia en el entrehierro y el par inducido; aplicando el Teorema de Thevenin al circuito de la figura 2.1, resulta el siguiente circuito equivalente, figura 2.2, obteniendo las ecuaciones: del voltaje de Thevenin se puede expresar como en la ecuación (2.11), mostrando solamente su magnitud [38,83].

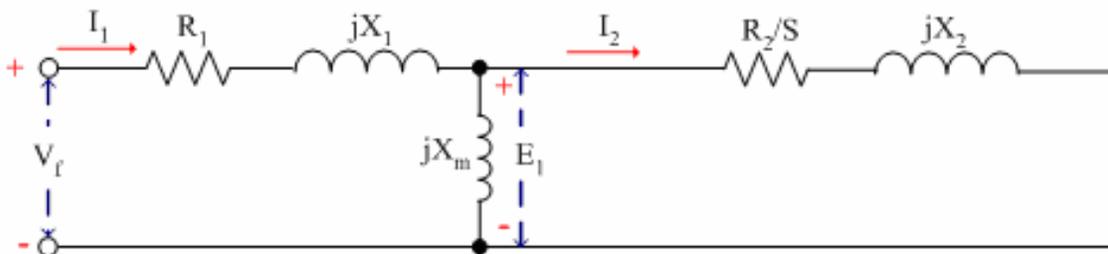


Figura 2.2. Diagrama Equivalente por fase para una máquina de inducción trifásica aplicando teorema de Thevenin [38,83].

$$V_{Th} = V_{\phi} \frac{X_M}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_M)^2}} \quad (2.11)$$

Impedancia de Thevenin (2.12):

$$Z_{Th} = \frac{jX_M(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_M)} \quad (2.12)$$

Para la resistencia y reactancia de Thevenin (R_{Th} , X_{Th}), se tiene las ecuaciones (2.13) y (2.14).

$$R_{Th} \approx R_1 \left(\frac{X_M}{X_1 + X_M} \right)^2 \quad (2.13)$$

$$X_{Th} \approx X_1 \quad (2.14)$$

Obteniendo los parámetros de Thevenin la figura 2.3, se puede calcular el valor de la corriente I_2 , ecuación (2.15), donde su magnitud esta dada por (2.16):

$$I_2 = \frac{V_{Th}}{Z_{Th} + Z_2} \quad (2.15)$$

$$I_2 = \frac{V_{Th}}{\sqrt{\left(R_{Th} + \frac{R_2}{S} \right)^2 + (X_{Th} + X_2)^2}} \quad (2.16)$$

La ecuación del Par Inducido se puede expresar sustituyendo el valor de I_2 en (2.10) y luego el valor de P_{ag} en (2.8), teniendo:

$$\tau_{ind} = \frac{3V_{Th}^2 \frac{R_2}{S}}{\omega_{sinc} \left[\left(R_{Th} + \frac{R_2}{S} \right)^2 + (X_{Th} + X_2)^2 \right]} \quad (2.17)$$

De manera gráfica, el comportamiento del par inducido en una máquina de inducción es observada en la figura 2.3, esta gráfica muestra el comportamiento de una máquina de inducción de 1 HP, en sus tres modos de funcionamiento (freno, motor y generador), dichos parámetros se encuentran dados en el *Apéndice B*; además, se muestra el comportamiento de la potencia en función de la ecuación (2.8), en la figura 2.4.

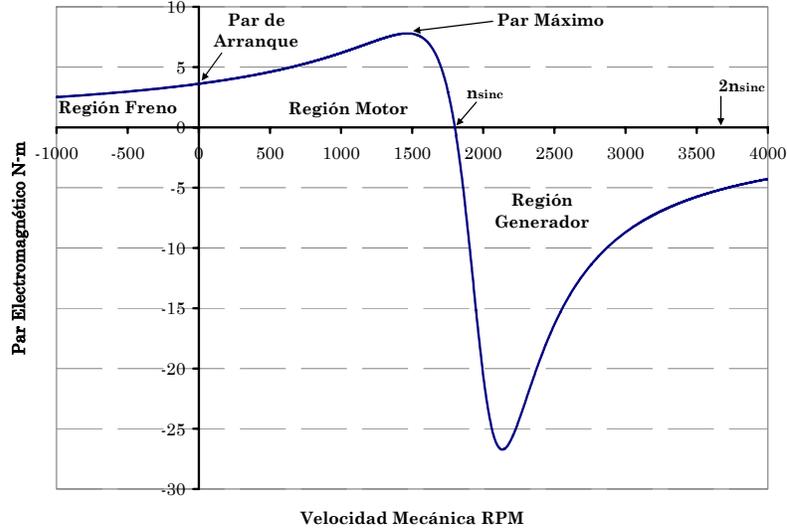


Figura 2.3. Curva característica de Par Inducido vs Velocidad Mecánica de una Máquina de Inducción rotor jaula de ardilla de 1 HP en valores reales.

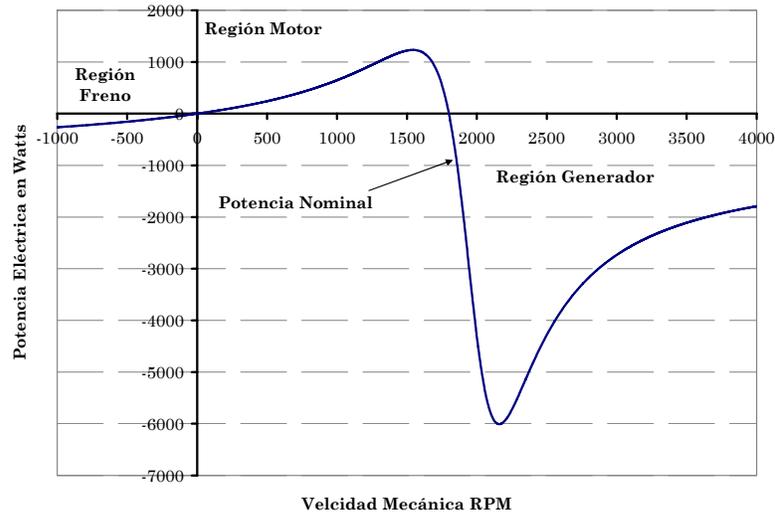


Figura 2.4. Curva característica de la Potencia de Conversión vs Velocidad Mecánica de una Máquina de Inducción rotor jaula de ardilla de 1 HP en valores reales.

2.5 PAR MÁXIMO.

El par máximo ocurre, cuando el valor de la potencia en el entrehierro, es máxima. Debido a que ésta, es igual a la potencia consumida en la resistencia R_2/S , provocando que el par máximo inducido ocurra cuando la potencia consumida por esa resistencia sea máxima. Aplicando el concepto de máxima transferencia de potencia; esta se cumple cuando la magnitud de R_2/S , como impedancia sea igual a la magnitud de la impedancia de la fuente, expresada como (2.18) [38,83].

$$Z_{\text{fuente}} = R_{\text{Th}} + jX_{\text{Th}} + jX_2 \quad (2.18)$$

La máxima transferencia de potencia, matemáticamente se puede expresar como:

$$\frac{R_2}{S} = \sqrt{R_{\text{Th}}^2 + (X_{\text{Th}} + X_2)^2} \quad (2.19)$$

Obteniendo el valor del deslizamiento máximo proporcional al valor de la resistencia del rotor, se puede obtener el valor del par máximo:

$$\tau_{\text{máx}} = \frac{3V_{\text{Th}}^2}{2\omega_{\text{sync}} \left[R_{\text{Th}} + \sqrt{R_{\text{Th}}^2 + (X_{\text{Th}} + X_2)^2} \right]} \quad (2.20)$$

El comportamiento del par de la ecuación (2.20), es proporcional al cuadrado del voltaje de alimentación y está en relación inversa con el tamaño de las impedancias del estator y la reactancia del rotor; cuanto menores sean los valores de las reactancias de una máquina, mayor es el par máximo desarrollado, así mismo el valor del deslizamiento máximo es mayor ya que va en función de la resistencia del rotor [38,83].

El comportamiento de la curva par-velocidad para una máquina de inducción con rotor devanado, es observada en la figura 2.5, ya que a medida que aumenta el valor de la resistencia del rotor, va decreciendo la velocidad correspondiente al par máximo, sin variar el valor del par desarrollado, debido a que es posible introducir resistencia en el circuito de un rotor devanado, ya que en las terminales de éste, salen a los anillos rozantes del estator, por lo que este tipo de máquinas como motores sirven para arrancar cargas demasiado pesadas [6,7,8,11,12,17,18,38,83,84].

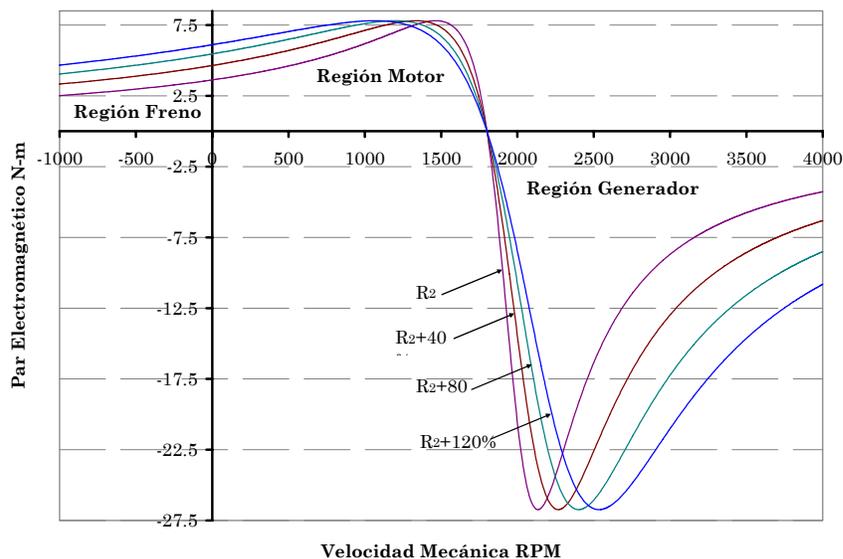


Figura 2.5. Curva de variación de la resistencia del rotor sobre la característica Par vs Velocidad Mecánica de una Máquina de Inducción con rotor devanado en valores reales.

2.6 VARIACIÓN DE VELOCIDAD POR VOLTAJE DE LÍNEA.

El par desarrollado de una máquina de inducción es proporcional al cuadrado del voltaje aplicado, por lo que una manera de controlar la velocidad puede ser variando el valor del voltaje de línea aplicado, pero solamente se puede tener control en un rango de velocidades muy limitado, por lo que se puede aplicar en máquinas pequeñas, ver figura 2.6 [26,81,83].

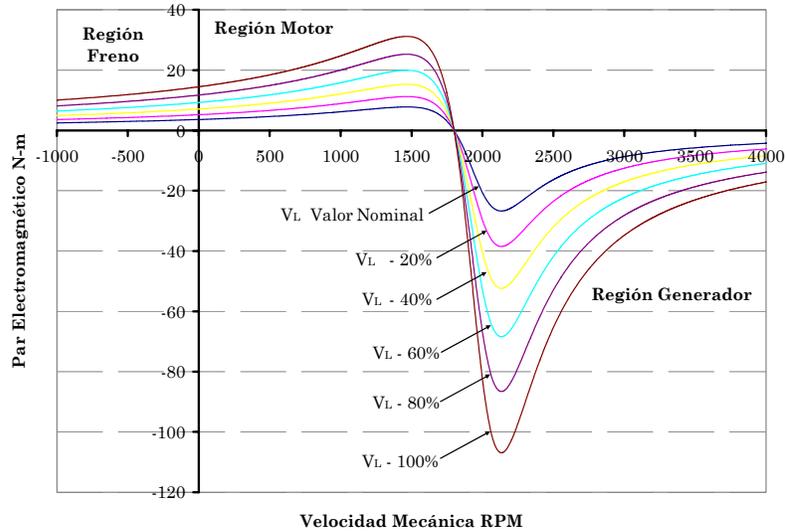


Figura 2.6. Curva de variación del voltaje de línea sobre la característica Par vs Velocidad Mecánica de una Máquina de Inducción.

2.7 GENERACIÓN EÓLICA.

El desarrollo de la energía eólica se ha manifestado en el hecho de que ha sido de todas las fuentes energéticas, la de mayor crecimiento durante el período 1990-1998, con un 25.7% debido a que su capacidad instalada se duplica cada 3 años. Por lo que para finales del año 2000 se tenían ya instalados alrededor de 17,000 MW eoloelectricos en el mundo conectados a los SEP convencionales de algunos países industrializados, siendo los países líderes en capacidad eoloelectrica instalada: la República Federal de Alemania, Estados Unidos, España (con 3,000 MW), Dinamarca, India, Países Bajos, Reino Unido, China, Italia y Suecia [34,81,85]. Las proyecciones de propagación de la tecnología eoloelectrica en el mediano plazo resultan interesantes ya que la Unión Europea persigue una meta de 40,000 MW eoloelectricos para el año 2010, donde la República Federal de Alemania cuenta con el primer lugar de generación eoloelectrica con 6,000 MW aproximadamente, mientras que en los Estados Unidos se espera contar con 10,000 MW para el mismo año y 80,000 MW para el año 2020. Como cifra de referencia, se considera que actualmente la capacidad total de generación de electricidad en México es cercana a 40,000 MW [19,20,36,34,85], la cual es el resultado de la generación por diferentes tipos de plantas eléctricas, mostrada en la tabla 2.1. Actualmente los aerogeneradores que dominan el mercado, tienen capacidades entre 500 y 750 kW y la magnitud de sus diámetros oscila alrededor de 40 metros. Sin embargo, en el ámbito comercial comienza a surgir la generación con máquinas de hasta 1.6 MW de capacidad unitaria que tienen diámetros cercanos a 60 metros. De manera experimental existen aerogeneradores de hasta 3 MW de capacidad nominal. En el ámbito internacional, el motivo principal para aplicar la tecnología eoloelectrica en escala significativa ha sido mitigar la emisión de gases de efecto invernadero, en respuesta a la preocupación mundial por el Cambio Climático Global [19,20,26,34,36,81,85].

Tabla 2.1. Capacidad Efectiva Instalada en el 2000 [81].

Tipo de central	Capacidad efectiva en MW	Participación en %
Combustóleo	14058,5	39.19
Carbón	2600,0	7.24
Gas Natural	5382,9	15.07
Diesel	115,7	0.32
Dual	2100,0	5.85
Geotérmica	854,9	2.38
Hidroeléctrica	9389,8	26.17
Eólica	2,2	0.01
Nuclear	1364,9	3.80
Total	35868,9	100.00

Fuente: Centro Nacional de Control de Energía, (CENACE)

Se ha hecho evidente que la aplicación de la tecnología eoloeléctrica trae una serie de beneficios adicionales comprobados, entre los que se encuentran: el incremento de la seguridad de abasto de energéticos mediante el aprovechamiento del recurso de energía propia e inagotable, el ahorro de combustibles fósiles, la atracción de la inversión privada con la participación de pequeñas y medianas empresas, el impulso del desarrollo en las regiones favorecidas con recurso eólico y la creación de nuevos empleos de manera directa e indirecta [34,36,81]. En la mayoría de los países en vías de desarrollo, resulta difícil que la tecnología eoloeléctrica pueda competir económicamente con las opciones convencionales si no se consideran costos ambientales, ha excepción de algunos casos con condiciones son muy favorables. Así, en el ámbito internacional, se sabe que la implantación de la tecnología eoloeléctrica en la mayoría de los países en vías de desarrollo requiere de realizar esfuerzos conjuntos para crear mercados eoloeléctricos locales que se adapten a las necesidades y oportunidades de cada país.

2.7.1 Situación del Recurso Eólico en México.

En México se tiene la necesidad de emprender acciones para el desarrollo sustentable propiciando el bienestar de la generación eólica, sin comprometer la satisfacción de las necesidades de las generaciones futuras como se establece en la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Medio Ambiente [85]. Donde el aprovechamiento de las fuentes no convencionales de energía ofrecen un potencial importante, mismo que día a día llama más la atención tanto de las autoridades públicas como de la iniciativa privada y del público en general, en la medida en que las tecnologías tienden a alcanzar su madurez técnica y económica. El recurso eólico, de acuerdo a los estudios realizados hasta ahora sugieren que posee un potencial importante cuyo aprovechamiento podría satisfacer, por lo menos, 4.5 % de las necesidades de electricidad esperadas para el año 2010; esto es considerando una tasa de crecimiento promedio de 5% para la demanda de electricidad y 5,000 MW eoloeléctricos operando a un factor de planta promedio de 25 %. En congruencia con los indicadores mundiales en cuanto a la implantación de la generación eoloeléctrica, un programa para instalar capacidad eoloeléctrica que aproveche el principal recurso eólico de México tomaría entre 14 y 23 años; considerando la instalación de 5,000 MW eólicos a

un ritmo, respectivamente, de 1 y 0.6 MW por día. Un programa de esta magnitud podría atraer la inversión privada para reforzar la generación de electricidad en el país, en una cifra acotada entre 4,500 y 7,200 millones de dólares. Esto significaría entre 321 y 514 millones de dólares por año para el escenario a 14 años, y de 195 a 313 millones de dólares anuales para el escenario a 23 años. Desde el punto de vista ambiental, la operación de 5,000 MW eoloeléctricos podría evitar la emisión a la atmósfera de aproximadamente 10 millones de toneladas de CO₂ por año [36,37,81,86,87].

Debido a la extensión del territorio mexicano, las mediciones del viento enfocadas a la evaluación y caracterización de su recurso eólico, con vías a la instalación de centrales eoloeléctricas, son muy limitadas. Aunque se han identificado las regiones con mayor potencial, con base en las mediciones ejecutadas por el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y estudios indirectos realizados por el National Renewable Energy Laboratory (NREL) de Estados Unidos. Algunas de las mediciones realizadas por el IIE se emprendieron con el apoyo económico de entidades gubernamentales regionales, entre ellas están el Gobierno del Estado de Baja California Sur y el Municipio de Zacatecas, así también se encuentra el Gobierno del Estado de Oaxaca. La tabla 2.2, muestra algunas de las regiones con mayores posibilidades para la instalación de Centrales Eoloeléctricas [36,37,81,86,87].

Tabla 2.2. Comparación de la velocidad del viento medio anual (V_v anual) en varios lugares del mundo [81].

Lugar	V_v Anual en M/S	Altura
Alemania	5-7	(1)
Los Países Bajos	6.9-7.2	45 m (2)
India	7-8	
La Virgen, Zacatecas, México	7-8	45 m (3)
Brownfield, Texas, Estados Unidos	7.4	55 m
Dinamarca	7-8	
La Laguna, Baja California Sur, México	7.5	40 m (1)
Gro. Negro, Baja California Sur, México	7.8	45 m (1)
Laguna Verde, Veracruz, México	7-8	60 m (1)
Altamont Pass, California, Estados Unidos	7-8	
Reino Unido	7-8.5	50 m (1)
Los Países Bajos	8.2-8.8	45 m (1)
Tehachapi, California, Estados Unidos	8-8.5	
Tarifa, España	8.5	30 m (4)
Dinamarca	9	Mar abierto
Escocia	8-10	
Gran Canaria, España	9.5	24 m (1)
Nueva Zelanda	7-10	
La Ventosa, Oaxaca, México	7-10.5	40 m (1)
La Venta Oaxaca, México	10.5	40 m (1)
Egipto	7.6-11	
Grecia	8.1-10.8	

(1) En las costas o a menos de 100 m SNMM.
(3) 2,750 m SNMM.

(2) Tierra adentro.
(4) 470 m SNMM.

El desarrollo de la tecnología eoloeléctrica en el ámbito internacional tiene dos tendencias principales: desarrollo de máquinas con más facultad para aprovechar vientos de poca intensidad y desarrollo de equipos robustos para operar con viento intensos; estas tendencias buscan mejorar continuamente tanto los aspectos de comportamiento técnico como los que influyen sobre los costos de fabricación, operación y mantenimiento. Los logros de la primera tendencia están haciendo que la generación eoloeléctrica pueda extenderse a sitios con recurso eólico moderado, en términos económicos adecuados. Esta tecnología se podría aplicar en México en zonas como la región central de Zacatecas, partes del Estado de Hidalgo y en algunas costas de nuestro país

2.7.2 Elementos de un Sistema Eoloeléctrico.

Un sistema eoloeléctrico consta principalmente de unidades aerogeneradoras, las cuales se pueden clasificar en función de sus aplicaciones [25,36,81,86,87]:

- *Aerogeneradores para aplicaciones aisladas*: Son máquinas pequeñas, que alimentan cargas alejadas de los SEP convencionales, combinadas con bancos de baterías para almacenar la electricidad que generen y acoplar la generación con la demanda. Estas son de capacidades inferiores a 35 kW, pero se integran en arreglos de varias unidades para suministrar energía eléctrica a cargas mayores. Este tipo de aerogeneradores se combinan con generadores diesel, sistemas fotovoltaicos, microturbinas hidráulicas entre otros, dando lugar a combinaciones que se conocen como *sistemas híbridos* [20,26,36,81,86,87].
- *Aerogeneradores para centrales eoloeléctricas*: Son máquinas de tamaño considerable, se conectan a un SEP convencional para contribuir a la alimentación de cargas específicas de grandes capacidades o para construir Centrales Eoloeléctricas. En la actualidad, se encuentran en capacidades que van de 200 a 1,500 kW [20,26,36,81,86,87].

Estos dos tipos de aerogeneradores son muy similares; pero tienen diferencias técnicas importantes en relación con su diseño y funcionalidad.

Los aerogeneradores de eje horizontal son los únicos que han desarrollado un gran avance técnico y económico, debido a la gran ventaja que tiene su eje de rotación, la cual, es paralelo a la dirección del viento, además de que cuentan con una gran ventaja en cuanto al aspecto aerodinámico, por lo que se desarrolla una amplia variedad de modelos que ahora se ofrecen comercialmente. Algunas de las diferencias entre ellos son: el tipo de subsistemas que se utilizan para la conversión mecánico-eléctrico, los métodos para controlar la velocidad de rotación en operación normal, el número y características de las aspas con que se construye el rotor, el tipo y número de mecanismos de seguridad, los subsistemas utilizados para incrementar la eficiencia y la confiabilidad de la máquina, los métodos, elementos y subsistemas que se usan para suavizar la conexión a la red eléctrica y mejorar la calidad de la energía

generada. A su vez los subsistemas principales que integran a un aerogenerador de eje horizontal son los siguientes, ver figura 2.7 [20,26,81,87]:

- ✓ Rotor (juego de aspas, cubo y nariz).
- ✓ Tren de potencia (flecha principal, caja de engranes y acoplamientos).
- ✓ Generador eléctrico.
- ✓ Subsistema de orientación al viento.
- ✓ Subsistema de regulación de potencia.
- ✓ Subsistemas de seguridad (frenos).
- ✓ Chasis principal.
- ✓ Torre.

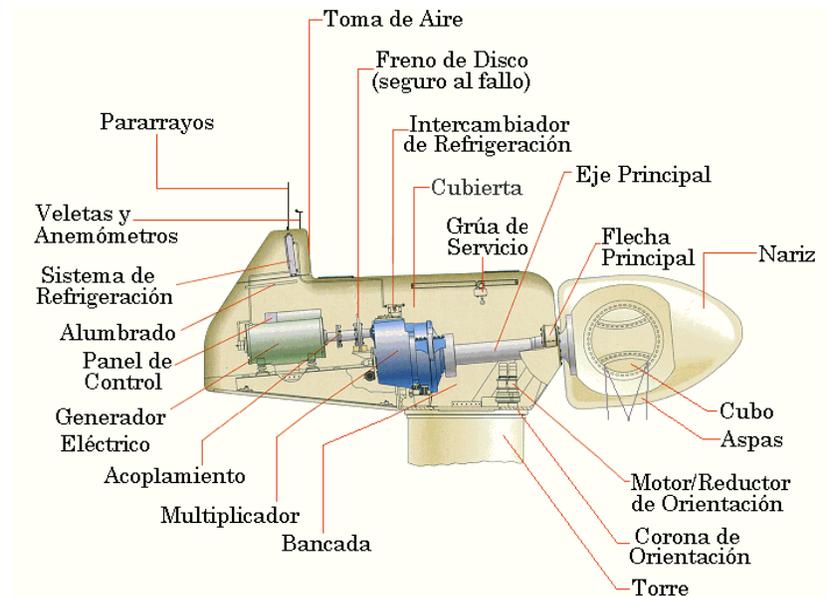


Figura 2.7. Subsistemas principales de un aerogenerador de eje horizontal típico [26,81].

Para transformar la energía eólica en electricidad, un aerogenerador capta la energía cinética del viento por medio de su rotor aerodinámico y la transforma en energía mecánica que concentra sobre su eje de rotación o flecha principal. La energía mecánica se transmite a la flecha de un generador eléctrico. El rotor aerodinámico está formado por un conjunto de dos o tres aspas. Por razones de diseño del tipo estructural y aerodinámico, para máquinas entre 200 y 3,000 kW, la velocidad en el extremo del aspa se limita a valores entre 42 y 86 m/s esto es, 64 m/s en promedio, lo que se traduce en velocidades angulares entre 19 y 65 rpm, siendo 34 rpm en promedio. Las velocidades nominales más bajas corresponden a los rotores de mayor diámetro, y por consecuencia, de mayor potencia. Pero si se usan generadores eléctricos convencionales que operan a velocidades nominales altas que van de 1200 a 1800 rpm, es necesario utilizar una caja de engranes para efectuar el acoplamiento. Los aerogeneradores de eje horizontal cuentan

con un subsistema dedicado a cuidar que el plano del rotor se mantenga en posición perpendicular a la dirección del viento, ya que las desviaciones al respecto reducen la cantidad de energía eólica que éste puede capturar, por lo que la gran mayoría de los aerogeneradores comerciales utilizan sistemas activos basados en servomecanismos, aunque también los hay controlados aerodinámicamente. Electromecánicamente, un aerogenerador tiene límites operativos que son función de la relación eficiencia-resistencia-costo, que se especifica en su diseño. Por ello, es importante limitar su velocidad de rotación y su potencia de salida a niveles que no pongan en riesgo su integridad física; es por ellos que se emplean métodos que van desde diseños pasivos como son: aspas fijas diseñadas para reducir aerodinámicamente la velocidad angular del rotor a partir de una velocidad del viento específica, hasta el uso de servomecanismos para controlar el ángulo en que el perfil aerodinámico de las aspas se presenta al viento. Así mismo, los aerogeneradores cuentan con dos o más subsistemas de seguridad enfocados a minimizar la aparición de fallas que pudieran causar daño a los usuarios, así como asegurar la integridad física del equipo. Todos los aerogeneradores para centrales eoloelectricas cuentan con un sistema electrónico propio dedicado al control y a la adquisición de datos (SCADA). El control de los parámetros operacionales de cada aerogenerador se lleva a cabo en el ámbito local de la máquina. El chasis principal es una estructura metálica donde se monta el tren de potencia, el generador eléctrico, las mordazas del freno y, en su caso, las unidades hidráulicas. Recibe las cargas del rotor a través del tren motor y las transmite a la torre vía el subsistema de orientación. En un aerogenerador de eje horizontal, el rotor aerodinámico el tren de potencia y el generador eléctrico se instalan sobre una torre de altura considerable para tomar ventaja del incremento de la velocidad del viento con la altura sobre el terreno y, por consecuencia, de su mayor contenido energético. Se utilizan torres que alcanzan de 40 a 60 metros de altura [26,81,87].

2.7.2.1 Potencia-Velocidad.

La cantidad de energía que se puede generar depende del régimen de viento en el sitio y de las características del terreno. Para mostrar el desempeño de un aerogenerador se representa por una *curva de potencia*, donde se relaciona la potencia eléctrica que entrega el sistema con la velocidad del viento a la altura del centro de su rotor, como la mostrada en la figura 2.8, estas curvas de potencia varían de un modelo de aerogenerador a otro; además se utilizan, como dato de entrada, para estimar la cantidad de energía eléctrica que un aerogenerador específico produciría al operar bajo un régimen de viento dado. En estas curvas existen cuatro puntos de referencia cuyos valores trascienden en cuanto a la respuesta operacional de los aerogeneradores, estos puntos son [26,81,84,87]:

1. V_i *velocidad de inicio de generación (cut in wind speed)*. Velocidad del viento a la cual un aerogenerador empieza a producir energía eléctrica.
2. V_n *velocidad nominal (rated wind speed)*. Velocidad del viento a la cual se alcanza el valor nominal de potencia del generador eléctrico.
3. V_s *velocidad de salida (cut out wind speed)*. Velocidad del viento a la cual un aerogenerador tiene que ejecutar un paro forzado para no operar por arriba de sus límites máximos de diseño.
4. V_{ss} *Velocidad de supervivencia (survival wind speed)*. La velocidad del viento arriba de la cual el rotor de un aerogenerador puede sufrir daños permanentes a pesar de que se encuentre frenado.

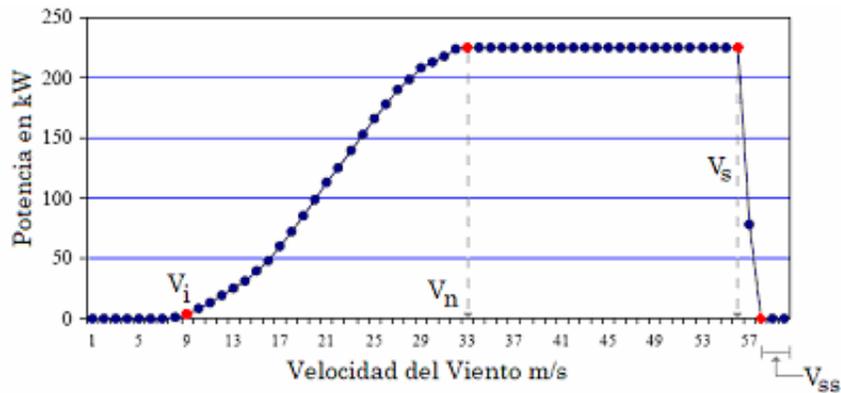


Figura 2.8. Curva hipotética para un aerogenerador Vestas V-27 225 kW [81,84].

2.8 GENERACIÓN MICROHIDROELÉCTRICA.

El aprovechamiento de la energía hidráulica en pequeñas centrales en nuestro país ha sido una práctica común desde principios del siglo XX. Las zonas montañosas con buena precipitación de lluvia son las adecuadas para su desarrollo. Así en algunas partes de los estados de Puebla, Veracruz, Chiapas, Michoacán y Oaxaca se tiene conocimiento de una serie de centrales que sirvieron y/o que aún operan en industrias como la papelera, la textil, la cervecera o la del café. Los usuarios potenciales de la energía minihidráulica son [36,81]:

- Diversos grupos industriales o agroindustriales quienes buscan reducir de alguna forma sus costos de producción.
- Los gobiernos municipales que se ven en dificultades para cubrir los pagos por servicio de energía eléctrica para alumbrado público o bombeo.

La energía hidráulica de un río o arroyo esta formada por el flujo de agua que corre por su cauce y por los desniveles o “caídas” a lo largo de su longitud, desde las partes altas o montañosas hasta las planicies

costeras. Una central minihidráulica (< 5 MW) buscará aprovechar parte de la energía hidráulica total del río o arroyo. Convencionalmente las centrales microhidráulicas se clasifican atendiendo a la caída (carga) de agua que aprovechan [55,81,86].

Por lo general las centrales que son de Baja Carga aprovechan gastos importantes pero desniveles de poca magnitud y por el contrario, las de Alta Carga utilizan gastos menores y desniveles importantes.

2.8.1 Partes de una Central Microhidroeléctrica.

Las partes principales de una central minihidráulica son [36,81,86]:

- La presa derivadora. Obra que sirve para desviar parte del flujo del río hacia la planta.
- El canal y/o túnel. Se utiliza para conducir el flujo captado por la presa.
- Un tanque de carga. Se utiliza para controlar el agua que llega del canal y permite operar satisfactoriamente a la tubería a presión.
- Tubería de presión. Este elemento se ubica entre el tanque de carga y la casa de máquinas, es decir a lo largo de la caída o desnivel por aprovechar.
- La casa de máquinas. Es la construcción que sirve para instalar la(s) turbina(s) y generador(es) eléctricos. Incluye la subestación.
- La línea de transmisión. La instalación que se utiliza para enviar la electricidad al centro de consumo.

El agua después de haber sido utilizada, se regresa al río o arroyo por medio de un canal de desfogue, a continuación se muestra la potencia generada por microhidroeléctrica en la tabla 2.3

Tabla 2.3. Resumen nacional de la microhidroeléctrica [36,81,86]

Concepto		No. de centrales	Potencia (MW)	Gen. Media anual (GWh)	Gen. Media anual (%)
Centrales públicas en operación con estudios de rehabilitación o modernización (1992-94)		7	13.30	39.20	10.20
Centrales públicas en operación sin estudios de rehabilitación o modernización		15	24.30	63.00	16.35
Centrales privadas en operación		61	43.57	155.00*	40.00
Centrales publicas fuera de servicio		36	(-36.8)	(-128.00)*	33.00
Estudios de pre-viabilidad de sitios con infraestructura hidráulica existente (presas y/o canales) 1993 - 95		17	255.26	1,000.00	16.7
Estudios muy preliminares de sitios con infraestructura hidráulica existente (presas y/o canales) 1993		51	381.00	900.00	15.0
Estudio de viabilidad Ver. 1994	Río Pescados	11	88.00	600.00	10.0
Estudio de potencial Veracruz/ Puebla 1995		100	411.00	3,500.00	58.3

CAPÍTULO III

MODELO LINEAL PARA DIFERENTES CONFIGURACIONES DEL SEP.

3.1 INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se presentan los modelos matemáticos de los dispositivos que conforman al sistema eléctrico de potencia con características deseables, para el estudio del comportamiento de los generadores de inducción en la estabilidad ante pequeños disturbios, se empleó un sistema máquina bus infinito con diferentes configuraciones. El desarrollo del modelado del sistema eléctrico de potencia para este trabajo, tiene una característica modular, debido a la agregación de dispositivos que conforman al sistema eléctrico de potencia en el cual se basa este trabajo; y de acuerdo al caso a estudiar permite de esta manera la representación en variables de estado con más detalle de las características para cada dispositivo.

3.2 REPRESENTACIÓN LINEAL DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA.

El comportamiento dinámico de un sistema eléctrico de potencia se describe por medio de un conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales de primer orden, que representan a las variables estado que intervienen en el sistema [3,4,29], ecuación (3.1).

$$\dot{\underline{x}} = \underline{f}(\underline{x}, \underline{u}, t) \quad (3.1)$$

donde:

\underline{x} = Vector columna, referido como vector de estados.

x_i = Entradas de las variables de estado.

\underline{u} = Vector columna, conocido como vector de entradas para el sistema, siendo estas señales externas que influyen en el desarrollo del sistema.

t = Tiempo.

\dot{x} = Derivada de la variable de estados \underline{x} con respecto al tiempo

De manera similar, se observa la representación de las variables de salida del sistema expresadas en función de las variables de estado y de las variables de entrada, ecuación (3.2).

$$\underline{y} = \underline{g}(\underline{x}, \underline{u}) \quad (3.2)$$

donde:

\underline{y} = Es el vector columna es el vector de salidas.

\underline{g} = Es el vector relacionado con las funciones no lineales de estado en función de las variables de estado y de las variables de entrada.

Si las derivadas de las variables de estado no son funciones explícitas del tiempo, el sistema se considera *autónomo*; ecuación (3.3):

$$\dot{\underline{x}} = \underline{f}(\underline{x}, \underline{u}) \quad (3.3)$$

Un análisis de espacio de estados en un sistema, es aplicado a cualquier sistema con n variables independientes, llamadas *variables de estado*, tomando en cuenta, que el concepto de *estado* para un sistema; representa la mínima información que se obtiene de este para cualquier instante de tiempo inicial t_0 , siendo necesario determinar su comportamiento futuro sin tomar como base el estado en que se encontraban las variables de entrada antes del tiempo inicial.

Si un sistema no se encuentra en equilibrio o las variables de entrada no son cero, el estado del sistema cambia con el tiempo; formando *una trayectoria* en las variables *de estado*.

Por otro lado, el concepto de *puntos de equilibrio*, se refiere a los puntos donde todas las derivadas que representan a las variables de estado son cero, siendo representadas por la ecuación (3.4).

$$\bar{f}(\bar{x}_0) = 0 \quad (3.4)$$

donde:

- \bar{x}_0 = Es el vector de estado.
- \bar{x} = Punto de equilibrio.

En un sistema lineal, las funciones $f_i(i=1,2,\dots,n)$ son lineales, encontrándose el sistema en un estado de equilibrio, siempre y cuando la *matriz* del sistema sea *no singular*. Aunque para un sistema no lineal puede haber más de un punto de equilibrio.

La estabilidad en un sistema lineal, es independiente de sus variables de entrada y del estado de un sistema estable con entrada cero; ya que siempre regresa al origen del espacio de estados, independientemente del estado inicial finito.

Esto se puede observar con la linealización de la ecuación (3.4), observando que el vector de estado inicial $\underline{\dot{x}}_0$, y el vector de entradas $\underline{\dot{u}}_0$, corresponden a un punto de equilibrio cercano al comportamiento del sistema, que a su vez, se encuentra cerca del comportamiento de una pequeña señal, que será analizada. Donde $\underline{\dot{x}}_0$ y $\underline{\dot{u}}_0$, satisfacen a la ecuación (3.4), representada por la ecuación (3.5).

$$\dot{\underline{x}}_0 = \underline{f}(\underline{x}_0, \underline{u}_0) = 0 \quad (3.5)$$

Pero si al sistema de la ecuación (3.5), se le aplica una perturbación, este se representa como la ecuación (3.6).

$$\underline{x} = \underline{x}_0 + \Delta \underline{x} \quad \underline{u} = \underline{u}_0 + \Delta \underline{u} \quad (3.6)$$

Donde Δ es una pequeña perturbación.

Como las magnitudes de las perturbaciones aplicadas al sistema son pequeñas; en las funciones no lineales $f(x,u)$, se pueden expresar en términos de la expansión de Series de Taylor, en función de derivadas parciales que son analizadas alrededor de un punto de operación dado, despreciando los términos de mayor orden[3], y expresando estos términos en forma lineal, se obtiene [3]:

$$\begin{aligned}\Delta\dot{x} &= A\Delta x + B\Delta u \\ \Delta\dot{y} &= C\Delta x + D\Delta u\end{aligned}\tag{3.7}$$

3.3 TÉCNICAS DE ANÁLISIS MODAL.

En el análisis y control de problemas de oscilaciones mal amortiguadas que se encuentran en un sistema, es necesario el empleo de técnicas de análisis modal o bien, de técnicas de identificación modal; que ayuden a determinar la fuente y naturaleza de la producción de esas oscilaciones mal amortiguadas, y orienten en la realización de diseños de medidas de control que mejoren el amortiguamiento del sistema [3,4,5,40,80].

Las técnicas de análisis modal, son métodos que consisten en la determinación de los eigenvalores, eigenvectores a partir de un método lineal del sistema considerando que las oscilaciones son libres; una técnica muy conocida es el *método de eigenanálisis* [3,4,5,40,80].

Las técnicas de identificación modal, son métodos que calculan las características principales de los modos dominantes del sistema ante la ocurrencia de un evento, a partir de señales en el tiempo obtenidas de mediciones o programas de simulación, algunos de este tipo son: *series de Fourier, análisis de Prony*, entre otros. [4,5,28,35,40,80].

3.3.1 Método de Eigenanálisis.

Este método se basa en la obtención de datos de los modelos para simulación, donde presenta compatibilidad con estudios en el dominio del tiempo, proporciona información cuantitativa a nivel de sistema sobre la naturaleza de los modos dominantes, permite la identificación de manera precisa del origen y naturaleza de las oscilaciones mal amortiguadas y aplica el desarrollo de medidas correctivas. El método de eigenanálisis, se aplica a sistemas dinámicos que son representados como en la ecuación (3.7), ya que describe el comportamiento de varios procesos tanto de naturaleza física como electromecánica. El método de eigenanálisis, toma información del comportamiento del sistema durante una pequeña perturbación, a partir de la obtención de la *matriz característica del sistema* (matriz [A]) [3,4].

3.3.1.1 Eigenvalores.

Con la obtención de los valores propios de la matriz [A], llamados también *eigenvalores*, siendo definidos como un parámetro escalar denominado λ , para el cual existe una solución no trivial, que satisfaga la siguiente ecuación:

$$A\Phi = \lambda\Phi \quad (3.8)$$

donde:

A = matriz característica del sistema de $n \times n$.

Φ = Vector de $n \times 1$.

La representación de los eigenvalores de la matriz $[A]$, de la ecuación (3.8), se escribe como:

$$(A - \lambda I)\Phi = 0 \quad (3.9)$$

Donde I , es la matriz identidad en la ecuación (3.9) y para una solución no trivial, la expresión es:

$$\det(A - \lambda I) = 0 \quad (3.10)$$

Si el sistema es de orden n , existirán n soluciones de λ ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$), para esa matriz conocidos como *eigenvalores de $[A]$* . Los eigenvalores obtenidos de la matriz $[A]$, pueden ser representados de manera real o compleja; aunque cuando llegan a ser complejos siempre se presentan en pares conjugados. En algunos sistemas los eigenvalores obtenidos son idénticos, debido a la información obtenida por la matriz $[A]$, pero se puede demostrar que los eigenvalores de la matriz $[A]$ y de su transpuesta son los mismos.

3.3.1.2 Eigenvectores.

Para cualquier eigenvalor λ_i , asociado con la matriz $[A]$, le corresponde un vector ϕ_i , diferente de cero que satisfagan la ecuación (3.8), conocido como *eigenvector derecho*, teniendo:

$$A\phi_i = \lambda_i\phi_i \quad (3.11)$$

cuando $i=1, 2, \dots, n$

Representando al *eigenvector derecho* Φ_i como:

$$\Phi_i = \begin{bmatrix} \phi_{1i} \\ \phi_{2i} \\ \vdots \\ \phi_{ni} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Si la ecuación (3.9), es homogénea; entonces el producto de $k\phi_i$ (donde k es escalar), es considerado como una solución del sistema; de manera similar, el vector de n -filas ψ_i , también satisface a la ecuación (3.9), teniendo:

$$\psi_i A = \lambda_i \psi_i \quad (3.13)$$

donde $i=1, 2, \dots, n$

Por lo que es llamado *eigenvector izquierdo* que a su vez se encuentran asociados con los eigenvalores λ_i de la matriz $[A]$.

Los *eigenvectores derechos e izquierdos* corresponden a diferentes eigenvalores de la matriz $[A]$, estos son ortogonales, lo cual quiere decir que los eigenvalores λ_i no son iguales a los eigenvalores λ_j , teniendo:

$$\psi_j \phi_i = 0 \quad (3.14)$$

Pero, para el caso de que los eigenvectores sean correspondientes al mismo eigenvalor, donde C_i es una constante diferente de cero, teniendo:

$$\Psi_j \phi_i = C_i \quad (3.15)$$

Normalizando a estos eigenvectores de la matriz $[A]$, se tiene:

$$\Psi_j \phi_i = 1 \quad (3.16)$$

3.3.1.3 Matrices Modales.

La representación en forma compacta los eigenvectores derechos Φ_i y eigenvectores izquierdos Ψ_i , de matriz $[A]$, se expresa como:

$$\Phi = [\phi_1 \quad \phi_2 \quad \dots \quad \phi_n] \quad (3.17)$$

$$\Psi = [\psi_1^T \quad \psi_2^T \quad \dots \quad \psi_n^T]^T \quad (3.18)$$

$[\Lambda]^T =$ Matriz diagonal con los eigenvalores
 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, como elementos en diagonal.

Considerando que cada matriz es de orden $n \times n$, entonces las ecuaciones (3.11) y (3.16), se expresan como:

$$A\Phi = \Phi\Lambda \quad (3.19)$$

$$\Psi\Phi = I \quad (3.20)$$

$$\Psi = \Phi^{-1}$$

De modo que la ecuación (3.19), se exprese como:

$$\Phi^{-1}A\Phi = \Lambda \quad (3.21)$$

3.3.1.4 Respuesta Libre del Sistema.

La respuesta natural del sistema representa el comportamiento del sistema en función de las condiciones iniciales, cuando no existe una fuerza externa de control, en este caso cuando el vector $\mathbf{u} = 0$, de tal manera que la ecuación (3.7), se expresa como:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = A\Delta \mathbf{x} \quad (3.22)$$

La respuesta libre del sistema, depende de tres factores principalmente que son:

- Determinación de la razón de aumento o decremento de la respuesta en función de los eigenvalores.
- Determinación de la forma de la respuesta en función de los eigenvalores.
- Determinación del grado en que cada modo participa en la respuesta libre del sistema dado por las condiciones iniciales.

Donde la solución de la ecuación (3.22), es expresada como [3], que dando:

$$\Delta \mathbf{x}(t) = \sum_{i=0}^n \Phi_i C_i e^{\lambda_i t} \quad (3.23)$$

C_i , de la ecuación (3.23), indica el producto escalar de $\Psi_i \Delta \mathbf{X}(0)$; si se expresa la ecuación (3.23), en función del tiempo, se tiene:

$$\Delta x_i(t) = \varphi_{1i} C_1 e^{\lambda_1 t} + \varphi_{2i} C_2 e^{\lambda_2 t} + \dots + \varphi_{ni} C_n e^{\lambda_n t} \quad (3.24)$$

La ecuación (3.24), se expresa en función de los eigenvectores derechos e izquierdos de la matriz $[\mathbf{A}]$, donde la respuesta libre del sistema queda expresada en función de una combinación lineal de n modos dinámicos correspondientes a n eigenvalores de la matriz de estado.

Observando que el producto escalar de $C_i = \psi_i \Delta \mathbf{X}(0)$, representa la magnitud de la excitación del $i_{\text{ésimo}}$ modo resultante de las condiciones iniciales.

La ecuación (3.24), que representa la respuesta libre; donde la característica dependiente del tiempo de un modo corresponde a un eigenvalor λ_i , y se encuentra dada por la expresión de $e^{\lambda_i t}$. Esta expresión esta directamente relacionada con el comportamiento de estabilidad del sistema. Algunas formas de los eigenvalores que se pueden obtener de la matriz característica son:

- Eigenvalores sólo con parte real, representan a un modo no oscilatorio en el sistema.
- Eigenvalores con parte real negativa, representan un modo decayendo.
- Eigenvalores con parte real positiva, representa inestabilidad no periódica.
- Eigenvalores complejos, se representan en pares conjugados, donde cada par corresponde a un modo oscilatorio.

La componente real del eigenvalor corresponde al *amortiguamiento* (α) de ese modo, mientras que la componente imaginaria corresponde a la *frecuencia de oscilación* del sistema (ω), de tal manera que la representación de un eigenvalor en función de su amortiguamiento y frecuencia es:

$$\lambda = \alpha \pm j\omega \quad (3.25)$$

La *frecuencia de oscilación amortiguada* se expresa en Hertz:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (3.26)$$

Y la *razón de amortiguamiento* se expresa en la ecuación (3.27), que representa la razón del decaimiento de la amplitud de la oscilación del eigenvalor.

$$\zeta = \frac{-\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \omega^2}} \quad (3.27)$$

3.3.1.5 Formas Modales

Es importante notar que la ecuación de la respuesta libre del sistema, se representa en función de sus eigenvalores y eigenvectores que se expresan de tal manera, que se pueden identificar sus formas modales, y no es más que la combinación de eigenvalores con sus respectivos eigenvectores.

Observando que la forma del modo, esta dada por el comportamiento del eigenvector derecho incluso cuando un modo es excitado, nos da la actividad relativa de las variables de estado involucradas. En la ecuación (3.24), si se calcula el valor de los ángulos para cada forma modal, nos proporciona los desplazamientos de fase para cada una de las variables de estado con respecto al modo de análisis.

Con el eigenvector izquierdo del eigenvalor correspondiente, ayuda a identificar la combinación de las variables de estado originales, mostradas en el modo en cuestión.

3.3.1.6 Factores de Participación.

La participación de los modos del sistema en la formación de la respuesta en el tiempo, puede obtenerse por la interpolación de la ecuación de la respuesta de los estados del sistema. Por medio de una matriz de participación [**P**], la cual combina eigenvectores derechos y eigenvectores izquierdos de cada modo del sistema, las cuales son cantidades complejas adimensionales que proporcionan información sobre el comportamiento de un sistema dinámico [3,4].

$$P = [p_1 \quad p_2 \quad \cdots \quad p_n] \quad (3.28)$$

Para un sistema de orden n , la matriz de participación es:

$$P = \begin{bmatrix} \varphi_{1i} \psi_{i1} \\ \varphi_{2i} \psi_{i2} \\ \vdots \\ \varphi_{ni} \psi_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{12} & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{1i} \\ p_{2i} \\ \vdots \\ p_{ni} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

donde:

φ_{ki} = Elemento de renglón k ésimo y la columna i ésima de la matriz modal Φ . Entrada k ésima de Φ_i .

ψ_{ik} = Elemento de renglón i ésimo y la columna k ésima de la matriz modal Ψ . Entrada k ésima de Ψ_i .

El elemento $p_{ki} = \varphi_{ki} \psi_{ik}$ es llamado *factor de participación*. Definido como una medida de la participación relativa de la k ésima variable de estado en el k ésimo modo y viceversa. Donde φ_{ki} mide la actividad en el modo y la ψ_{ik} muestra la contribución de esta actividad en el modo.

3.3.1.7 Método de Sensibilidad de Eigenvalores.

Los eigenvalores del sistema, nos proporcionan información acerca del comportamiento del sistema, en un caso de condición de operación específico; pero, si los eigenvalores son obtenidos en función de la variación de los parámetros del sistema, como es el caso de las resistencias y reactancias del rotor y estator, además de la reactancia de magnetización, se tiene un análisis de sensibilidad de eigenvalores, que establece las condiciones de estabilidad del sistema en base al comportamiento de la variación de sus parámetros; donde estas variaciones, se pueden dar por condiciones ambientales a las que se encuentre trabajando el sistema como es el caso de las máquinas o bien por condiciones de operación a las que el

sistema tenga que apoyarse de otros dispositivos para cumplir con su operación como es la compensación serie o paralelo (capacitores) o variación de la carga.

El análisis de sensibilidad de eigenvalores, se basa en el comportamiento de los eigenvalores con respecto a la variación de los parámetros del sistema, expresados como [3,4,95,96]:

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial \ln \xi_i} = \frac{\left(\left(\psi_i \frac{\partial [A]}{\partial \xi_i} \right) \varphi_i \right)}{(\psi_i \varphi_i)} \xi_0 \quad (3.30)$$

donde:

[A] = Matriz característica del sistema.

λ_i = El i ésimo eigenvalor de la matriz [A].

φ_i = Eigenvector derecho correspondiente de λ_i .

ψ_i = Eigenvector izquierdo correspondiente de λ_i .

ξ_i = Parámetros del sistema.

ξ_0 = Valor nominal de los Parámetros del sistema.

3.4 TÉCNICAS DE IDENTIFICACIÓN MODAL.

Las técnicas de identificación modal consideran efectos adicionales como: el de un disturbio, en algunos fenómenos no lineales como la saturación, el límite en controles y otros que no son considerados en el análisis modal, generalmente estas técnicas se aplican a señales en el tiempo con variables del sistema registradas durante un disturbio. Ese disturbio por lo general solamente excita un subconjunto de todos los modos del sistema, conocido como del grupo de *modos dominantes*. Los métodos de identificación modal, solamente determinan la información de este grupo *modos dominantes*. [4,29,50,40,41].

Una ventaja de los métodos de identificación modal es que permiten determinar los modos de oscilación más importantes que son excitados en un evento y de este modo se concentra el análisis modal del sistema solamente en el grupo crítico, dado que para sistemas de gran dimensión solamente es posible calcular los modos del sistema en grupos reducidos [4,29].

3.4.1 Análisis de Fourier.

El análisis de Fourier se aplica de forma simple a los datos de respuesta de un sistema de potencia ya sean obtenidos mediante simulación con programas de análisis de estabilidad o medidos ante un evento real o preparado [4,29,40,41].

Tabla 3.1 Ventajas y Desventajas del Análisis de Fourier [4].

<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Es aplicable a registros obtenidos mediante simulación en el dominio del tiempo o a registros de datos obtenidos de pruebas en campo. ▪ Permite la identificación de modos dominantes, envolturas modales y niveles de respuesta en puntos seleccionados del sistema. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Se requiere de registros con un número relativamente grande de puntos y señales estables. ▪ La información obtenida es principalmente a nivel local asociada a partes del sistema. ▪ La información no conduce directamente a modelos de simulación o al diseño de controles.

El Análisis de Fourier es la representación de una función periódica $f(x)$ por una serie trigonométrica de forma:

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \text{sen } nx) \quad (3.31)$$

La aplicación práctica del Análisis de Fourier se obtiene al considerar que en muchos procesos físicos no es posible tener funciones periódicas por lo que es necesario una generalización de el método de Fourier, esta integral es una función no periódica que puede expresarse como:

$$f(x) = \int_0^{\infty} [A(\omega) \cos \omega x + B(\omega) \text{sen } \omega x] d\omega \quad (3.32)$$

donde ω y v son variables de integración.

3.4.2 Análisis de Prony.

El análisis de Prony es una técnica para ajustar datos de muestras uniformes (espacios igualmente) por una combinación lineal de funciones senoidales amortiguadas. A diferencia de que en el Análisis de Fourier que solamente se obtienen amplitudes y frecuencias; en el análisis de Prony se permite obtener información adicional sobre la fase y amortiguamiento modal [4,29,39,40,41]. Muestra las diferencias básicas entre los modelos propuestos por el Análisis de Prony y el de Fourier.

Esta técnica de identificación modal, descompone señales en el dominio del tiempo en senoidales amortiguadas con cuatro parámetros por modo que son: frecuencia, amortiguamiento, amplitud y fase, además propone un ajuste aproximado de un conjunto de n , muestras mediante p polinomios, donde $n > 2p$ [4,29,39,40,41].

Este método muestra las siguientes características:

- Permite la estimación de modos dominantes y niveles de respuesta en puntos seleccionados del sistema.
- Presenta características de aplicación a registros obtenidos de simulación digital o pruebas en campo, así como de aplicación al diseño de controles.

Una de las limitaciones más importantes del análisis de Prony, es que en el análisis de oscilaciones electromagnéticas, estas se encuentran en etapa de investigación.

El modelo que más frecuentemente se utiliza en el ajuste de Prony es un conjunto de p exponenciales con amplitud, fase, frecuencia y factores de amortiguamiento arbitrarios en la siguiente forma [4]:

$$\hat{X}_n = \sum_{m=1}^p b_m z_m^n, \quad \text{para } n = 0, \dots, N-1 \quad (3.33)$$

donde:

$$b_m = A_m e^{j\theta_m}$$

$$z_m = e^{(\alpha_m + j2\pi f_m) \Delta t}$$

A_m = Amplitud.

θ_m = Angulo de fase en radianes.

α_m = Factor de amortiguamiento.

f_m = Frecuencia de oscilación en Hz.

Δt = Intervalo de muestreo en segundos.

El problema que se plantea es la determinación de los coeficientes A_m , θ_m , α_m , f_m , Δt . El análisis de Prony es una extensión del análisis de Fourier con la diferencia de que las funciones Prony pueden ser exponenciales amortiguadas en lugar de funciones periódicas y que sus frecuencias no necesitan estar relacionadas armónicamente o a la duración de la señal. El análisis de Prony como la mayoría de las técnicas de identificación modal se utiliza en combinación con las técnicas análisis modal para determinar el origen de los problemas de oscilaciones mal amortiguadas y en el diseño de medidas de control. Algunas de las tareas que facilita el uso del método de Prony son [28,39,40,41]:

- Comparación y validación de los resultados de estudios de análisis modal con resultados de simulaciones en el tiempo utilizando el modelo completo no lineal del sistema o con mediciones directas de variables del sistema.
- Construcción de modelos reducidos o equivalentes de áreas del sistema utilizando señales en el tiempo.

Otras aplicaciones del método de Prony en el control de sistemas eléctricos de potencia son:

- Sistemas de monitoreo en tiempo real para controlar problemas de oscilaciones transitorias mal amortiguadas.
- Empleo de simulaciones en el tiempo.
- Estudio de eventos registrados por unidades de medición fasorial (PMU en inglés).
- Mejoramiento de los modelos matemáticos del sistema a partir de la reproducción de eventos registrados.

3.5 EQUIVALENTES DINÁMICOS.

Un sistema de potencia empleado para este análisis es de un sistema eoloelectrico, en donde se desarrollará un análisis de estabilidad ante pequeños disturbios desarrollado en el Capítulo 5. Debido a que el grupo de máquinas generadoras son de la misma capacidad con características iguales conectadas a uno o varios transformadores, de acuerdo al tamaño de la planta o del valor de su capacidad total requerida, el sistema es mostrado en la figura 3.1 [81,88].

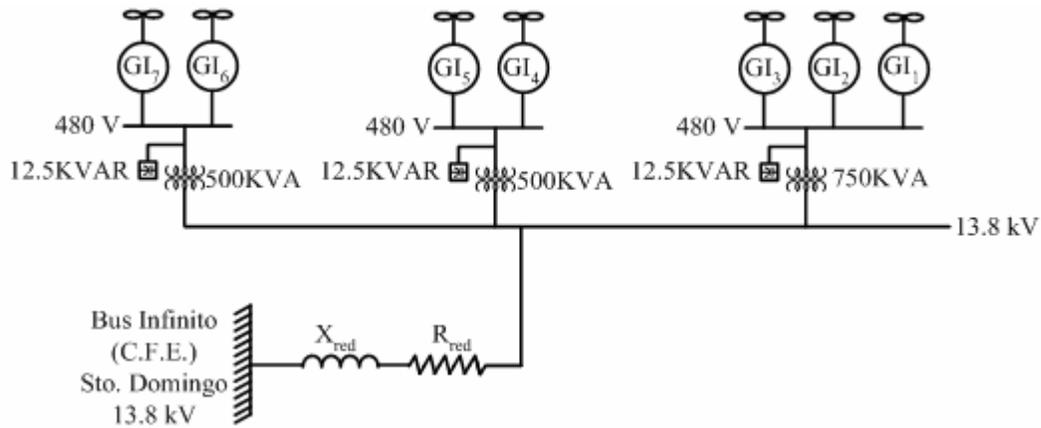


Figura 3.1. Circuito de la planta eoloelectrica con N generadores de características iguales.

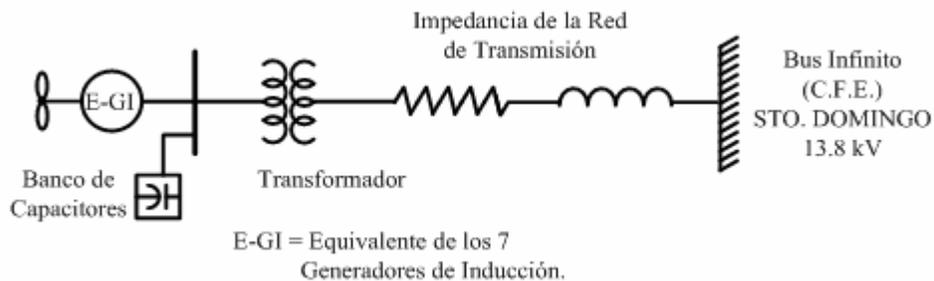


Figura 3.2. Circuito equivalente de la planta eoloelectrica La Venta, Oaxaca.

Si el sistema eólico de la figura 3.1, se le hace el estudio de estabilidad ante pequeños disturbios de forma conjunta, se dice que se le aplica un *equivalente dinámico*, analizando a un sistema más sencillo como el de la figura 3.2, (máquina bus infinito).

Un análisis dinámico de un *equivalente dinámico* originado por un sistema de potencia de gran tamaño, simplificaría en parte su análisis, lo cual quiere decir que la representación de varias unidades como una sola máquina ya sea como carga o generación de forma equivalente, es mucho más sencillo de manejar ahorrando tiempo-máquina en cuanto a cálculos para el análisis.

Aunque existen una diversa infinidad de métodos para el desarrollo de un equivalente dinámico [88], se emplea el equivalente de máquinas (cargas o generadores) agrupándolas como una carga estática equivalente con una impedancia constante, en donde hay que tomar en cuenta que todas las máquinas participantes en el sistema son completamente iguales [88], por lo que se quiere representar los parámetros

de una máquina de inducción equivalente, empleando el circuito de la máquina de inducción monofásico para expresar los valores de resistencias y reactancias equivalentes, ver figura 3.3.

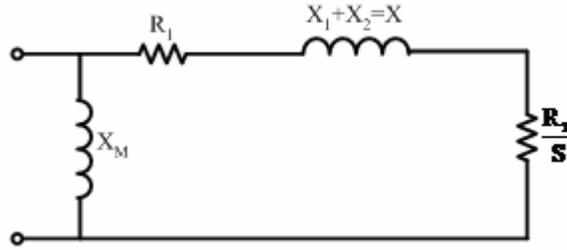


Figura 3.3. Circuito equivalente de una máquina de inducción por fase.

De tal manera que las fórmulas para la representación equivalente de las máquinas es la siguiente:

$$X_M = \frac{X_M}{N} K \quad (3.34)$$

$$X = \frac{X}{N} K \quad (3.35)$$

$$R_2 = \frac{R_2}{N} K \quad (3.36)$$

donde:

N= Número de máquinas generadoras

$$K = \frac{\text{potencia base}_1}{\text{potencia base}_2} \quad (3.37)$$

K = factor que transforma los parámetros para obtener una nueva base.

La constante de inercia (H), se representa como:

$$H_{eq} (VA)_{eq} = H_1 (VA)_1 + H_2 (VA)_2 + \dots + H_N (VA)_N \quad (3.38)$$

donde:

VA_1, VA_2, \dots = Potencia de las máquinas.

Para el caso de dos máquinas, la constante de inercia (H), se calcula de la siguiente manera:

$$VA_{eq} = VA_1 + VA_2 \quad (3.39)$$

$$H = H_1 = H_2 \quad (3.40)$$

De tal manera que H_{eq} es:

$$H_{eq} = H \quad (3.41)$$

La aplicación del equivalente se desarrolla en el Capítulo 5, donde el análisis de estabilidad ante pequeños disturbios parte del circuito equivalente del sistema de potencia a estudiar.

3.6 MODELO LINEAL DEL GENERADOR DE INDUCCIÓN-BUS INFINITO.

El desarrollo de las ecuaciones para el modelo de la máquina de inducción de 5° orden en el caso no lineal este se desarrolla en el apéndice A, siendo este un sistema máquina bus infinito, presentando dos opciones de este modelo en función de corrientes o flujos electromagnéticos; en este apartado se desarrollan los modelos linealizados correspondientes a las configuración del sistema. En las ecuaciones (A.34) y (A.39) del modelo de la máquina de inducción se les aplican las Series de Taylor, derivando parcialmente cada parámetro que se quiere analizar, en las ecuaciones del voltaje pero del rotor, se toma en cuenta el comportamiento del deslizamiento (ecuación (2.4)) como en [3,4,7,18,38] teniendo:

Ecuaciones de Voltaje en el Estator (3.42), (3.43) y Rotor (3.44), (3.45):

$$-\Delta v_d = \left(R_s + \frac{p}{\omega_0} X_s \right) \Delta i_d + \left(\frac{p}{\omega_0} X_m \right) \Delta i_{rd} + (X_s) \Delta i_q + (X_m) \Delta i_{rq} \quad (3.42)$$

$$-\Delta v_q = \left(R_s + \frac{p}{\omega_0} X_s \right) \Delta i_q + \left(\frac{p}{\omega_0} X_m \right) \Delta i_{rq} - (X_s) \Delta i_d - (X_m) \Delta i_{rd} \quad (3.43)$$

$$0 = \frac{p}{\omega_0} X_m \Delta i_d + \left(R_r + \frac{p}{\omega_0} X_r \right) \Delta i_{rd} + S X_m \Delta i_q - \Delta \eta_r X_{mq} + S X_r \Delta i_{rq} - \Delta \eta_r X_{rq} \quad (3.44)$$

$$0 = -S X_m \Delta i_d + \frac{p}{\omega_0} X_m \Delta i_q + \left(R_r + \frac{p}{\omega_0} X_r \right) \Delta i_{rq} + \Delta \eta_r X_{md} - S X_r \Delta i_{rd} + \Delta \eta_r X_{rd} \quad (3.45)$$

Ecuación del Par Electromagnético:

$$\Delta T_m = p 2H_m \Delta \eta_r + X_{mq} \Delta i_{rd} + X_{md} \Delta i_{rq} - X_{mq} \Delta i_d - X_{md} \Delta i_{dr} \quad (3.46)$$

La representación en forma matricial de las ecuaciones anteriores es:

$$\begin{bmatrix} -\Delta v_{ds} \\ 0 \\ -\Delta v_{qs} \\ 0 \\ \Delta T_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + \frac{p}{\omega_0} X_s & \frac{p}{\omega_0} X_m & X_s & X_m & 0 \\ \frac{p}{\omega_0} X_m & R_{rd} + \frac{p}{\omega_0} X_r & S X_m & S X_r & -(X_{mq} + X_{rq}) \\ -X_s & -X_m & R_s + \frac{p}{\omega_0} X_s & \frac{p}{\omega_0} X_m & 0 \\ -S X_m & -S X_r & \frac{p}{\omega_0} X_m & R_{qr} + \frac{p}{\omega_0} X_r & X_{md} + X_{rd} \\ -X_{mq} & X_{ms} & X_{md} & -X_{ms} & 2pH_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{ds} \\ \Delta i_{dr} \\ \Delta i_{qs} \\ \Delta i_{qr} \\ \Delta \eta_r \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

Donde se obtiene el modelo de 5° orden en función de corrientes. Ahora si se factoriza a p en la ecuación (3.47), se tiene:

$$\frac{p}{\omega_0} \begin{bmatrix} X_s & X_m \\ X_m & X_r \\ X_s & X_m \\ X_m & X_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{ds} \\ \Delta i_{dr} \\ \Delta i_{qs} \\ \Delta i_{qr} \\ \Delta \eta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & X_s & X_m \\ & R_r & S X_m & S X_r \\ -X_s & -X_m & R_s \\ -S X_m & -S X_r & R_r & X_{md} + X_{rd} \\ -X_{mq} & X_{ms} & X_{md} & -X_{ms} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{ds} \\ \Delta i_{dr} \\ \Delta i_{qs} \\ \Delta i_{qr} \\ \Delta \eta_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\Delta v_{ds} \\ 0 \\ -\Delta v_{qs} \\ 0 \\ \Delta T_m \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

Se descomponen la ecuación (3.48), en bloques teniendo:

$$\begin{array}{c} p \\ \hline \end{array} \omega_0 \begin{array}{|c|c|} \hline -X_{mot}^{-1} R_{mot} & -X_{mot}^{-1} \Delta V_1 \\ \hline \frac{1}{-2H\omega_0} \Delta V_2 & \\ \hline \end{array} \begin{array}{c} \\ \hline \end{array} \omega_0 \begin{array}{|c|c|} \hline X_{mot}^{-1} & \\ \hline & \frac{1}{2H\omega_0} \\ \hline \end{array} \begin{array}{c} \\ \hline \end{array} \quad (3.49)$$

donde:

$$X_{mot} = \begin{bmatrix} X_s & X_m \\ X_m & X_r \\ & & X_s \Delta i \\ & & X_m \Delta i \\ & & X_m & X_r \end{bmatrix} = R_{mot} = \begin{bmatrix} R_s & & X_s & X_m \\ & R_r & SX_m & SX_r \\ -X_s & -X_m & R_s & \\ -SX_m & -SX_r & & R_r \end{bmatrix} \Delta i$$

siendo:

X_{mot} = Matriz de reactancias de la máquina de inducción.

R_{mot} = Matriz de resistencias de la máquina de inducción.

$$\Delta V^T = [-\Delta V_d \quad 0 \quad \Delta V_q \quad 0 \quad \Delta T_m] \quad (3.50) \quad \Delta \eta_r$$

$$\Delta i^T = [\Delta i_d \quad \Delta i_{rd} \quad \Delta i_q \quad \Delta i_{rq} \quad \Delta \eta_r] \quad (3.51)$$

$$\Delta V_1^T = [0 \quad -(X_m i_q + X_r i_{rq}) \quad 0 \quad (X_m i_d + X_r i_{rd})] \quad (3.52)$$

$$\Delta V_2 = [-X_m i_{rq} \quad X_m i_q \quad X_m i_d \quad -X_m i_d] \quad (3.53)$$

pero,

$$\Delta V = \begin{bmatrix} -\Delta V_d \\ 0 \\ -\Delta V_q \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

Haciendo lo mismo para el modelo de 5° orden en función de flujos (ecuación (A.39)), se tiene:

$$\frac{p}{\omega_0} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2H_m \omega_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \psi_{ds} \\ \Delta \psi_{qs} \\ \Delta \psi_{dr} \\ \Delta \psi_{qr} \\ \Delta \eta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \left(\frac{R_s}{X_r X_s - X_m^2}\right) X_r & 1 & -\left(\frac{R_s}{X_r X_s - X_m^2}\right) X_m & 0 & 0 \\ -1 & \left(\frac{R_s}{X_r X_s - X_m^2}\right) X_r & 0 & -\left(\frac{R_s}{X_r X_s - X_m^2}\right) X_m & 0 \\ \left(\frac{R_r}{X_m^2 - X_r X_s}\right) X_m & 0 & -\left(\frac{R_r}{X_m^2 - X_r X_s}\right) X_s & S & -\psi_{qr} \\ 0 & \left(\frac{R_r}{X_m^2 - X_r X_s}\right) X_m & -S & -\left(\frac{R_r}{X_m^2 - X_r X_s}\right) X_s & \psi_{dr} \\ -\left(\frac{X_m}{X_r X_s - X_m^2}\right) \psi_{qr} & \left(\frac{X_m}{X_r X_s - X_m^2}\right) \psi_{dr} & \left(\frac{X_m}{X_r X_s - X_m^2}\right) \psi_{qs} & -\left(\frac{X_m}{X_r X_s - X_m^2}\right) \psi_{ds} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \psi_{ds} \\ \Delta \psi_{qs} \\ \Delta \psi_{dr} \\ \Delta \psi_{qr} \\ \Delta \eta_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\Delta V_{ds} \\ -\Delta V_{qs} \\ 0 \\ 0 \\ \Delta T_m \end{bmatrix} \quad (3.55)$$

$$\begin{matrix} \mathbf{p} \\ \Delta\psi \\ \Delta\eta_r \end{matrix} = \omega_p \begin{matrix} -X_{\text{red}} & -X_{\text{red}} \Delta i_1 \\ \frac{1}{2Hm_p} \Delta i_1 & \end{matrix} \begin{matrix} \Delta\psi \\ \Delta\eta_r \end{matrix} + \omega_p \begin{matrix} X_{\text{red}} & \\ & \frac{1}{2Hm_p} \end{matrix} \begin{matrix} \Delta V \\ \Delta T_m \end{matrix} \quad (3.56)$$

Llegando a la misma representación que la ecuación (3.49) pero ahora las variables son flujos electromagnéticos.

3.6.1 Modelo de un Generador de Inducción conectado a través de una Impedancia al Bus Infinito.

El desarrollo del modelo de la red de transmisión, muestra los modelos de los elementos que la conforman como: la impedancia de la red de transmisión, el capacitor y un CEV; aumentando el orden del modelo de la máquina de inducción en el sistema máquina bus infinito, en función de flujos electromagnéticos.

Las ecuaciones que describen el comportamiento de la impedancia de la red de transmisión que se emplea para este sistema, se toma en cuenta el marco de referencia seleccionado para el modelado de la máquina de inducción en el sistema máquina bus infinito [7,38], anteriormente visto.

$$V_{dl} = V_{dB} + R_{red} i_{dl} + X_{red} \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt} i_{dl} + \frac{\omega}{\omega_0} X_{red} i_{ql} \quad (3.57)$$

$$V_{ql} = V_{qB} + R_{red} i_{ql} + X_{red} \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt} i_{ql} - \frac{\omega}{\omega_0} X_{red} i_{dl} \quad (3.58)$$

Simplificando las ecuaciones se tiene:

$$V_{dl} = V_{dB} + R_{red} i_{dl} + X_{red} \frac{p}{\omega_0} i_{dl} + X_{red} i_{ql} \quad (3.59)$$

$$V_{ql} = V_{qB} + R_{red} i_{ql} + X_{red} \frac{p}{\omega_0} i_{ql} - X_{red} i_{dl} \quad (3.60)$$

En el modelo de la máquina de inducción como generador, cuando es conectado a un sistema bus infinito a través de una impedancia externa con red de transmisión, se emplean las mismas ecuaciones del sistema matricial no lineal mostrada en la ecuación (A.39), pero en este caso, como se esta empleando las ecuaciones de la impedancia de la red de transmisión en el modelo de corrientes de 5° orden, se emplea el concepto de máquina modificada, donde el valor de resistencia y reactancia de la red se suman a la resistencia y reactancia de la ecuación de voltaje en el estator de la máquina de inducción, debido a que físicamente se encuentran conectados como un circuito serie, ver figura 3.4, dando como resultado un sistema de 5° orden de manera simplificada.

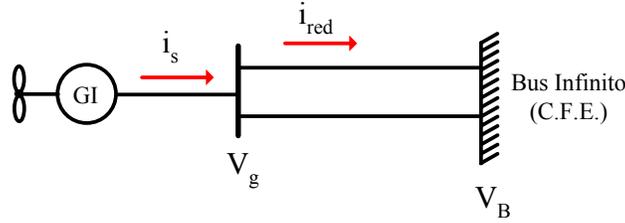


Figura 3.4. Circuito de la máquina bus infinito conectada por medio de la impedancia de la red de transmisión.

Conociendo que los valores de corrientes y voltajes en la impedancia de la red de transmisión como en la armadura de la máquina son los mismos, se tiene:

$$i_{ds} = i_{dl} \Rightarrow i_{d'} \quad (3.61)$$

$$i_{qs} = i_{ql} \Rightarrow i_{q'} \quad (3.62)$$

y a su vez se ve reflejado en la resistencias y reactancias equivalentes:

$$R_{s'} = R_a + R_{red} \quad (3.63)$$

$$X_{ds'} = X_{ds} + X_{red} \quad (3.64)$$

$$X_{qs'} = X_{qs} + X_{red} \quad (3.65)$$

De manera que se modifican solamente las ecuaciones de voltaje de la armadura en d y q (A.34) con las ecuaciones de la red (3.59), y (3.60), resultado:

$$\begin{bmatrix} -v_{dB} \\ 0 \\ -v_{qB} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_s + R_{red}) + \frac{p}{\omega_0} (X_s + X_{red}) & \frac{p}{\omega_0} X_m & X_s + X_{red} & X_m \\ \frac{p}{\omega_0} X_m & R_{dr} + \frac{p}{\omega_0} X_r & SX_m & SX_r \\ -(X_s + X_{red}) & -X_m & R_s + R_{red} + \frac{p}{\omega_0} (X_s + X_{red}) & \frac{p}{\omega_0} X_m \\ SX_m & -SX_r & \frac{p}{\omega_0} X_m & R_{qr} + \frac{p}{\omega_0} X_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d'} \\ i_{dr} \\ i_{q'} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (3.66)$$

Linealizando la ecuación (3.66), se tiene:

$$\frac{p}{\omega_0} \begin{bmatrix} X_s + X_{red} & X_m \\ X_m & X_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_s + X_{red} & X_m \\ X_m & X_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{d'} \\ \Delta i_{dr} \\ \Delta i_{q'} \\ \Delta i_{qr} \\ \Delta \eta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s + R_{red} & X_s + X_{red} & X_m \\ - (X_s + X_{red}) & -X_m & R_s + R_{red} \\ -SX_m & -SX_r & R_r \\ -X_m i_{qr} & X_m i_{qs} & X_m i_{dr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{d'} \\ \Delta i_{dr} \\ \Delta i_{q'} \\ \Delta i_{qr} \\ \Delta \eta_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\Delta V_{dB} \\ 0 \\ -\Delta V_{qB} \\ 0 \\ \Delta T_m \end{bmatrix} \quad (3.67)$$

De manera que se llega a la misma representación que las ecuaciones (3.49) y (3.56), donde en forma general es igual a la ecuación (3.7), y en forma de bloques se tiene:

$$\mathbf{P} \begin{bmatrix} \Delta i \\ \Delta \eta_r \end{bmatrix} = \mathbf{e}_1 \begin{bmatrix} -\mathbf{X}^{-1} \mathbf{R} & -\mathbf{X}^{-1} \Delta \mathbf{V}_1 \\ \frac{1}{-2H_m \omega_0} \Delta \mathbf{V}_2 & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i \\ \Delta \eta_r \end{bmatrix} + \mathbf{e}_2 \begin{bmatrix} \mathbf{X}^{-1} & \\ & \frac{1}{2H_m \omega_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{V} \\ \Delta T_m \end{bmatrix} \quad (3.68)$$

donde:

$\mathbf{X}_{\text{mot-red}}$ = Matriz de reactancias de la máquina de inducción y la red de transmisión.

$\mathbf{R}_{\text{mot-red}}$ = Matriz de resistencias de la máquina de inducción y la red de transmisión.

$$\Delta \mathbf{V}^T = \begin{bmatrix} -\Delta V_{dB} & 0 & -\Delta V_{qB} & 0 & \Delta P_m \end{bmatrix} \quad (3.69)$$

$$\Delta i^T = \begin{bmatrix} -\Delta i_{d'} & \Delta i_{rd} & -\Delta i_{q'} & \Delta i_{rq} & \Delta \eta_r \end{bmatrix} \quad (3.70)$$

$$\Delta \mathbf{V}_1^T = \begin{bmatrix} 0 & -\left(X_{m i q} + X_{r i r q} \right) & 0 & \left(X_{m i d} + X_{r i r d} \right) \end{bmatrix} \quad (3.71)$$

$$\Delta \mathbf{V}_2 = \begin{bmatrix} -X_{m i r q} & X_{m i q} & X_{m i d} & -X_{m i d} \end{bmatrix} \quad (3.72)$$

$$\Delta \mathbf{V} = \begin{bmatrix} -\Delta V_{dB} \\ 0 \\ -\Delta V_{qB} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.73)$$

Si en el modelo de la máquina de inducción como generador conectado a un sistema bus infinito a través de una impedancia externa como red de transmisión, se emplean las ecuaciones del sistema matricial no lineal mostrada en la ecuación (A.63), pero usando el modelo de flujos electromagnéticos de 5° orden, se obtiene un modelo de 7° orden, debido a que no se puede hacer una igualación de corrientes en los modelos de ambos dispositivos por que se encuentran en función de variables de estado distintas (flujos y corrientes), entonces se tiene:

$$\frac{p}{\omega_0} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2H_m \omega_0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & X_{red} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & X_{red} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta w_{ds} \\ \Delta w_{qs} \\ \Delta w_{dr} \\ \Delta w_{qr} \\ \Delta \eta_r \\ \Delta i_{dl} \\ \Delta i_{ql} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \left(\frac{R_s}{X_r X_s - X_m^2} \right) X_r & 1 & -\left(\frac{R_s}{X_r X_s - X_m^2} \right) X_m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & \left(\frac{R_s}{X_r X_s - X_m^2} \right) X_r & 0 & -\left(\frac{R_s}{X_r X_s - X_m^2} \right) X_m & 0 & 0 & 0 \\ \left(\frac{R_r}{X_m^2 - X_r X_s} \right) X_m & 0 & -\left(\frac{R_r}{X_m^2 - X_r X_s} \right) X_s & S & -\psi_{qr} & 0 & 0 \\ 0 & \left(\frac{R_r}{X_m^2 - X_r X_s} \right) X_m & -S & -\left(\frac{R_r}{X_m^2 - X_r X_s} \right) X_s & \psi_{dr} & 0 & 0 \\ -\left(\frac{X_m}{X_r X_s - X_m^2} \right) \psi_{qr} & \left(\frac{X_m}{X_r X_s - X_m^2} \right) \psi_{dr} & \left(\frac{X_m}{X_r X_s - X_m^2} \right) \psi_{qs} & -\left(\frac{X_m}{X_r X_s - X_m^2} \right) \psi_{ds} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & R_s + R_{red} & X_{red} \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_{red} & R_s + R_{red} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta w_{ds} \\ \Delta w_{qs} \\ \Delta w_{dr} \\ \Delta w_{qr} \\ \Delta \eta_r \\ \Delta i_{dl} \\ \Delta i_{ql} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\Delta V_{ds} \\ -\Delta V_{qs} \\ 0 \\ 0 \\ \Delta T_m \\ -\Delta V_{dB} \\ -\Delta V_{qB} \end{bmatrix} \quad (3.74)$$

Expresando la ecuación (3.65) de la forma (3.7), en forma de bloques se tiene:

$$\mathbf{P} \begin{bmatrix} \Delta\psi \\ \Delta\eta_r \\ \Delta i_l \end{bmatrix} = \omega_s \begin{bmatrix} -\underline{X}_{red}^T \underline{R}_{red} & & \\ & -\underline{X}_{red}^T \underline{\Psi}_{red} & \\ & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\psi \\ \Delta\eta_r \\ \Delta i_l \end{bmatrix} + \omega_s \begin{bmatrix} \underline{X}_{red}^T & & \\ & \frac{1}{2H\omega_s} & \\ & & \underline{X}_{red}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta T_m \\ \Delta V_l \end{bmatrix} \quad (3.75)$$

donde:

$X_{mot-red}$ = Matriz de reactancias de la máquina de inducción y la red de transmisión.

$R_{mot-red}$ = Matriz de resistencias de la máquina de inducción y la red de transmisión.

$$\Delta V^T = [-\Delta V_d \quad -\Delta V_q \quad 0 \quad 0 \quad \Delta T_m \quad \Delta V_{Bd} \quad \Delta V_{Bq}] \quad (3.76)$$

$$\Delta \psi^T = [\Delta \psi_d \quad \Delta \psi_q \quad \Delta \psi_{dr} \quad \Delta \psi_{qr} \quad \Delta \eta_r \quad \Delta i_{dl} \quad \Delta i_{ql}] \quad (3.77)$$

$$Z_{red}^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_s + R_{red} & X_{red} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X_{red} & R_s + R_{red} \end{bmatrix} \quad (3.78)$$

$$X_{red}^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X_{red} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X_{red} \end{bmatrix} \quad (3.79)$$

$$\Delta V = \begin{bmatrix} -\Delta V_d \\ -\Delta V_q \\ 0 \\ 0 \\ \Delta T_m \\ \Delta V_{Bd} \\ \Delta V_{Bq} \end{bmatrix} \quad (3.80)$$

3.6.1.1 Modelo del Capacitor.

En el modelo del sistema máquina bus infinito que se está tomando como base para realizar un análisis de estabilidad ante pequeños disturbios, consta de un capacitor para su autoexcitación; es por ello de que a continuación se muestra el modelo de este dispositivo así como la configuración resultante del sistema en variables de estado, ver figura 3.5.

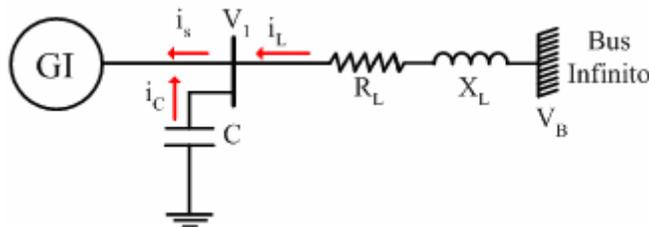


Figura No.3.5. Conexión de una máquina de inducción, bus infinito por medio de una impedancia de red con un capacitor de autoexcitación en paralelo.

Este dispositivo es representado como una reactancia capacitiva X_c , ya sea en función de su voltaje o corriente, según convenga la ecuación para el desarrollo del modelo de estados en el sistema, donde al aplicarle la transformada de Park a estas ecuaciones se puedan expresar en función del marco de referencia d y q empleado en la máquina de inducción y red de transmisión [29,80].

$$i_{dc} = \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt} \frac{1}{X_c} V_{dc} + \frac{\omega}{\omega_0} \frac{1}{X_c} V_{qc} \quad (3.81)$$

$$i_{qc} = \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt} \frac{1}{X_c} V_{qc} - \frac{\omega}{\omega_0} \frac{1}{X_c} V_{dc} \quad (3.82)$$

$$V_{dc} = -X_c i_{qc} + X_c \frac{p}{\omega_0} V_{qc} \quad (3.83)$$

$$V_{qc} = X_c i_{dc} - \frac{p}{\omega_0} V_{dc} \quad (3.84)$$

Simplificando las ecuaciones (3.81) y (3.82), se tiene:

$$i_{dc} = \frac{p}{\omega_0} \frac{1}{X_c} V_{dc} + \frac{1}{X_c} V_{qc} \quad (3.85)$$

$$i_{qc} = \frac{p}{\omega_0} \frac{1}{X_c} V_{qc} - \frac{1}{X_c} V_{dc} \quad (3.86)$$

Observando que en la figura 3.5, en el circuito existe un nodo que relaciona a los voltajes en las terminales de la máquina, con el capacitor e impedancia de red de transmisión, teniendo la siguiente relación de corrientes y voltajes:

$$V_{ds,qs} = V_{dc,qc} = V_{dl,ql} = V_l \quad (3.87)$$

$$i_{ds,qs} = i_{dl,ql} + i_{dc,qc} \quad (3.88)$$

Donde a su vez las corrientes de la línea y las corrientes del capacitor están dadas por:

$$i_{dl,ql} = i_{ds,qs} - i_{dc,qc} \quad (3.88.1)$$

$$i_{dc,qc} = i_{ds,qs} - i_{dl,ql} \quad (3.88.2)$$

De manera que de forma matricial se obtiene un sistema de 9° orden, ecuación (3.80) y en la forma de (3.7), se tiene la ecuación (3.89).

$$\begin{aligned}
& \frac{p}{\omega_0} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2H_m\omega_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & X_{\text{red}} & 0 & \frac{R_s}{X_C} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & X_{\text{red}} & 0 & \frac{R_s}{X_C} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\psi_d \\ \Delta\psi_q \\ \Delta\psi_{rd} \\ \Delta\psi_{rq} \\ \Delta\eta_r \\ \Delta i_{dl} \\ \Delta i_{ql} \\ \Delta V_{dc} \\ \Delta V_{qc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \left(\frac{R_s}{X_r X_s - X_m^2}\right) X_r & 1 & -\left(\frac{R_s}{X_r X_s - X_m^2}\right) X_m & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & \left(\frac{R_s}{X_r X_s - X_m^2}\right) X_r & 0 & -\left(\frac{R_s}{X_r X_s - X_m^2}\right) X_m & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \left(\frac{R_r}{X_m^2 - X_r X_s}\right) X_m & 0 & -\left(\frac{R_r}{X_m^2 - X_r X_s}\right) X_s & S & -\psi_{rq} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \left(\frac{R_r}{X_m^2 - X_r X_s}\right) X_m & -S & -\left(\frac{R_r}{X_m^2 - X_r X_s}\right) X_s & \psi_{rd} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\left(\frac{X_m}{X_r X_s - X_m^2}\right) \psi_{rq} & \left(\frac{X_m}{X_r X_s - X_m^2}\right) \psi_{rd} & \left(\frac{X_m}{X_r X_s - X_m^2}\right) \psi_q & -\left(\frac{X_m}{X_r X_s - X_m^2}\right) \psi_d & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & R_s + R_{\text{red}} & X_{\text{red}} & 0 & \frac{R_s}{X_C} \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_{\text{red}} & R_s + R_{\text{red}} & -\frac{R_s}{X_C} & 0 \\ \frac{X_C X_r}{X_r X_s - X_m^2} - 1 & \frac{R_s X_r}{X_r X_s - X_m^2} & -\frac{X_C X_m}{X_r X_s - X_m^2} & -\frac{R_s X_m}{X_r X_s - X_m^2} & 0 & -X_C & 0 & 0 & 0 \\ \frac{R_s X_r}{X_r X_s - X_m^2} & 1 - \frac{X_C X_r}{X_r X_s - X_m^2} & -\frac{R_s X_m}{X_r X_s - X_m^2} & \frac{X_C X_m}{X_r X_s - X_m^2} & 0 & 0 & X_C & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\psi_d \\ \Delta\psi_q \\ \Delta\psi_{rd} \\ \Delta\psi_{rq} \\ \Delta\eta_r \\ \Delta i_{dl} \\ \Delta i_{ql} \\ \Delta V_{dc} \\ \Delta V_{qc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \Delta T_m \\ -\Delta V_{Bd} \\ -\Delta V_{Bq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.89)
\end{aligned}$$

$$\begin{array}{c} p \\ \omega_0 \end{array} \begin{array}{|c|} \hline \\ \hline \\ \hline \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline -X_{\text{mot}}^{-1} R_{\text{mot}} & -X_{\text{mot}}^{-1} \psi_{\text{mot}} & & \\ \hline -X_{\text{mot}}^{-1} \psi_{\text{mot}} & & & \\ \hline -X_{\text{mot}}^{-1} R_{\text{mot}} & & -X_{\text{mot}}^{-1} Z_{\text{red}} & \\ \hline & & & -X_{\text{mot}}^{-1} \frac{1}{X_C} \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline X_{\text{mot}}^{-1} & & & \\ \hline & \frac{1}{2H\omega_0} & & \\ \hline & & X_{\text{red}}^{-1} & \\ \hline & & & \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline \\ \hline \\ \hline \\ \hline \end{array} \quad (3.90)$$

3.6.1.2 Modelo del Compensador Estático de VARs (CEV).

En caso de que para su compensación para un sistema máquina bus infinito se emplee un arreglo como el de la referencia [71], es necesario conocer que tipos compensadores estáticos de VAR's existen, así como el modelo matemático que se emplea para un sistema de potencia dado. El compensador estático de VARs (SVCs) que se emplea para el arreglo de [71], es la combinación de un reactor controlado por tiristores (TCR), accionado por un capacitor fijo (FC), donde se puede modelar en función de su representación física como un capacitor de valor fijo en paralelo con un reactor inductivo variable como se muestra en la figura 3.6. Este dispositivo sirve para compensar el valor de voltaje que una línea de transmisión esta demandando de acuerdo a la carga, en este caso este dispositivo es conectado en las terminales del generador para compensar el valor de voltaje que la máquina este entregando a la línea de transmisión, en función del valor de su potencia reactiva [3,71,80].

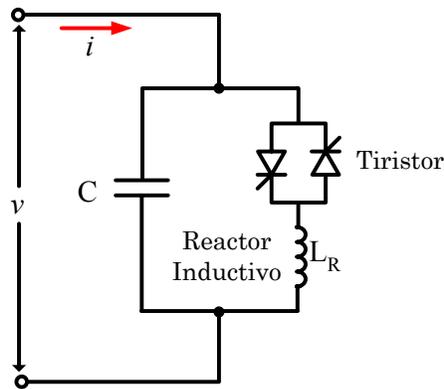


Figura No.3.6. Configuración básica de un FC-TCR [3].

Las ecuaciones del capacitor son las empleadas en el modelo de 9º orden, ecuaciones (3.81) a la (3.84), en función de corrientes de compensación reactiva; donde varia continuamente sin pasos entre un valor cero y un valor máximo correspondiente a la conducción completa. La corriente reactiva siempre está atrasada, por lo que la potencia reactiva solamente puede ser absorbida.

$$V_{dL} = \frac{P}{\omega_0} X_L i_{dL} + X_L i_{qL} \quad (3.91)$$

$$V_{qL} = \frac{P}{\omega_0} X_L i_{qL} - X_L i_{dL} \quad (3.92)$$

Conociendo que la corriente en el reactor inductivo (i_R) es controlada por el ángulo β de ignición del tiristor, representada por:

$$i_R = \frac{V_g}{\omega_R L_R} \left(\frac{2\beta - \text{sen}(2\beta)}{\pi} \right) \quad (3.93)$$

donde:

V_g = Voltaje en las terminales del generador.

L_R = Reactor Inductivo.

ω_R = Frecuencia angular.

Como se puede observar en la ecuación (3.93), el reactor inductivo es controlado por un tiristor, el cual se representa por una inductancia ajustable L_{TCR} controlado por el ángulo de ignición β , de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$L_{TCR} = \frac{\pi L_R}{2\beta \cdot \text{sen}(2\beta)} \quad (3.94)$$

En la figura 3.6, se observa que la Z_L , es la impedancia de la red de transmisión, por lo tanto $Z_L = Z_{red}$. Además, en un sistema en p.u. $X_L = \omega_0 L_R$, por lo tanto se tiene:

$$i_{qL_R} = \frac{V_{dL_{TCR}}}{X_{TCR}} - \frac{p}{\omega_0} i_{dL_R} \quad (3.95)$$

$$i_{dL_R} = -\frac{V_{qL_{TCR}}}{X_{TCR}} + \frac{p}{\omega_0} i_{qL_R} \quad (3.96)$$

Como se requiere el control del voltaje en las terminales del generador, se le agrega un FC-TCR y en la figura 3.7, se muestran los comportamientos de las corrientes:

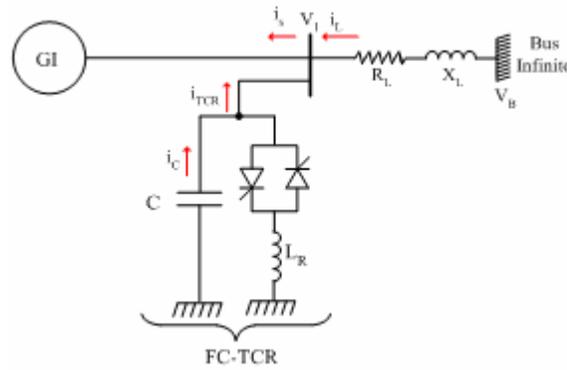


Figura No.3.7. Comportamiento del voltaje y corriente en un circuito máquina bus infinito con el control de voltaje de un FC-TCR en paralelo.

$$V_1 = V_{dg,qg} = V_{dl,ql} = V_{TCR} = V_{dc,qc} = V_{L_R} \quad (3.97)$$

$$i_{dg,qg} = i_{dl,ql} + i_{dTCR,qTCR} \quad (3.98)$$

$$i_{dl,ql} = i_{dg,qg} - i_{dTCR,qTCR} \quad (3.99)$$

$$i_{dTCR,qTCR} = i_{dg,qg} - i_{dl,ql} \quad (3.100)$$

Corriente en el FC-TCR:

$$i_{dTCR,qTCR} = i_{dc,qc} - i_{dL,qL} \quad (3.101)$$

$$i_{dc,qc} = i_{dTCR,qTCR} + i_{dL,qL} \quad (3.102)$$

$$i_{dL,qL} = i_{dc,qc} - i_{dTCR,qTCR} \quad (3.103)$$

De manera que al desarrollar el modelo de 11° orden, la integración de las ecuaciones de las corrientes en la máquina no se afectan, solamente hay que considerar que el valor del voltaje en el nodo es el mismo como se muestra en la ecuación (3.97), pero en las ecuaciones de la red de transmisión y en los componentes del FC-TCR, estos interactúan de manera que la representación matricial se muestra en la ecuación (3.104) y su representación a bloques es parecida a la ecuación (3.7).

$$\frac{p}{\omega_0} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2H_m \omega_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & X_{\text{red}} & 0 & \frac{R_s}{X_c} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & X_{\text{red}} & 0 & \frac{R_s}{X_c} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & \frac{R_s}{X_c} & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{R_s}{X_c} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{R_s}{X_c} & 0 & X_L & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{R_s}{X_c} & 0 & X_L & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\psi_{\text{ds}} \\ \Delta\psi_{\text{qs}} \\ \Delta\psi_{\text{dr}} \\ \Delta\psi_{\text{qr}} \\ \Delta\eta_{\text{r}} \\ \Delta i_{\text{di}} \\ \Delta i_{\text{qi}} \\ \Delta V_{\text{dc}} \\ \Delta V_{\text{qc}} \\ \Delta i_{\text{di}} \\ \Delta i_{\text{qi}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \left(\frac{R_s}{X_r X_s - X_m^2}\right) X_r & 1 & -\left(\frac{R_s}{X_r X_s - X_m^2}\right) X_m & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & \left(\frac{R_s}{X_r X_s - X_m^2}\right) X_r & 0 & -\left(\frac{R_s}{X_r X_s - X_m^2}\right) X_m & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \left(\frac{R_r}{X_m^2 - X_r X_s}\right) X_m & 0 & -\left(\frac{R_r}{X_m^2 - X_r X_s}\right) X_s & S & -\psi_{\text{qr}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \left(\frac{R_r}{X_m^2 - X_r X_s}\right) X_m & -S & -\left(\frac{R_r}{X_m^2 - X_r X_s}\right) X_s & \psi_{\text{dr}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\left(\frac{X_m}{X_r X_s - X_m^2}\right) \psi_{\text{qr}} & \left(\frac{X_m}{X_r X_s - X_m^2}\right) \psi_{\text{dr}} & \left(\frac{X_m}{X_r X_s - X_m^2}\right) \psi_{\text{qr}} & -\left(\frac{X_m}{X_r X_s - X_m^2}\right) \psi_{\text{dr}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & R_s + R_{\text{red}} & X_{\text{red}} & 0 & \frac{R_s}{X_c} & -R_s & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_{\text{red}} & R_s + R_{\text{red}} & -\frac{R_s}{X_c} & 0 & 0 & -R_s \\ \frac{X_c X_r}{X_r X_s - X_m^2} - 1 & 0 & -\frac{X_c X_m}{X_r X_s - X_m^2} & 0 & 0 & 0 & -X_c & R_s & -\frac{R_s}{X_c} & 0 & X_c & -R_s \\ 0 & 1 - \frac{X_c X_r}{X_r X_s - X_m^2} & 0 & \frac{X_c X_m}{X_r X_s - X_m^2} & 0 & R_s & X_c & 0 & \frac{R_s}{X_c} & -R_s & -X_c \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & \frac{R_s}{X_c} & -R_s & X_L \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_s & -\frac{R_s}{X_c} & 0 & -X_L & -R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\psi_{\text{ds}} \\ \Delta\psi_{\text{qs}} \\ \Delta\psi_{\text{dr}} \\ \Delta\psi_{\text{qr}} \\ \Delta\eta_{\text{r}} \\ \Delta i_{\text{di}} \\ \Delta i_{\text{qi}} \\ \Delta V_{\text{dc}} \\ \Delta V_{\text{qc}} \\ \Delta i_{\text{di}} \\ \Delta i_{\text{qi}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \Delta T_m \\ -\Delta V_{\text{bd}} \\ -\Delta V_{\text{Bq}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.104)$$

3.7 SIMULADOR DIGITAL.

En esta sección de este capítulo se describen las características de los simuladores digitales, que se utilizaron para el desarrollo de este trabajo: *frecuencia.for* y *tiempo.for*, el primero es un programa de computadora digital que se fue desarrollando con cada uno de los modelos de la máquina de inducción en un sistema máquina bus infinito con sus diferentes configuraciones, esto es empleando los modelos desde 5° hasta 11° orden sin control en lazo abierto, sin embargo se anexan 12° y 13° orden en función de los controles; donde su finalidad es el de realizar un análisis de estabilidad ante pequeños disturbios, así como aplicar el método de sensibilidad de eigenvalores de primer orden, en función del comportamiento de la variación de los parámetros de la máquina de inducción para un modelo de 5° orden. El segundo programa, tiene como finalidad el de realizar un análisis en el tiempo con la aplicación de un pequeño disturbio para observar el comportamiento tanto de sus variables de salida como las variables de entrada del sistema, igualmente para cada configuración del sistema, además en el apéndice C, se muestran los diagramas de flujo de las subrutinas empleadas para cada programa; con sus respectivos archivos de entrada y salida para cada programa sin olvidar el archivo fuente de cada programa.

3.7.1 Características del Simulador Digital *frecuencia.for*.

El programa de este simulador digital nos sirve para realizar análisis de estabilidad ante pequeños disturbios de un sistema máquina bus infinito, ya sea de 5° o bien de 11° orden, además de realizar un estudio de sensibilidad de eigenvalores en función del comportamiento de la variación de los parámetros del sistema, el diagrama de flujo es mostrado en la figura 3.8 y los diagramas para cada subrutina son mostrados en el Apéndice C.

3.7.2 Características del Simulador Digital *tiempo.for*.

El programa de *tiempo.for*, se desarrollo tomando como base los programas de las referencias [7,38], haciendo las modificaciones adecuadas para que la máquina de inducción opere como generador en sus diferentes configuraciones del SEP. Esto con el fin de utilizar este programa para realizar un análisis de estabilidad ante pequeños disturbios, observando el comportamiento de sus variables de estado para una condición de operación dada, aplicando un pequeño disturbio en las variables de entrada, utilizando las gráficas del comportamiento de las variables de entradas en la matriz de estados $[A]$, para obtener información de fase y amortiguamiento aplicando una técnica de una técnica de identificación modal como es el caso del análisis de Prony. Este programa emplea subrutinas conocidas para integración de ecuaciones como en [38], llamada RUNKUT. El diagrama de flujo es mostrado en la figura 3.9. y el programa fuente con sus archivos de entrada y salida se muestran en el Apéndice D.

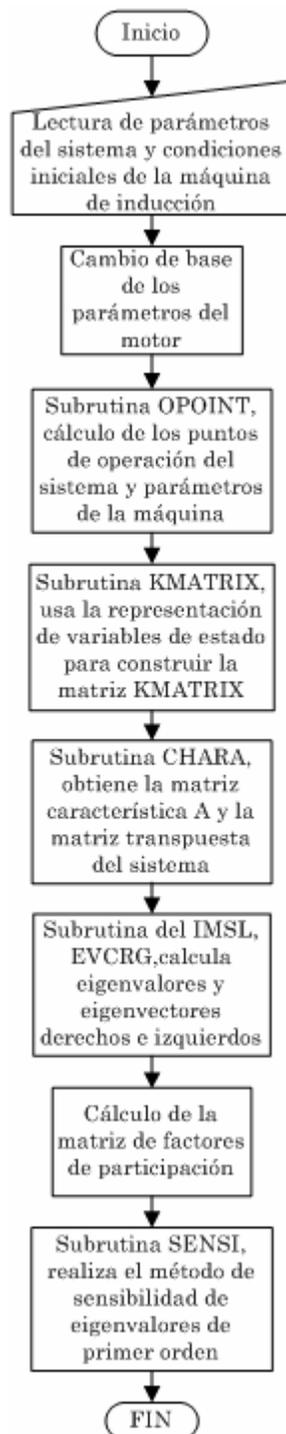


Figura No.3.8. Diagrama de Flujo del simulador digital *frecuencia.for*.

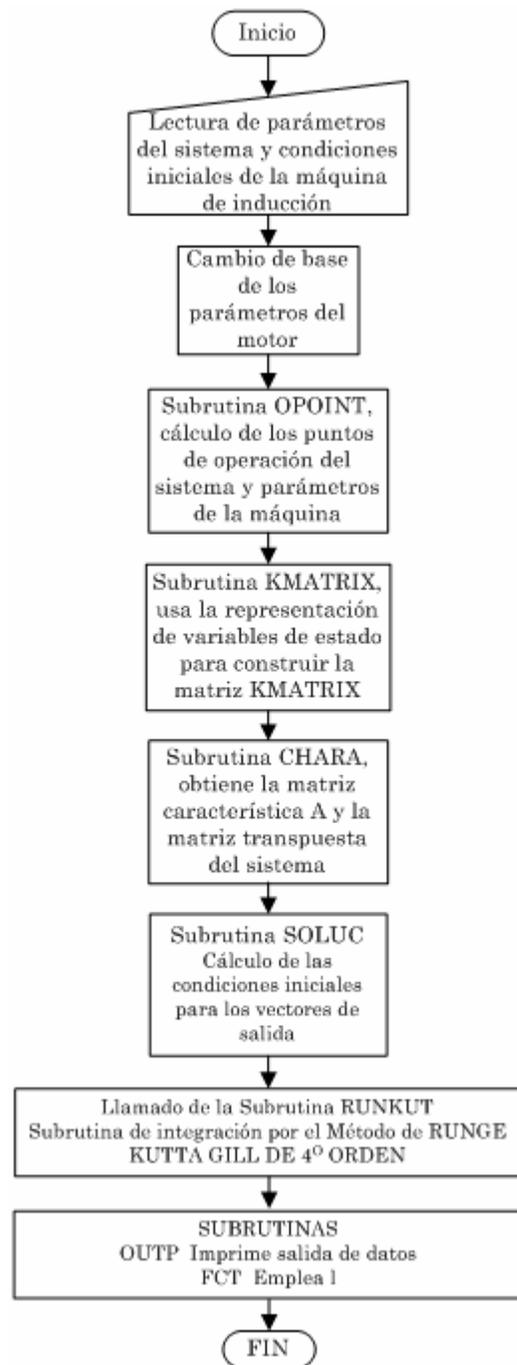


Figura No.3.9. Diagrama de Flujo del simulador digital *tiempo.for*.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL SEP DE LABORATORIO CON GENERADORES DE INDUCCIÓN.

4.1 INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se muestran las simulaciones digitales y experimentales del comportamiento dinámico de un sistema máquina bus infinito con generadores de inducción para los modelos explicados en el Capítulo 3, mediante el uso de un programa digital llamado *frecuencia.for*, donde se validan los resultados obtenidos con la referencia [71], además se realiza un análisis de estabilidad ante pequeños disturbios para los sistemas de prueba de laboratorio, cuyos resultados son verificados con simulaciones realizadas con un programa en el tiempo, validándolo con los resultados obtenidos con los programas de [7,38], por último se realiza un análisis de Prony, donde se hace la comparación de los resultados obtenidos con los modelos lineal y no lineal del modelo de 5° orden y un análisis de sensibilidad paramétrica.

4.2 DESCRIPCIÓN DEL PRIMER SISTEMA DE PRUEBA.

El sistema de prueba utilizado, es un sistema máquina bus infinito con un CEV acoplado en las terminales del generador [71], mostrado en la figura 4.1; donde sus parámetros se expresados en la tabla 4.1.

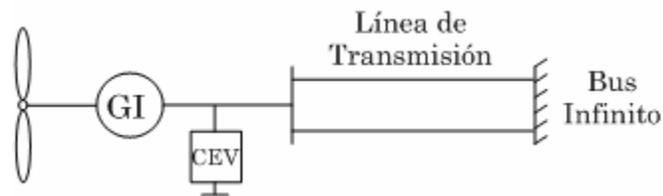


Figura 4.1. Primer Sistema de prueba [71].

Tabla 4.1. Parámetros del SEP del aerogenerador en pu [71].

Generador de Inducción 4 polos, 6.6 kV, 60 Hz	Compensador Estático de VARs	Línea de Transmisión	Turbina Eólica
$R_s=0.0059$ $R_r=0.0339$ $X_s=0.135$ $X_r=0.075$ $X_m=4.161$ $H=1.975$ s	$X_L = 4.0$ $X_C = 3.8$	$X_{TL} = 0.15$ $R_{TL} = 0.015$ Bus Infinito $V_B = 1.04$	Turbina de eje horizontal (6MW) $H_T = 16.72$ s $R = 200$ ft $GR = 103.6$ V_w (nominal)= 240.0 millas/h V_w (inicio)= 120.0 millas/h V_w (salida)= 45.0 millas/h

4.2.1 Comportamiento del Primer Sistema de Prueba.

Como el estudio que se realiza en esta tesis, es un análisis de estabilidad ante pequeños disturbios en los generadores de inducción, es necesario representar al sistema en función de variables de estados de manera lineal, como se vio en el Capítulo 3; que muestren el comportamiento de las variables involucradas en un sistema.

Para llevar a cabo este análisis, fue necesario desarrollar un programa en el dominio de la frecuencia que calculara a partir de condiciones de operación dadas, el comportamiento de los eigenvalores del sistema a analizar, y en función de estos resultados, obtener el comportamiento de los eigenvectores derechos e izquierdos para conocer la participación de las variables de estado en cada forma modal; por esta razón, se hace el desarrollo en variables de estado hasta llegar a la representación del sistema a un sistema de 11° y 13° orden, basados en la referencia [71], y mostrando solamente a los eigenvalores en cada orden de modelo, en la tabla 4.2.

El modelo de 13° orden se realiza tomando en cuenta las características de operación de los sistemas eólicos, esto es, conociendo el comportamiento de la potencia eléctrica y el voltaje en las terminales de la máquina, mostradas en la ecuación (4.1), que son representadas en función de las variables de estado del sistema lineal de 11° orden, obteniendo un modelo de 13° orden, donde se aplica un lazo de control proporcional integral (PI) [71], como se muestra a continuación:

$$u1 = \left[\int (\Delta P_{ref} - \Delta P_g) dt, \int (\Delta V_{ref} - \Delta V_g) dt \right]^t \quad (4.1)$$

Tabla 4.2. Comparación de los resultados del programa de *frecuencia.for* con los resultados de la referencia [71].

Eigenvalores utilizando el programa <i>frecuencia.for</i> .					
Modelo 5° orden*	Modelo 7° orden	Modelo 9° orden	Modelo 11° orden	Modelo 13° orden	Variables
				0.0**	V _{TCR}
				0.0**	T _m
			-0.10003+376.9751i	-0.10003+376.9751i	I _{dL} , I _{qL}
		-23.8828+2864.45i	-26.0831+2759.479i	-26.0831+2759.479i	V _{dc} , V _{gc}
	-52.5275+376.991i	-27.8362+2110.45i	-30.5612+1998.938i	-30.5612+1998.938i	I _{dI} , I _{qI}
-10.4475+375.390i	-10.4461+375.390i	-21.8923+375.034i	-22.2335+374.6334i	-22.2335+374.6334i	Ψ _{ds} , Ψ _{qs}
-61.8903+9.86223i	-61.9124+9.85491i	-36.4331+9.70357i	-34.1994+9.370599i	-34.1994+9.370599i	Ψ _{dr} , Ψ _{qr}
-0.866881	-0.8227358	-0.85091	-0.4301999	-0.4301999	η _r
Eigenvalores Originales de la referencia [71]					
			Modelo 11° orden	Modelo 13° orden	Variables
				0.0	V _{TCR}
				0.0	T _m
			-0.10 + 377.00i	-0.10 + 377.00i	I _{dL} , I _{qL}
			-24.40 + 2685.20i	-24.40 + 2685.20i	V _{dc} , V _{gc}
			-29.40 + 1931.10i	-29.40 + 1931.10i	I _{dI} , I _{qI}
			-23.90 + 375.10i	-23.90 + 375.10i	Ψ _{ds} , Ψ _{qs}
			-32.30 + 9.80i0.0	-32.30 + 9.80i0.0	Ψ _{dr} , Ψ _{qr}
			-0.600.0	-0.600.0	η _r

*Los modelos de 5° orden están en función de flujos electromagnéticos.

**Eigenvalores con lazo de control abierto.

En los resultados obtenidos de la tabla 4.2, se observa que los eigenvalores de los modelos de 11° y 13° orden, comparados con los resultados de la referencia [71], son muy similares y que solamente se observa una pequeña variación en el eigenvalor de la velocidad tanto para el modelo de 11° y 13° orden, de los resultados obtenidos en el programa *frecuencia.for* y en los modelos de la referencia [71]; es por ello, que los resultados del programa se consideran como aceptables debido a que no hay gran variación en los eigenvalores del programa; además de los eigenvalores de estos modelos, se muestran los eigenvalores de los modelos de 5°, 7° y 9° orden, donde se observa que los eigenvalores obtenidos no son muy parecidos con los resultados de la referencia [71], pero se da un comportamiento evolutivo en cuanto al número de elementos que forman al sistema de estados, mostrado en la tabla 4.2.

4.3 DESCRIPCIÓN DEL SEGUNDO SISTEMA DE PRUEBA.

El segundo sistema de prueba que se utiliza para el análisis de estabilidad ante pequeños disturbios, es un sistema máquina bus infinito que emplea los valores de un simulador experimental de un SEP de laboratorio, el cual se encuentra en las instalaciones de los Laboratorios de Pesados II de Ingeniería Eléctrica, ESIME-ZACATENCO, y que a continuación se muestra como diagrama unifilar en la figura 4.2. Este simulador tiene la capacidad de poder implementar sistemas tipo máquina bus infinito (como motor o generador), multimáquinas o bien ambos que sean aislados [7,8,9,10,23,24].

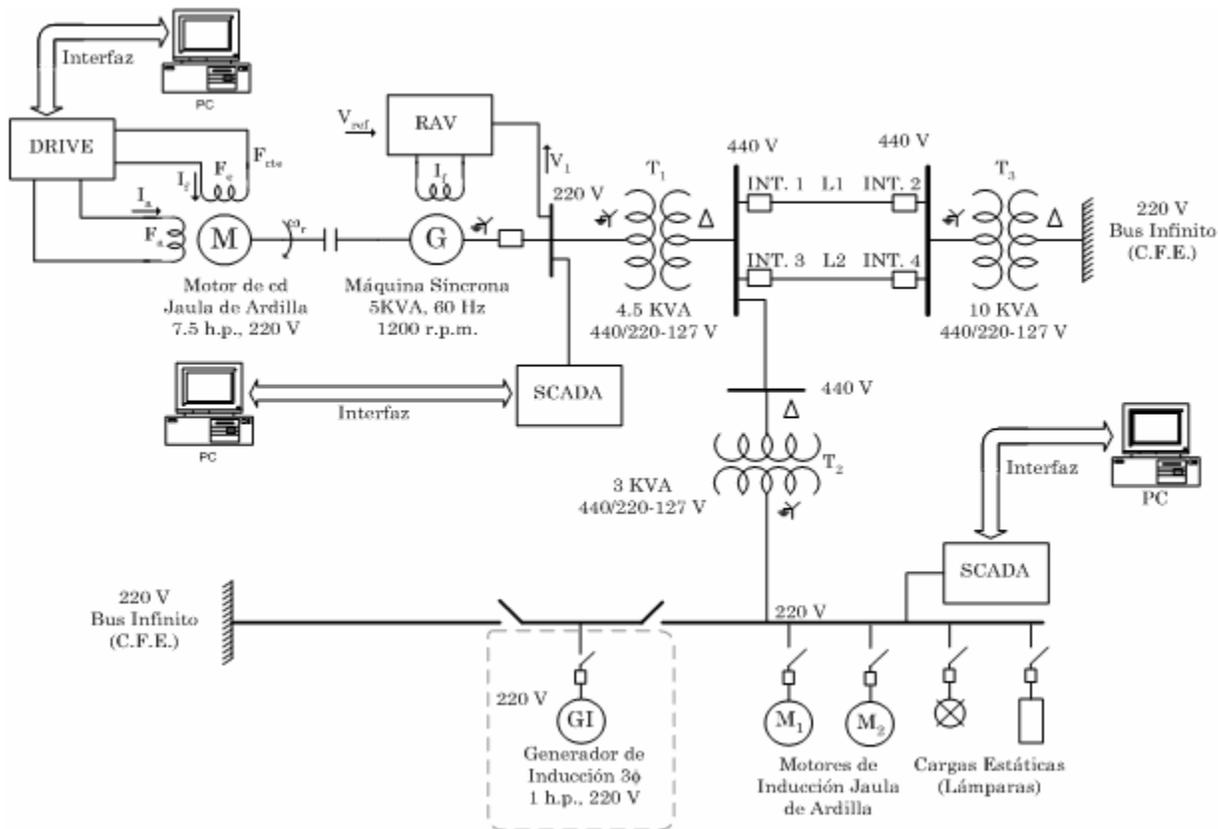


Figura 4.2. Diagrama unifilar del simulador experimental de la ESIME ZACATENCO.

Este simulador [7,8,10,23,24,90], está compuesto por un motor de cd que simula a una turbina eólica, el cual mediante un controlador de velocidad de su nombre usual en inglés DRIVE, marca Reliance Electric, modelo FlexPak 3000, y mediante una interfaz PC-usuario, o bien controlándolo directamente del DRIVE, por medio del control de un motor de cd, tiene la función de mover al generador síncrono de 5kVA, a través de un acoplamiento, por medio de un regulador automático de voltaje (RAV), marca Basler Electric, modelo DECS 63-15, el cual controla el voltaje del campo del generador; estos dispositivos se encuentran conectados como un sistema máquina bus infinito mediante un sistema de transmisión (formado por transformadores y líneas de transmisión), conectando del lado de la carga a un generador de inducción de 1 hp y además de uno o dos motores de inducción más, así como cargas estáticas compuestas por lámparas incandescentes y fluorescentes.

Para el monitoreo de los valores de voltajes, corrientes, potencias, frecuencia y F.P., se emplea un sistema de control y adquisición de datos por medio de software (SCADA), el cual cuenta con la opción de PC-usuario. En la tabla 4.3, se muestran los parámetros del SEP de pruebas en unidades reales.

Tabla 4.3. Parámetros del SEP de prueba en unidades reales de la figura 4.2. [7,8,9].

Generador Síncrono de 5kVA	Transformadores	Líneas de Transmisión	Máquinas Generadoras
$H = 0.658 \text{ s}$ $R_s = 0.38 \Omega$ Eje directo $X_d = 8.75 \Omega$ $X'_d = 1.41 \Omega$ $X''_d = 1.27 \Omega$ $T'_{d0} = 67.01 \text{ ms}$ $T''_{d0} = 0.11 \text{ ms}$ Eje cuadratura $X_q = 5.5 \Omega$ $X'_q = 1.34 \Omega$ $T''_{q0} = 0.41 \text{ ms}$	4.5 kVA $R_{cc} = 0.40 \Omega$ $X_{cc} = 0.52 \Omega$ 10 kVA $R_{cc} = 0.13 \Omega$ $X_{cc} = 0.26 \Omega$ 3kVA $R_{cc} = 0.320 \Omega$ $X_{cc} = 0.598 \Omega$	Corta $X_L = 7.33 \Omega$ Larga $X_L = 29 \Omega$	Generador de Inducción de 1 hp $R_s = 5.78 \Omega$ $R_r = 1.763 \Omega$ $X_s = 3.179 \Omega$ $X_r = 4.770 \Omega$ $X_m = 59.839 \Omega$ $H_m = 0.0564 \text{ s}$ Generador Síncrono de 5 kVA $R_s = 0.823 \Omega$ $R_r = 0.476 \Omega$ $X_s = 0.594 \Omega$ $X_r = 0.890 \Omega$ $X_m = 20.661 \Omega$ $H_m = 0.0586 \text{ s}$

En la figura 4.2, se muestra un diagrama de la representación del generador de inducción, aunque en la figura 4.3, se ve con más detalle el arreglo de motor-generador, por medio de un acoplamiento mecánico, donde el control de la velocidad del motor se realiza mediante una unidad DRIVE analógica, marca BALDOR, Motors and Drives.

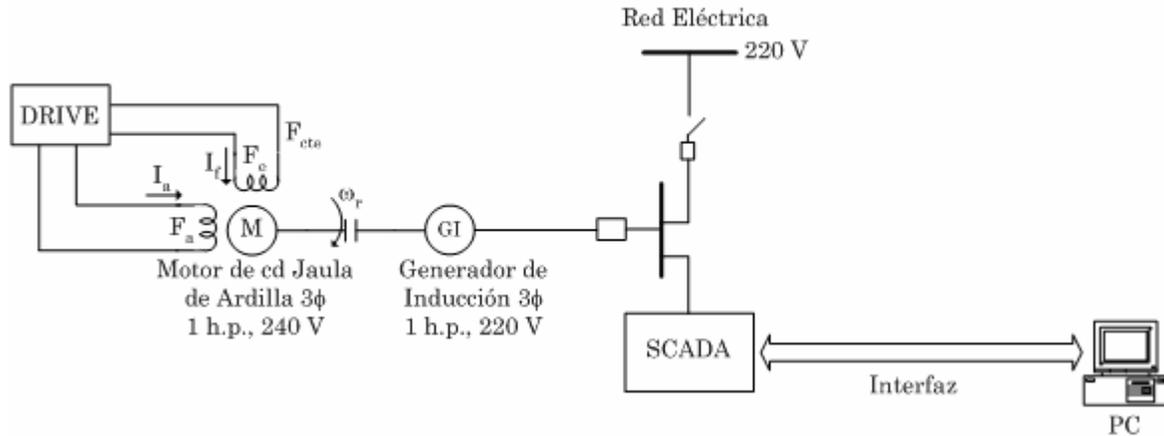


Figura 4.3. Diagrama unifilar del generador de inducción de 1 hp.

4.3.1 Sistema de Prueba Máquina Bus Infinito.

En la implementación del sistema máquina bus infinito de laboratorio, el generador de inducción se conecta directamente al bus infinito o C.F.E., empleando una impedancia que se conecta directamente al generador de inducción, mostrado en la figura 4.4. El sistema de la figura 4.4, es un sistema máquina bus infinito convencional, en donde se toma como base para agregar con más dispositivos que fueron explicados en el Capítulo 3.

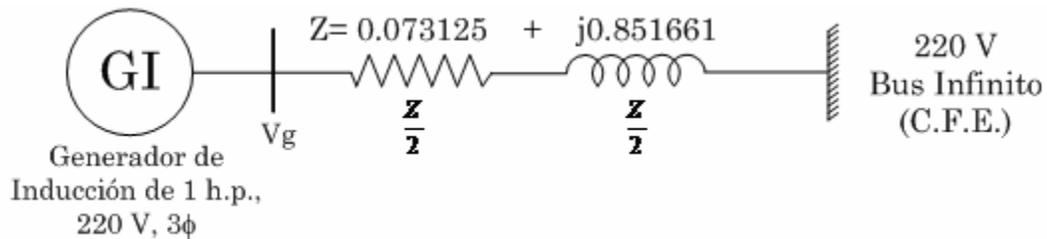


Figura 4.4. Sistema de prueba máquina bus infinito convencional [7,8,9,10,23,24].

4.4 SIMULACIÓN EXPERIMENTAL.

En el registro de la potencia activa del arreglo de prueba del sistema máquina bus infinito se utilizó un transductor que mide la potencia trifásica y salida de voltaje en corriente directa con relación ± 10 VCD a 2500 W, la conexión del transductor y el empleo del un osciloscopio se muestran en la figura 4.5.

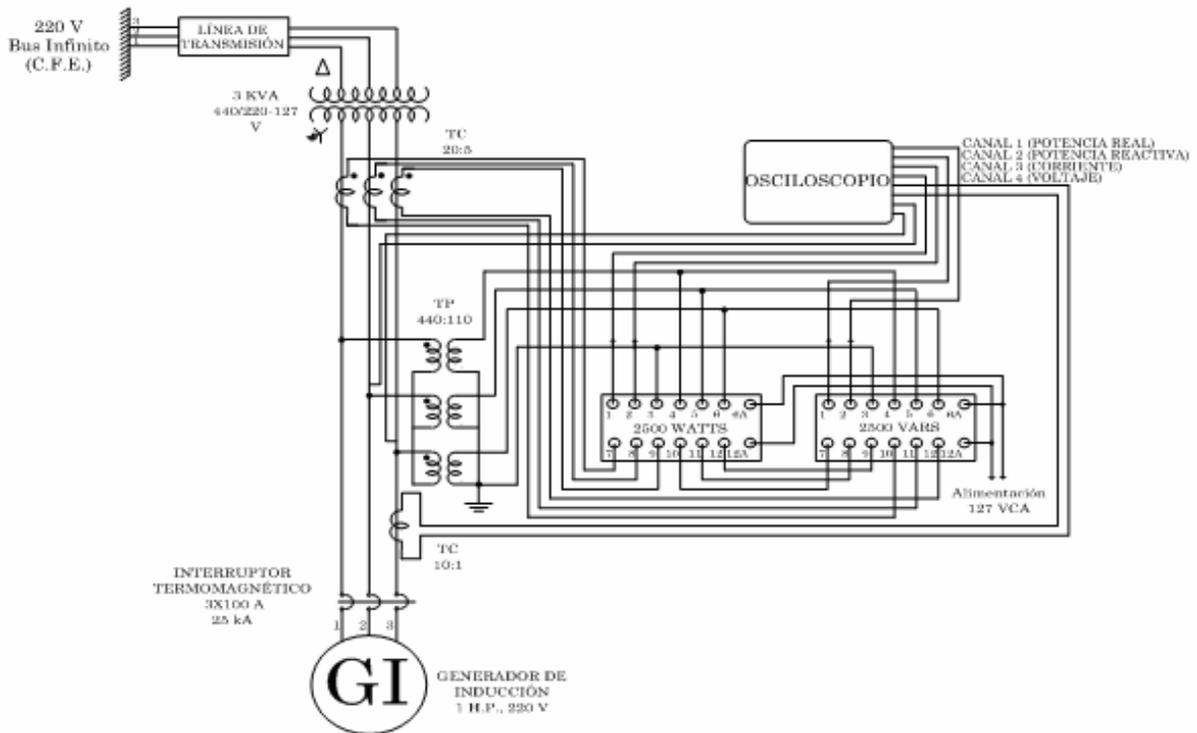


Figura 4.5. Diagrama unifilar de la conexión de los transductores de potencia activa y reactiva del arreglo.

4.4.1 Resultados del Sistema Máquina Bus Infinito de Laboratorio.

En las siguientes gráficas se muestra el comportamiento de la potencia activa del sistema máquina bus infinito de Laboratorio, obtenida de manera experimental mediante la aplicación de un disturbio en la potencia mecánica dentro de una condición normal de operación en la potencia eléctrica del generador de inducción conectado a un bus infinito; el valor de este disturbio es de $0.6171 \text{ pu} \approx 0.62 \text{ pu}$, en un tiempo de estudio de 2.93 segundos, como se observa en las figuras 4.6 y 4.7.

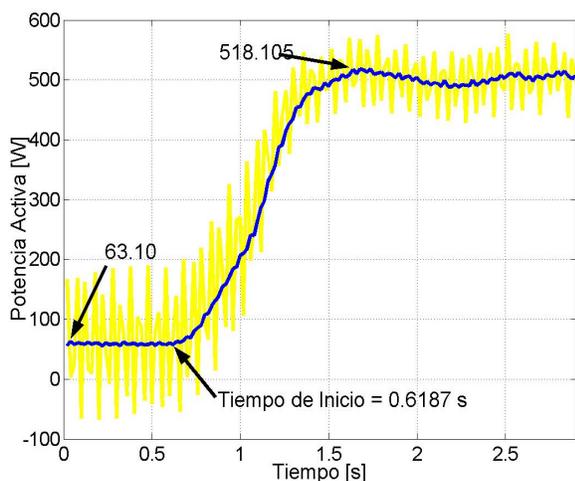


Figura 4.6. Potencia eléctrica en terminales del sistema máquina Bus infinito de laboratorio en unidades reales.

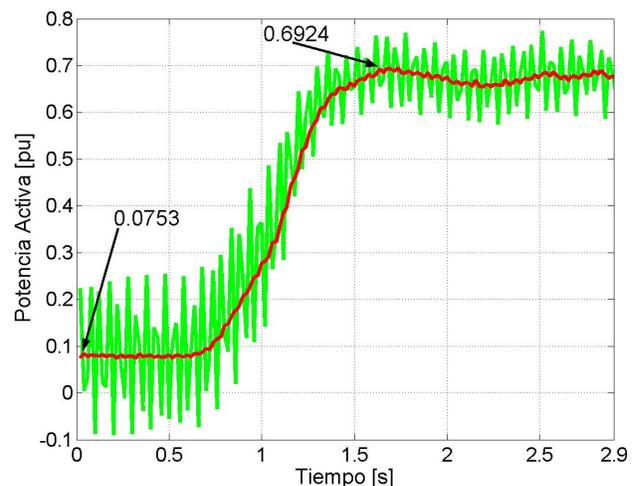


Figura 4.7. Potencia eléctrica en las terminales del sistema máquina Bus infinito de laboratorio en pu.

Para el arranque del generador de 1 hp, en este sistema se realiza mediante el empleo de un DRIVE, el cual no permite que el generador salga de control en cuanto a su velocidad de giro, es por ello que con las condiciones que nos proporciona el SEP, en las figuras 4.6 y 4.7, se observa una condición de potencia activa con la aplicación de un disturbio en la potencia mecánica y reflejado en la potencia eléctrica, tanto unidades reales como en pu.

En la figura 4.8, se muestra el comportamiento de la potencia eléctrica en función del tiempo para un modelo lineal, no lineal y del sistema de laboratorio, de un generador de inducción de 1 hp; observando que tanto para el modelo lineal y no lineal el comportamiento de la potencia eléctrica es muy oscilatoria y más en el modelo lineal pero debido a que en el SEP de Laboratorio, se encuentra la presencia del DRIVE su comportamiento no lo es; pero se observa que a pesar de esta diferencia, al aplicar las mismas condiciones de operación y valor del disturbio; las tres respuestas llegan a un punto de estabilidad muy cercano y similar; aunque la aplicación del disturbio en estas respuestas se comporten de manera diferente a pesar de que llegan a un punto de estabilidad muy cercano.

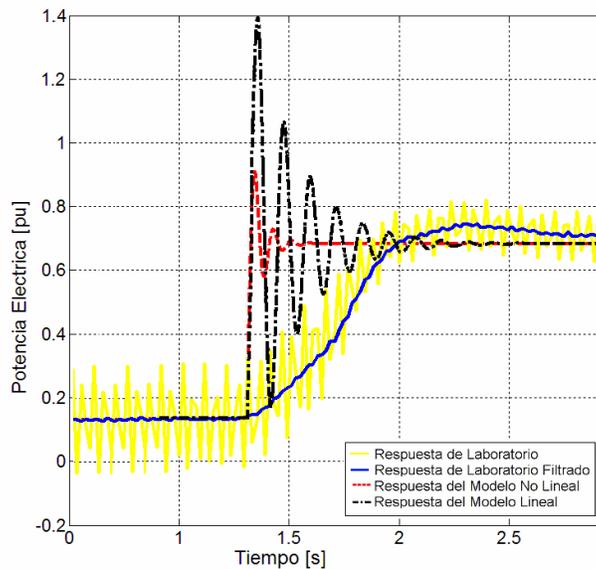


Figura 4.8. Comparación del comportamiento de la Potencia eléctrica en terminales del sistema máquina Bus infinito de laboratorio en pu.

El valor del deslizamiento para que una máquina de inducción trabaje como generador, tiene como condición el mantener el valor de su velocidad mecánica del rotor mayor al valor de su velocidad mecánica de sincronismo, donde se va a encontrar generando hasta que esta velocidad se encuentre a un valor aproximado al de su potencia nominal, por diseño. Sin embargo, cuando el generador se encuentra trabajando en un valor de potencia máxima y se le aplica un pequeño disturbio en la potencia mecánica esta afecta a su vez, al valor de su potencia eléctrica dejándolo fuera de sincronismo donde pierde estabilidad. Esta condición de operación se observa más adelante con el comportamiento de un modelo no lineal.

4.5 COMPORTAMIENTO DE LAS VARIABLES DEL GENERADOR DE INDUCCIÓN EN UN MODELO NO LINEAL.

En la figura 4.9, se observa, la curva par-velocidad para la máquina de inducción de 1 hp, en modo generador, mostrando tres condiciones de operación; las dos primeras son para una situación estable del sistema y para el tercer caso, es considerado inestable; uno de los casos estables pertenece a la condición que se llevo a cabo en el laboratorio (CL), la segunda condición estable es aplicando el concepto de *puntos de equilibrio* para estabilidad en un sistema [3,6], donde se muestra que para un punto de equilibrio estable (E) corresponde otro inestable (I), el valor de los puntos de operación se encuentran en función de la velocidad angular en el rotor, tomando en cuenta el comportamiento del deslizamiento y de la potencia eléctrica de la máquina de inducción de 1 hp; los valores correspondientes del deslizamiento para cada condición de operación son: para el caso CL, el deslizamiento es de -0.01278; para el caso E, el valor de deslizamiento de -0.0311 y para este mismo valor de deslizamiento del otro lado de la curva en el caso de operación inestable es de -1.1056.

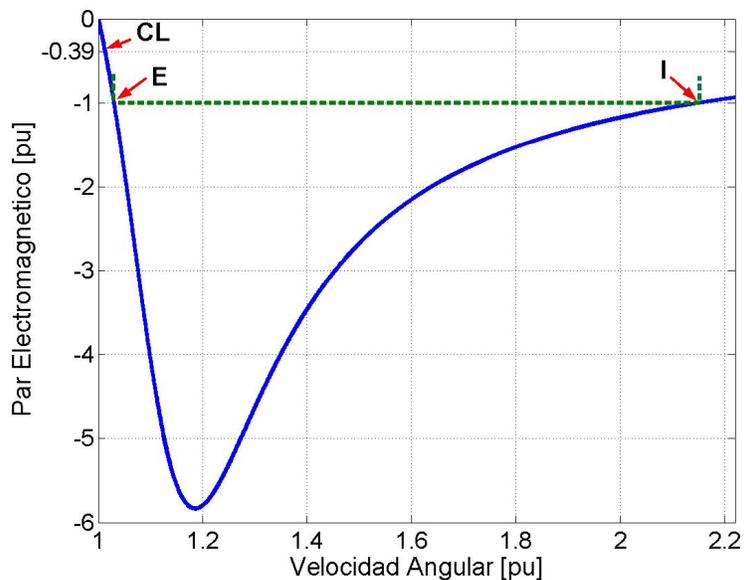


Figura 4.9. Puntos de operación para la condición de laboratorio CL y los puntos de equilibrio E e I, de un generador de inducción de 1 hp

Las condiciones de operación de la figura 4.9, se simulan en un programa de Fortran para un modelo no lineal de la maquina de inducción como generador [7,38], mostrando como resultados el comportamiento de manera gráfica de la corriente, voltaje, potencia eléctrica, deslizamiento y velocidad del generador de inducción de 1 hp, estos comportamientos se muestran al aplicar un disturbio en la potencia mecánica, observando el efecto que provoca el disturbio sobre las demás variables de sistema, para cada condición de la figura 4.9.

En las figuras 4.10a, 4.10b, 4.10c, 4.10d y 4.10e; se muestran las simulaciones para la condición CL, sin y con el efecto de un disturbio en el par mecánico de un 62% aproximadamente con un valor de deslizamiento de -0.01278 .

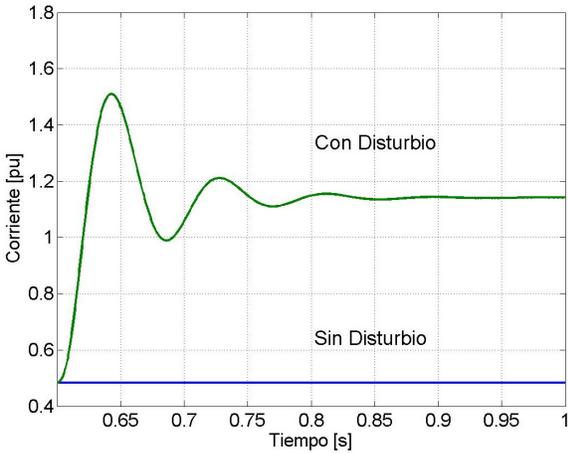


Figura 4.10a. Comportamiento de la Corriente para el caso de laboratorio CL.

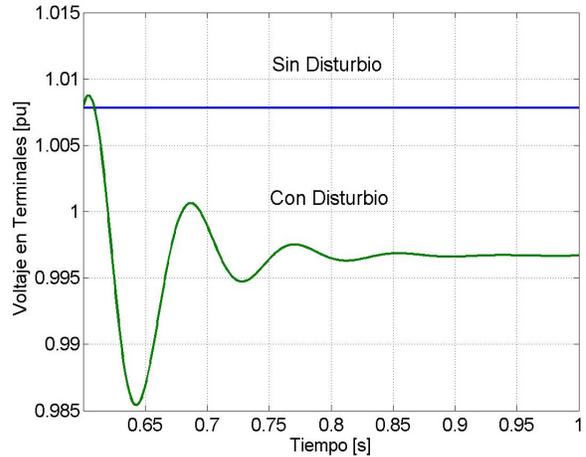


Figura 4.10b. Comportamiento del voltaje terminal para el caso de laboratorio CL.

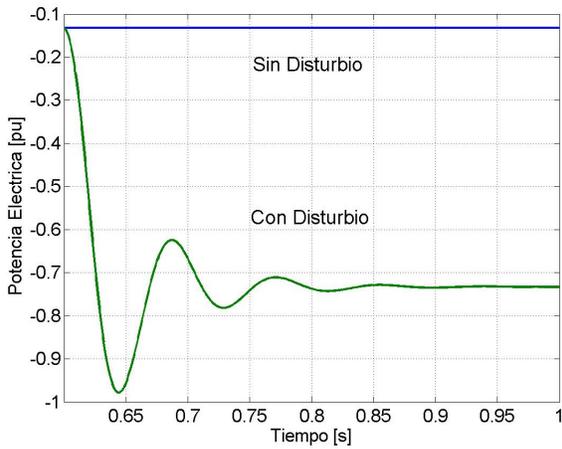


Figura 4.10c. Comportamiento de la Potencia Eléctrica para el caso de laboratorio CL.

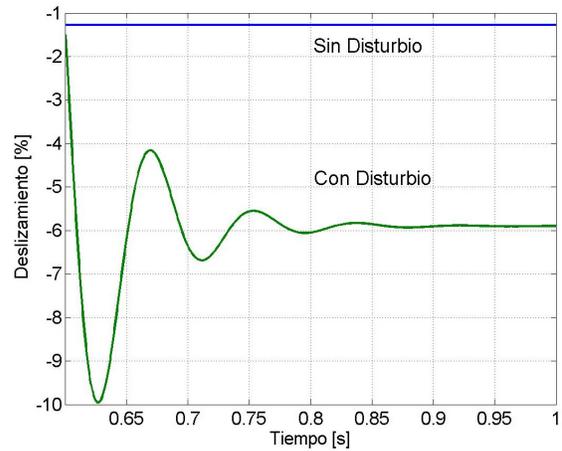


Figura 4.10d. Comportamiento del Deslizamiento para el caso de laboratorio CL.

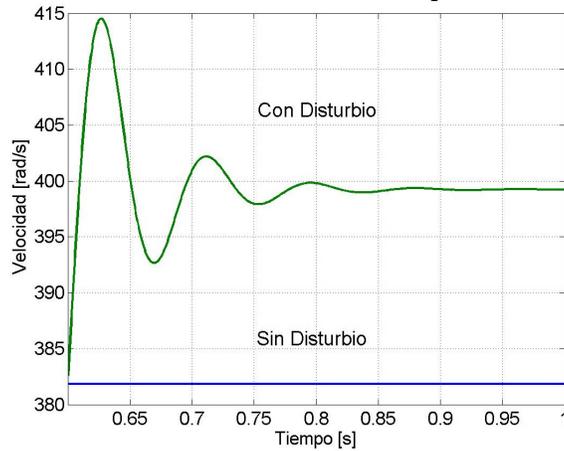


Figura 4.10e. Comportamiento de la velocidad para el caso de laboratorio CL.

En las gráficas de las figuras 4.10a, 4.10b, 4.10c, 4.10d y 4.10e, cuando se aplica el disturbio en el par mecánico del generador, este hace un ajuste en el valor del par eléctrico, reflejando este efecto en la magnitud de velocidad, deslizamiento y voltaje, pero sin que la máquina se inestabilice.

En la segunda condición para el caso de operación de un punto de equilibrio estable, cuando se le aplica un disturbio en el par mecánico del 10%, su comportamiento se muestra en las gráficas de las figuras 4.11a, 4.11b, 4.11c, 4.11d y 4.11e.

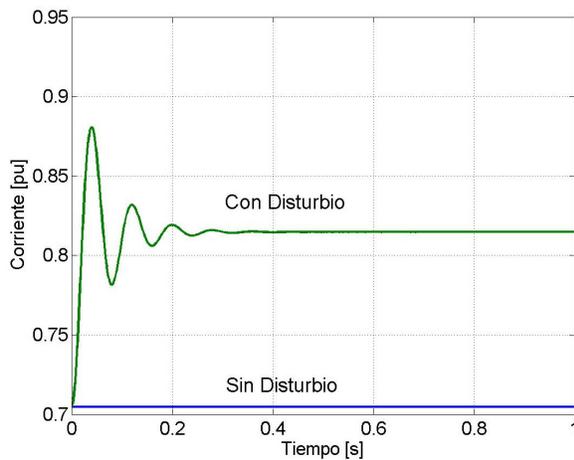


Figura 4.11a. Comportamiento de la Corriente para un punto de equilibrio estable E.

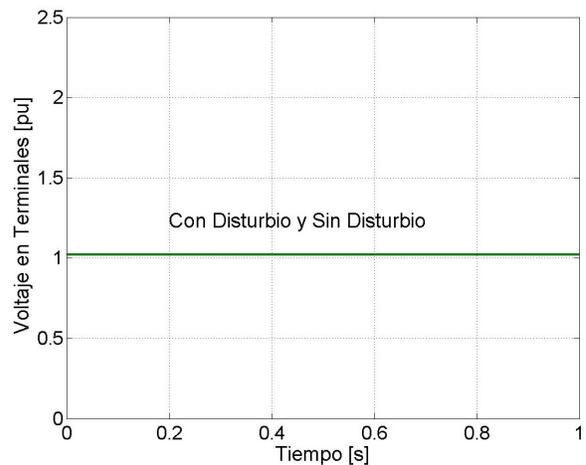


Figura 4.11b. Comportamiento del voltaje terminal para un punto de equilibrio estable E.

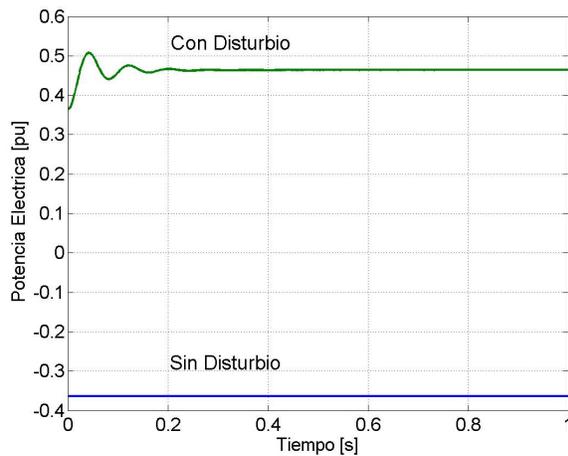


Figura 4.11c. Comportamiento de la Potencia Eléctrica para un punto de equilibrio estable E.

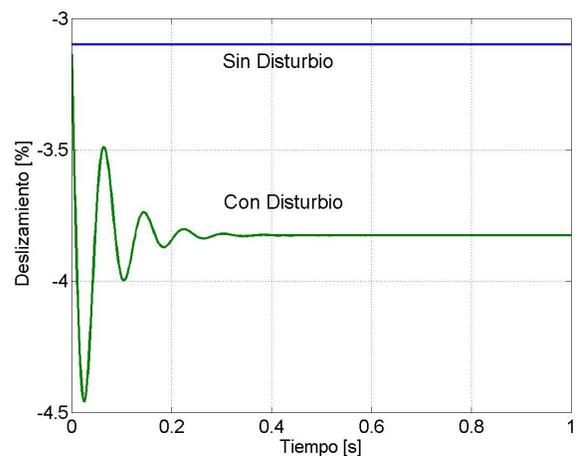


Figura 4.11d. Comportamiento del Deslizamiento para un punto de equilibrio estable E.

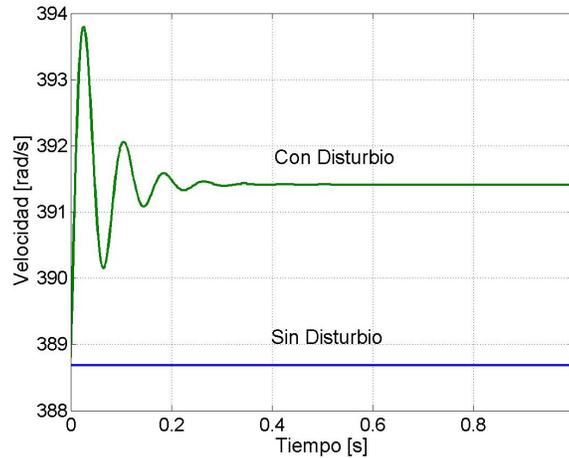


Figura 4.11e. Comportamiento de la velocidad para un punto de equilibrio estable E.

Para este caso, el comportamiento de las variables de velocidad, deslizamiento, potencia eléctrica y corriente eléctrica son mostradas en las figuras 4.11a, 4.11b, 4.11c, 4.11d y 4.11e, el comportamiento comparado con el caso anterior es similar debido a que la máquina se encuentra trabajando en una condición estable dentro de su rango de operación normal. Pero con respecto al valor de su voltaje, este no varía debido a que la máquina se encuentra conectada a un bus infinito, haciendo que el valor de voltaje y frecuencia se mantengan siempre en un valor estable, a diferencia de esta simulación en el primer caso, se nota que el valor del voltaje disminuye pero aun con esa disminución, la operación del sistema es estable.

En las gráficas de las figuras 4.12a, 4.12b, 4.12c, 4.12d y 4.12e, se aplica el mismo valor del disturbio en el par mecánico, pero ahora la condición del punto de equilibrio es inestable, observando que el comportamiento del generador de inducción es inestable; ya que en esta condición, este generador se acelera de manera extrema, hasta que ya no puede regresar a su condición de operación, teniendo como consecuencia el incremento de la velocidad mecánica del rotor, trayendo como consecuencia un decremento en el valor del deslizamiento perdiendo de esta manera su estabilidad.

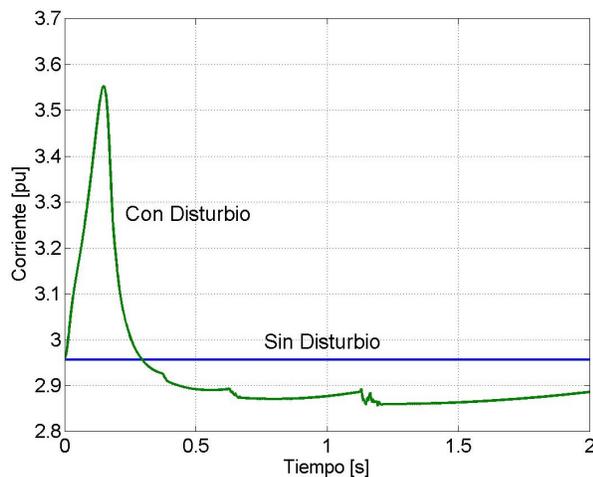


Figura 4.12a. Comportamiento de la Corriente para un punto de equilibrio inestable I.

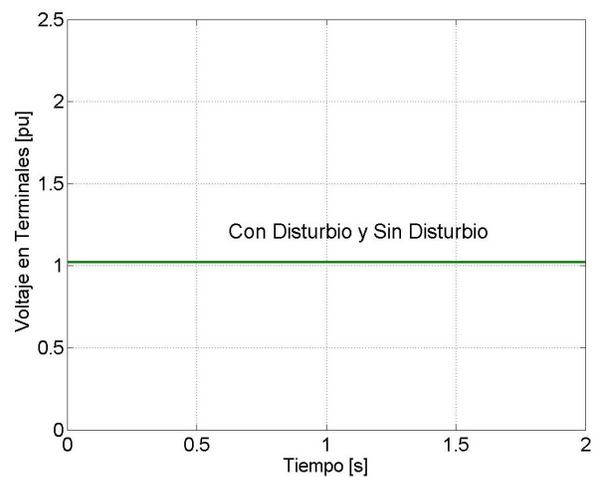


Figura 4.12b. Comportamiento del voltaje terminal para un punto de equilibrio inestable I.

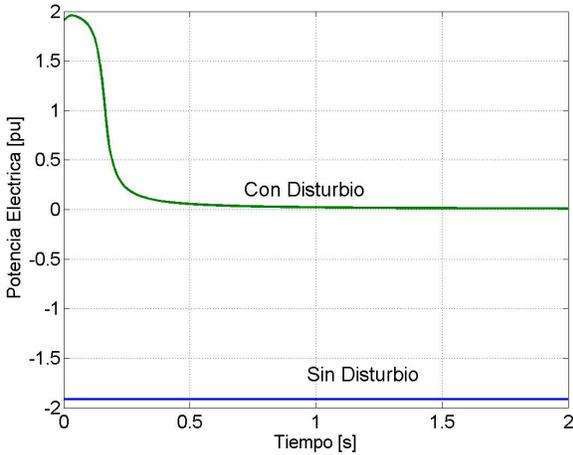


Figura 4.12c. Comportamiento de la Potencia Eléctrica para un punto de equilibrio inestable I.

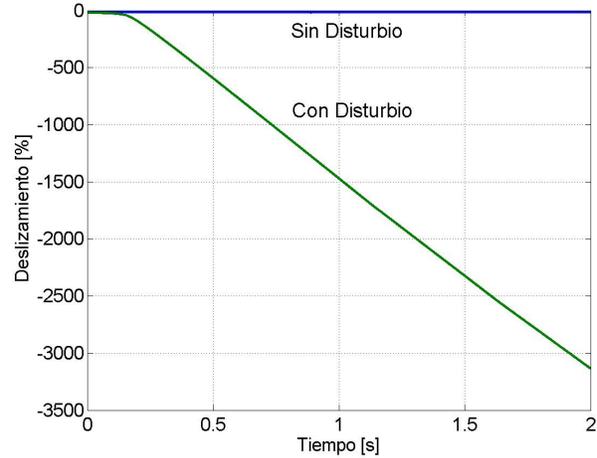


Figura 4.12d. Comportamiento del Deslizamiento para un punto de equilibrio inestable I.

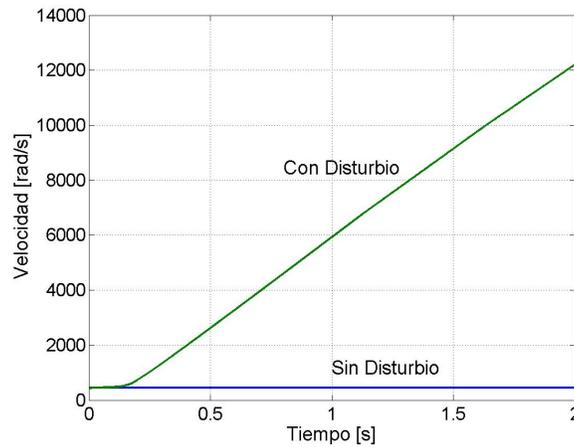


Figura 4.12e. Comportamiento de la velocidad para un punto de equilibrio inestable I.

4.6 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD ANTE PEQUEÑOS DISTURBIOS DE UN SISTEMA MÁQUINA BUS INFINITO.

En este apartado, se muestra el desarrollo del análisis de estabilidad ante pequeños disturbios de un sistema máquina bus infinito, que se presenta con los modelos de 5º, 7º y 9º orden en función de flujos electromagnéticos en el dominio de la frecuencia, con las siguientes condiciones de operación inicial, que son mostradas en la tabla 4.4.

Tabla 4.4. Condiciones de operación inicial para el generador de 1 hp.

Parámetros de Inicialización en el Generador de Inducción de 1 hp		
Corrientes	Voltajes	Potencias
$I_s = 0.95424 + 1.39401i$ $I_r = -1.13959 - 0.29167i$ $I_m = 2.09383 + 1.68568i$	$V_1^* = 0.01671 + 0.17095i$ $V_f^* = 1.01671 - 0.17095i$ $V_B = -1.000 + 0.0000i$	$S = 0.95424 - 1.39401i$ $P = 0.95424$ $Q = -1.39401$
Flujos Electromagnéticos	Par Electromagnético	
$\psi_s = -0.12419 + 1.08501i$ $\psi_r = -0.25985 + 0.99395i$	$T_s = 1.2097$ $T_r = -1.20849$	

* V_1 = Voltaje en las terminales de la máquina e impedancia de la red de transmisión.

* V_f = Voltaje interno del generador de inducción.

En base a las condiciones de operación inicial, con las que el generador de inducción muestra el comportamiento de sus corrientes y voltajes tanto en el estator como en el rotor, a continuación se muestra el comportamiento fasorial de estas variables en el marco de referencia dq , en las figuras 4.13a, 4.13b y 4.13c.

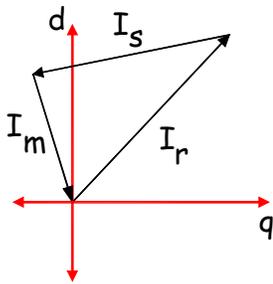


Figura 4.13a. Corrientes del generador.

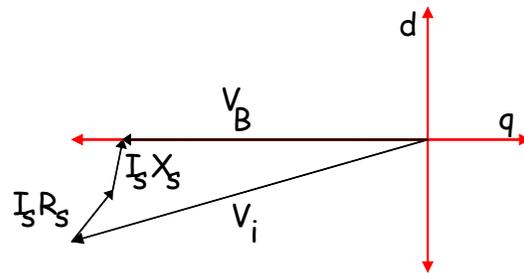


Figura 4.13b. Voltajes en el estator del generador.

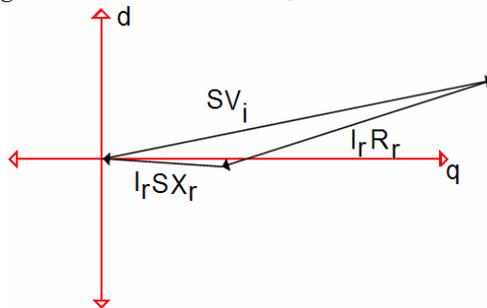


Figura 4.13c. Comportamiento de los voltajes en el rotor del generador.

4.6.1 Modelo de Quinto Orden.

Para el desarrollo del análisis de estabilidad ante pequeños disturbios, se utiliza el programa de *frecuencia.for*, donde se realizan simulaciones con dos condiciones de operación inicial en el sistema máquina bus infinito, en función del deslizamiento, obteniendo el comportamiento dinámico de las variables de estado que forman al sistema, en el modelo lineal de 5° orden, que intervienen en la respuesta libre como se explica en el Capítulo 3, ver tabla 4.5.

Tabla 4.5. Comportamiento de los eigenvalores del generador de 1 HP.

Eigenvalores* del Generador de 1 HP.					
MODOS	Modelo 5° orden**				VARIABLES
	S=-0.0311		S=-0.18060		
	AMORTIGUAMIENTO	FRECUENCIA	AMORTIGUAMIENTO	FRECUENCIA	
4,5	-317.015	+340.4986i	-309.8225	+337.6400i	Ψ_{ds}, Ψ_{qs}
2,3	-17.6117	+77.73010i	-62.30648	+43.59674i	Ψ_{dr}, Ψ_{qr}
1	-75.06236		-0.05712692		η_r

**El modelo de 5° orden esta en función de flujos electromagnéticos.

* Parte real en 1/seg. Parte imaginaria en rad/seg.

En esta tabla se observa el comportamiento de los eigenvalores para el modelo de 5° orden, para dos condiciones de deslizamiento; en el primero se tiene un valor de deslizamiento de $S=-0.0311$, donde el generador de inducción se encuentra trabajando en una condición normal de generación; esta condición de deslizamiento es la que se muestra en las gráficas de las figuras 4.11a, 4.11b, 4.11c, 4.11d y 4.11e, con un programa para generador de inducción con modelo no lineal [7,38], observando que el comportamiento de las variables de estado son estables; en esta tabla también se observa el comportamiento de los eigenvalores, cuando el deslizamiento es de -0.18060 ; y aunque en ambas condiciones los eigenvalores son estables, debido al incremento del deslizamiento, el valor de amortiguamiento (parte real) y frecuencia de oscilación (parte imaginaria) tienen ciertas modificaciones como se observan en la figura 4.14.

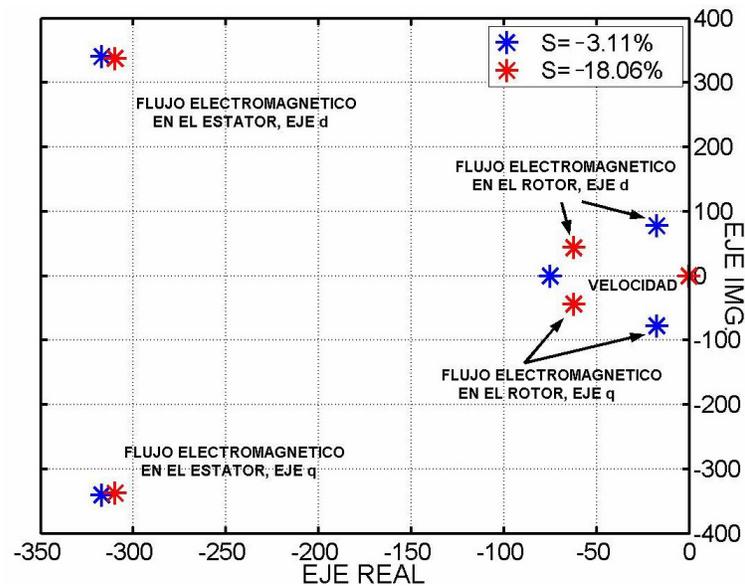


Figura 4.14. Comportamiento de los eigenvalores para el modelo de 5° orden.

Los eigenvalores de los flujos electromagnéticos en el estator, tanto para el eje d como eje q , con lo que respecta al valor de amortiguamiento y frecuencia de oscilación disminuye muy poco como se puede observar tanto en la tabla 4.5 y figura 4.14; los eigenvalores resultantes de los flujos electromagnéticos tanto en eje d como en el eje q , sufren un aumento en cuanto a su amortiguamiento de manera notoria como se observa de manera gráfica, ver figura 4.14, ya que su desplazamiento debido a la disminución de

su valor real es hacia la derecha, pero con lo que respecta a su valor de frecuencia de oscilación, esta disminuye de manera gradual, como se muestra en la tabla 4.5 y figura 4.14, aunque ambos eigenvalores conservan su comportamiento estable; por último, el eigenvalor de velocidad, aunque en ambas condiciones carece de frecuencia de oscilación, su valor de amortiguamiento se ve afectado de manera drástica, debido a que casi tiende a la inestabilidad pues tiene un desplazamiento muy notorio hacia la derecha del plano real, como se puede observar en la figura 4.14, ya que si se le aplica un disturbio del 10% en el valor de su par mecánico, realmente el eigenvalor de la velocidad se puede llegar a comportar de manera inestable, afectando de manera notoria al voltaje, corriente, potencia eléctrica, velocidad y deslizamiento como en [23], y de una manera muy similar como en las gráficas de las figuras 4.12a, 4.12b, 4.12c, 4.12d y 4.12e.

4.6.1.1 Comportamientos Modales.

Los eigenvalores obtenidos del sistema de 5° orden, se pueden expresar en forma modal tanto en función de sus respectivos eigenvectores derechos e izquierdos, así como la relación de ambos arreglos como factores de participación del sistema; esto es, para tener un conocimiento más completo sobre el comportamiento modal sobre todas las variables de estado involucradas en el sistema, cuando este se encuentra en una condición normal de operación ($S=-0.03111$) o bien, cuando el sistema se encuentra en una condición de llegar casi a la inestabilidad ($S=-0.18060$), observando siempre su valor de amortiguamiento y frecuencia de oscilación en función de sus matrices de eigenvectores derechos, eigenvectores izquierdos y factores de participación que corresponden a cada eigenvalor del sistema de 5° orden de un generador de 1 hp. Las expresiones modales se expresan de manera gráfica en las figuras 4.15, 4.16 y 4.17.

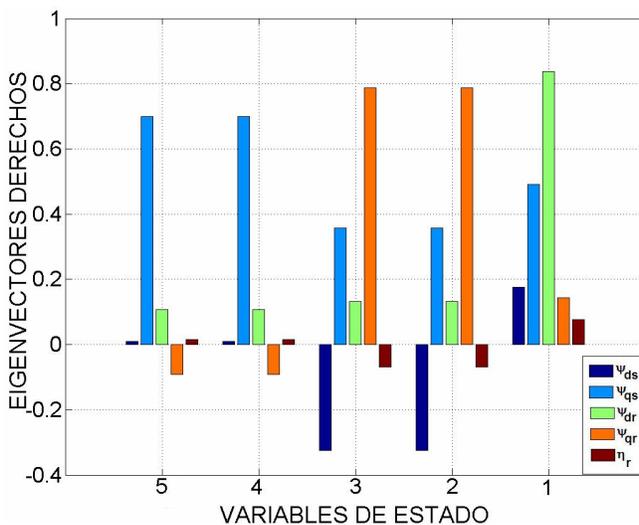


Figura 4.15. Comportamiento modal de los eigenvectores derechos.

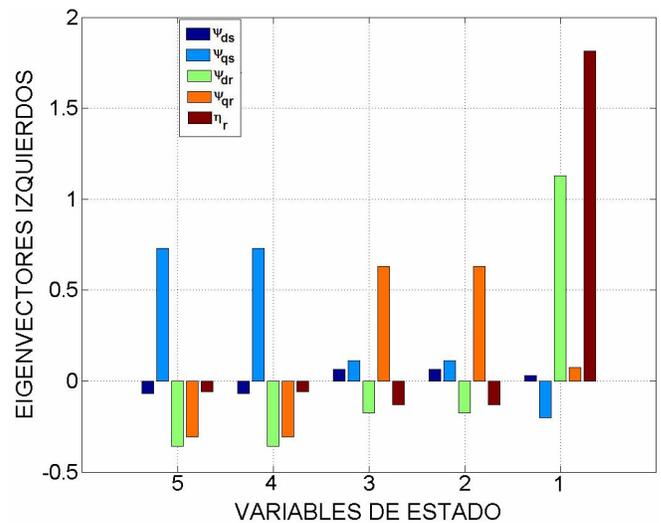


Figura 4.16. Comportamiento modal de los eigenvectores izquierdos.

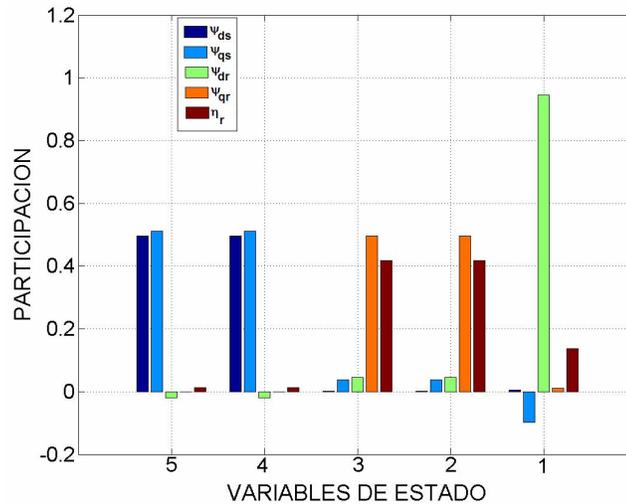


Figura 4.17. Comportamiento modal de los factores de participación.

La figura 4.15, representa el comportamiento de los eigenvectores derechos en el eje real indicando el comportamiento modal de cada variable de estado del sistema de 5° orden en una respuesta libre. Esta gráfica muestra la forma que toman los modos del sistema en función de cada variable de estado, indicando un valor cuantitativo de la actividad relativa que tiene cada variable de estado para cada modo; observando cuando una variable de estado es excitada. Observando que en los cinco modos del sistema, siempre existe actividad por parte de los flujos electromagnéticos, ya sea en el eje d o q del estator o rotor.

Haciendo el análisis en el modo 1, hay mayor actividad por parte de la velocidad debido a que este modo representa al eigenvalor de la variable de estado velocidad y se puede decir que mediante el valor de las magnitudes de cada eigenvector derecho, observando cuales son las variables que tienen una mayor actividad en cada modo en todo el sistema, se puede identificar cuales son los eigenvectores derechos que pertenecen a cada eigenvalor del sistema. También en este mismo modo, el eigenvector derecho que representa a la variable del flujo electromagnético en el rotor en el eje d , es mayor, debido a la relación que tiene con el deslizamiento en las ecuaciones del modelo; se observa que los eigenvectores derechos que representan a los flujos electromagnéticos en el estator tienen una actividad en este modo; a diferencia de los modos 4 y 5 en donde existe una actividad por parte de las cinco variables de estado en este modo, debido a la relación de velocidad y su representación en flujos electromagnéticos en el modelo.

En los modos 2 y 3, existe mayor actividad por parte de los flujos electromagnéticos en el eje q , además de una actividad equitativa en los flujos del estator, tanto en d como en q , debido a que en el modelo se emplean las mismas ecuaciones en ambos ejes a diferencia del signo menos en el valor del deslizamiento en el eje q . Por último en los modos 4 y 5, se observa que existe una gran actividad en los flujos del estator en el eje q que en el eje d , dando como resultado que la actividad en los eigenvectores derechos en los modos 4 y 5 haga que sean identificados como los correspondientes a los eigenvalores de los flujos electromagnéticos en el estator.

La figura 4.16, representa el comportamiento de los eigenvectores izquierdos donde el eje real indica el valor correspondiente a cada variable de estado en el sistema de 5° orden en una respuesta libre. En esta gráfica se muestra la forma real que toman los modos del sistema en función de cada variable de estado involucrada, de tal manera que la matriz de eigenvalores izquierdos identifica la combinación original de las variables de estado para cada modo del sistema, dando el peso necesario de cada variable de estado en un modo determinado. Para el modo 1, la variable velocidad y la que representa al flujo en el estator en el eje d , son dominantes, debido a la relación que tienen con el deslizamiento. Aquí el valor de los eigenvectores izquierdos indica que la combinación de las variables de estado se encuentra dada por la magnitud de las variables de los flujos del estator, rotor y velocidad; aunque el valor relativo de estas sea diferente en sus eigenvectores derechos correspondientes. Pero con los modos 2, 3, 4 y 5, la combinación de cada variable de estado en cada modo es similar al de sus eigenvectores derechos correspondientes, con la diferencia del valor de su magnitud y sentido. Por último, la representación de los factores de participación esta dada por la gráfica de la figura 4.17, donde las barras indican la combinación entre una medida (eigenvectores derechos) y asociación (eigenvectores izquierdos) entre las variables de estado y modos del sistema; en otras palabras nos proporciona la participación de cada variable de estado en forma modal de un sistema.

En la figura 4.17, se observa que en el modo 1, existe una gran participación por parte de la variable del flujo electromagnético en el rotor del eje d y aunque este modo sea identificado como el correspondiente a la velocidad debido a la relación que tiene con el deslizamiento realmente influye sobre el comportamiento modal de esta variable. Ahora para los modos 2 y 3, la participación se da en las variables de los flujos electromagnéticos en q y en la velocidad, ver capítulo 3, debido a la relación del deslizamiento y velocidad en el rotor en las ecuaciones del modelo. Para los modos 4 y 5, la participación en los flujos electromagnéticos del estator, tanto para d como para q ; en la gráfica de la figura 4.17, se observa el dominio de la variable de estado correspondiente al modo y al eigenvalor del sistema, de esta manera se detectan los modos que pueden llegar a afectar al sistema en un determinado caso, permitiendo determinar la naturaleza de los diferentes modos que participan en las oscilaciones que se presentan en caso de inestabilidad. El análisis para cada forma modal se realizo en función del valor de su parte real; pero si se quiere conocer la ubicación en función de su comportamiento angular, es necesario representar en función de su magnitud y ángulo a cada forma modal correspondiente a cada eigenvalor del sistema, a continuación en las figuras 4.18, 4.19 y 4.20, se muestran las magnitudes de las formas modales, además de su comportamiento fasorial, tomando en cuenta que si el ángulo de desplazamiento se encuentra entre el primer y segundo cuadrante, la barra es positiva, pero si el ángulo se encuentra entre el tercer y cuarto cuadrante se considera como negativo.

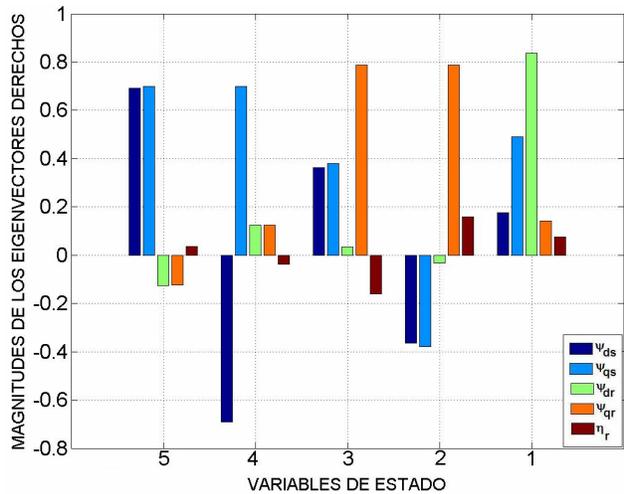


Figura 4.18. Comportamiento modal de los eigenvectores derechos.

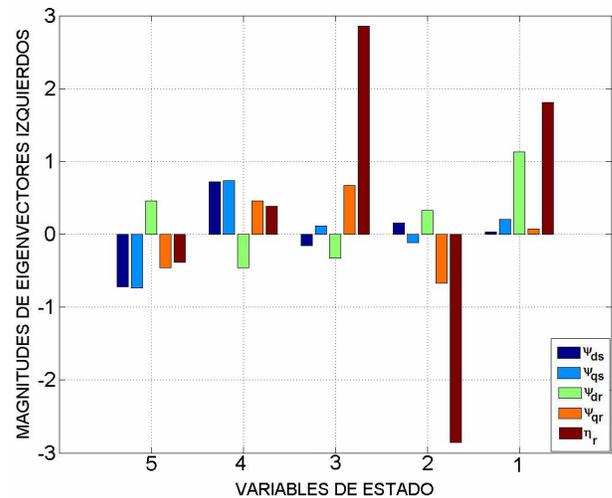


Figura 4.19. Comportamiento modal de los eigenvectores izquierdos.

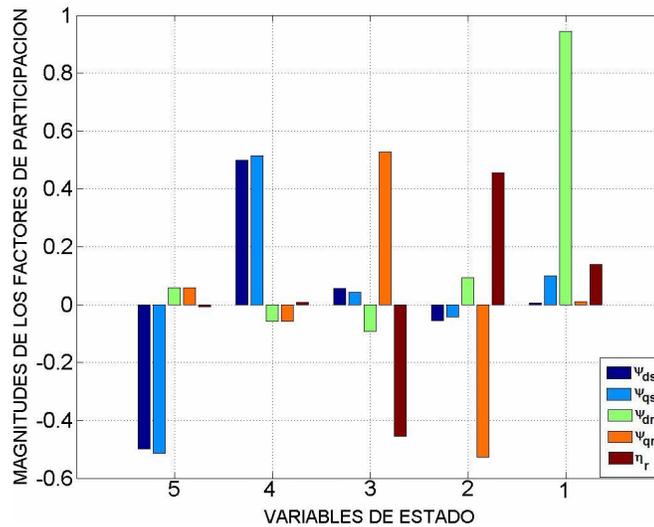


Figura 4.20. Comportamiento modal de los factores de participación.

Si se compara los valores de la parte real de la figura 4.15 y la figura 4.18, en el caso del modo 1 no se tiene ningún cambio debido a que en este modo no existe frecuencia de oscilación, es por ello que la representación de la parte real y la de su magnitud, es la misma. En cuanto a los modos 2 y 3 correspondientes a los flujos en el rotor, tanto en el eje d como en el eje q , solamente los eigenvectores derechos correspondientes a los flujos en el estator en ambos ejes y el flujo en el rotor en el eje q , el valor de su magnitud es la misma, pero en cambio a los eigenvectores derechos correspondientes a la velocidad y al flujo en el rotor en el eje d , existe una diferencia proporcional en ambos eigenvectores derechos, ya que mientras en la gráfica de la figura 4.15, este eigenvector derecho es mayor en el flujo en el rotor; la velocidad es menor en la gráfica donde se representa en función de su magnitud y ángulo, ocurre el efecto contrario; pero aun así se puede decir que la relación de las actividades relativas de cada variable en estos

dos modos es muy parecida; por último en los modos 4 y 5, realmente en las gráfica de magnitudes es en los flujos en el estator en ambos ejes, donde existe una mayor actividad por parte de estas variables en este modo mientras que la velocidad tiene una actividad relativamente baja comparada con las magnitudes de los eigenvectores derechos de los flujos en el rotor.

En la figura 4.19, se vuelve a observar que en el modo 1, que esta representado por la velocidad, debido a que carece de frecuencia de oscilación en su forma modal, el valor de su magnitud y el de su parte real es igual, no hay variación alguna; en cuanto a los modos 2 y 3, se observa que la variable que domina más es la de velocidad, mientras que en la gráfica de la figura 4.16, los eigenvectores izquierdos muestran que son los flujos en el rotor del eje q , las variables más dominantes en estos modos; ahora en función de sus magnitudes, la variable que domina más son los flujos en el rotor y son muy parecidas al valor obtenido por sus valores reales, los flujos en el estator en ambos ejes en la gráfica de las magnitudes de los eigenvectores izquierdos es inverso al obtenido en la gráfica de la figura 4.16, ya que se observa que realmente en función de sus magnitudes los flujos en el estator del eje d , son mayores que el flujo en el estator en el eje q . Por último, en los modos 4 y 5, las variables dominantes son los flujos en el estator en ambos ejes, que a diferencia de la gráfica de la figura 4.16, se muestra solamente que la variable dominante es el del flujo en el estator en el eje d , con respecto a los eigenvectores izquierdos de las magnitudes de los flujos en el rotor y velocidad también influyen; a diferencia de la figura 4.17, se observa que variable que domina es la velocidad, pero realmente no lo es así.

En la figura 4.20, se observa el comportamiento de la magnitud de los factores de participación en el modelo de 5° orden de un generador de 1 hp, observando el modo1, este se encuentra representado por la variable velocidad y tiene el mismo comportamiento en cuanto al valor de su magnitud y parte real de su modo, debido a que carece de frecuencia de oscilación. En cambio en los modos 2 y3 representando a los flujos en el rotor muestran una mayor variación en la gráfica de sus magnitudes, que en la gráfica de la figura 4.17. En los modos 4 y 5 de la figura 4.20, muestran una participación equitativa en los factores de participación de los flujos en el rotor, que a diferencia de la gráfica de la figura 4.17, se observa que casi no hay participación en los flujos en el rotor del eje q ; en cambio en la gráfica de las magnitudes de los flujos en el estator tanto en la figura 4.17 y 4.20, su comportamiento es igual, pero con respecto a la participación de la velocidad en la figura 4.20, es similar a la obtenida en la figura 4.17. De manera general, se puede decir que con respecto al valor relativo obtenido en los eigenvectores derechos de cada forma modal en función de sus eigenvalores de cada variable estado, predominan los valores de los flujos electromagnéticos tanto en el rotor como en el estator de ambos ejes, y esto es tanto en su parte real como en su magnitud. En los eigenvectores izquierdos en forma general, tanto en función de su parte real como en su magnitud, el valor dominante de las variables es muy similar ya que en ambas gráficas predomina el valor de los flujos tanto del estator como rotor, así como el de la velocidad. Por último en las gráficas de

los factores de participación tanto en función de sus magnitudes como en función de su parte real, el comportamiento de la participación en las variables de estado en cada modo es igual en ambas gráficas aun tomando en cuenta el valor para cada representación en barra. De la misma manera que se ha simulado y analizado el caso donde el valor del deslizamiento, $S=-0.03111$, considerado como un caso de operación estable, se hace el siguiente análisis para un valor de deslizamiento $S=-0.18060$, donde el generador de inducción se encuentra en un caso crítico, debido a que el eigenvalor de la velocidad se encuentra casi en el límite del eje imaginario y puede cruzar hacia al lado derecho indicando para un análisis de estabilidad ante pequeños disturbios inestabilidad, explicado en el Capítulo 3. A continuación se muestran las representaciones en forma gráfica de las formas modales, ver figuras 4.21, 4.22 y 4.23.

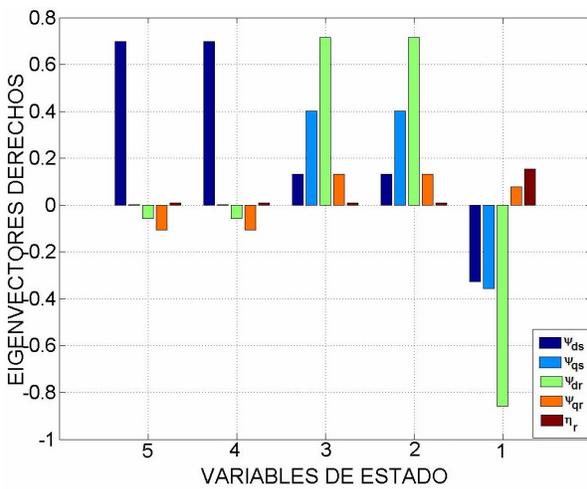


Figura 4.21. Comportamiento modal de los eigenvectores derechos.

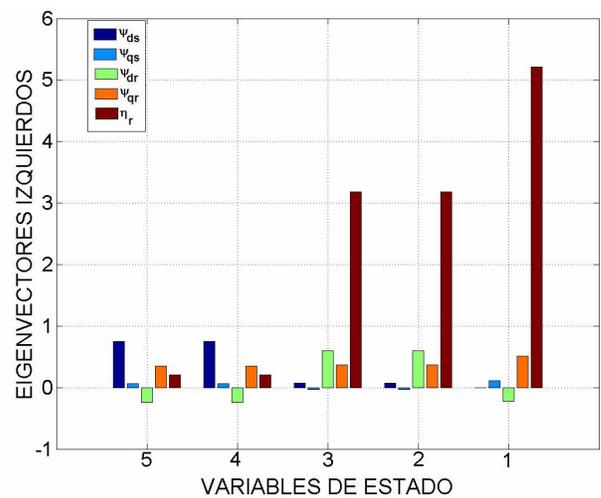


Figura 4.22. Comportamiento modal de los eigenvectores izquierdos.

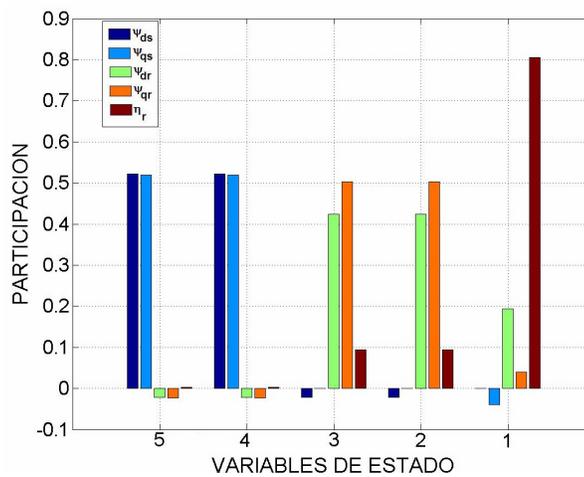


Figura 4.23. Comportamiento modal de los factores de participación para el modelo de 5° orden.

En la figura 4.21, se muestra el comportamiento de los eigenvectores derechos, donde el modo 1, se tiene un gran incremento en la actividad relativa del flujo electromagnético en el rotor en el eje d , que a diferencia de los demás modos este valor es mayor. En los modos 2 y 3, el valor del flujo en el rotor en el eje d , tiene un valor relativo alto comparado con los demás eigenvectores derechos, en cambio el valor de la velocidad se ve disminuida, debido al incremento del deslizamiento en esta condición, también el valor de los flujos en el estator, no son equitativos si no que sobre sale más el valor relativo del flujo en el estator del eje q , dando lugar a un dominio de esta variable en este modo; por último, en los modos 4 y 5, se observa que el valor relativo del flujo en el estator del eje d , es más dominante que en la primera condición el valor del flujo en el estator en el eje q ; aquí el valor del flujo del estator en el eje q y el eigenvector derecho de la velocidad son los que menos influyen en este modo.

En la figura 4.22, el comportamiento de los eigenvectores izquierdos para el modo 1, el comportamiento del eigenvector izquierdo de la velocidad, es mayor su influencia en este modo, debido al valor de deslizamiento para esta condición de operación, de tal manera que se ve reflejado que en el eigenvector izquierdo del flujo electromagnético en el estator del eje d , casi no tiene influencia sobre las demás variables para este modo; para los modos 2 y 3, también se nota la influencia de la velocidad sobre todas las variables participantes en estos modos; también se observa que la variable que tiene menos influencia en estos modos es la variable del flujo electromagnético en el estator del eje q ; mientras que para los modos 4 y 5, se nota una mayor influencia del flujo electromagnético en el estator del eje d y una influencia menor por parte del flujo en el estator del eje q .

Para la figura 4.23, el comportamiento de los factores de participación para el modo 1, la participación de la velocidad es muy clara debido a que a pesar de ser la que más domine en este modo, es también la que domina en los otros modos, como se puede observar en la figura, a diferencia de esta variable en el modo 1, la variable que casi no tiene participación en este modo es el flujo en el estator del eje d , en cambio la participación de las otras variables tanto de los demás flujos es relativa. Para los modos 2 y 3, se observa que la participación para estos modos es por parte de los flujos en el rotor en el eje q , es la de mayor influencia tiene sobre las demás participaciones de las otras variables al igual que en el modo 1, el valor del flujo en el estator del eje q , es casi nula a comparación de las otras participaciones de las demás variables; para los modos 4 y 5, se tiene una mayor participación en los flujos del estator para ambos ejes y una menor participación en la velocidad, pero en el caso de los flujos en el rotor en ambos ejes es equitativa su participación aunque de un valor menor a comparación de los flujos en el estator.

De la misma manera que se tuvo en la primera condición de operación en el deslizamiento es importante conocer el valor de sus magnitudes y desplazamientos para conocer con más detalle el comportamiento modal de este sistema; por ello, a continuación se muestran las representaciones gráficas de las formas modales en función de su magnitud y ángulo de fase en las figuras 4.24, 4.25 y 4.26.

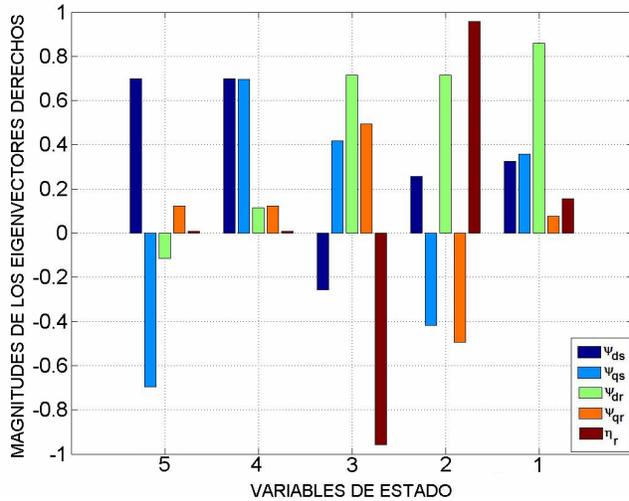


Figura 4.24. Comportamiento modal de los eigenvectores derechos.

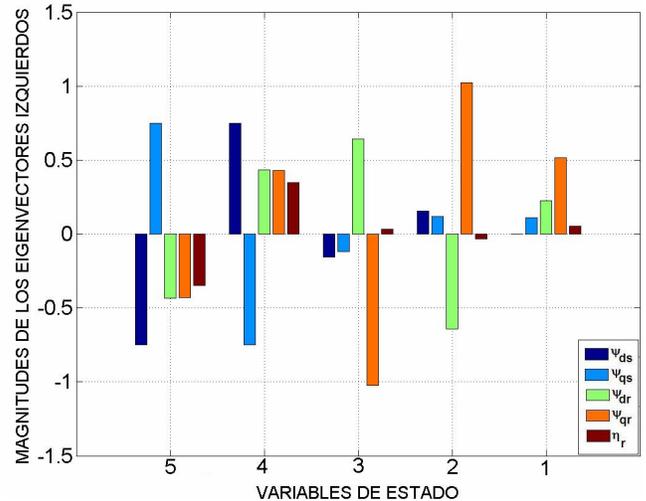


Figura 4.25. Comportamiento modal de los eigenvectores izquierdos.

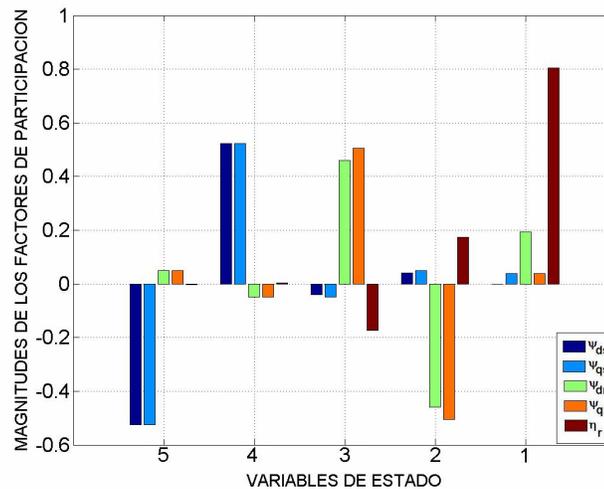


Figura 4.26. Comportamiento modal de los factores de participación para el modelo de 5º orden.

En la figura 4.24, se muestran las magnitudes de los eigenvectores derechos, para el modo 1, se tiene el mismo comportamiento de las variables de estado tanto en la figura 4.21 y 4.24, pues debido a la falta de frecuencia de oscilación en el eigenvalor correspondiente al modo 1, su valor relativo es el mismo. Sin embargo, en los modos 2 y 3, la velocidad es quien realmente tiene un valor relativo mayor a las demás variables de estado, aunque tanto en la figura 4.21 y 4.24 el valor de los flujos en el rotor en el eje d , se mantiene en ambas gráficas, también en el valor del eigenvector derecho que pertenece al valor del flujo en el rotor del eje q , sobre sale más su valor relativo en su grafica de magnitud a diferencia de la gráfica del valor real de su eigenvector derecho; en los modos 4 y 5, en lo que respecta al comportamiento de su magnitud se nota que el valor relativo perteneciente a los flujos en el estator en ambos ejes es más dominante sobre el valor relativo de las demás variables, ya que a diferencia de la gráfica de la figura 4.21, solamente se puede observar el comportamiento de un flujo en el estator en el eje d ; observando

solamente sus magnitudes se puede conocer el comportamiento de los eigenvectores derechos en estos modos.

En la figura 4.25, el comportamiento de los eigenvectores izquierdos en el modo 1, indica que las variables con mayor influencia son: el flujo en el rotor del eje q , el flujo en el rotor del eje d y el flujo en el estator en el eje q . Para los modos 2 y 3, la influencia de la variable en estos modos es el flujo en el rotor de los ejes d y q ; en los modos 4 y 5, la influencia de las variables de los flujos en el estator en ambos ejes es sobresaliente en estos modos, además de tener la influencia de los flujos en el rotor en ambos ejes y la velocidad en estos modos.

En la figura 4.26, el comportamiento modal de los factores de participación en cuanto al valor de sus magnitudes es: para el modo 1, debido al incremento del valor del deslizamiento se observa que la influencia de la variable velocidad es dominante tanto en este modo como en los demás; ahora en los modos 2 y 3 se tiene la participación de los flujos en el rotor en ambos ejes, resultando ser dominantes, además de la velocidad, ya que tienen cierta influencia sobre la velocidad en el rotor, para los últimos modos 4 y 5, las participaciones en estos modos son por parte de los flujos en el estator en ambos ejes, dominantes a diferencia de las otras variables de estado; en cambio, la influencia de la velocidad en este modo es casi nula, este comportamiento también es observado cuando solamente se grafican los valores reales de los factores de participación.

De lo anterior, se puede decir que un análisis de estabilidad ante pequeños disturbios, nos sirve para conocer el comportamiento de cada variable de estado, encontrando las variables que realmente son las que marcan el comportamiento para este sistema ya sea amortiguado, muy estable y oscilatorio, tanto de una manera cualitativa pues por medio de las formas modales como son los eigenvectores derechos podemos conocer la influencia que tienen algunas variables de estado sobre otras, ocasionando ciertos comportamientos modales de cada variable de estado; también podemos obtener información de manera cuantitativa conociendo el valor real que influye cierta variable de estado en cada forma modal, así como su ubicación en el espacio de estados mediante su magnitud y desplazamiento de cada modo; trayendo como consecuencia el conocimiento de las fuentes reales que ocasionan las oscilaciones en este sistema.

4.6.2 Modelos de Séptimo y Noveno Orden.

En el modelo de 5° orden, se realizó un análisis completo de dos condiciones de operación del sistema uno estable y otro casi inestable, conociendo con detalle los comportamientos que pueden llegar a tener las variables de estado del sistema cuando se tiene alguna variación sobre los parámetros de la máquina. A continuación, se realiza el análisis de estabilidad ante pequeños disturbios con el mismo sistema de 5° orden, pero con la diferencia de conocer el comportamiento de este modelo, pero cuando se tienen más dispositivos conectados externamente del generador, como son red de transmisión y capacitor para su

autoexcitación. Estos sistemas fueron explicados con detalle en el capítulo 3; ya que cuando al sistema de 5° orden se le agrega el modelo de la impedancia de la red de transmisión el modelo pasa a ser de 7° orden, debido al anexo de estas ecuaciones, posteriormente, se hace el anexo de las ecuaciones del capacitor, dando como resultado un modelo de 9° orden.

El origen del modelo de 9° orden, se debe al hecho de agregar un elemento capacitivo al SEP, con el objeto de ayudar a mantener una buena compensación de voltaje en el nodo de generación, ofreciendo como ventaja cero problemas de inestabilidad en función de la frecuencia y voltaje [7,91].

En una máquina de inducción es necesario un elemento capacitivo para que mantenga un valor de voltaje en sus terminales, es por ello que el elemento capacitivo sea considerado como un elemento de autoexcitación para el generador. En la referencia [7], se mencionan dos métodos para el cálculo de la capacitancia de excitación en la máquina de inducción, los cuales son: uno por pruebas eléctricas (aplicando pruebas de vacío al generador) cuando se encuentra conectado en forma aislada y otro por datos de voltaje y corriente proporcionados por el fabricante. En el primer método [7], los valores de voltaje y corriente obtenidos, se puede aproximar el valor de la capacitancia, para ello se emplea un banco de capacitores conectados tanto en delta como en estrella. En delta, la reactancia capacitiva de excitación deberá ser igual al valor de la reactancia capacitiva conectada en delta, con un valor aproximado sin carga a la reactancia de la máquina (reactancia mutua), como se muestra en la referencia [7], expresada en la ecuación (4.2), mostrada en la referencia [7].

$$X_{m(\text{máquina})} = X_{c(\text{delta})} = \frac{V_{\text{fase}}}{(I/\sqrt{3})} \quad (4.2)$$

Si el banco de capacitores es conectado en estrella entre líneas, entonces el valor de la reactancia capacitiva requerida es igual al valor de la reactancia de magnetización equivalente en la máquina de inducción [7], expresado en la ecuación (4.3):

$$X_{m(\text{máquina})} = X_{c(\text{estrella})} = \frac{V_{\text{fase}}}{(I*\sqrt{3})} \quad (4.3)$$

La capacitancia que se requiere en la línea y el valor de la capacitancia requerida para la autoexcitación del punto en estrella tendrán un valor tres veces mayor que en el caso delta [7]. A continuación se muestran los resultados en pu de la reactancia capacitiva requerida para la autoexcitación de la máquina de inducción como generador en la figura 4.27, donde se muestran los valores que compensan al nodo de generación desde 1 pu en el voltaje hasta llegar al valor de la reactancia mutua utilizada como reactancia capacitiva, observando un valor de compensación de 0.9969 pu, para el voltaje en este nodo.

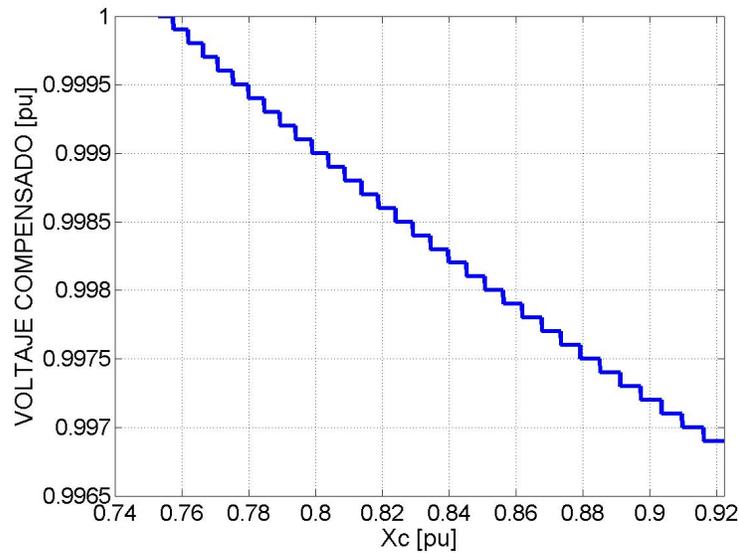


Figura 4.27. Comportamiento de la reactancia capacitiva para la compensación del nodo de generación en el modelo de 9º orden.

Para tener una idea exacta del valor de la variación de la reactancia capacitiva de autoexcitación, se muestran los valores de la capacitancia y reactancia capacitiva en unidades reales y en pu, así con el valor del voltaje en pu compensado, ver tabla 4.6.

Tabla 4.6. Variación de la capacitancia para excitación de la máquina [7].

Voltaje pu	X_C pu	X_C Ω	C μF
1.000	0.753	48.862	54.3
1.000	0.775	50.302	52.7
0.999	0.780	50.600	52.4
0.999	0.824	53.458	49.6
0.998	0.829	53.796	49.3
0.998	0.879	57.046	46.5
0.997	0.885	57.432	46.2
0.997	0.922	59.839	44.3

Observando estos valores de reactancia capacitiva en el sistema de 9º orden, se observa que para cada valor de voltaje existe un pequeño rango de valores de la capacitancia dando como resultado un comportamiento constante para cada valor de capacitancia en el sistema. A continuación, se muestra en la tabla 4.7, el comportamiento de los eigenvalores para un sistema de 7º y 9º orden, observando que debido a la influencia del capacitor en el modelo de 9º orden modifica el comportamiento de los eigenvalores de la impedancia de red de transmisión en el modelo de 7º orden.

Tabla 4.7. Comportamiento de los eigenvalores del generador de 1 HP.

Eigenvalores del Generador de 1 HP.			
Modos	Modelo 7° orden	Modelo 9° orden	Variables
8,9		-32.5921+7139.688i	V_{dc}, V_{qc}
6,7	-2590.413+376.9909i	-33.0269+6385.666i	I_{dl}, I_{ql}
4,5	-316.9935+340.3864i	-285.335+345.800i	Ψ_{ds}, Ψ_{qs}
2,3	-17.72227+77.11930i	-17.8311+79.7351i	Ψ_{dr}, Ψ_{qr}
1	-74.88391	-71.63348	η_r

*El modelo de 5° orden esta en función de flujos electromagnéticos.

En esta tabla, se observa que los modos de oscilación tanto en la red de transmisión y en el capacitor, son muy oscilatorios debido al incremento del valor en la parte imaginaria, en cuanto al valor de su amortiguamiento, este es casi igual; en la tabla 4.8, se expresa el valor de la parte real (amortiguamiento) que existe en cada eigenvalor o forma modal, así como la parte imaginaria (frecuencia de oscilación en Hertz), para cada caso de variación en la reactancia capacitiva, de tal manera que podemos conocer el comportamiento modal en función del valor de su amortiguamiento y frecuencia de oscilación, para cada modo.

Tabla 4.8. Comportamiento de los eigenvalores del generador de 1 HP, variando el valor del capacitor, en el modelo de 9° orden.

Cuando: $X_C=0.753$					
Modos	Eigenvalores*	Razón de Amortiguamiento (ζ)	Frecuencia de Oscilación (f) Hz	Frecuencia Natural No Amortiguada (Hz)	Variables
8,9	-32.248+3386.363i	0.0095	538.956	538.9803	V_{dc}, V_{qc}
6,7	-33.225+2632.238i	0.0126	418.933	418.9663	I_{dl}, I_{ql}
4,5	-286.603+349.284i	0.6343	55.5903	71.9070	Ψ_{ds}, Ψ_{qs}
2,3	-15.379+98.462i	0.1543	15.6708	15.8607	Ψ_{dr}, Ψ_{qr}
1	-74.295	1.0000	0.0000	0.0000	η_r
Cuando: $X_C=0.824$					
Modos	Eigenvalores*	Razón de Amortiguamiento (ζ)	Frecuencia de Oscilación (f) Hz	Frecuencia Natural No Amortiguada (Hz)	Variables
8,9	-32.277+3524.875i	0.0092	561.001	561.0247	V_{dc}, V_{qc}
6,7	-33.211+2770.763i	0.0120	440.981	441.0128	I_{dl}, I_{ql}
4,5	-286.536+349.130i	0.6344	55.5657	71.8827	Ψ_{ds}, Ψ_{qs}
2,3	-15.471+97.708i	0.1564	15.5510	15.7448	Ψ_{dr}, Ψ_{qr}
1	-74.213	1.0000	0.0000	0.0000	η_r
Cuando: $X_C=0.922$					
Modos	Eigenvalores*	Razón de Amortiguamiento (ζ)	Frecuencia de Oscilación (f) Hz	Frecuencia Natural No Amortiguada (Hz)	Variables
8,9	-32.312+3707.581i	0.0087	590.07984	590.1022	V_{dc}, V_{qc}
6,7	-33.193+2953.481i	0.0112	470.06110	470.0906	I_{dl}, I_{ql}
4,5	-286.420+348.813i	0.6346	55.51528	71.8328	Ψ_{ds}, Ψ_{qs}
2,3	-15.660+96.171i	0.1607	15.30610	15.5076	Ψ_{dr}, Ψ_{qr}
1	-74.035	1.0000	0.0000	0.0000	η_r

*Parte real en 1/seg. Parte imaginaria en rad/seg.

En esta tabla, se hacen tres simulaciones tomando en cuenta tres condiciones de operación en los capacitores en función del valor de su reactancia capacitiva, donde para la primera condición el valor de la reactancia capacitiva es un 90% menor al valor de la reactancia capacitiva requerida en el sistema, la segunda simulación se hace para un valor de reactancia capacitiva que es necesaria para la compensación del sistema y la tercera simulación se hace tomando en cuenta un valor de 90% arriba del valor requerido para compensar el sistema.

La información obtenida en las tablas 4.7 y 4.8, indican que debido a estas pequeñas variaciones en la reactancia capacitiva, esta afectando a los modos 6,7,8 y 9, que pertenecen a las corrientes de la red de transmisión en los ejes d y q , y los voltajes en el capacitor en los dos ejes, respectivamente.

Aunque si se observa el valor de capacitor en función del valor de compensación del voltaje en la tabla 4.6, realmente no se tiene gran pérdida, ya si el sistema se encuentra operando con el valor de reactancia capacitiva se tiene una compensación unitaria, pero de manera que se varia el valor del capacitor el valor de compensación en el voltaje va disminuyendo, aunque estos puntos de operación del capacitor realmente las condiciones de operación son para una operación estable en el sistema de 9° orden, pero lo importante de estas simulaciones es conocer la influencia de las variables de estado en los modos de oscilación correspondientes a cada variable de estado del sistema, conocer el desplazamiento que pueden llegar a tener en el espacio de estados, donde se encuentran ubicados y como es su desplazamiento cuando existe una pequeña variación en la reactancia capacitiva, de manera gráfica su comportamiento es mostrado en la figura 4.28.

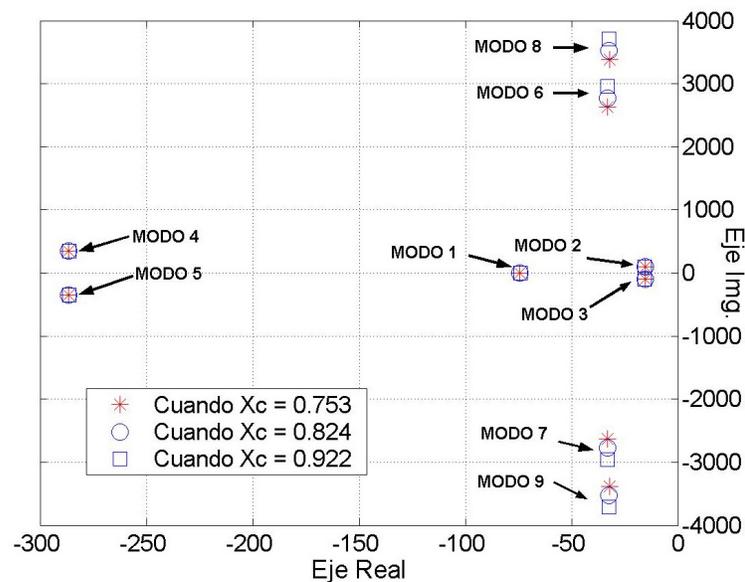


Figura 4.28. Comportamiento de los eigenvalores del modelo de 9° orden cuando se varía el valor de la reactancia capacitiva.

De manera gráfica se observa que los desplazamientos más significativos se encuentran en los modos 6, 7, 8 y 9, debido a la relación del capacitor con la impedancia de la red de transmisión, cuando el generador se encuentra y trabajando, se tiene una variación mínima en el voltaje terminal, pero se considera estable.

Cuando en el modelo de 9° orden, ahora se varía el valor de la impedancia de la red de transmisión, como es mostrado en la tabla 4.9, para tres casos de operación estable, esto es: el primero, el valor de la impedancia es la mitad de su valor base, el segundo cuando la impedancia es el valor base y el tercero cuando el valor de la impedancia es el doble; mostrando el comportamiento de los eigenvalores.

Tabla 4.9. Comportamiento de los eigenvalores del generador de 1 HP, variando el valor de la impedancia de red, en el modelo de 9° orden.

Cuando: $Z_{red} = 0.000565, 0.006565$					
Modos	Eigenvalores*	Razón de Amortiguamiento (ζ)	Frecuencia de Oscilación (f) Hz	Frecuencia Natural No Amortiguada (Hz)	Variables
8,9	-24.643+4969.990i	0.0050	790.9985	791.0084	V_{dc}, V_{qc}
6,7	-24.9791+4215.974i	0.0059	670.9931	671.0048	I_{dl}, I_{ql}
4,5	-301.164+346.997i	0.6555	55.2263	73.1285	Ψ_{ds}, Ψ_{qs}
2,3	-15.089+97.270i	0.1533	15.4810	15.6662	Ψ_{dr}, Ψ_{qr}
1	-76.932	1.0000	0.0000	0.0000	η_r
Cuando: $Z_{red} = 0.00113, 0.01313$					
Modos	Eigenvalores*	Razón de Amortiguamiento (ζ)	Frecuencia de Oscilación (f) Hz	Frecuencia Natural No Amortiguada (Hz)	Variables
8,9	-32.312+3707.581i	0.0087	590.07984	590.1022	V_{dc}, V_{qc}
6,7	-33.193+2953.481i	0.0112	470.06110	470.0906	I_{dl}, I_{ql}
4,5	-286.420+348.813i	0.6346	55.51528	71.8328	Ψ_{ds}, Ψ_{qs}
2,3	-15.660+96.171i	0.1607	15.30610	15.5076	Ψ_{dr}, Ψ_{qr}
1	-74.035	1.0000	0.0000	0.0000	η_r
Cuando: $Z_{red} = 0.00226, 0.02626$					
Modos	Eigenvalores*	Razón de Amortiguamiento (ζ)	Frecuencia de Oscilación (f) Hz	Frecuencia Natural No Amortiguada (Hz)	Variables
8,9	-45.129+2845.727i	0.1565	452.9115	458.5619	V_{dc}, V_{qc}
6,7	-47.304+2091.400i	0.0226	332.8566	332.9416	I_{dl}, I_{ql}
4,5	-261.347+351.967i	0.5962	56.0173	69.7743	Ψ_{ds}, Ψ_{qs}
2,3	-16.534+93.984i	0.1733	14.9580	15.1878	Ψ_{dr}, Ψ_{qr}
1	-68.57666	1.0000	0.0000	0.0000	η_r

*Parte real en 1/seg. Parte imaginaria en rad/seg.

En esta tabla se puede observar que al igual que en el capacitor, el valor de la reactancia de la red de transmisión para los tres casos de simulación el comportamiento del modelo es estable, pero con la diferencia que en cada forma modal el comportamiento de los eigenvalores es afectada en cada uno de los modos, de manera gráfica, esto es observado en la figura 4.29, un desplazamiento más claro en los modos 4, 5, 6, 7, 8 y 9 aunque existe también una variación en los modos 1 y 2, pero desplazamiento es mínimo. Estos desplazamientos modales en función de los eigenvalores se pueden observar con detalle en las figuras 4.30a, 4.30b, 4.30c y 4.30d, observando un mayor desplazamiento hacia la derecha del eje real en los modos 2, 3, 4 y 5.

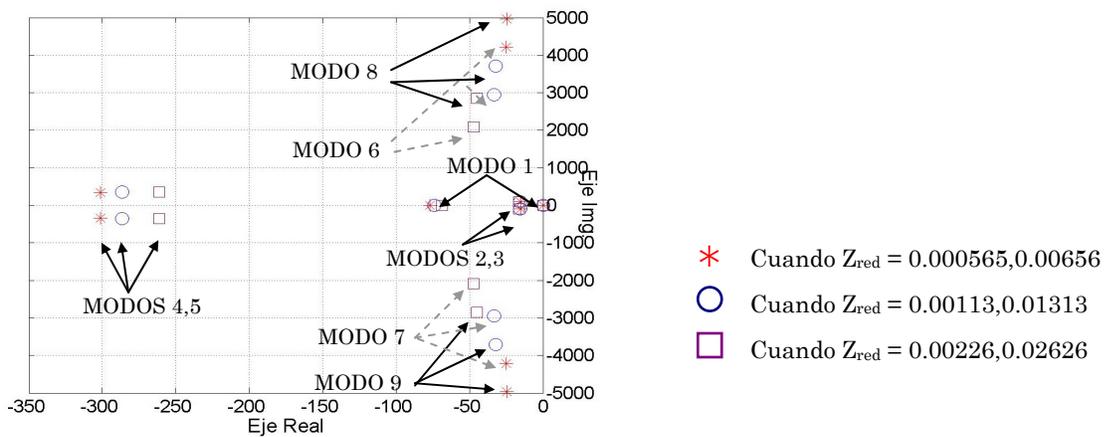


Figura 4.29. Comportamiento de los eigenvalores del variando la impedancia de red.

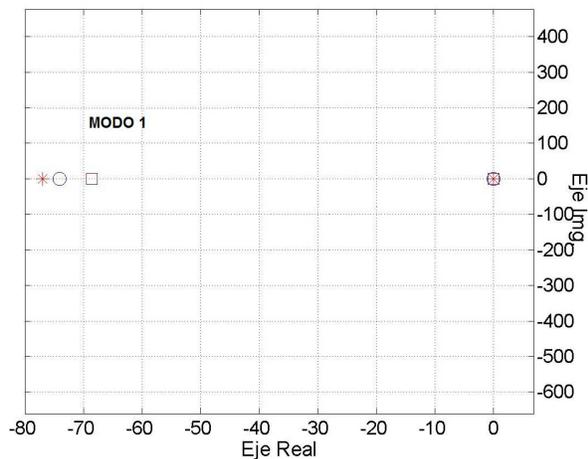


Figura 4.30a. Eigenvalores del modo 1 variando la impedancia de red.

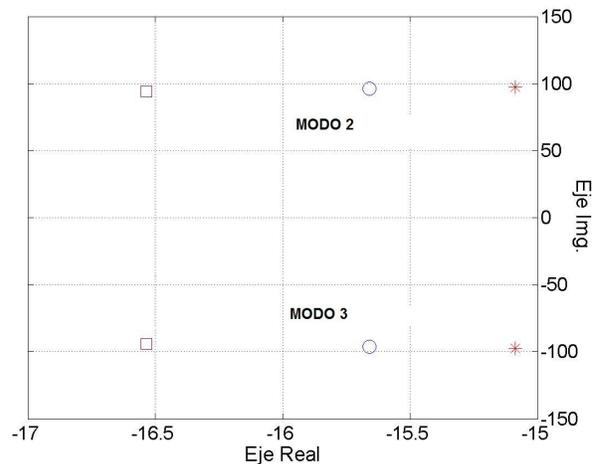


Figura 4.30b. Eigenvalores del modos 2 y 3 variando la impedancia de red.

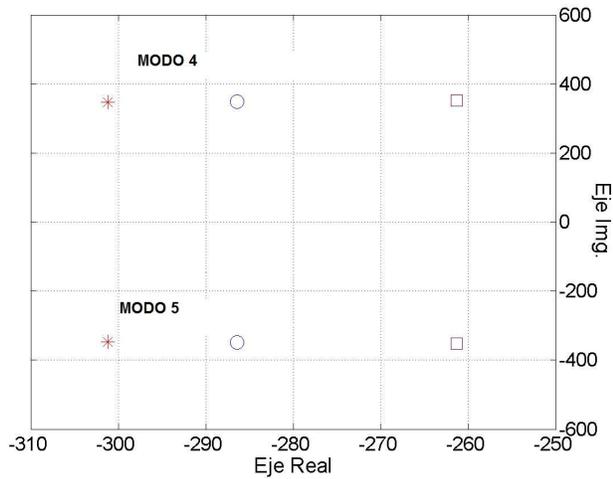


Figura 4.30c. Eigenvalores de los modos 4 y 5 variando la impedancia de red.

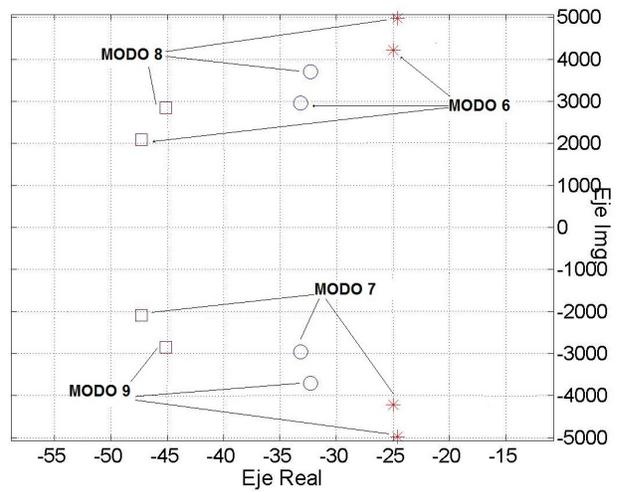


Figura 4.30d. Eigenvalores de los modos 6, 7, 8 y 9 variando la impedancia de red.

De manera gráfica se puede observar el comportamiento de las formas modales de cada eigenvalor del modelo de 9° orden, en función de sus eigenvectores derechos y factores de participación correspondientes, ver figuras 4.31a, 4.31b, 4.31c, 4.31d, 4.31e, 4.32a, 4.32b, 4.32c, 4.32d y 4.32e, respectivamente.

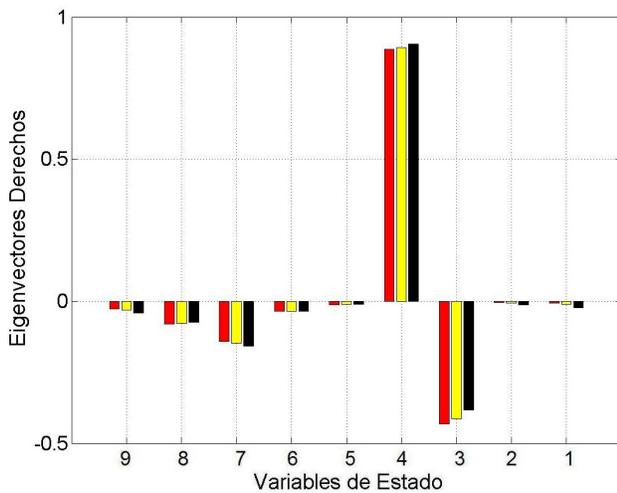


Figura 4.31a. Forma modal de los eigenvectores derechos del modo 1.

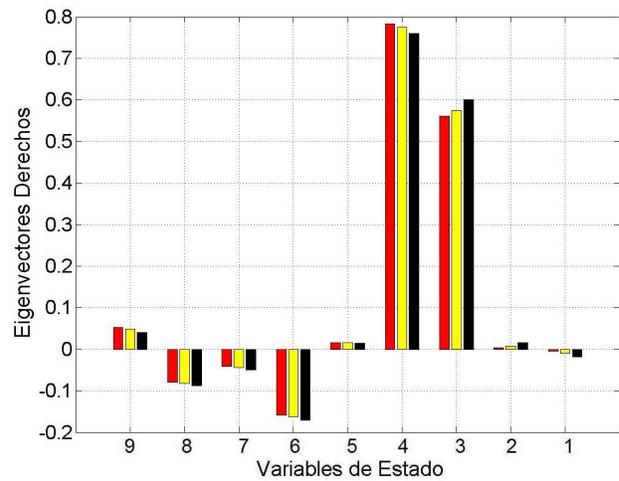


Figura 4.31b. Forma modal de los eigenvectores derechos del modo 2 y 3.

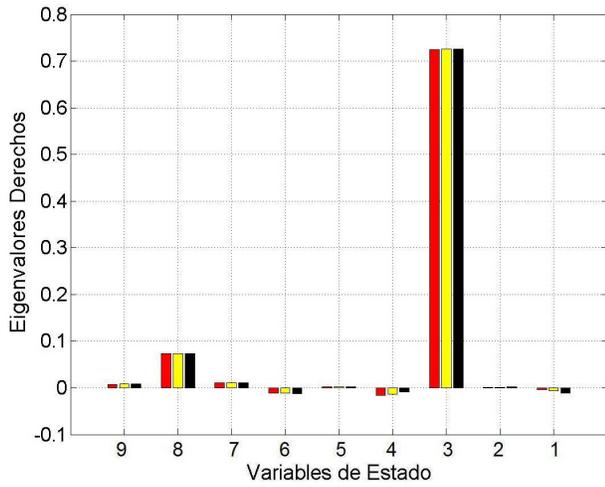


Figura 4.31c. Forma modal de los eigenvectores derechos del modo 4 y 5.

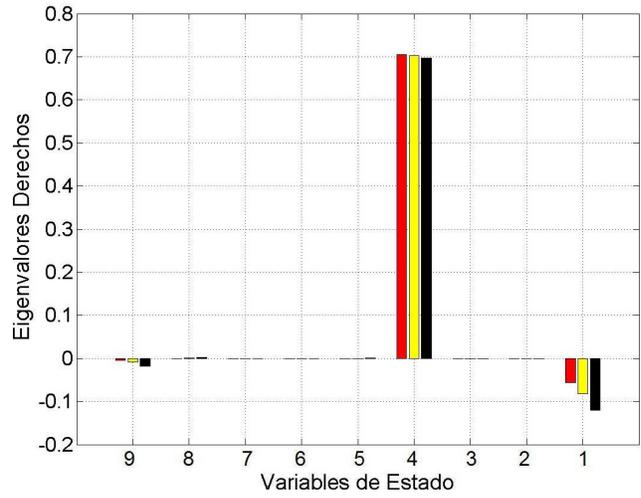


Figura 4.31d. Forma modal de los eigenvectores derechos del modo 6 y 7.

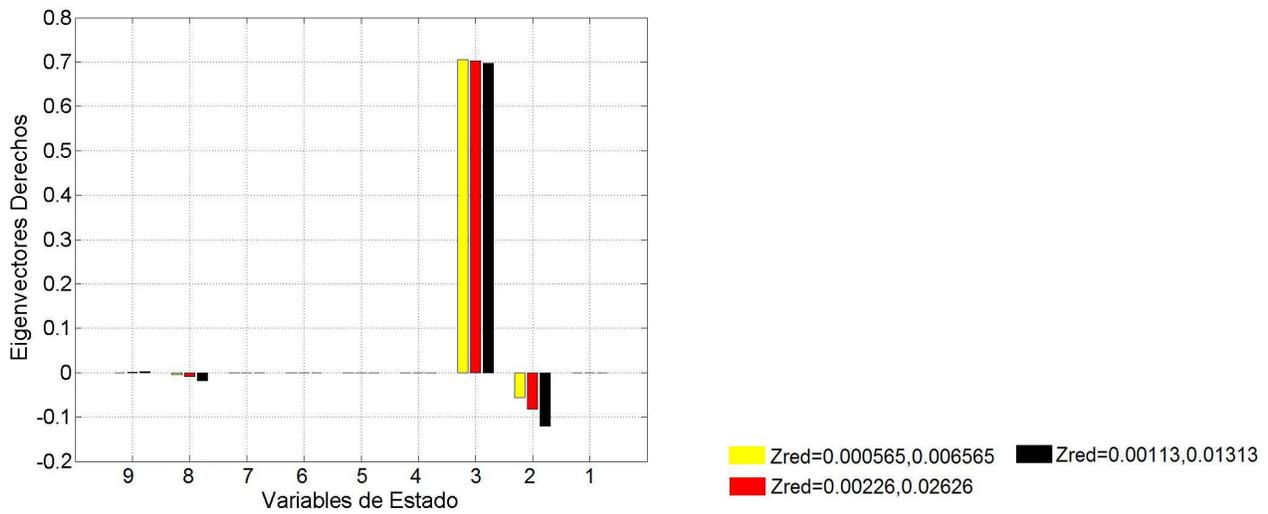


Figura 4.31e. Forma modal de los eigenvectores derechos de los modos 8 y 9.

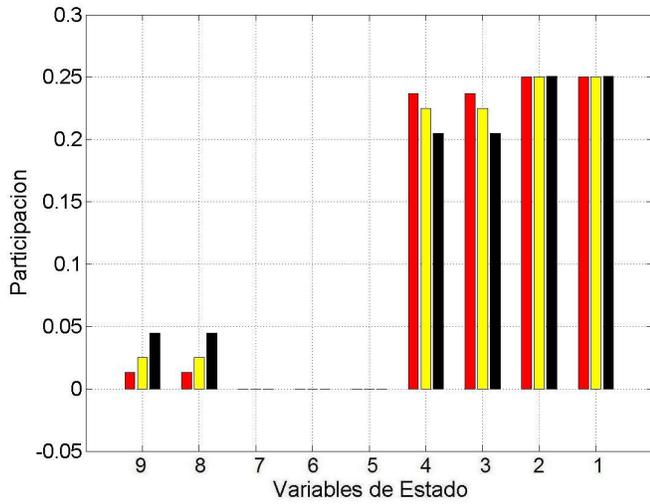


Figura 4.32a. Factores de Participación del modo 1.

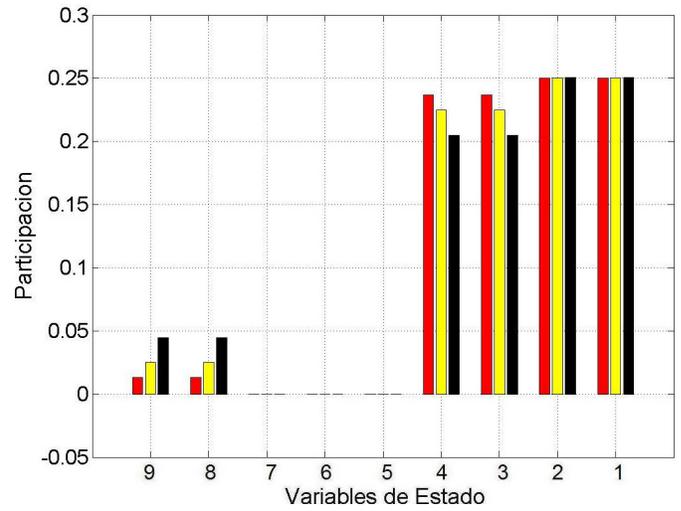


Figura 4.32b. Factores de Participación de los modos 2 y 3.

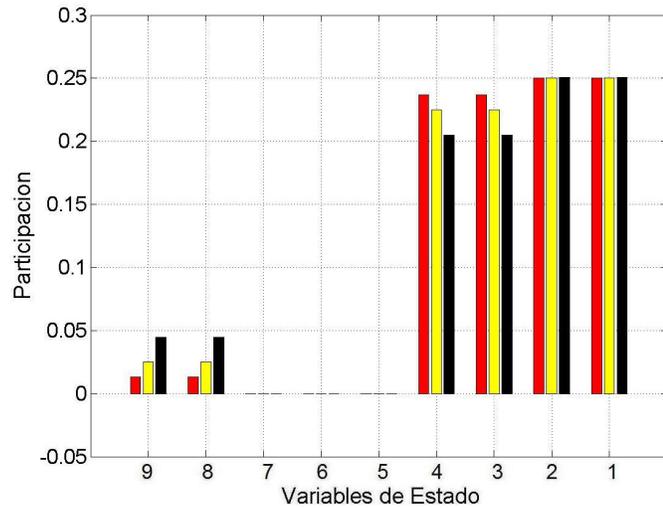


Figura 4.32c. Factores de Participación de los modos 4 y 5.

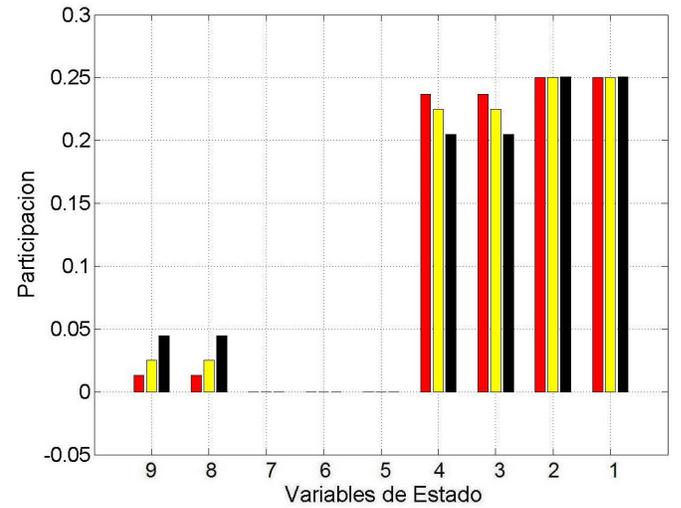


Figura 4.32d. Factores de Participación de los modos 6 y 7.

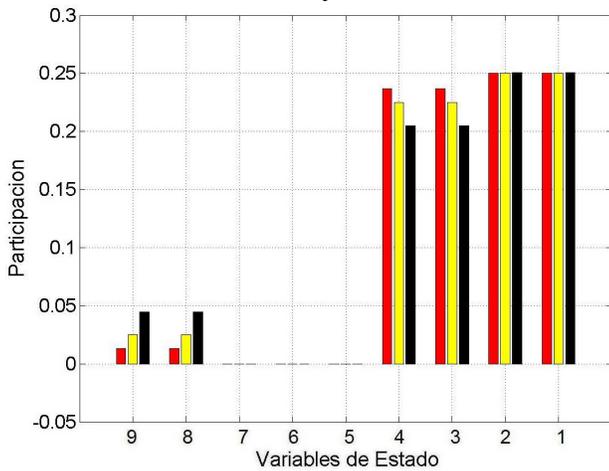


Figura 4.32e. Factores de Participación de los modos 8 y 9.

■ Zred=0.000565,0.006565
 ■ Zred=0.00113,0.01313
■ Zred=0.00226,0.02626

Observando el comportamiento de las formas modales de las figuras 4.31a, 4.31b, 4.31c, 4.31d, 4.31e, se tiene lo siguiente: en la gráfica del modo 1, los valores relativos más significativos son eigenvectores derechos que representan a los flujos en el rotor del eje d y a los flujos en el estator en el eje q , este valor relativo predomina en las tres condiciones para la variación de la red de transmisión, esto se debe a la relación que tiene con los flujos en estator y rotor en dichos ejes del modelo.

De la misma manera se puede observar que los otros eigenvectores derechos para este modo son los voltajes del capacitor en el eje q y la corriente de la impedancia de la red de transmisión en el eje d , en los modos 2 y 3, el comportamiento de los eigenvectores derechos se observa que las variables que representan un valor relativo más dominante sobre las demás son los flujos en el rotor en el eje d y los flujos en el estator del eje q , luego le siguen el valor de la corriente en la línea de transmisión en el eje q y por último los voltajes en el capacitor en ambos ejes; para los modos 4 y 5, el valor relativo más dominante de las nueve variables son los flujos en el eje d , y el valor del voltaje en el capacitor en el eje q .

Para los modos 6 y 7, los valores relativos más dominantes son los flujos en el estator en el eje q y luego le sigue el valor de la velocidad; por último, en los modos 8 y 9 los valores relativos más sobresalientes en estos modos son los flujos en el rotor tanto en el eje d como en el eje q , sobresaliendo de los dos eigenvectores derechos los flujos en el rotor en el eje d , de tal manera que por medio del valor dominante en cada forma modal muestra la identificación de las variables de estados con el valor de los modos en función de los eigenvectores derechos. En la representación de los factores de participación las variables de estado que participan a parte de los flujos en el estator en el eje q , y los flujos en el rotor en ambos ejes en todos los modos del sistema es la velocidad, pero también se ve que hay participación en las variables del voltaje en el capacitor.

En cada forma modal en función de los factores de participación para cada forma modal predomina la participación por parte de la velocidad, flujos en el rotor en ambos ejes y del flujo en el estator en el eje q .

4.7 ANÁLISIS DE PRONY DE UN SISTEMA MÁQUINA BUS INFINITO.

El análisis de Prony es una técnica para ajustar datos de muestras uniformes (espacios igualmente) por una combinación lineal de funciones senoidales amortiguadas, además permite obtener información adicional sobre la fase y amortiguamiento modal [4,28,35,39,40,41]. Este método descompone señales en el dominio del tiempo en senoidales amortiguadas con cuatro parámetros por modo que son: frecuencia, amortiguamiento, amplitud y fase. El método de Prony como la mayoría de las técnicas de identificación modal se utiliza en combinación con las técnicas análisis modal para determinar el origen de los problemas de oscilaciones mal amortiguadas y en el diseño de medidas de control.

Algunas de las aplicaciones del método de Prony son el monitoreo de sistemas en tiempo real para controlar problemas de oscilaciones transitorias mal amortiguadas empleando simulaciones en el tiempo [4,28,35,39,40,41].

Para el desarrollo del análisis de Prony, se emplea el modelo de 5° orden del sistema máquina bus infinito del modelo lineal empleada en esta tesis, así mismo se realiza el análisis con el modelo no lineal desarrollada en [7,38] para estos últimos se hace la comparación con la curva de potencia eléctrica por medio del uso de un toolbox en el MATLAB, llamado Identificación de Sistemas Dinámicos (DSI) [97].

A continuación se muestra la comparación de la potencia eléctrica de los modelos lineal y no lineal con los obtenidos en el análisis de Prony, en la figura 4.33, donde para el caso lineal y no lineal se esta considerando un disturbio aplicado en el par mecánico es del 10% con un valor de deslizamiento de -0.03111.

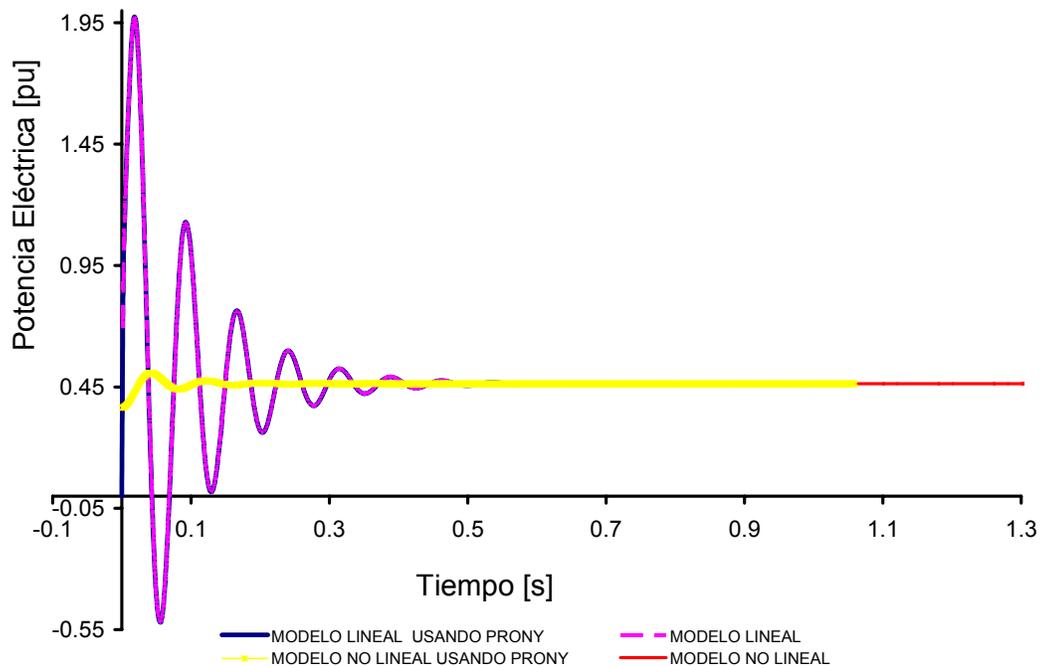


Figura 4.33. Comparación de la respuesta en el tiempo de la potencia eléctrica en un modelo lineal de 5° orden.

En la tabla 4.9, se muestran los valores de frecuencia de oscilación (f), razón de amortiguamiento (ζ), fase y magnitud comparando los valores con los obtenidos en el programa de *frecuencia.for*, con el modelo no lineal [7,38] y el modelo lineal de 5° orden.

Tabla 4.10. Comparación de los factores de amortiguamiento y frecuencia correspondientes al generador de 1 HP en un modelo de 5° orden en y los obtenidos con Prony.

Resultados Obtenidos del programa <i>frecuencia.for</i>			
Variables	n_r	Ψ_{dr}, Ψ_{qr}	Ψ_{ds}, Ψ_{qs}
Modos	1	2,3	4,5
Eigenvalores*	-75.062	-17.614+77.730i	-317.015+340.499i
Frecuencia de Oscilación (Hz)	0.0000	12.37113	54.19204
% Amortiguamiento (ζ)	-----	0.2210	0.6814
Amortiguamiento	-11.9465	-2.8034	-50.4545
Frecuencia Natural No Amortiguada (Hz)	0.0000	12.68483	74.0418
Resultados Obtenidos del modelo lineal por el método de Prony			
Variables	n_r	Ψ_{dr}, Ψ_{qr}	Ψ_{ds}, Ψ_{qs}
Modos	1	2,3	4,5
Eigenvalores*	-----	-10.7376+84.9487i	-2.9688+335.5984i
Frecuencia de Oscilación (Hz)	0.0000	13.520000	53.147460
% Amortiguamiento (ζ)	-----	0.125403	0.008846
Amortiguamiento	-0.000000	1.708944	0.470160
Frecuencia Natural No Amortiguada (Hz)	0.000000	13.6276	53.4185
Amplitud	0.463600	1.806807	0.000000
Fase (deg)	0.000000	-96.853414	-128.447772
Peso Relativo	1.000000	0.011966	0.000000
Resultados Obtenidos del modelo no lineal por el método de Prony			
Variables	n_r	Ψ_{dr}, Ψ_{qr}	Ψ_{ds}, Ψ_{qs}
Modos	1	2,3	4,5
Eigenvalores*		-16.7257+78.7294i	-15.0132+335.8009i
Frecuencia de Oscilación (Hz)	0.00000	12.530167	53.444375
% Amortiguamiento (ζ)	-----	0.207808	0.044664
Amortiguamiento	-0.0000	2.661978	2.389448
Frecuencia Natural No Amortiguada (Hz)	0.0000	12.8332	53.5000
Amplitud	0.463645	0.091016	0.000011
Fase (deg)	0.000000	-200.065066	-318.231814
Peso Relativo	1.000000	0.000002	0.000000

En esta tabla, se hace una comparación de los resultados de los eigenvalores obtenidos por el programa de *frecuencia.for*, y mediante las gráficas de potencia eléctrica utilizando tanto el programa para el modelo lineal y no lineal de quinto orden; se observa que los resultados de los eigenvalores obtenidos con el programa del modelo no lineal tiene una mejor aproximación que los eigenvalores que se obtuvieron con el modelo lineal; observando que tanto los valores de amortiguamiento y de frecuencia de oscilación son muy cercanos.

4.8 MÉTODO DE SENSIBILIDAD DE LOS EIGENVALORES DE UN SISTEMA MÁQUINA BUS INFINITO.

El método de sensibilidad se basa en las condiciones de exactitud de los eigenvalores. Por lo que es importante observar el efecto de los cambios estructurales en la matriz de estados sobre los eigenvalores correspondientes al caso base de operación. Este método de sensibilidad de los eigenvalores estima el valor de otros dispositivos que se le agreguen al SEP como controles que dependan del valor de su amortiguamiento y frecuencia de oscilación de los modos de interés en dicho sistema; además de la identificación de los modos con oscilaciones de bajas frecuencias o bien de la identificación de la variable o dispositivo al que pertenece; por último, detectar la influencia de los modos más dominantes del sistema y de las variables a las que este pertenece, dando como resultado el tener una coordinación de los elementos de control en el sistema [4,3,92,29,89]. En el caso del sistema máquina bus infinito se puede aplicar este análisis al diseño de las máquinas eléctricas en general, aunque en este caso se enfocara dicho análisis a las máquinas de inducción donde en función de las características de la variación de sus parámetros se puede tener una mejor aplicación de estas en varias áreas de trabajo, logrando así un mejor desempeño de la misma; en la figura 4.34, se observa el comportamiento de los eigenvalores de manera gráfica con los valores base del sistema que son mostrados en la tabla 4.8.

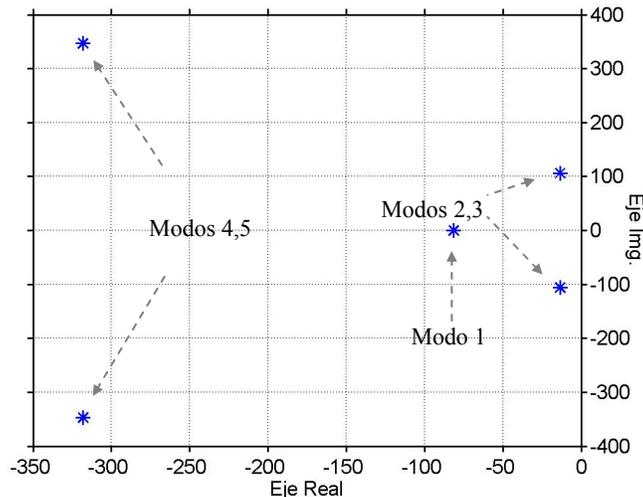


Figura 4.34. Comportamiento de los eigenvalores de un sistema de 5º orden.

4.8.1 Método de Sensibilidad variando cada parámetro del modelo de 5° orden.

Empleando los datos de la tabla 4.10 se incrementa cada parámetro un 25% de su valor nominal, mostrando una comparación de los resultados obtenidos en la tabla 4.11; posteriormente se hace el cálculo de los eigenvalores con y sin el incremento de estos, variándolos directamente a través del método de eigenanálisis; mostrando estas variaciones en la figura 4.35, por último se vuelve hacer el cálculo de los valores de los eigenvalores pero ahora usando el método de sensibilidad de primer orden de los eigenvalores, observando sus diferencias en la tabla 4.12 y a su vez mostrando la comparación de sus valores en la figura 4.35 [89].

Tabla 4.11. Eigenvalores correspondientes al generador de 1 HP en un modelo de 5° orden con los valores base.

Modos	1	2,3	4,5
Variables	n_r	Ψ_{dr}, Ψ_{qr}	Ψ_{ds}, Ψ_{qs}
Eigenvalores	-75.062	-17.612+77.730i	-317.015+340.499i

Tabla 4.12. Variación de los parámetros del generador de inducción de 1 HP.

Parámetros	R_1	R_2	X_1	X_2	X_m	H_m (s)	S
Valores Base	0.08909	0.02717	0.04900	0.07352	0.92231	0.05640	-0.03111
Valores con un 25%	0.1113625	0.0339625	0.06125	0.0919	1.1528875	0.070625	-0.0388875

Tabla 4.13. Comportamiento de los eigenvalores con un incremento de un 25% en cada parámetro del sistema.

Variación de cada uno de los Parámetros un 25% sin Sensibilidad			
	$\lambda_{4,5}$	$\lambda_{2,3}$	λ_1
R_1	-396.87+346.31i	-8.735509+97.80653i	-76.52483
R_2	-326.03+335.47i	-16.65337+108.1962i	-101.6075
X_m	-319.69+352.15i	-12.3489+140.3775i	-73.23631
H_m	-318.09+347.04i	-13.42102+106.1869i	-81.30334
S	-318.10+347.04i	-13.42102+106.1869i	-81.30334
X_1	-281.59+350.78i	-15.02738+104.834i	-75.35875
X_2	-269.87+353.072i	-15.21747+102.3678i	-70.76749
Variación de todos los Parámetros un 25% con Sensibilidad			
	$\lambda_{4,5}$	$\lambda_{2,3}$	λ_1
R_1	-396.8685+346.3048i	-8.735509+97.80653i	-76.52483
R_2	-326.0313+335.4673i	-16.65337+108.1962i	-101.6075
X_m	-319.6932+352.1501i	-12.3489+140.3775i	-73.23631
H_m	-318.0848+347.0443i	-13.42102+106.1869i	-81.30334
S	-318.0848+347.0443i	-13.42102+106.1869i	-81.30334
X_1	-281.5923+350.78i	-15.02738+104.834i	-75.35875
X_2	-269.8709+353.0716i	-15.21747+102.3678i	-70.76749

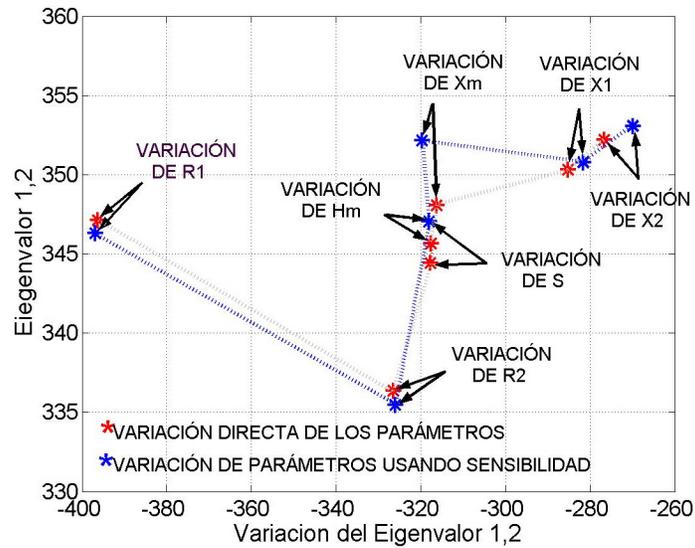


Figura 4.35. Comportamiento de la variación de los modos 1,2 en función de la variación de todos los parámetros de la máquina de inducción.

A continuación se muestran una gráfica variando de manera directa cada parámetro del generador de inducción (figura 4.36), así mismo se muestra otra gráfica variando de la misma manera cada uno de los parámetros del generador de inducción pero aplicando el método de sensibilidad (figura 4.37).

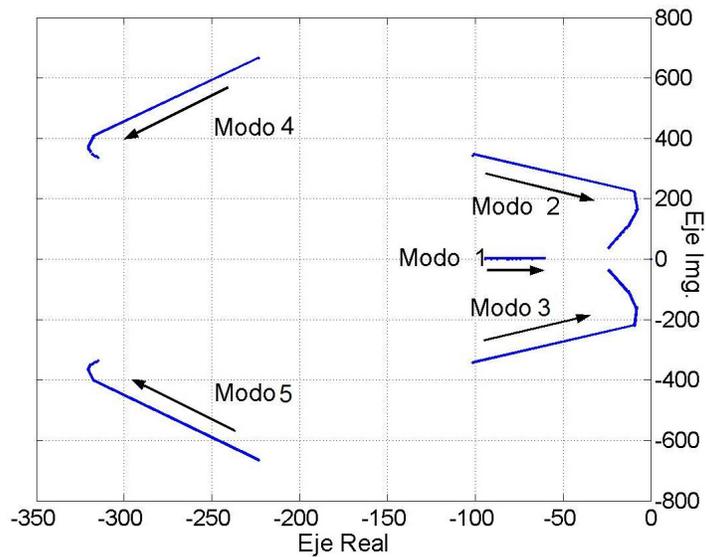


Figura 4.36. Trayectorias de los modos del generador de inducción de 1 hp, variándolos de manera directa.

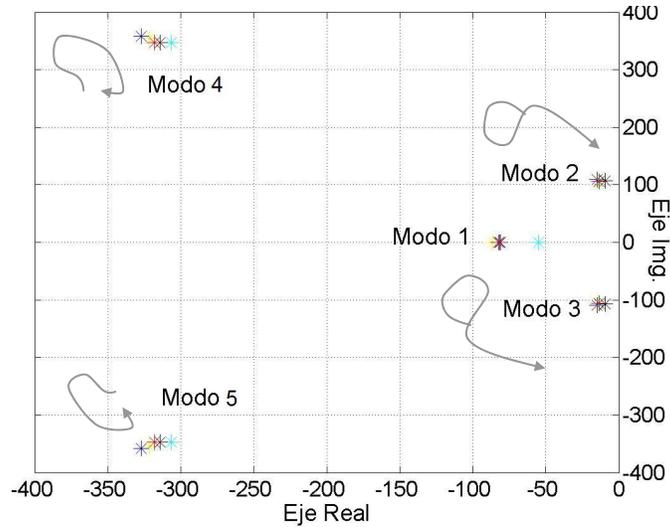


Figura 4.37. Trayectorias de los modos del generador de inducción de 1 hp, variándolos con el método de sensibilidad.

4.8.2 Método de Sensibilidad variando solamente un parámetro del modelo de 5° orden.

Para este caso, se hace una variación del 25% solamente a un parámetro del modelo de la máquina de inducción, como es el caso de la reactancia del estator, X_1 , aplicando el mismo procedimiento anterior, primero se hace la variación de manera directa a la reactancia del estator X_1 , mostrando los datos obtenidos en la tabla 4.13, y de manera gráfica en la figura 4.38, así mismo, se aplica el método de sensibilidad con el mismo valor de variación en X_1 , cuyos datos son mostrados en la tabla 4.14 y de manera gráfica en la figura 4.38, donde se observa una comparación del comportamiento de X_1 entre ambos métodos [89].

Tabla 4.14. Variación de la reactancia de dispersión en la X_1 del generador de inducción.

Incrementos	-25%	-5%	0%	5%	25%	50%	75%	100%
Variación de X_1	0.03675	0.04655	0.04900	0.05145	0.06125	0.0735	0.1225	0.098

Tabla 4.15. Variación de los eigenvalores de la reactancia de dispersión en la reactancia del estator del generador de inducción a diferentes porcentajes.

Incrementos %	Eigenvalores de la Reactancia de Dispersión en la X_1	
	<i>Sin Sensibilidad</i>	<i>Con Sensibilidad</i>
-25	-359.11240+343.24800i	-354.57720+343.30870i
-5	-325.5585+346.31900i	-325.38320+346.29720i
0	-318.08480+347.0443i	-318.0848+347.0443i
5	-310.9396+347.7363i	-310.7863+347.79140i
25	-285.193+350.3061i	-281.5923+350.78000i
50	-258.2809+353.1165i	-245.0999+354.51560i
75	-186.9165+361.1805i	-208.60790+358.25080i
100	-216.9917+357.6875i	-172.11500+361.98680i

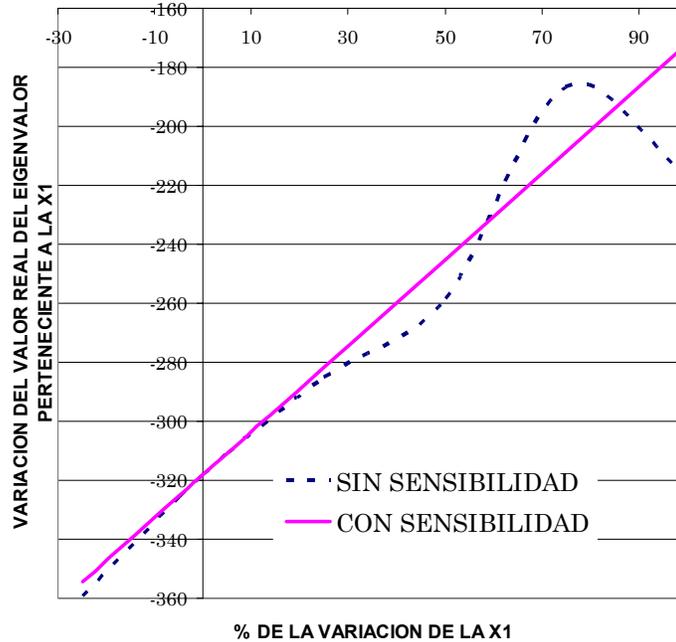


Figura 4.38. Comparación entre la variación del valor de la X_1 .

Haciendo las dos comparaciones de la variación de los parámetros para un sistema de 5° orden, cuando se aplica un incremento del 25% a cada parámetro, se observa que la variación más sobresaliente es cuando se hace un incremento en la resistencia del estator (R_1), mostrando una variación menos significativa en el modelo es la variación de la reactancia del rotor (X_2), como se pueden observar.

Cuando la variación es aplicando el método de sensibilidad de eigenvalores, existe esta diferencia en los mismos parámetros pero con una pequeña discrepancia; pero con lo que respecta al incremento de la reactancia de magnetización (X_m) a diferencia del incremento directo en el parámetro del sistema este tiende a diferir en cuanto al valor del eigenvalor proporcionado por el método de sensibilidad es un poco mayor con respecto al otro valor, además el eigenvalor en el deslizamiento como en la constante de inercia, no varía para ambos parámetros, pero si se usa el método de sensibilidad, se incrementa para cada parámetro del sistema donde esta variación de los eigenvalores tanto del deslizamiento como para la constante de inercia son muy cercanos.

Por último, cuando se aplica el método de sensibilidad, se hace una comparación más específica para observar el comportamiento de ambos métodos en la variación de los parámetros del sistema, que es cuando solamente se trabaja con un parámetro como es este último caso, en el cual se toman varios valores de incrementos, tanto de manera directa, a través del método de eigenanálisis, y así también se hacen las mismas variaciones de este parámetro empleando el método de sensibilidad de primer orden en la cual, se observa que la variación de este mismo parámetro, empleando el método de sensibilidad tiende a tener un comportamiento más lineal que cuando se va incrementando este mismo directamente.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE UN PARQUE EÓLICO EN “LA VENTA” OAXACA.

5.1 INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se presenta un análisis de estabilidad ante pequeños disturbios por medio de un comportamiento dinámico a través de su equivalente, de un Parque Eólico localizado en la zona de La Venta, Oaxaca, en el Sur del Istmo de Tehuantepec, que desde 1984, fue caracterizada por el Instituto de Investigaciones Eléctricas, IIE, como la región con mayor recurso eólico en México, para fines de evaluación de este recurso, esta zona se delimitó por la primera curva de nivel es a 100 m sobre el nivel medio del mar, que parte desde el puerto de Salina Cruz, hasta el límite entre Oaxaca y Chiapas como es mostrada en la figura 5.1 [36,81].



Figura 5.1. Zona geográfica de La Ventosa, Oaxaca.

La zona de La Ventosa, Oaxaca, cuenta con un recurso eólico de bueno a excelente; ya que se sitúa entre los mejores en el mundo. Ahí, se han medido velocidades de viento medias anuales que hasta ahora sólo se pueden comparar con las registradas en algunos sitios de Nueva Zelanda, en algunas costas de Escocia, en las regiones más ventosas de Egipto y en algunas islas de Grecia [36,81].

En relación con el potencial de aprovechamiento del recurso eólico para la generación de electricidad en la zona de La Ventosa; la información disponible sugiere (y en algunos casos comprueba) que en la región se podrán encontrar áreas con velocidades medias anuales que van desde 7 a 10.5 m/s a 40 metros de altura sobre el terreno. Su característica de planicie costera la hace muy adecuada para la construcción de centrales eoloelectricas, en virtud de que por ello posee una alta densidad del aire y una topografía prácticamente plana. Estas características influyen favorablemente sobre el costo de generación eoloelectrica. Se ha estimado que en la zona de La Ventosa se podrían construir varias centrales eoloelectricas cuya capacidad podría acumular cerca de 2,000 MW. En términos de capacidad, esto significa una potencia comparable a 60% de la capacidad del mayor complejo hidroeléctrico del país (Chicoasén, Peñitas, Angostura y Malpaso). El factor de planta promedio para las centrales eoloelectricas en la región podría superar 30% (i.e., desde 25% para áreas con recurso eólico moderado, hasta cerca de 50% para las áreas con vientos excelentes) [36,81].

La Ventosa, Oaxaca, es la región donde la generación eoloelectrica tiene la mayor oportunidad de desarrollo en México. Al aplicar la tecnología actual en esta región, se podría lograr la mejor competitividad económica con respecto a la generación convencional. El proceso de instalación de 2,000MW eólicos en esta zona podría ocupar a una posible industria eoloelectrica mexicana durante 5 o 7 años (bajo una actividad relativamente intensa). Las actividades de operación y mantenimiento de las centrales durante sus 20 a 25 años de vida útil, la renovación de dichas plantas y la expansión de la generación eoloelectrica a otras áreas del país, podrían consolidar esta industria y crear nuevos empleos. El desarrollo de la tecnología eoloelectrica en el ámbito internacional tiene dos tendencias principales: a) Desarrollo de máquinas con más facultad para aprovechar vientos de poca intensidad y b) desarrollo de equipos robustos para operar con viento intensos. Ambas tendencias buscan mejorar continuamente (como en todas las tecnologías ya maduras) tanto los aspectos de comportamiento técnico como los que influyen sobre los costos de fabricación, operación y mantenimiento. Los logros de la primera tendencia están haciendo que la generación eoloelectrica pueda extenderse a sitios con recurso eólico moderado, en términos económicos adecuados. Esta tecnología se podría aplicar en México en zonas como la región central de Zacatecas, partes del Estado de Hidalgo y en algunas costas de nuestro país [36,81].

5.2 CENTRAL “LA VENTA” OAXACA.

A finales de 1993, la Comisión Federal de Electricidad licitó la construcción de una central eoloelectrica de 1.5 MW de capacidad en La Venta, Oaxaca (a treinta kilómetros al noreste de Juchitán). La licitación se realizó en la modalidad de proyecto "llave en mano" [26,81]. Su construcción se inició en enero de 1994 y entró en operación en Agosto del mismo año, dicho sistema se muestra a continuación en la figura 5.2.

La central está integrada por siete aerogeneradores daneses (marca Vestas, modelo V-27), que tienen una capacidad nominal de 225 kW a 15 m/s. El diámetro de barrido del rotor de las máquinas es de 27 metros, están colocadas sobre torres tubulares de 30 metros de altura, ver figura 5.3 [81,93].



Figura 5.3. Central eoloeléctrica de La Venta, Oaxaca, (CFE).

En los dos primeros años de operación, la generación de la central fue de 12.4 GW, con un factor de planta global de 48.1 %. Durante el primer año, el factor de planta fue de 51.7 % [11,12,13,81,84]. En el mundo operan unas 1,600 máquinas del mismo fabricante y de capacidad similar a las de La Venta, pero sólo la instalada en Nueva Zelanda se acerca a los valores de generación registrados en México, que han impuesto récord con más de un millón de kWh al año. Los costos de generación en “La Venta” son 4.3 centavos de dólar por kWh, similares a los de las grandes centrales térmicas y este costo es el resultado del alto factor de planta alcanzado y el relativo bajo costo de instalación [11,81,84]. Los aerogeneradores V-27 son del tipo viento arriba, con orientación activa y con un sistema para regulación de velocidad por control del ángulo de paso de las aspas [11,81,84].

La configuración de la central es "en línea" con una separación entre máquinas de 60 metros. La interconexión a la red eléctrica se realizó sobre una línea de 13.8 kV, es decir, a un voltaje de distribución. No han ocurrido problemas graves como pudieran ser fracturas en las aspas o fallas estructurales. Los problemas que se han presentado están relacionados con: descargas eléctricas atmosféricas, sobre temperatura en el interior de la carcasa, incendio en componentes de dos controles electrónicos locales y fallas en dos cajas de engranes.

5.2.1 Características de La Central “La Venta” Oaxaca.

El sistema de la Central Eoloelectrica en “La Venta”, Oaxaca, forma parte del SIN en la zona de Tehuantepec, Oaxaca; el cual, es mostrado en la figura 5.2, de donde se toma el sistema de siete aerogeneradores conectados en el nodo de Santo Domingo de 13.8kV de alimentación, el cual, es representado por un sistema máquina bus infinito con banco de capacitores para excitar al generador [11,84], mostrado en la figura 5.4, cuyos parámetros están dados en la tabla 5.1.

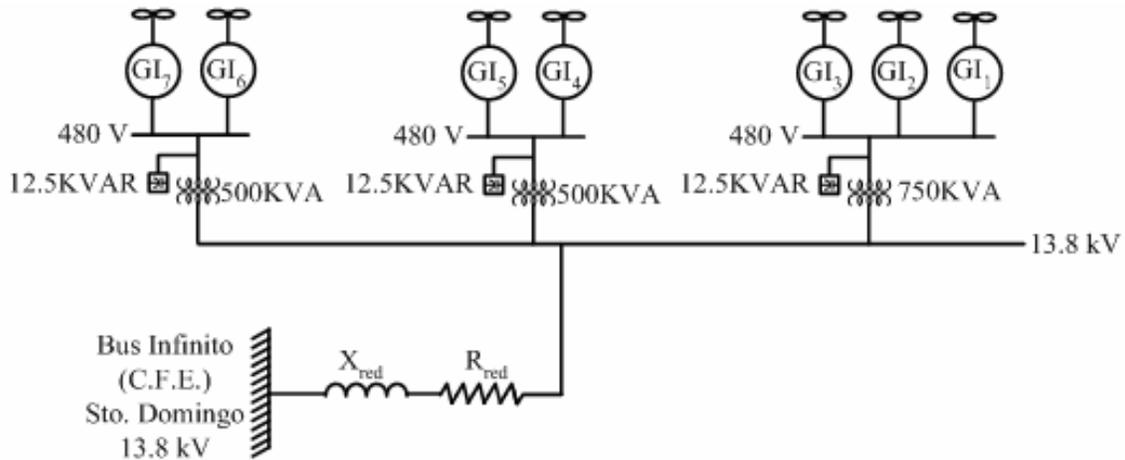


Figura 5.4. Sistema de prueba de La Venta Oaxaca.

Tabla 5.1. Parámetros del SEP del aerogenerador en unidades reales.

Generador de Inducción 6 polos, Vestas V-27 225kW-480V-Δ-60Hz	Generador de Inducción 8 polos, Vestas V-27 50kW-480V-Δ-60Hz	Transformador y Banco de Capacitores.	Línea de Transmisión.
HP=302 $I_{nom}=335$ A $N_{sinc}=1200$ rpm $R_s=0.018$ Ω $R_r=0.019$ Ω $X_s=0.22$ Ω $X_r=0.414$ Ω $X_M=5.8$ Ω $J=7.4$ Kg-m ²	HP=67 $I_{nom}=85$ A $N_{sinc}=900$ rpm $R_s=0.367$ Ω $R_r=0.072$ Ω $X_s=0.45$ Ω $X_r=2.23$ Ω $X_M=18.1$ Ω $J=7.4$ Kg-m ²	Transformadores 750 KVA, 500 KVA 480/13.8 kV % de Impedancia 7.5% Banco de Capacitores 12.5 KVAR	Impedancia de la Línea de Transmisión: $R_{red}=0.673153$ Ω $X_{red}=2.358020$ Ω Bus Infinito $V_B=13.8$ kV

5.2.2 Análisis Ante Pequeños Disturbios de la Central “La Venta” Oaxaca.

Para el desarrollo del análisis ante pequeños disturbios de este sistema, se realiza mediante la aplicación de un equivalente dinámico, ya que la característica principal de este tipo de sistemas en plantas de generación es que emplean un grupo o grupos de máquinas generadoras con la misma capacidad con características iguales interconectadas a uno o varios transformadores, que dependen de la capacidad de generación total de la planta, la cual, para este caso es de 1,575 kW, el sistema equivalente es mostrado en la figura 5.5.

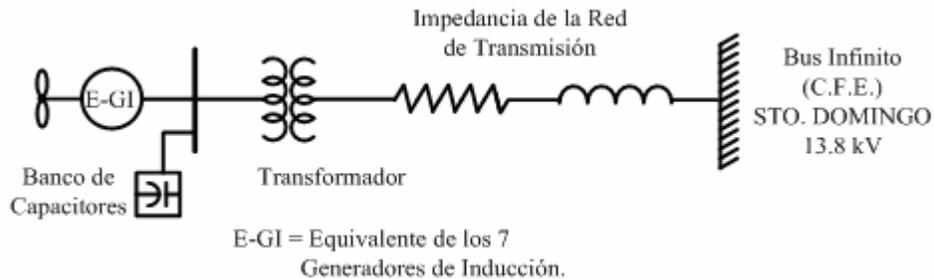


Figura 5.5. Circuito equivalente de la planta de Generación Eoloeléctrica “La Venta”, Oaxaca.

La ventaja de trabajar este tipo de sistemas como un equivalente dinámico, es que se realiza un análisis del sistema más sencillo como el de la figura 5.5, (sistema máquina bus infinito).

A continuación se muestran los eigenvalores obtenidos con los datos originales de la tabla 5.1, donde se indica el modo correspondiente para cada variable de estado según sea el orden del modelo, ver tabla 5.2.

Tabla 5.2. Comportamiento de los eigenvalores de los generadores Vestas de 6 y 8 polos.

Eigenvalores del Generador de 6 Polos.				
Modos	Modelo 5° orden*	Modelo 7° orden	Modelo 9° orden	Variables
8,9			$-35.64644 \pm 6368.726i$	V_{dc}, V_{qc}
6,7		$-160.0118+376.9910i$	$-35.72484 \pm 5614.743i$	I_{dl}, I_{ql}
4,5	$-11.21353+376.6859i$	$-11.21309+376.6859i$	$-19.30898 \pm 376.5318i$	Ψ_{ds}, Ψ_{qs}
2,3	$-5.708685+24.48469i$	$-5.708990+24.32042i$	$-5.054565 \pm 26.79027i$	Ψ_{dr}, Ψ_{qr}
1	-11.40580	-11.40577	-10.16261	n_r
Eigenvalores del Generador de 8 Polos.				
Modos	Modelo 5° orden*	Modelo 7° orden	Modelo 9° orden	Variables
8,9			$-47.91749+3512.477i$	V_{dc}, V_{qc}
6,7		$-571.7104+376.9904i$	$-48.03340+2758.504i$	I_{dl}, I_{ql}
4,5	$-56.99668+375.6818i$	$-57.05508+375.6969i$	$-61.75658+375.7780i$	Ψ_{ds}, Ψ_{qs}
2,3	$-4.947438+8.721601i$	$-4.878801+20.52172i$	$-4.296520+30.36576i$	Ψ_{dr}, Ψ_{qr}
1	-10.09057	-10.11028	-9.135734	n_r

*El modelo de 5° orden esta en función de flujos electromagnéticos.

Observando el valor de los eigenvalores para el modelo de 9° orden, se dice que a medida que el orden del sistema empieza aumentando el número de dispositivos que forman al SEP, el eigenvalor de la velocidad tiende a disminuir sólo un poco, aunque sigue careciendo de frecuencia de oscilación,

existen otras variaciones, como en los eigenvalores de los flujos electromagnéticos en el rotor, debido a que existe un contacto directo con la flecha del generador y con la velocidad; otro desplazamiento que se nota es el de los eigenvalores de los flujos electromagnéticos en el estator que a medida que aumenta el número de dispositivos en el SEP, estos eigenvalores se incrementan, por último, la diferencia que existe entre los eigenvalores de la impedancia de la red de transmisión en el modelo de 7° orden y el modelo de 9° orden, es muy notoria, ya que al agregar el capacitor en el SEP, hace que ambos eigenvalores sean muy parecidos en cuanto al valor de amortiguamiento, debido a la compensación que recibe este SEP, por el capacitor. Este mismo comportamiento lo podemos observar en el generador de 8 polos, obteniendo sus eigenvalores correspondientes con los datos de la tabla 5.1. Graficando a los eigenvalores de cada generador, y en cada orden del modelo, debido a la capacidad, el valor de amortiguamiento y frecuencia de oscilación de cada eigenvalor es diferente, esto se observa en las figuras 5.6, 5.7 y 5.8.

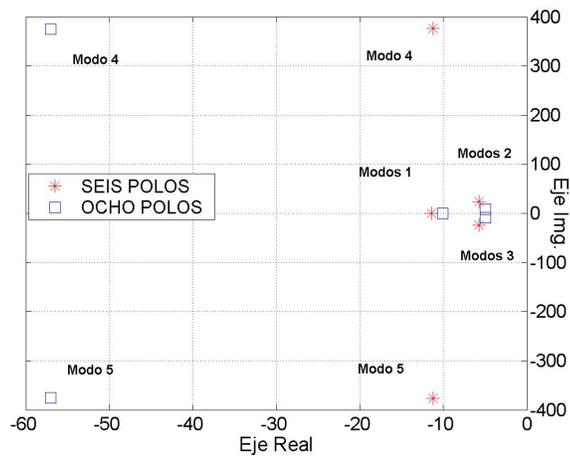


Figura 5.6. Comportamiento de los eigenvalores del modelo de 5° orden para 6 y 8 polos de los generadores Vestas.

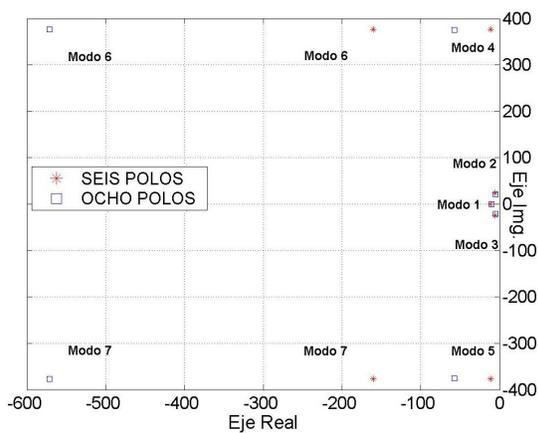


Figura 5.7. Comportamiento de eigenvalores del modelo de 7° orden para 6 y 8 polos de los generadores Vestas*.

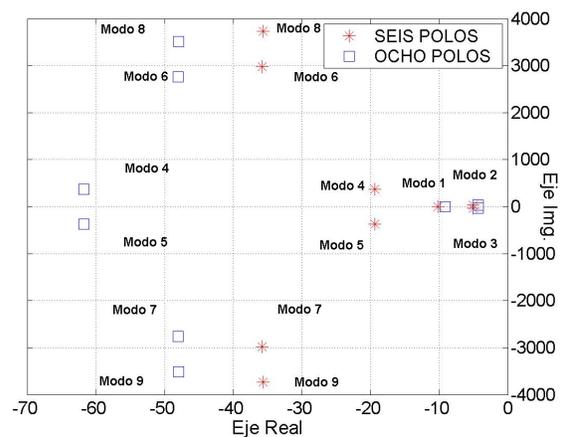


Figura 5.8. Comportamiento de eigenvalores del modelo de 9° orden para 6 y 8 polos de los generadores Vestas*.

Ahora, se muestran los comportamientos de las formas modales del modelo de 9° orden en función de sus eigenvectores derechos, en las figuras 5.9a, 5.9b, 5.9c, 5.9d y 5.9e y factores de participación, en las figuras 5.10a, 5. 10b, 5. 10c, 5. 10d y 5. 10e, tanto para seis y ocho polos.

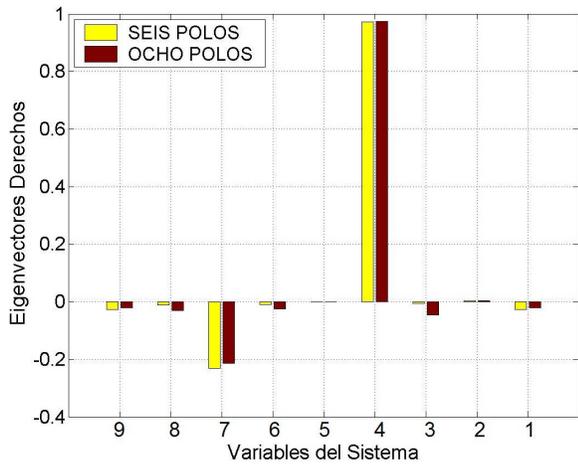


Figura 5.9a. Comportamiento Modal en función del eigenvector derecho en función del modo 1.

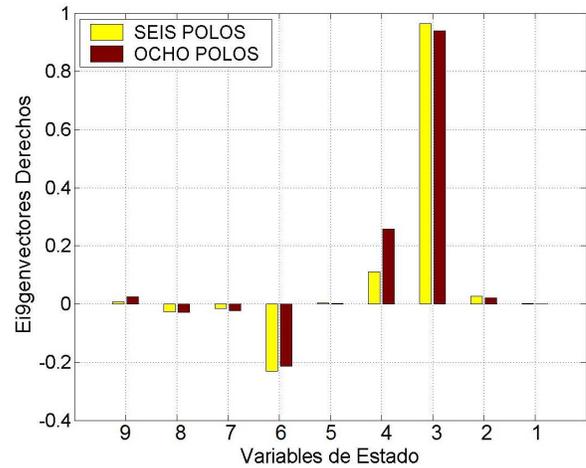


Figura 5.9b. Comportamiento Modal en función del eigenvector derecho en función de los modos 2 y 3.

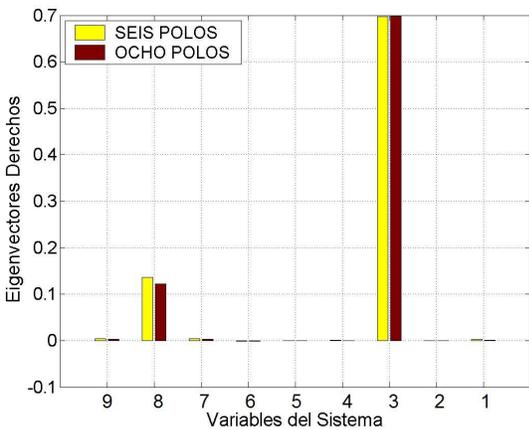


Figura 5.9c. Comportamiento Modal en función del eigenvector derecho en función de los modos 4 y 5.

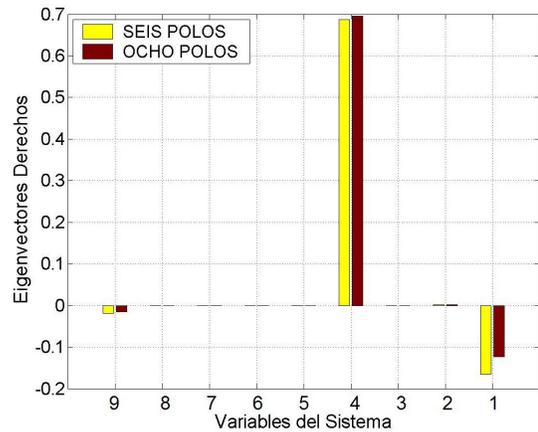


Figura 5.9d. Comportamiento Modal en función del eigenvector derecho en función de los modos 6 y 7.

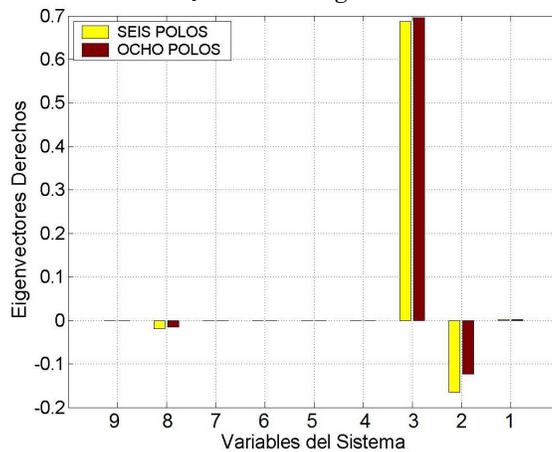


Figura 5.9e. Comportamiento Modal en función del eigenvector derecho en función de los modos 8 y 9.

En las gráficas de los eigenvectores derechos, de cada modo de oscilación del sistema de 9° orden, se tiene el siguiente análisis:

En el modo 1, que representa a la velocidad de la figura 5.9a, los valores relativos de las variables de estado más sobresalientes son: la corriente de la línea de transmisión en el eje d , luego le sigue el flujo electromagnético del estator en el eje d . En la figura 5.9a, se tiene este mismo comportamiento en cuanto al valor relativo de las variables de estado en el modelo de 9° orden tanto para el generador de 8 polos como 6 polos. En los modos 2 y 3 que corresponden a los flujos electromagnéticos en el rotor en ambos ejes, los valores relativos más sobresalientes de las variables de estado en función de los eigenvectores derechos son el valor de la corriente de la red de transmisión en el eje q y luego los valores relativos del flujo electromagnético en el estator en el eje q , y por último el valor relativo del flujo electromagnético en el rotor en el eje d , el cual, a diferencia de los dos primeros sus valores relativos respectivos a estas variables de estado es más sobresaliente debido a que esta forma modal corresponde al de los flujos electromagnéticos en el rotor para ambos ejes, además se observa que este eigenvector derecho es similar para el generador de 8 polos.

En los modos 4 y 5 que pertenecen a los flujos electromagnéticos en el estator para ambos ejes, ver figura 5.9c, el análisis es el siguiente: los valores relativos más sobresalientes son el voltaje en el capacitor para el eje q y el flujo electromagnético en el rotor en el eje q , esto es debido a que al agregarle el capacitor al SEP, afecta directamente al comportamiento del voltaje en el capacitor, esto es debido a que el valor del voltaje es el mismo que debe de a ver en las terminales de la máquina de inducción, esto es el estator del generador, es por ello que aunque esta forma modal sea la correspondiente a los flujos en el estator, realmente influye mucho los valores relativos del voltaje en el capacitor y el valor de los flujos en el rotor.

En la forma modal 6 y 7, representan los valores de las corrientes de la línea de transmisión en ambos ejes, los valores relativos más sobresalientes de los eigenvectores derechos son de los flujos electromagnéticos en el rotor en el eje q , además de la velocidad y en un valor muy pequeño el voltaje del capacitor en el eje d .

Por último, en la forma modal correspondiente a los voltajes en el capacitor, la cual es presentada en el modelo de 9° orden por los modos 8 y 9, tiene como valores relativos más sobresalientes son de los flujos electromagnéticos en el rotor en ambos ejes, pero también se observa que el valor relativo en el voltaje del capacitor en el q , aunque es mínimo tiene influencia sobre las demás variables.

En general, con respecto al comportamiento de los eigenvectores derechos del modelo de 9° orden, se puede decir que en estas formas modales, el valor relativo de los flujos electromagnéticos tanto en el estator como en el rotor siempre se encuentra presente, definiendo el comportamiento de la forma modal para cada variable de estado.

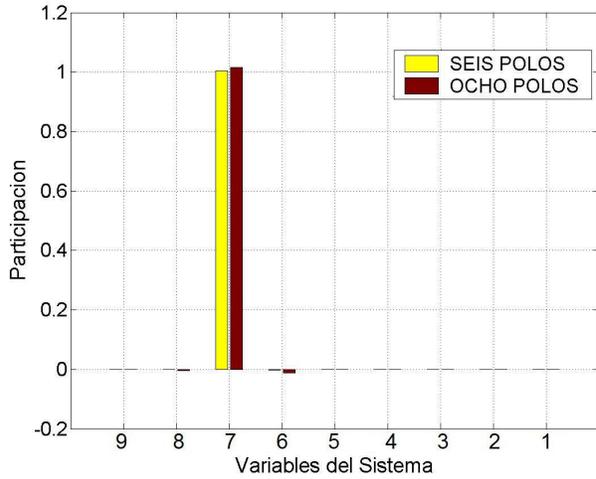


Figura 5.10a. Comportamiento de los Factores de Participación del modo 1.

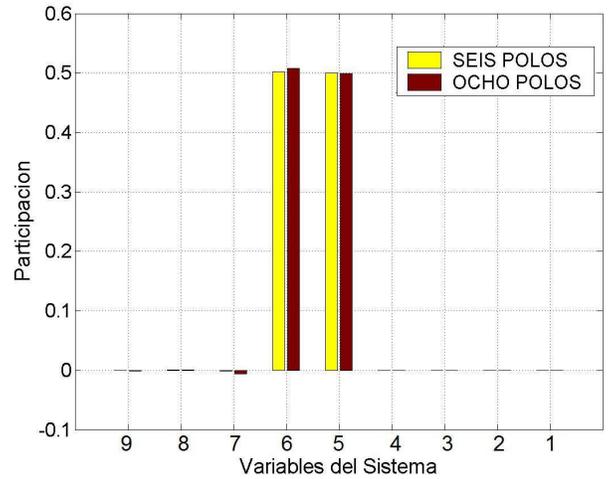


Figura 5.10b. Comportamiento de los Factores de Participación de los modos 2 y 3.

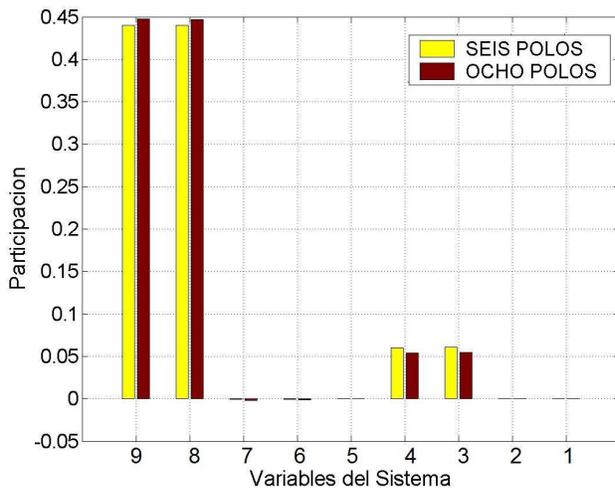


Figura 5.10c. Comportamiento de los Factores de Participación de los modos 4 y 5.

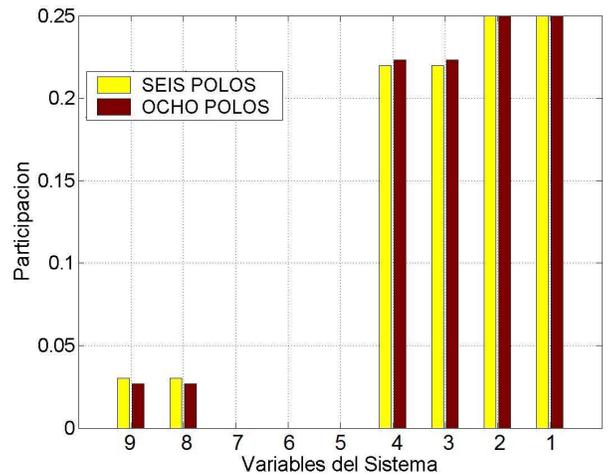


Figura 5.10d. Comportamiento de los Factores de Participación de los modos 6 y 7.

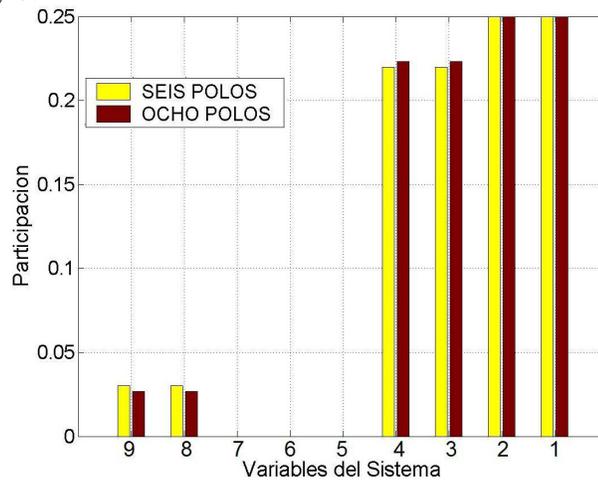


Figura 5.10e. Comportamiento de los Factores de Participación de los modos 8 y 9.

Las figuras que muestran el comportamiento de los factores de participación para cada forma modal, se puede observar en las figuras 5.10a, 5.10b, 5.10c, 5.10d y 5.10e, de la siguiente manera: en la figura 5.10a, la cual muestra el comportamiento modal de la velocidad, la participación de las variables de estado más dominantes es la corriente en la línea de transmisión en el eje d . Pero si se observan los factores de participación en los modos 2 y 3, que representan a los flujos electromagnéticos en el rotor para ambos ejes, se observa que la participación sigue siendo por parte de la línea de transmisión pero en el eje q , junto con la participación del flujo en el estator en el eje d , la participación de la línea de transmisión, solamente afecta a los modos 1, 2 y 3 del modelo de 9° orden, no así, en los modos 4, 5, 6, 7, 8 y 9, se puede observar que en los modos 4 y 5 que representan a los flujos en el estator la participación se da en los flujos en el estator en ambos ejes, y además de los voltajes en el capacitor en los dos ejes, debido a que el voltaje en el capacitor afecta directamente el voltaje en las terminales de la máquina y esto se ve reflejado en los flujos del estator de la máquina. La participación de los modos 6, 7, 8 y 9, es por parte de la velocidad, de los flujos en el rotor en ambos ejes, y un flujo en el estator en el eje q . Mencionando que el comportamiento de los modos 6 y 7 es igual al de los modos 8 y 9, además se observa que la participación para el generador de 8 polos es muy similar al del generador de 6 polos, ya que su variación se da en la capacidad de cada máquina.

En los eigenvalores se puede observar que estos sistemas son muy estables, independientemente si solamente se tiene un modelo de 5° orden, donde muestre los comportamientos de las variables de estado de los generadores o bien, cuando este tipo de sistemas eléctricos de potencia se les vaya agregando más dispositivos como son la impedancia de la red de transmisión o bien un banco de capacitores para ayudarlos en su autoexcitación y mantener un valor de voltaje estable en las terminales del generador, se observa que los eigenvalores que corresponden a cada variable en un orden de modelo determinado, solamente los eigenvalores sufren una modificación en sus frecuencias de oscilación que corresponden a cada variable de estado, pero nunca se ven afectados de manera severa en cuanto a su amortiguamiento o frecuencia de oscilación. A continuación, se muestra un caso donde se hacen dos simulaciones de los generadores de 6 y 8 polos donde el valor de la reactancia capacitiva que representa a cada banco de capacitores es considerada igual al valor de la reactancia magnetizante de la máquina y el otro manejando el valor que se encuentra operando en la Venta, ver tabla 5.3.

Tabla 5.3. Comportamiento de los eigenvalores de los generadores Vestas de 6 y 8 polos en función de la variación de la reactancia capacitiva que representa el banco de capacitores.

Eigenvalores del Generador de 6 Polos.			
Modos	Modelo 9° orden		Variables
	Valor real en el sistema de Xc	Cuando Xc = Xm	
8,9	-35.64644 + 6368.726i	-35.62004+3737.924i	V_{dc}, V_{qc}
6,7	-35.72484 + 5614.743i	-35.76057+2983.951i	I_{dl}, I_{ql}
4,5	-19.30898 + 376.5318i	-19.34470+376.5333i	Ψ_{ds}, Ψ_{qs}
2,3	-5.054565 + 26.79027i	-5.014288+35.94572i	Ψ_{dr}, Ψ_{qr}
1	-10.16261	-10.15216	n_r

Eigenvalores del Generador de 8 Polos.			
Modos	Modelo 9° orden		Variables
	Valor real en el sistema de Xc	Cuando Xc = Xm	
8,9	-47.91787 + 3541.126i	-47.91749+3512.477i	V_{dc}, V_{qc}
6,7	-48.03281 + 2787.152i	-48.03340+2758.504i	I_{dl}, I_{ql}
4,5	-61.75593 + 375.7776i	-61.75658+375.7780i	Ψ_{ds}, Ψ_{qs}
2,3	-4.297276 + 30.30711i	-4.296520+30.36576i	Ψ_{dr}, Ψ_{qr}
1	-9.135918	-9.135734	n_r

De manera gráfica, en las figuras 5.11 y 5.12, se observa que realmente el efecto de usar el valor de la reactancia magnetizante X_m , y el valor real de banco de capacitores no afecta en nada al sistema, ya que se encuentran ambos valores dentro del rango de operación para autoexcitar y compensar el voltaje en las terminales de las máquinas.

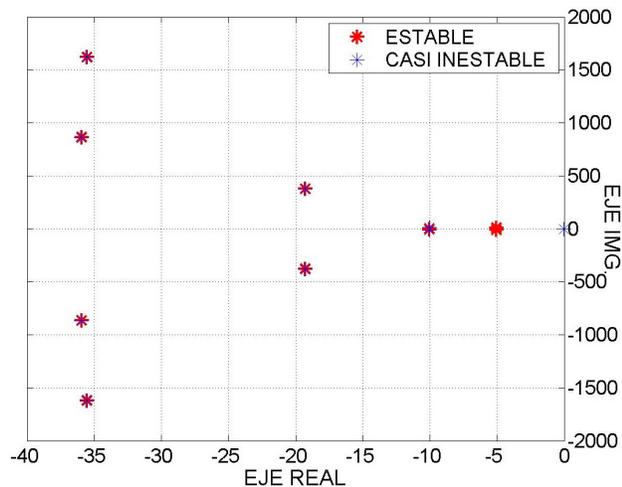


Figura 5. 11. Eigenvalores del generador de 6 polos variando su Xc

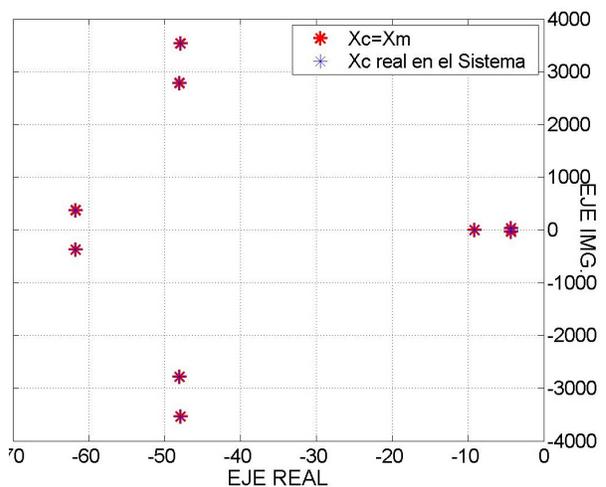


Figura 5. 12. Eigenvalores del generador de 8 polos Variando su Xc

Haciendo una variación en cuanto al valor del deslizamiento, tanto para el generador de 6 polos como para el de 8 polos, se observa que el comportamiento de los eigenvalores en cada generador es observado en el desplazamiento hacia la derecha del eigenvalor que representa a la velocidad; esta variación es dada tanto para el generador de 6 como de 8 polos. Este tipo de generadores debido a las características de sus

parámetros y al valor de su capacidad, se especifica la variación de los eigenvalores en función de los parámetros que el generador este manejando para su operación, además de su capacidad; los eigenvalores para esta condición, se muestran en la tabla 5.4 y figuras 5.13 y 5.14.

Tabla 5.4. Comportamiento de los eigenvalores de los generadores Vestas de 6 y 8 polos en función de la variación del deslizamiento.

Eigenvalores del Generador de 6 Polos.			
Modos	Modelo 9° orden		Variables
	Caso Estable	Caso Crítico	
8,9	$-35.64644 \pm 6368.726i$	$-35.53330 \pm 1618.879i$	V_{dc}, V_{qc}
6,7	$-35.72484 \pm 5614.743i$	$-35.95901 \pm 864.9353i$	I_{dl}, I_{ql}
4,5	$-19.30898 \pm 376.5318i$	$-19.27366 \pm 376.5408i$	Ψ_{ds}, Ψ_{qs}
2,3	$-5.054565 \pm 26.79027i$	$-10.04974 \pm 12.92322i$	Ψ_{dr}, Ψ_{qr}
1	-10.16261	-0.0001677453	n_r

Eigenvalores del Generador de 8 Polos.			
Modos	Modelo 9° orden		Variables
	Caso Estable	Caso Crítico	
8,9	$-47.91787 + 3541.126i$	$-47.91659 \pm 3512.472i$	V_{dc}, V_{qc}
6,7	$-48.03281 + 2787.152i$	$-48.03532 \pm 2758.494i$	I_{dl}, I_{ql}
4,5	$-61.75593 + 375.7776i$	$-61.59029 \pm 375.7583i$	Ψ_{ds}, Ψ_{qs}
2,3	$-4.297276 + 30.30711i$	$-9.029728 \pm 11.09667i$	Ψ_{dr}, Ψ_{qr}
1	-9.135918	-0.00005819335	n_r

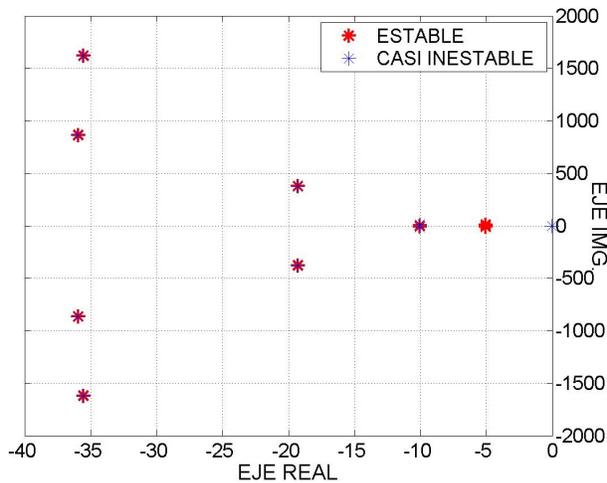


Figura 5. 13. Eigenvalores del generador de 6 polos variando su deslizamiento.

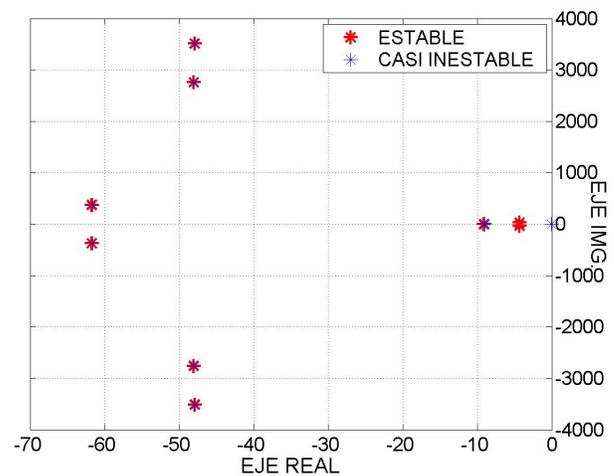


Figura 5. 14. Eigenvalores del generador de 8 polos variando su deslizamiento.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

6.1 CONCLUSIONES.

En los sistemas eléctricos de potencia pueden llegar a ocurrir tanto pequeños como grandes disturbios que afecten el comportamiento de estos, y aunque se considere una perturbación pequeña, este tipo de fallas pueden llegar a afectar las condiciones de operación de un sistema de potencia y pasar de condiciones normales a un caso de inestabilidad en el sistema, como las que se presentaron en los capítulos IV y V.

Este capítulo se divide en tres partes, en la primera parte se presentan las conclusiones en función del análisis de estabilidad ante pequeños disturbios de los generadores de inducción, en la segunda parte se muestran las contribuciones que se obtuvieron con el desarrollo de este análisis. La tercera parte se dedica a las sugerencias y recomendaciones para trabajos futuros.

Los resultados que se presentan en el capítulo IV, son resultados de un análisis de estabilidad ante pequeños disturbios con generadores de inducción, en los cuales se emplearon dos sistemas de prueba que a continuación se mencionan.

6.1.1 Conclusiones del sistema de prueba según referencia [71].

En este sistema de prueba, se comparan los resultados que se obtuvieron con el programa *frecuencia.for*, con el fin de validar los resultados que da el programa, con los valores de los eigenvalores correspondientes al SEP, esta comparación se realiza con los modelos de 11° y 13° orden, obteniendo resultados aceptables en cuanto al comportamiento de los eigenvalores del sistema, como se observa en la tabla 4.2.

6.1.2 Conclusiones del sistema de prueba de laboratorio [10].

En este sistema, se realizó una simulación de manera práctica con el equipo de laboratorio, donde se llevó hasta un punto máximo de operación con la aplicación de un pequeño disturbio, este punto de operación se realizó dentro de un rango estable para el generador, comparando los resultados obtenidos en el laboratorio en función de la potencia eléctrica en las mismas condiciones de operación tanto del modelo

lineal y no lineal respectivamente, haciendo una adición de los comportamientos de la aplicación del disturbio y el tiempo en que cada curva llego a estabilizarse. Además se hicieron otras simulaciones con el modelo no lineal de [7,38], para observar con detalle la variación de las demás variables involucradas en el modelo del generador, en estas condiciones de operación del sistema, además se realiza al mismo tiempo la validación del programa en el tiempo del modelo lineal con el programa del modelo no lineal.

Se hace un análisis modal utilizando el modelo lineal de 5° orden, en función de las variaciones de deslizamiento y mediante el modelo de 9° orden, se hacen variaciones tanto a la impedancia de la red de transmisión como su compensación capacitiva, obteniendo sus formas modales y factores de participación.

Se comparan a los eigenvalores obtenidos con el programa de *frecuencia.for*, el cual emplea el método de eigenanálisis, con los eigenvalores obtenidos, utilizando el método de Prony, el cual utiliza las curvas obtenidas con el modelo lineal y no lineal de la potencia eléctrica, observando una mayor similitud con los eigenvalores obtenidos del modelo no lineal, debido a la información que se puede obtener de un modelo no lineal que de un modelo lineal.

Por último, se hace un análisis de sensibilidad paramétrica con el modelo de 5° orden, donde se hacen variaciones con el valor de la reactancia del estator, y haciendo una comparación de estas variaciones con los obtenidos de las variaciones directas del valor de x_s , donde se obtiene un mejor comportamiento de los eigenvalores cuando se utiliza el método de sensibilidad que cuando se hacen las variaciones de manera directa.

6.1.3 Conclusiones del sistema de prueba de la Venta Oaxaca [93].

En el capítulo cinco, se realiza un análisis de estabilidad ante pequeños disturbios utilizando un equivalente dinámico de un parte eólico como es el de La Venta, Oaxaca, en el cual se hace el estudio tomando en cuenta el comportamiento modal de los dos generadores que conforman el aerogenerador.

Primeramente se observa el comportamiento de los eigenvalores de los modelos de 5°, 7° y 9° orden, para cada aerogenerador, observando un muy buen amortiguamiento y estabilidad en cuanto a cada eigenvalor del sistema; además se muestran sus formas modales para conocer la influencia de ciertas variables de estado sobre determinados modos de oscilación. También se hace un análisis de estos dos generadores pero con la diferencia de la variación de los bancos de capacitores y con la variación del deslizamiento, en donde se observa que de las dos variaciones, la más crítica es la variación del

deslizamiento, donde el sistema llega a comportarse de manera crítica, ya que si se le aplica un pequeño disturbio, el sistema tendría a la inestabilidad.

6.2 CONTRIBUCIONES.

- Se desarrollan dos programas para estudios de estabilidad ante pequeños disturbios uno en la frecuencia, haciendo un eigenanálisis, obteniendo los eigenvalores, eigenvectores derechos e izquierdos y factores de participación, además de un programa en el tiempo, obteniendo los comportamientos gráficos de cada variable que intervienen en los modelos respectivos.
- Se obtienen los modelos matemáticos en función de flujos electromagnéticos para modelos de quinto orden, de séptimo, noveno, onceavo y treceavo orden, para sistemas con máquina de inducción como generador en sistema máquina bus infinito.
- Se obtiene un equivalente dinámico de la Venta Oaxaca.
- Se realiza dos análisis de estabilidad ante pequeños disturbios tanto de un sistema de laboratorio como de un sistema eólico real.
- Se hace una comparación entre el método de eigenanálisis y método de Prony.
- Se comparan las respuestas de un sistema lineal y no lineal de una máquina de inducción como generador.

6.3 SUGERENCIAS Y RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS.

- Desarrollo de un estudio de estabilidad en sistema multimáquinas para ver el efecto de los generadores eólicos en el SEP.
- Análisis del efecto de los controles de velocidad y de voltaje en generadores eólicos ante pequeños y grandes disturbios.
- Implementación de equipo eléctrico para monitorear y controlar un sistema de laboratorio para analizar y observar las interacciones de los generadores de inducción con otro tipo de dispositivos y máquinas síncronas.

REFERENCIAS.

- [1] Wilson Kimbark Edward, *Power System Stability: Elements of Stability Calculations*, Volumen I, Editorial Dover Publications, inc., New York, 1956, pp. 355.
- [2] J. Grainger John, D. Stevenson William *Análisis de Sistemas de Potencia*. Trd. Carlos Lozano Sousa, Editorial McGraw-Hill, México, 1996, pp. 740.
- [3] Prabha Kundur, *Power System Stability and Control*. Editorial McGraw-Hill, United States of America, 1994, pp. 1176.
- [4] Arturo Román Messina. *Análisis y Control de Oscilaciones Electromecánicas en Sistemas Eléctricos de Potencia*. Curso de Estabilidad ante Pequeños Disturbios, Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, Mayo 23-27 de 1994.
- [5] Castellanos Bustamante Rafael, *Análisis de Oscilaciones Locales e Interárea en Sistemas Eléctricos de Potencia*. Tesis de Grado de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, SEPI ESIME, México, D. F., 1997.
- [6] Van Cutsem Thierry, Vournas Costas, *Voltage Stability of Electric Power Systems*. Editorial Kluwer Academic Publishers, London, Great Britain, 1998, pp. 376.
- [7] Elmer Santos Mora. *Interacción del Generador de Inducción con un Sistema Eléctrico de Potencia*. Tesis de Grado de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, SEPI ESIME, México, D. F., Marzo, 1998.
- [8] Elmer Santos Mora, Tomás I. Asiaín, Daniel Ruiz, Daniel Olguín Salinas, *Respuesta Dinámica de los Generadores de Inducción*. Artículo presentado en la Reunión de Verano, RVP – AI/1998 IEEE sección México, Acapulco Gro. Julio 1998, pp. 107-112.
- [9] Elmer Santos, T. Asiaín, D. Ruiz, D. Olguín, *The Effect of Load Characteristics on the Transient Stability Studies of a Laboratory Electric Power System Including Induction Generators*. IEEE Power Tech'99, Conference, Budapest, Hungary, August 29 – September 2, 1999.
- [10] Elmer Santos Mora; Tomás I. Asiaín Olivares, Daniel Ruiz Vega, Daniel Olguín Salinas, *The Effect of Induction Generators on the Transient Stability of a Laboratory Electric Power System*. ELSEVIER, Electric Power Systems Research; No. 61; México, D. F., September, 2001; pp. 211-219.
- [11] Complejo Hidroeléctrico Grijalva, *Central Eoloeléctrica La Venta, Oaxaca*, Cuarto Congreso Nacional de Máquinas Eléctricas Rotatorias y Tercer Simposium Internacional de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Sección Veracruz, Asociación Mexicana de Ingenieros Mecánicos y Electricistas, A. C., Octubre 16-18, Veracruz, Veracruz, 1994.
- [12] J. L. Guardado, J. H. Tovar, F. Cisneros, *Incorporación de Aerogeneradores al Sistema Eléctrico Nacional: Beneficios Energéticos y Operación en Estado Estable*, Quinto Congreso Nacional de Máquinas Eléctricas Rotatorias y Cuarto Simposium Internacional de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Sección Veracruz, Asociación Mexicana de Ingenieros Mecánicos y Electricistas, A. C., Octubre 16-18, Veracruz, Veracruz, 1995.
- [13] J. H. Tovar, A. Silva, J. L. Guardado, F. Cisneros, *Análisis en Estado Estacionario de la Incorporación de Generación Eólica al Sistema Eléctrico Nacional*, Sexto Congreso Nacional de Máquinas Eléctricas Rotatorias y Quinto Simposium Internacional de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Sección Veracruz, Asociación Mexicana de Ingenieros Mecánicos y Electricistas, A. C., Octubre 16-18, Veracruz, Veracruz, 1996.
- [14] Jorge Guillermo Calderón Guizar. *Estudios de estabilidad en el dominio de la frecuencia*, Tesis de grado de maestría, Instituto Politécnico Nacional, SEPI ESIME, México, D. F., 1986.
- [15] Vénikov V., *Procesos Transitorios Electromecánico en los Sistemas Eléctricos de Potencia*. Editorial MIR, Moscú, URSS, 1988, pp. 502.

- [16] Jan Machowski, Janusz W. Bialek, James R. Bumby, *Power System Dynamics and Stability*. Editorial John Wiley & Sons Ltd., New York, NY, USA, 1997, pp. 461.
- [17] Pankaj K. Sen, Ph.D., P.E., John Nelson, P.E., *Application Guidelines for Induction Generators*. IEEE Transactions on Industry Application, paper No. WC1-5.1, 1997.
- [18] P. C. Krause Paul, *Analysis of Electric Machinery*, 2da edición, editorial McGraw-Hill, New York, state, 2002, pp. 564.
- [19] Ismael González García, David Romero Romero, *Respuesta del Generador de Inducción en forma Aislada y conectada a un Sistema Bus Infinito aplicado en Plantas Eoloeléctricas*. Artículo presentado en la Reunión de Verano, RVP – AI/2004-SIS-30 IEEE sección México, Acapulco Gro. Del 11-17 de Julio de 2004.
- [20] Ismael González García, David Romero Romero, *Análisis del Generador de Inducción Empleado en Plantas Eoloeléctricas*. Artículo presentado en la Reunión de Verano, RVP – AI/2004-SIS-32 IEEE sección México, Acapulco Gro. Del 11-17 de Julio de 2004.
- [21] Sung Chun Kuo, Li Wang, *Dynamic Eigenvalue Analysis of a Self-excited Induction Generator Feeding an Induction Motor*, IEEE, Power Engineering Society Winter meeting, 2001, published: 2001, Vol. 3, pp. 1393-1397.
- [22] O. Wasynczuk, D. T. Man, J. P. Sullivan, *Dynamic Behavior of a Class of Wind Turbine Generators During Random Wind Fluctuations*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 6, June 1981, pp. 2837-2845.
- [23] Lázaro G. Mercedes, Asiaín O. Tomas, Olguín S. Daniel, *Estabilidad ante Pequeños Disturbios de un Generador de Inducción – Bus Infinito*, Séptimo Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas. IPN-SEPI ESIME, Noviembre 2003.
- [24] Lázaro G. Mercedes, Asiaín O. Tomas, Olguín S. Daniel, *Análisis de Estabilidad ante Pequeños Disturbios de un Generador de Inducción*, Artículo presentado en la Reunión de Verano, RVP – AI/2004-SIS-12 IEEE sección México, Acapulco Gro. Del 11-17 de Julio de 2004.
- [25] Centro de Investigación en Energía: <http://miquiztli.cie.unam.mx/xml/>
- [26] European Wind Energy Association: <http://www.ewea.org/>
- [27] Daniel Olguín Salinas, *The Effect of Load Characteristics on Multi-Machine Electric Power System Dynamic Stability*. Tesis de Grado de Doctorado, University of London, Imperial College of Science and Technology, 1979.
- [28] J. F. Hauer, C. J. Demeure, L. L. Scharf, *Initial Results in Prony Analysis of Power Systems Response Signals*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 1, February 1990, pp. 80-88.
- [29] Carlos Alberto Rivera Salamanca, *Análisis de Interacciones Torsionales Subsíncronas en Sistemas de Potencia con Compensación Serie y Paralelo*, Tesis de Grado de Doctorado, Instituto Politécnico Nacional, SEPI ESIME, México, D. F., Septiembre, 2000.
- [30] Daniel Sbarbaro, Ruben Peña, *A Non-Linear Wind Velocity Observer for a Small Wind Energy System*, Proceedings of the 39th IEEE, Conference on Decision and Control, Sydney, Australia, December, 2000, pp. 3086.
- [31] Claudio L. Souza, Luciano M. Neto, Geraldo C. Guimarañes, Adelio J. Moraes, *Power System Transient Stability Analysis Including Synchronous and Induction Generators*, IEEE Porto Power Tech Conference 10th -13th September, Porto, Portugal.
- [32] Kundur P., Wang Lei, *Small Signal Stability Analysis: Experiences, Achievements, and Challenges*. 2002, pp. 6-12.
- [33] Comisión Nacional de Energía, *Las Energías Renovables en México y el mundo, Semblanza*, 2003.
- [34] Hugo Pérez R., *Desarrollo Tecnológico de la Gerencia de Uso de Energía Eléctrica*. Boletín IIE, marzo-abril del 2001.
- [35] Ek Wee. Tan, *Power System Dynamic Security Assignment via Prony Analysis*, Thesis of the Engineering, University of Queensland, In the Department of Information Technology and Electrical Engineering (ITEE), October 2003.

- [36] Comisión Nacional de Energía: <http://www.conae.gob.mx/cofer/cofer.html>
- [37] Energías Renovables: <http://www.energias-renovables.com/>
- [38] Carlos Alberto Rivera Salamanca. *Modelos Aproximados para Motores de Inducción en Estudios de Estabilidad Transitoria en Sistemas Eléctricos de Potencia*. Tesis de Grado de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, SEPI ESIME, México, D. F., 1989.
- [39] J. F. Hauer, Fellow, *Applicatoion of Prony Analysis to the Determination of Modal Content and Equivalent Models for Measured Power System Response*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No. 3, August 1991, pp. 1062-1068.
- [40] C. E. Grund, J. J. Paserba, J. F. Hauer, S. Nilsson, *Comparison of Prony and Eigenanalysis for Power System Control Design* IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 3, August, 1993, pp. 964-970.
- [41] T. Lobos, J. Rezmer, P. Schegner, *Parameter Estimation of Distorted Signals Using Prony Method*, IEEE, Bologna PowerTech, Faculty of Engineering-University of Bologna, Bologna, Italy, June 23-26, 2003.
- [42] Robert H. Nelson, Thomas A. Lipo, Paul C. Krause, *Stability Analysis of a Symmetrical InductionMachine*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-88, No. 11, November 1969, pp. 1710-1717.
- [43] N. Gunaratnam, D. W. Novotny, *The Effects of Neglecting Stator Transients in Induction Machine Modeling*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 6, Nov/Dec 1980, pp. 2050-2059.
- [44] E. N. Hinrichsen, P. J. Nolan, *Dynamic and Stability of Wind Turbine Generators*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 8, August 1982, pp. 2640-2648.
- [45] Abdel-Magid Y. L., Ei-Amin I. M., *Dynamic Stability of Wind-Turbine Generators under Widely Varying Loading Conditions*, Electrical Power & Energy Systems, April 1985, Revised: 29 December 1986.
- [46] IEEE Standards Coordinating Committee 23, *Dispersed Storage and Generation, an American National Standard IEEE Recommended Practice for Utility Interconnection of Small Wind Energy Conversion System*. IEEE Standards Board, ANSI/IEEE Std. 1021-1988, Approved December 11, 1986, IEEE Standards Board, Approved May 18, 1987, American National Standards Institute, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc 345 East 47th Street, New York, NY 10017, USA.
- [47] Kinh D. Pham, ELCON Associates, Inc, *Cogeneration Application: Interconnection of Induction Generators with Public Electric Utility*, Rural Electric Power Conference, 1991, paper presented at the 35th Annual Conference Published: 1991, pagD4/1-D4/7.
- [48] R. M. Hilloowala, A. M. Sharaf, *Modeling, Simulation and Analysis of Variable Speed Constant Frequency Wind Energy Conversion Scheme Using Self Excited Induction Generator*, 1991.
- [49] X. S. Chen, A. J. Flechsig, C. W. Pang, L. M. Zhuang, *Digital Modeling of and Induction Generator*. IEEE International Conference on Advance in Power System Control, Operation and Management, Hong Kong, Japan, November, 1991, pp. 720-726.
- [50] Arturo Román Messina. *Coordination of Static VAR Compensators to Damp Power and Voltage Oscillations*. Tesis de Grado de Doctorado, University of London, Imperial College of Science and Technology. 1990.
- [51] A. G. Bakirtzis, *A Probabilistic Method for the Evaluation of the Reliability of Stand Alone Wind Energy Systems*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 7, No. 1, March 1992, pp. 99-107.
- [52] Liang Zhixiang, Yang Shunchang, Quing Yihong, Xu Guoyu, *The Effect of Asynchronous Generators on the Transient Stability of Power Systems*, IEEE TENCON, Beijing, 1993.
- [53] S. P. Singh, B. Singh, M. P. Jain, *Comparative Study on the Performance of a Commercially Designed Induction Generator with Induction Motors Operating as Self Excited Induction Generators*, IEE Proceedings-C, Vol. 140, No. 5, September 1993.

- [54] G. S. Stavrakakis, G. N. Kariniotakis, *A general Simulation Algorithm for the Accurate Assessment of Isolated Diesel-Wind Turbines Systems Interaction. Part I: A General Multimaquine Power System Model*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 10, No. 3, September 1995.
- [55] G. S. Stavrakakis, G. N. Kariniotakis, *A General Simulation Algorithm for the Accurate Assessment of Isolated Diesel-Wind Turbines Systems Interaction. Part II: Implementation of the Algorithm and Case-Studies with Induction Generators*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 10, No. 3, September 1995.
- [56] Yoshinori Sakamoto, Mitsuo Natsusaka, Koichi Murakami, *A Parametric Induction Generator useful for the effective Utilization of Wind and Solar Power*, IEEE Transactions ON Magnetics, Vol. 31, No. 6, November, 1995.
- [57] B. Connor, W. E. Leithead, *Performance Assessment of Variable Speed Wind Turbines, Opportunities and Advances in International Power Generation*, 18-20th, March, 1996.
- [58] Jan Svensson, *Simulation of Power Angle Controlled Voltage Source Converter Using a Linear Quadratic Method in a Wind Energy Application*, IEEE, Computers in Power Electronics, 1996, Workshop on Published: 1996, pp. 157-162.
- [59] R. S. Pena, G. M. Asher, J. C. Clare, R. Cardenas, *A Constant Frequency constant Voltage Variable Speed Stand Alone Wound Rotor Induction Generator*, IEE Conference Publication No. 419, The University of Nottingham, Nottingham, England, 18-20th March, 1996.
- [60] R. S. Pena, J. C. Clare, G. M. Asher, *A Doubly Fed Induction Generator Using Back-to-Back PWM Converters Supplying an Isolated Load from a Variable Speed Wind Turbine*, IEE Proceeding online No. 19960454, The University of Nottingham, Nottingham, England, 11th March, 1996, pp. 380-387.
- [61] Anders Grauers, *Efficiency of Three Wind Energy Generators Systems*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 11, No. 3, September 1996.
- [62] Bogdan S. Borowy, Ziyad M. Salameh, *Dynamic Response of a Stand-Alone Wind Energy Conversion System with Battery Energy Storage to a Wind Gust*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 12, No. 1, March, 1997. pp 73-77.
- [63] Li Wang, Jian-Yi Su, *Determination of Minimum and Maximum Capacitances of an Isolated Seig using Eigenvalue Sensitivity Approach*, Power System Technology, Proceeding POWER'98, 1998, International Conference on Published: 1998, Vol.1, pp.610-614.
- [64] T. Jiang, N. S. Bao, Q. X. Chen, *Modeling and Identification of Wind Energy Conversion System*, IEEE, 1997.
- [65] Wu Xueguang, Wang Weisheng, Dai Huizhu, Chen Yunping, *Application of Models of the Wind Energy Conversion System to Wind Power Dynamic Analysis*, IEEE, Power System Technology, Proceeding POWERCON'98, International Conference, published: 1998, 1998, Vol. 2, pp.1406-1411.
- [66] R. Chedid, H. Akiki, Saifur Rahman, *A Decision Support Technique for the Design of Hybrid Solar-Wind Power Systems*. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 13, No. 1, March 1998, pp. 76-82.
- [67] Hernán De Battista, Ricardo Julián Mantz, *Sliding Mod Control of Torque Ripple in Wind Energy Conversion Systems with Slip Power Recovery*, IEEE, Industrial Electronic Society, 1998, IECON '98, Proceeding of the 24th Annual Conference of the IEEE, published: 1998, Vol.2, pp. 651-656.
- [68] Miguel A. Mayosky, Gustavo I. E. Cancelo, *Adaptive Control of Wind Energy Conversion Systems Using Radial Basis Networks*, , IEEE, Neural Networks Proceeding, 1998, Word of Congress on Computational Intelligence. The 1998, International Joint Conference on Published: 1998. Vol. 2, pp. 996-1001.
- [69] Sergio Daher, Ricardo Pontes, Fernando Antunes, *A Stand-Alone Three-Phase Induction Generator-Based Wind Energy Storage System*, IEEE, Energy Processing and Control Group – GPEC, 1999, pp. 1397-1402.

- [70] Shashank Wekhande, Vivek Agarwal, *A Simple Wind Driven Self-Excited Induction Generator with Regulated Output Voltage*, IEEE, Telecommunication Energy Conference, 1999, INTELEC'99. The 21st International Published: 1999, pp.371.
- [71] Ezzeldin S. Abdin y Wilson Xu, *Control Design and Dynamic Performance Analysis of a Wind Turbine-Induction Generator Unit*, IEEE, Transactions on Energy Conversion, Vol. 15, No. 1, March, 2000, pp. 91-96.
- [72] Sung-Chun Kuo, Li Wang, *Steady-State Performance and Dynamic Stability of a Self-Excited Induction Generator Feeding an Induction motor*, IEEE, Power Engineering Society Winter meeting, 2001, Vol. 1, pp. 277-280.
- [73] Charles Lemogo Kana, Manoharan Thamodharan, Albrecht Wolf, *System Management of a Wind-Energy Converter*, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 16, No. 3, May, 2001, pp. 375-381.
- [74] Ali M. Eltamaly, *New Formula to Determine the Minimum Capacitance Required for Self-Excited Induction Generator*, IEEE, Power Electronic Specialist Conference, 2002, PESC, 02, 2002, 33rd Annual Published: 2002, Vol. 1, pp. 106-110.
- [75] M. Machmoum, F. Poitiers, C. Darendosse, A. Queric, *Dynamic Performances of a Doubly-fed Induction Machine for a Variable –speed Wind Energy Generation*, IEEE, Power System Technology, 2002, Proceeding POWERCON 2002, International Conference en published: 2002, Vol. 2, pp. 661-666.
- [76] Seung-Ho Song, Shin-il Kang, Nyeon-Kun Hahm, *Implementation and Control of Grid Connected AC-DC-AC Power Converter for Variable Speed Wind Energy Conversion System*, IEEE, Applied Power Electronics, Conference and Exposition, 2003, APEC'03. Eighteenth Annual IEEE, published: 2003, Vol. 1, pp.154-158.
- [77] A. B. Raju, B. G. Fernandes, K. Chatterjee, *Estimation of Optimum Wind Turbine Generator Speed Parameters*, IEEE Power Engineering Society General Meeting, 6-10 June 2004, Denver, Colorado USA.
- [78] K. L. Shi, Helen Li, *A Novel Control of a Small Wind Turbine Driven Generator based on Neural Networks*, IEEE Power Engineering Society General Meeting, 6-10 June 2004, Denver, Colorado USA.
- [79] Kiran Nandigam, Badrul H. Chowdhury, *Power Flow and Stability Models for Induction Generators Used in Wind Turbines*, IEEE Power Engineering Society General Meeting, 6-10 June 2004, Denver, Colorado USA.
- [80] José Antonio Castillo Jiménez, *Análisis de Dispositivos FACTS (CEV, CSCT Y UPFC) para Interacciones Torsionales Subsíncronas de Turbogeneradores en Sistemas Eléctricos de Potencia*, Tesis de Grado de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, SEPI ESIME, México, D. F., Marzo, 2003.
- [81] Instituto de Investigaciones Eléctricas: <http://www.iie.org.mx/sitio/insafi.htm>
- [82] Z. Chen, S. Arnalte Gómez, M. McCormick, *A Fuzzy Logic Controlled Power Electronic System for Variable Speed Wind Energy Conversion Systems*, IEE, Power Electronics and Variable Speed Drives, Conference Publication No. 475, 18-19, September, 2000, pp. 114-118.
- [83] Stephen J.Chapman, *Máquinas Eléctrica*, Editorial McGraw-Hill, Bogota, Colombia, 1987, pp. 6255.
- [84] Especificaciones generales de VESTAS V27-225 kW, 60 Hz, WINDTURBINE-(US) with Tubular/Lattice Tower, ITEM No: 941130. 4 January, 1995.
- [85] Guillermo Cacho López, Tadany Cargnin, Dos Santos Víctor, F. Tamayo Galindo, Ricardo Whaley Rodríguez, *Retos del Desarrollo de Proyectos Renovables en México*, Artículo presentado en la Reunión de Verano, RVP – AI/2004-SIS-12 IEEE sección México, Acapulco Gro. Del 11-17 de Julio de 2004.
- [86] Secretaría de Energía: <http://www.energia.gob.mx/wb>
- [87] American Wind Energy Association:<http://www.awea.org/>

- [88] M. M. Abdel Hakim, G.J. Berg, *Dynamic Single-Unit Representation of Induction Motor Groups*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-95, No. 1, January/February 1976 pp. 155-165.
- [89] Lázaro G. Mercedes, Olguín S. Daniel, *Sensibilidad de los Eigenvalores de un Sistema Eléctrico de Potencia incluyendo Generadores de Inducción*, Octavo Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas. IPN-SEPI ESIME, 15-19, Noviembre 2004.
- [90] Patel Mukund R., *Wind and Solar Power Systems*. Editorial CRC Press, United States of America, 1999, pp. 351.
- [91] Raúl Rabinovici, *Autonomous Excitation of Induction Generators*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 34, No.3, May, 1998, pp. 664-670.
- [92] Paul J. Nolan, Naresh K. Sinha, Robert T. H. Alden, *Eigenvalue Sensitivities of Power Systems Including Network and Shaft Dynamics*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-95, No. 4, July/August 1976, pp. 1318-1324.
- [93] Comisión Federal de electricidad: <http://www.cfe.gob.mx>.
- [94] Prabha Kundur (Canada, Convener), John Paserba (USA, Secretary), Venkat Ajarapu (USA), Göran Andersson (Switzerland), Anjan Bose (USA) , Claudio Canizares (Canada), Nikos Hatziargyriou (Greece), David Hill (Australia), Alex Stankovic (USA), Carson Taylor (USA), Thierry Van Cutsem (Belgium), and Vijay Vittal (USA), “*Definition and Classification of Power System Stability*”, IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, IEEE Transactions on Power Systems, VOL. 19, NO. 2, MAY 2004,pp. 1387-1401.
- [95] Joong-Ho Song, Kwang-Bae Kim, Myung Joong Youn, “*Eigenvalue Sensitivity of a Speed-sensorless CSI-fed Induction Motor System*”, Industrial Electronics, Control and Instrumentation, 1993. Proceeding of the IECON’93, International Conference on Published: 1993, page(s): 987-991. Vol. 2.
- [96] E.E.S. Lima, member IEEE, “A sensitivity analysis of Eigenstructures”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 3, Department of Electrical Engineering, Universidade de Brasilia, Brasilia, DF, Brazil. August 1997.

APÉNDICE “A”

MODELO NO LINEAL DE UN GENERADOR DE INDUCCIÓN.

Este apéndice presenta el modelo no lineal de 5° orden de la máquina de inducción como generador en dos versiones (corrientes y flujos electromagnéticos) con rotor jaula de ardilla, utilizando transformación de Park, y la técnica de variables de estado.

Para el desarrollo de este modelo se considera una máquina de inducción como generador conectada a un bus infinito, a través de una pequeña impedancia de red, simulando una línea de transmisión, mostrada en la figura A.1.

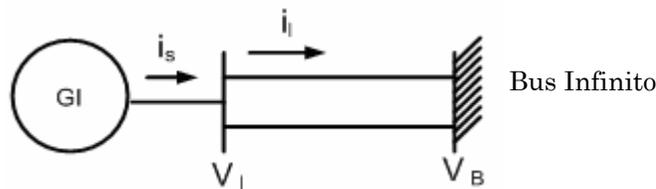


Figura A.1 Sistema Máquina Bus Infinito.

A.1 MODELO MATEMÁTICO.

El modelo de la máquina de inducción puede describirse en el marco de referencia arbitrario. Existen tres marcos de referencia comúnmente más utilizados: el marco de referencia estacionario, cuando $\omega_0 = 0$; el marco de referencia del rotor, cuando $\omega_r = \omega_r$ y el marco de referencia síncrono, cuando $\omega_b = \omega_b$ [8,38,75,83]. Para el desarrollo del modelo no lineal de la máquina se presenta en el marco de referencia arbitrario.

En la figura A.2, se muestra la relación entre los ejes de las fases del estator y del rotor con los ejes d y q del marco de referencia, esta representación se puede emplear para máquinas con rotor jaula de ardilla y rotor devanado [7,8]. Las ecuaciones de voltaje para cada uno de estos marcos de referencia se obtienen a partir de las ecuaciones en el marco de referencia arbitrario y mediante la asignación de la velocidad angular (ω) apropiada.

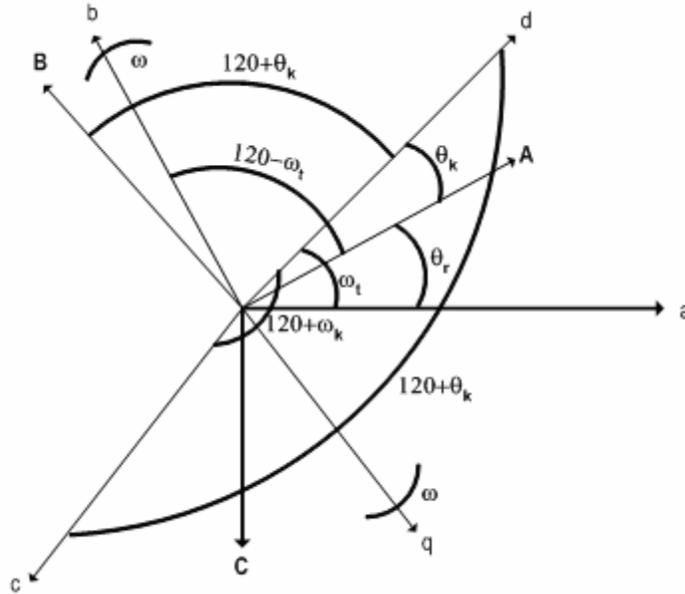


Figura A.2 Relación entre los ejes de las fases del estator y rotor con los ejes del marco de referencia dq [75].

Ecuaciones de Voltaje: Estas ecuaciones de voltaje en el rotor y el estator de la máquina de inducción se expresan en los ejes d y q del estator y rotor [8,38,75,83]:

Estator:

$$-v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt} (\psi_{ds}) + \frac{\omega}{\omega_0} \psi_{qs} \quad (\text{A.1})$$

$$-v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt} (\psi_{qs}) - \frac{\omega}{\omega_0} \psi_{ds} \quad (\text{A.2})$$

Rotor:

$$0 = R_r i_{dr} + \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt} (\psi_{dr}) + S \psi_{qr} \quad (\text{A.3})$$

$$0 = R_r i_{qr} + \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt} (\psi_{qr}) - S \psi_{dr} \quad (\text{A.4})$$

Invirtiéndolo el signo del deslizamiento (S) a las ecuaciones (A.3) y (A.4), debido al efecto de la velocidad en el rotor; entonces también, se invierte el sentido en el par electromagnético y se le cambia el sentido de los flujos en el rotor [8].

Ecuaciones de Flujos Electromagnéticos: Son la relación entre las corrientes y enlaces de flujo, expresadas en los ejes d y q del estator y rotor [8,38,75]:

Estator:

$$\Psi_{ds} = (X_{da} + X_s) i_{ds} + X_{da} i_{dr} \quad (\text{A.5})$$

$$\Psi_{qs} = (X_{qa} + X_s) i_{qs} + X_{qa} i_{qr} \quad (\text{A.6})$$

Rotor:

$$\Psi_{dr} = X_s i_{dr} + (X_{da} + X_{dr}) i_{ds} \quad (\text{A.7})$$

$$\Psi_{qr} = X_s i_{qr} + (X_s + X_{qr}) i_{qs} \quad (\text{A.8})$$

Potencia Activa:

$$P_s = (V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs}) \quad (\text{A.9})$$

Par Electromecánico:

$$T_{el} = (\Psi_{dr} i_{qr} - \Psi_{qr} i_{dr}) \quad (\text{A.10})$$

Donde:

i_{ds} e i_{qs} = Corrientes en los ejes directo y en cuadratura del estator.

i_{dr} e i_{qr} = Corrientes en los ejes directo y en cuadratura del rotor.

R_s y R_r = Resistencias del rotor y estator.

X_{da} y X_{qa} = Reactancia magnetizante.

X_s = Reactancia de armadura.

X_r = Reactancia del rotor.

X_{dr} = Reactancia del rotor en el eje d.

X_{qr} = Reactancia del rotor en el eje q.

X_m = Reactancia mutua.

Efectuando las operaciones en el marco de referencia del estator, por medio de la transformación de Park y obteniendo los valores en p.u., dan como resultado, nuevas ecuaciones de voltaje, flujos electromagnéticos y par electromagnético, teniendo [8,38,75]:

Ecuaciones de Voltaje en el Estator:

$$-v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt} (\Psi_{ds}) + \frac{\omega}{\omega_0} \Psi_{qs} \quad (\text{A.11})$$

$$-v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt} (\Psi_{qs}) - \frac{\omega}{\omega_0} \Psi_{ds} \quad (\text{A.12})$$

Ecuaciones de Voltaje en el Rotor:

$$0=R_r i_{dr} + \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt} (\psi_{dr}) + S \psi_{qr} \quad (\text{A.13})$$

$$0=R_r i_{qr} + \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt} (\psi_{qr}) - S \psi_{dr} \quad (\text{A.14})$$

Flujos Electromagnéticos en el Estator:

$$\psi_{ds} = (X_{da} + X_s) i_{ds} + X_{da} i_{dr} \quad (\text{A.15})$$

$$\psi_{qs} = (X_{qa} + X_s) i_{qs} + X_{qa} i_{qr} \quad (\text{A.16})$$

Flujos Electromagnéticos en el Rotor:

$$\psi_{dr} = X_s i_{dr} + (X_{da} + X_{dr}) i_{ds} \quad (\text{A.17})$$

$$\psi_{qr} = X_s i_{qr} + (X_{sa} + X_{qr}) i_{qs} \quad (\text{A.18})$$

Par Electromecánico:

$$T_e = \psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds} \quad (\text{A.19})$$

Las ecuaciones de voltajes y flujos se pueden representar en forma compacta como en [8,38,75].

Si se sustituye $p = \frac{d}{dt}$ en las ecuaciones (A.11), (A.12), (A.13), (A.14), (A.15), (A.16), (A.17), (A.18) y

(A.19) y además sustituimos $\frac{\omega}{\omega_0} = 1$, se obtienen las siguientes ecuaciones:

Ecuaciones de Voltajes en el Estator:

$$-v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{p}{\omega_0} (\psi_{ds}) + \psi_{qs} \quad (\text{A.11.1})$$

$$-v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{p}{\omega_0} (\psi_{qs}) - \psi_{ds} \quad (\text{A.12.1})$$

Ecuaciones de Voltajes en el Rotor:

$$0 = R_r i_{dr} + \frac{p}{\omega_0} (\psi_{dr}) + S \psi_{qr} \quad (\text{A.13.1})$$

$$0 = R_r i_{qr} + \frac{p}{\omega_0} (\psi_{qr}) - S \psi_{dr} \quad (\text{A.14.1})$$

Las reactancias mutuas y propias de los flujos se pueden definir como:

$$X_m = X_{da} = X_{qa} = X_{ds} = X_{qs} \quad (\text{A.20})$$

$$X_s = X_{da} + X_s = X_{qa} + X_s \quad (\text{A.21})$$

$$X_r = X_{da} + X_{dr} = X_{qa} + X_{qr} \quad (\text{A.22})$$

y sustituyendo estas ecuaciones en las ecuaciones de flujos, se tiene:

Ecuaciones de Flujos en el Estator:

$$\Psi_{ds} = X_s i_{ds} + X_m i_{dr} \quad (\text{A.15.1})$$

$$\Psi_{qs} = X_s i_{qs} + X_m i_{qr} \quad (\text{A.16.1})$$

Ecuaciones de Flujos en el Rotor:

$$\Psi_{dr} = X_m i_{ds} + X_r i_{dr} \quad (\text{A.17.1})$$

$$\Psi_{qr} = X_m i_{qs} + X_r i_{qr} \quad (\text{A.18.1})$$

A.2 MODELO EN FUNCIÓN DE CORRIENTES.

La representación matricial de la máquina de inducción para nuestros fines la podemos presentar en función de corrientes o de flujos electromagnéticos; por medio de las ecuaciones de voltaje, flujos electromagnéticos y par electromagnético; obteniendo un sistema de 5° orden, debido al número de ecuaciones involucradas en el modelo de la máquina de inducción.

A continuación, se muestra a este sistema en forma de arreglo matricial, en función de corrientes, luego se desarrolla este mismo modelo, pero en función de flujos electromagnéticos; ambos de 5o orden; esto es necesario, debido a que el SEP que se desea analizar, se basa en la referencia [71], en donde se le van agregan dispositivos como: red de transmisión, compensación fija (capacitor) o compensación controlada (CEV), y es necesario el empleo del modelo de 5° orden en función de flujos, para obtener todas las variables involucradas en esta referencia y utilizarlas para la realización de un análisis de estabilidad ante pequeños disturbios.

Ecuaciones de Voltajes en el Estator:

$$-v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{p}{\omega_0} (X_s i_{ds} + X_m i_{dr}) + X_s i_{qs} + X_m i_{qr} \quad (\text{A.23})$$

$$-v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{p}{\omega_0} (X_s i_{qs} + X_m i_{qr}) - (X_s i_{ds} + X_m i_{dr}) \quad (\text{A.24})$$

Ecuaciones de Voltajes en el Rotor:

$$0 = R_r i_{dr} + \frac{p}{\omega_0} (X_m i_{ds} + X_r i_{dr}) + S (X_m i_{qs} + X_r i_{qr}) \quad (\text{A.25})$$

$$0 = R_r i_{qr} + \frac{p}{\omega_0} (X_m i_{qs} + X_r i_{qr}) - S (X_m i_{ds} + X_r i_{dr}) \quad (\text{A.26})$$

Expresando a las ecuaciones (A.23), (A.24), (A.25) y (A.26), se tiene:

$$\begin{bmatrix} -v_{ds} \\ 0 \\ -v_{qs} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + \frac{p}{\omega_0} X_s & \frac{p}{\omega_0} X_m & X_s & X_m \\ \frac{p}{\omega_0} X_m & R_{dr} + \frac{p}{\omega_0} X_r & SX_m & SX_r \\ -X_s & -X_m & R_s + \frac{p}{\omega_0} X_s & \frac{p}{\omega_0} X_m \\ SX_m & -SX_r & \frac{p}{\omega_0} X_m & R_{qr} + \frac{p}{\omega_0} X_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{dr} \\ i_{qs} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{A.27})$$

Si se sustituyen los flujos en la ecuación del par electromagnético, se tiene:

$$T_e = X_s i_{ds} i_{qs} + X_m i_{dr} i_{qs} - X_s i_{qs} i_{ds} - X_m i_{qr} i_{ds} \quad (\text{A.28})$$

Desarrollando y agrupando (A.28), se tiene:

$$T_e = X_m \left(i_{dr} i_{qs} - i_{qr} i_{ds} \right) \quad (\text{A.29})$$

Expresando la ecuación de movimiento de una máquina de inducción en función del par, despreciando a la resistencia y a las pérdidas por fricción y reemplazando a la velocidad angular ω por el deslizamiento (S) como variable [15,66,91], se tiene:

$$\frac{d}{dt}(\omega_r) = \frac{\omega_0}{2H_m} (T_m - T_e) \quad (\text{A.30})$$

donde:

H_m = Constante de inercia en segundos.

T_m = Par Mecánico de entrada al generador.

T_e = Par eléctrico del generador.

Desarrollando la ecuación (A.30) y despejando T_m , se tiene:

$$T_m = \frac{\omega_r}{\omega_0} 2pH_m + T_e \quad (\text{A.31})$$

Conociendo que $f_r = \frac{\omega_0}{\omega_b} = \eta_r$, donde, ω_0 es la velocidad angular síncrona, ω_b es la velocidad angular base y

f_r es la Frecuencia en p. u. (η_r), por lo tanto, se sustituye el valor de la frecuencia en la ecuación (A.31),

resultando:

$$T_m = p2H_m \eta_r + T_e \quad (\text{A.32})$$

y por último sustituimos el par electromecánico (A.29) en la ecuación del par mecánico (A.32), se tiene:

$$T_m = p2H_m \eta_r + X_m i_{rd} i_{dq} - X_m i_{rq} i_{dr} \quad (\text{A.33})$$

de manera que el sistema en forma matricial resultante es:

$$\begin{bmatrix} -v_{ds} \\ 0 \\ -v_{qs} \\ 0 \\ T_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + \frac{p}{\omega_0} X_s & \frac{p}{\omega_0} X_m & X_s & X_m & 0 \\ \frac{p}{\omega_0} X_m & R_{dr} + \frac{p}{\omega_0} X_r & SX_m & SX_r & 0 \\ -X_s & -X_m & R_s + \frac{p}{\omega_0} X_s & \frac{p}{\omega_0} X_m & 0 \\ SX_m & -SX_r & \frac{p}{\omega_0} X_m & R_{qr} + \frac{p}{\omega_0} X_r & 0 \\ -X_m i_{qr} & 0 & X_m i_{dr} & 0 & 2pH_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{dr} \\ i_{qs} \\ i_{qr} \\ \eta_r \end{bmatrix} \quad (\text{A.34})$$

A.2.2 Modelo en función de Flujos.

Para formar el modelo de 5° orden en función de flujos electromagnéticos, conservan las ecuaciones de voltaje de la máquina tanto del estator como rotor, (ecuaciones (A.11) a la (A.14)), pero se despejan las ecuaciones de los flujos electromagnéticos (ecuaciones (A.15) a la (A.18)), en función de las corrientes del estator y del rotor, obteniendo las siguientes ecuaciones:

$$i_{ds} = \frac{X_r \psi_{ds} - X_m \psi_{dr}}{X_r X_s - X_m^2} \quad (\text{A.34})$$

$$i_{qs} = \frac{X_r \psi_{qs} - X_m \psi_{qr}}{X_r X_s - X_m^2} \quad (\text{A.35})$$

$$i_{dr} = \frac{X_m \psi_{ds} - X_s \psi_{dr}}{X_m^2 - X_s X_r} \quad (\text{A.36})$$

$$i_{qr} = \frac{X_m \psi_{qs} - X_s \psi_{qr}}{X_m^2 - X_s X_r} \quad (\text{A.37})$$

Sustituyendo las ecuaciones de las corrientes, en las ecuaciones de los voltajes originales y representándolas en forma matricial, se tiene:

$$\begin{bmatrix} -v_{ds} \\ -v_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{R_s}{X_r X_s - X_m^2} \right) X_r + \frac{p}{\omega_0} & 1 & - \left(\frac{R_s}{X_r X_s - X_m^2} \right) X_m & 0 \\ -1 & \left(\frac{R_s}{X_r X_s - X_m^2} \right) X_r + \frac{p}{\omega_0} & 0 & - \left(\frac{R_s}{X_r X_s - X_m^2} \right) X_m \\ \left(\frac{R_r}{X_m^2 - X_s X_r} \right) X_m & 0 & - \left(\frac{R_r}{X_m^2 - X_s X_r} \right) X_s + \frac{p}{\omega_0} & S \\ 0 & \left(\frac{R_r}{X_m^2 - X_s X_r} \right) X_m & -S & - \left(\frac{R_r}{X_m^2 - X_s X_r} \right) X_s + \frac{p}{\omega_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{ds} \\ \psi_{qs} \\ \psi_{dr} \\ \psi_{qr} \end{bmatrix} \quad (A.38)$$

y sustituyendo corrientes en la ecuación (A.33), el sistema matricial resultante es:

$$\begin{bmatrix} -V_{ds} \\ -V_{qs} \\ 0 \\ 0 \\ T_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{R_s}{X_r X_s - X_m^2} \right) X_r + \frac{p}{\omega_0} & 1 & - \left(\frac{R_s}{X_r X_s - X_m^2} \right) X_m & 0 & 0 \\ -1 & \left(\frac{R_s}{X_r X_s - X_m^2} \right) X_r + \frac{p}{\omega_0} & 0 & - \left(\frac{R_s}{X_r X_s - X_m^2} \right) X_m & 0 \\ \left(\frac{R_r}{X_m^2 - X_r X_s} \right) X_m & 0 & - \left(\frac{R_r}{X_m^2 - X_r X_s} \right) X_s + \frac{p}{\omega_0} & S & -\psi_{qr} \\ 0 & \left(\frac{R_r}{X_m^2 - X_r X_s} \right) X_m & -S & - \left(\frac{R_r}{X_m^2 - X_r X_s} \right) X_s + \frac{p}{\omega_0} & \psi_{dr} \\ - \left(\frac{X_m}{X_r X_s - X_m^2} \right) \psi_{qr} & \left(\frac{X_m}{X_r X_s - X_m^2} \right) \psi_{dr} & \left(\frac{X_m}{X_r X_s - X_m^2} \right) \psi_{qs} & - \left(\frac{X_m}{X_r X_s - X_m^2} \right) \psi_{ds} & 2pH_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{ds} \\ \psi_{qs} \\ \psi_{dr} \\ \psi_{qr} \\ \eta_r \end{bmatrix} \quad (A.39)$$

APÉNDICE “B”

SISTEMAS EN POR UNIDAD Y PARÁMETROS DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN.

En el análisis de grandes redes eléctricas, donde se transmiten grandes cantidades de potencia, es común que operen a niveles de kilovolts (kV), kilowatts (kW), megawatts (MW), kilovoltamperes (kVA) o megavoltamperes (MVA).

Sin embargo, estas cantidades se expresan frecuentemente en por ciento o en por unidad de un valor base o de referencia especificado para cada una [2,3]. Estas cantidades se denominan por unidad (y se designan como p.u.) y se define como la relación de la cantidad a su base y se expresa como un decimal; en la siguiente forma [2]:

$$\frac{\text{Valor real (en cualquier unidad)}}{\text{Valor base o referencia en la misma unidad}}$$

La relación en por ciento es 100 veces el valor en por unidad. Ambos métodos de cálculo, porcentual y en por unidad, son más simples y más informativos que los volts (V), los amperes y los ohms (Ω) reales. El método en p.u. tiene una ventaja sobre el porcentual: el producto de dos cantidades expresadas en por unidad se expresan también en p.u., mientras que el producto de dos cantidades dadas en por ciento se debe dividir entre 100 para obtener el resultado en por ciento.

El voltaje, la corriente, los kVA y la impedancia están relacionados de tal manera que la selección de los valores base para cualquier dos de ellos determina la base de los dos restantes. Si se especifican los valores base de corriente y de voltaje, se pueden determinar las bases de impedancia y de kVA. La impedancia base es aquella que tiene una caída de voltaje igual a la del voltaje base, cuando la corriente que fluye a través de ella es igual a la del valor base de corriente [2]. Además los sistemas en p.u. cuentan con las siguientes ventajas:

- ✓ Se reduce el empleo de la raíz cúbica en los cálculos trifásicos.
- ✓ Seleccionan las bases de voltaje apropiados se facilita la solución de redes que contienen varios transformadores.
- ✓ Para el cálculo de las condiciones de operación de la máquina es importante contar con los parámetros base del mismo, ya que todos los parámetros de la máquina se pueden conocer en función de la variación de los mismos, y se pueden interpretar como porcentajes con respecto a la base además de observar su comportamiento.

A continuación se presenta las fórmulas que se emplearon para expresar los parámetros de la máquina y dispositivos del sistema en p.u.

Se expresan las formulas para calcular el valor de la impedancia base:

$$Z_{base}, \Omega = \frac{(\text{Voltaje}_{base}, KV_{LN})^2 \times 1000}{KVA_{1\phi base}} \quad (B.1)$$

$$Z_{pu} = \frac{Z_{real}}{Z_{base}} = \frac{R_{real}}{R_{base}} \quad (B.2)$$

Para calcular la impedancia base, primero se debe de conocer el voltaje base y los $KVA_{1\phi base}$, teniendo:

Voltaje base:

$$V_{LN} = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}} = \text{RMS} \quad (B.3)$$

Conociendo:

$$P_{base}, W_{1\phi} = VA_{1\phi, base} \quad (B.4)$$

$$P_{base}, KW_{1\phi} = KVA_{1\phi, base} \quad (B.5)$$

$$P_{base}, MW_{1\phi} = MVA_{1\phi, base} \quad (B.6)$$

Calculo del valor de la corriente de base:

$$I_{base}, A = \frac{KVA_{1\phi base}}{V_{base}, KV_{LN}} = \frac{KW_{1\phi base}}{V_{base}, KV_{LN}} \quad (B.7)$$

Cálculo las reactancias X_1 , X_2 y X_M :

$$X_1 = (L_1 - L_M) 2\pi f \quad (B.8)$$

$$X_2 = (L_2 - L_M) 2\pi f \quad (B.9)$$

$$X_M = L_M 2\pi f \quad (B.9)$$

Cálculo de la constante de inercia H [2,3]:

$$H = \frac{1}{2} \frac{J \omega_{0m}^2}{S_{B_m}, VA} \quad (B.10)$$

$$H = 5.48 \times 10^{-9} \frac{J(\text{rpm})^2}{S_{B_m}, MVA} \quad (B.11)$$

donde:

J= Momento de Inercia en $Kg \cdot m^2$

ω_{0m} = velocidad angular de la máquina en rad/seg

teniendo:

$$\omega_{0m} = 2\pi \frac{\text{rpm}}{60} = \text{rad/seg} \quad (B.12)$$

$$S_{B_m} = 3 \left(V_{ef_{base}} i_{ef_{base}} \right) \quad (B.13)$$

Tabla B.1. Parámetros de un Generador de Inducción de 1 HP.

PARÁMETROS EN UNIDADES REALES	VALORES BASE	PARÁMETROS EN PU
<p>Generador de Inducción:</p> <p>4 Polos HP=1 $f=60$ Hz $V=220$ volts $I=3.39091$ A $N_{sinc}=1800$ rpm $N_m=1856$ rpm $R_s=5.78$ Ω $R_r=1.763$ Ω $X_s=3.179$ Ω $X_r=4.770$ Ω $X_M=59.839$ Ω $J=0.00411$</p> <p>Impedancia de la Línea de Transmisión:</p> <p>$R_{red}=0.073125$ Ω $X_{red}=0.851661$ Ω</p> <p>Capacitor para Autoexcitación:</p> <p>$X_C=59.839$ Ω $C=44.3287$ μF</p>	<p>$V_{base}=127.0171$ volts $Z_{base}=64.87936$ Ω $I_{base}=1.95774$ A $S_{base}=1,291.11066$ VA</p>	<p>$R_s=0.08909$ $R_r=0.02717$ $X_s=0.04900$ $X_r=0.07352$ $X_M=0.92231$ $H=0.0564$ seg Deslizamiento (S)= -0.03111</p> <p>$R_{red}=0.00113$ $X_{red}=0.01313$</p> <p>$X_C=0.92231$</p>

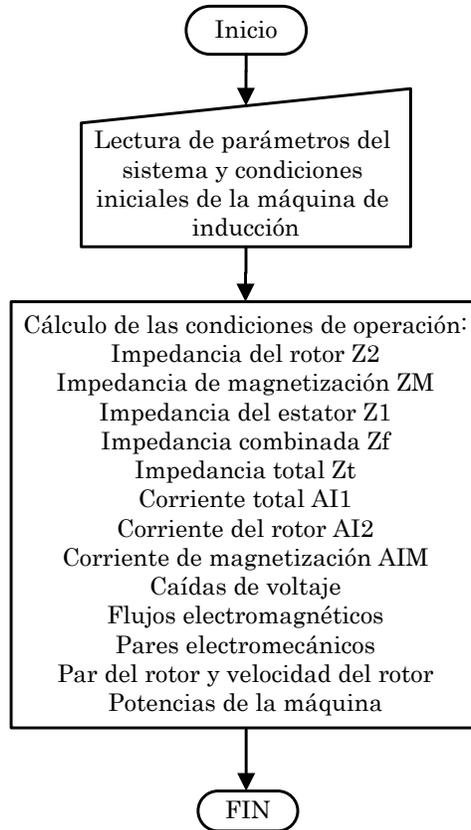
Tabla B.2. Parámetros del Generador de Inducción de Vestas V-27 225/50kW-480V-60Hz [84].

PARÁMETROS EN PU	PARÁMETROS EN PU
<p>Generador de Inducción:</p> <p>Para 6 polos</p> <p>Valores Base:</p> <p>$V_{base}=480$ volts $Z_{base}=3.07200$ Ω $I_{base}=156.25000$ A $S_{base}=278.513769856$ KVA $R_s=0.00586$ $R_r=0.006185$ $X_s=0.071615$ $X_r=0.134766$ $X_M=1.88802$ $H=0.209666$ seg Deslizamiento (S)= -0.001667</p> <p>Impedancia de la red de Transmisión.</p> <p>$R_{red}=0.21913$ $X_{red}=0.76758$</p> <p>Banco de Capacitores.</p> <p>$X_C=1.88802$</p>	<p>Generador de Inducción:</p> <p>Para 8 polos</p> <p>Valores Base:</p> <p>$V_{base}=480$ Volts $Z_{base}=13.82400$ Ω $I_{base}=34.72222$ A $S_{base}=70.667672949$ KVA $R_s=0.02655$ $R_r=0.00521$ $X_s=0.03255$ $X_r=0.16131$ $X_M=1.3093$ $H=0.464811$ seg Deslizamiento (S)= -0.002162</p> <p>Impedancia de la red de Transmisión.</p> <p>$R_{red}=0.04869$ $X_{red}=0.17057$</p> <p>Banco de Capacitores.</p> <p>$X_C=1.3093$</p>

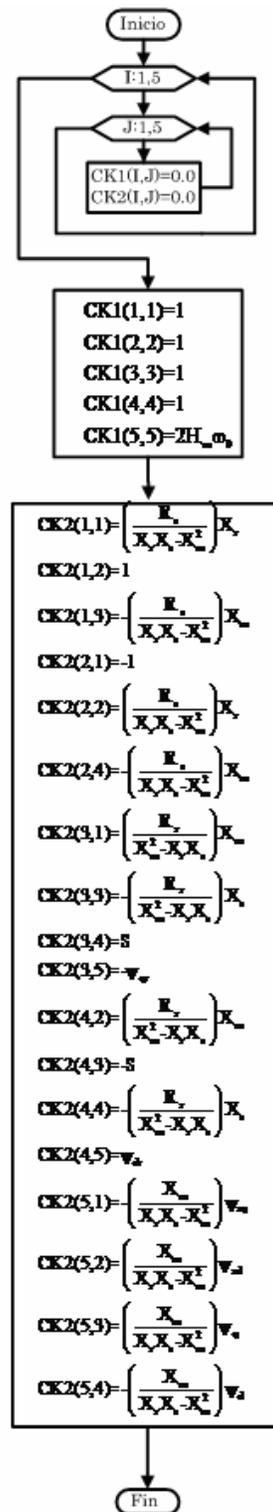
APÉNDICE “C”

DIAGRAMAS DE FLUJO

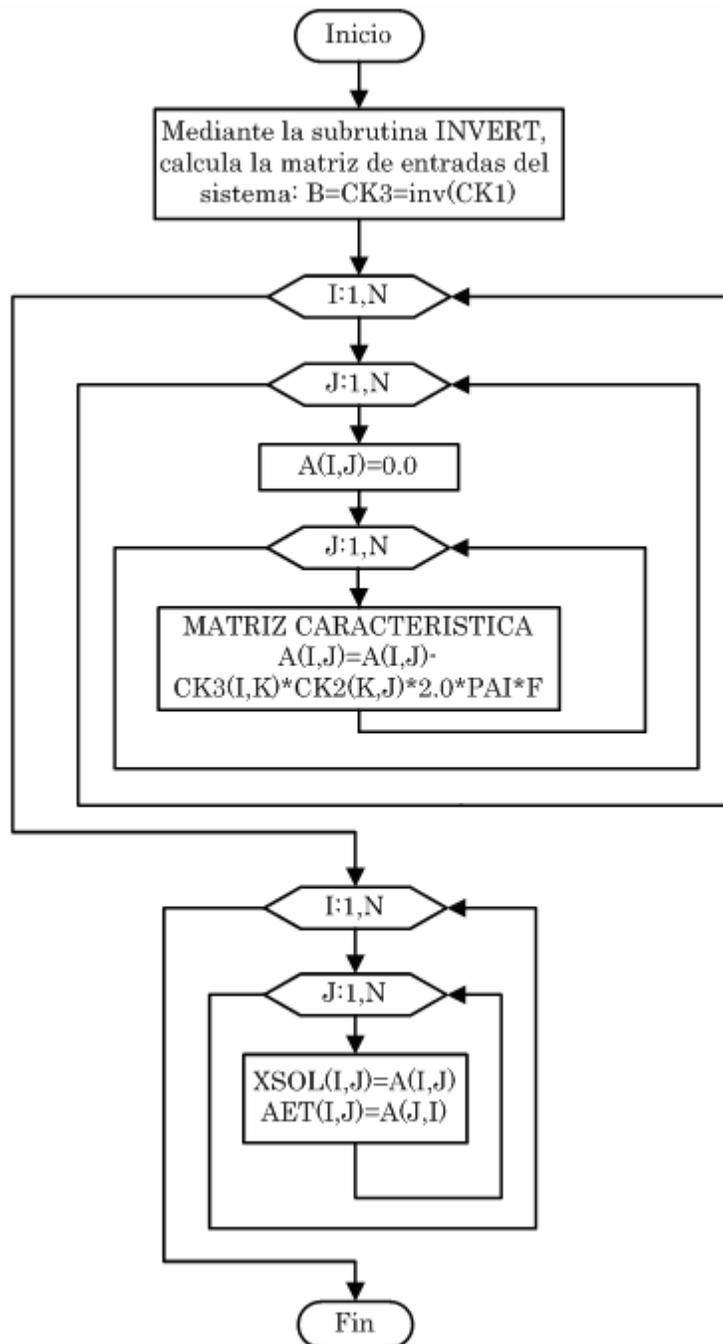
C.1 SUBROUTINA OPOINT



C.2 SUBROUTINA KMATRIX

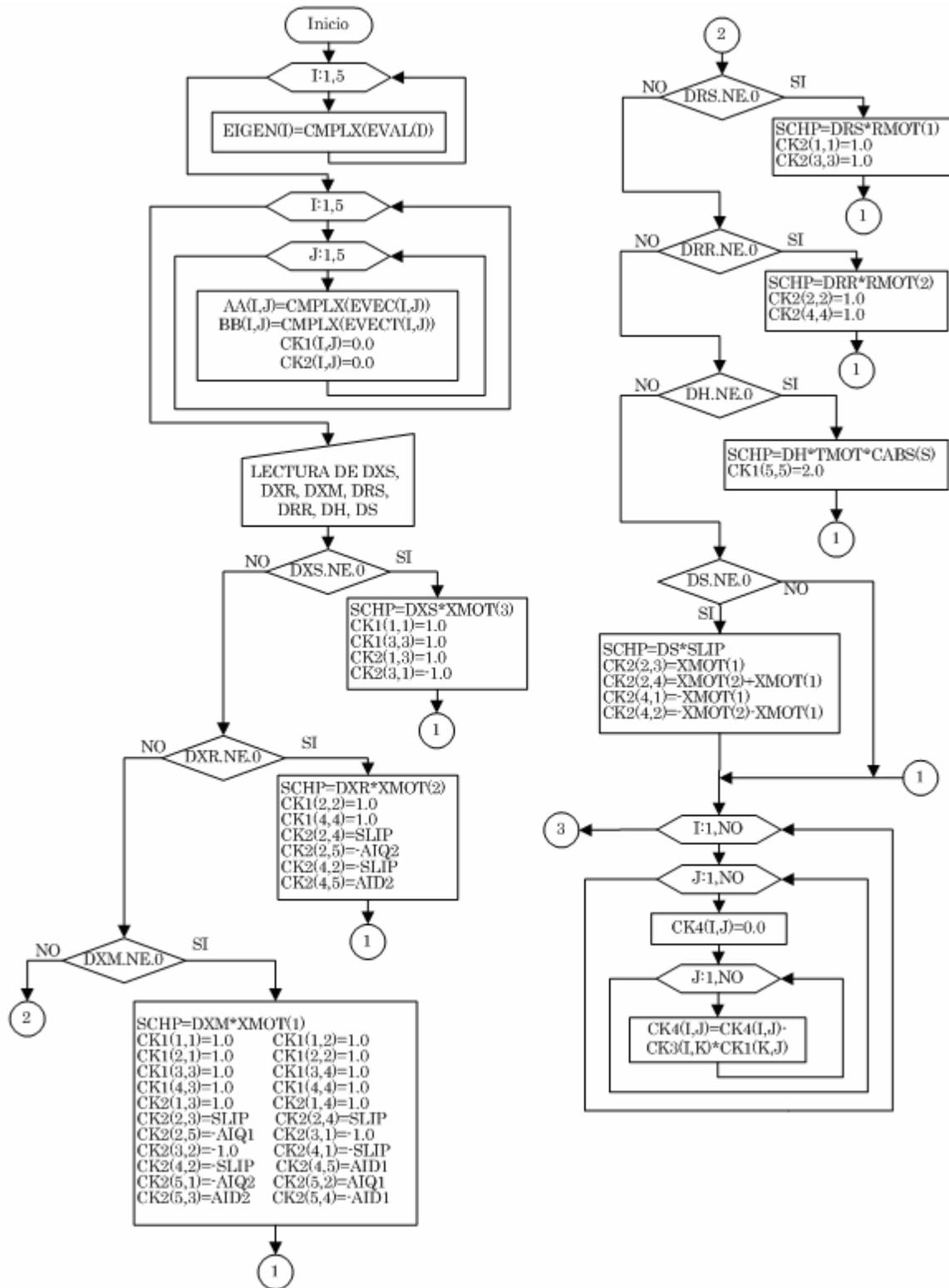


C.3 SUBROUTINA CHARA

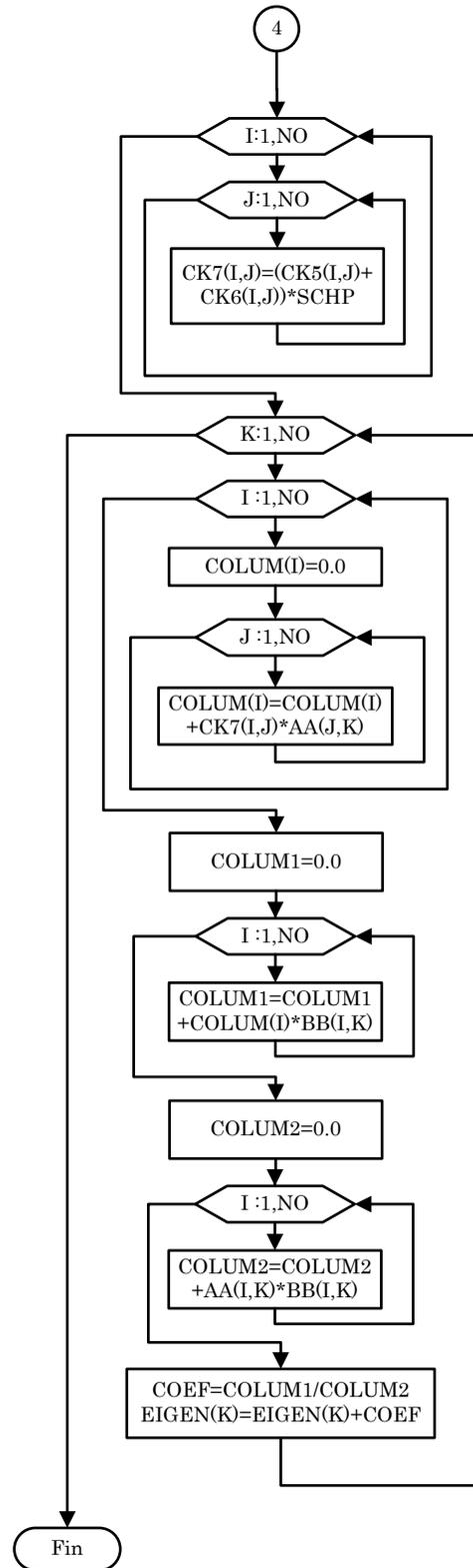
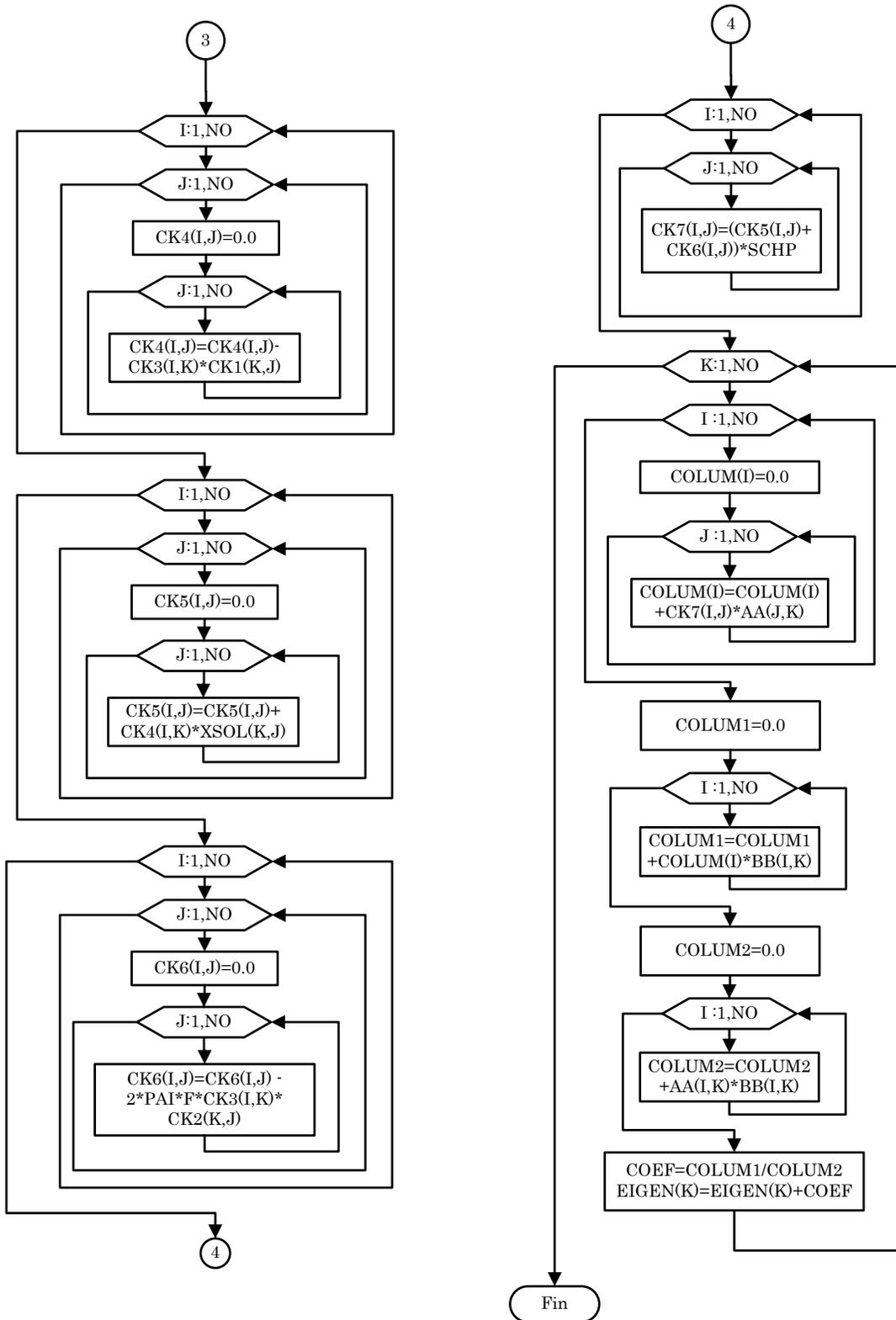


C.4 SUBROUTINA SENSI

Primera parte



Segunda parte



APÉNDICE “D”

PROGRAMAS EN FORTRAN.

D.1 ARCHIVO DE ENTRADA:

Este archivo de entrada se muestra tal y como lo pide en el programa:

```
DATOS DE LA MAQUINA  
  
0.08909,0.02717  
0.75745,0.07352,0.04900  
0.000565,0.006565,0.92231  
-0.031111,0.11280,1.00000,1.00000  
1.00000,0  
3.14159,60.00000,1.0
```

A continuación se da el nombre que representa cada dato en el archivo de entrada, así mismo lo que significa cada uno:

```
DATOS DE LA MAQUINA  
RMOT1 , RMOT2  
XM , X2 , X1  
SLIP , TMOT , HP , ANUM  
MAGV , DELTA  
PAI , FREQ , SENS
```

Para el caso de SENS, esta subrutina solo es válida para modelos de 5° orden del generador de inducción.

Donde:

RMOT1=Resistencia del estator del generador

RMOT2= Resistencia del rotor del generador

XM= Reactancia mutua del generador

X2= Reactancia del rotor del generador

X1= Reactancia del estator del generador

SLIP= Deslizamiento

TMOT= Constante de Inercia del generador en s.

HP=Caballos de Potencia del Generador

ANUM=Numero de Generadores.

MAGV=Magnitud

DELTA=Angulo

PAI=Valor de PI (3.141516)

FREQ=Frecuencia del Sistema.

D.2 ARCHIVO DE SALIDA:

A continuación se muestra la información que nos proporciona el archivo de salida:

CONDICIONES DE OPERACIÓN PARA EL MODELO DE 90. ORDEN

```

PFAC= 1.000000
ZEQ= -.8734      .0735  ZM= .0000      .7574  ZF= -.3448      .4294
ZLS= .0891      .0490  ZMQ= -.2557      .4784  ZC= .0000      -.9223
ZMC= -.8288      .5165  ZRED= .0006      .0066  ZT= -.8282      .5231
AIT= -.8631      -.5451  AII= .8566      1.6260  AI2=-1.1112    -.3143
AIM= 1.9678      1.9403  AIC= -.0065      1.0809  AIDT= -.5451
AIQT= -.8631      AID1= 1.6260      AIQ1= .8566
AIDC= 1.0809      AIQC= -.0065
AID2= -.3143      AIQ2=-1.1112      AIDM= 1.9403
AIQM= 1.9678
V= 1.0000      .0000  VRED= .0031      -.0060  VMQ= .9969      .0060
VC= .9969      .0060  VD= .0000      VQ= 1.0000
VREDD= -.0060      VREDQ= .0031      VMQD= .0060
VMQ= .9969      VCD= .0060      VCQ= .9969
V1= -.0034      .1868  V2= -.9936      -.1928  V1D= .1868
V1Q= -.0034      V2D= -.1928      V2Q=-.9936
DELTA= .0000
    
```

CAÍDAS DE VOLTAJE EN EL ESTATOR

```

VIR= .0763  .1449  VIX= .0420  .0797  VIRD= .1449  VIRQ= .0763  VIXD= .0797  VIXQ= .0420
    
```

CAÍDAS DE VOLTAJE EN EL ROTOR

```

Vi1= .0309      .0000  Vi2= -.0302    -.0085  Vi3= .0025      .0007
FIST= -.1508     1.0732  FIROT= -.2745    .9704  FISD= 1.0732      FISQ= -.1508
FIRD= .9704      FIRO= -.2745
PROT=-1.1646     WROT= 1.0311
TORQUE=-1.2008    AKTOR= .0000
TOR1= 1.16460    TOR2= -1.16460
SRED= .0006      .0068  SMQ= .8637     -1.6159
SC= .0000      -1.0776  S= .8631      -.5451
PRED= .00059     QRED= .00684
PMQ= .86368     QMQ= -1.61587
PC= .00000      QC= -1.07758
P= .86309      Q= -.54513      AMAGS= 1.02083
    
```

MATRIZ CARACTERISTICA "A"

```

-286.8348  -376.9908  265.6584  .0000  .0000
 376.9908  -286.8348  .0000  265.6584  .0000
 81.0185  .0000  -85.3228  11.7282  -96.0322
 .0000  81.0185  -11.7282  -85.3228  -375.2047
 -5.2868  -20.6560  2.5775  22.5187  .0000
    
```

ORDEN DE LA MATRIZ DEL SISTEMA = 5

EIGENVALORES

MATRIZ CARACTERISTICA "A"

```

-.31701480000E+03  .34049860000E+03
-.31701480000E+03  -.34049860000E+03
-.17611700000E+02  .77730100000E+02
-.17611700000E+02  -.77730100000E+02
-.75062360000E+02  .00000000000E+00
    
```

EIGENVECTORES DERECHOS

MATRIZ CARACTERISTICA "A"

```

.89129910000E-02  .69104770000E+00  .89129910000E-02  -.69104770000E+00  -.32476650000E+00  .16352820000E+00
.69978000000E+00  .00000000000E+00  .69978000000E+00  .00000000000E+00  .35802360000E+00  .12561840000E+00
.10630540000E+00  -.67082040000E-01  .10630540000E+00  .67082040000E-01  .13109300000E+00  .24896030000E+00
-.92146170000E-01  -.83733270000E-01  -.92146170000E-01  .83733270000E-01  .78694220000E+00  .00000000000E+00
.14892610000E-01  .34013640000E-01  .14892610000E-01  -.34013640000E-01  -.68804200000E-01  -.14368560000E+00
-.32476650000E+00  -.16352820000E+00  .17556010000E+00  .00000000000E+00
.35802360000E+00  -.12561840000E+00  .49155030000E+00  .00000000000E+00
.13109300000E+00  -.24896030000E+00  .83749950000E+00  .00000000000E+00
.78694220000E+00  .00000000000E+00  .14271080000E+00  .00000000000E+00
-.68804200000E-01  .14368560000E+00  .76059970000E-01  .00000000000E+00
    
```

EIGENVECTORES IZQUIERDOS			MATRIZ CARACTERISTICA "A"			
-.68907300000E-01	-.71866060000E+00	.73047960000E+00	-.71651480000E-01	-.35681040000E+00	.28643840000E+00	
-.68907290000E-01	.71866070000E+00	.73047950000E+00	.71651470000E-01	-.35681040000E+00	-.28643840000E+00	
.65746690000E-01	-.13924100000E+00	.11135220000E+00	.13753740000E-01	-.17457630000E+00	-.27747020000E+00	
.65746690000E-01	.13924110000E+00	.11135220000E+00	-.13753730000E-01	-.17457630000E+00	.27747020000E+00	
.29253780000E-01	.94183030000E-08	-.20064660000E+00	.47213610000E-08	.11284130000E+01	-.47434710000E-08	
-.30640770000E+00	-.34530050000E+00	-.58031450000E-01	-.38424300000E+00			
-.30640770000E+00	.34530050000E+00	-.58031540000E-01	.38424300000E+00			
.62953250000E+00	.23191140000E+00	-.13030710000E+00	.28526090000E+01			
.62953250000E+00	-.23191140000E+00	-.13030710000E+00	-.28526090000E+01			
.73900280000E-01	-.30192710000E-08	.18130490000E+01	.15938960000E-07			

FACTORES DE PARTICIPACIÓN			MATRIZ CARACTERISTICA "A"			
.49601460000E+00	-.54023640000E-01	.49601460000E+00	.54023640000E-01	.14175050000E-02	.55972240000E-01	
.51117500000E+00	-.50140270000E-01	.51117500000E+00	.50140260000E-01	.38138990000E-01	.18912040000E-01	
-.18715990000E-01	.54385510000E-01	-.18715980000E-01	-.54385510000E-01	.46193340000E-01	-.79836960000E-01	
-.67883990000E-03	.57474640000E-01	-.67884270000E-03	-.57474640000E-01	.49540570000E+00	.18250090000E+00	
.12205260000E-01	-.76962400000E-02	.12205260000E-01	.76962440000E-02	.41884450000E+00	-.17754820000E+00	
.14175120000E-02	-.55972260000E-01	.51357960000E-02	.16534780000E-08			
.38138990000E-01	-.18912040000E-01	-.98627900000E-01	.23207860000E-08			
.46193340000E-01	.79836960000E-01	.94504530000E+00	-.39726550000E-08			
.49540570000E+00	-.18250090000E+00	.10546370000E-01	-.43088250000E-09			
.41884450000E+00	.17754820000E+00	.13790040000E+00	.12123160000E-08			

D.3 Programa de Análisis en la Frecuencia

C INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
C ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA
C MECÁNICA Y ELÉCTRICA
C UNIDAD ZACATENCO
C S.E.P.I
C PROGRAMAS DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

C PROGRAMA DE ANÁLISIS EN LA FRECUENCIA
C UTILIZANDO EL MODELO LINEAL DE SÉPTIMO
C ORDEN QUE CONSTA DE UNA MÁQUINA DE INDUCCIÓN,
C EN MODO GENERADOR CON IMPEDANCIA DE RED DE
C TRANSMISIÓN Y CON CAPACITOR PARA
C SU AUTOEXCITACIÓN

C ESTE PROGRAMA CONSTA DE TRES SUBROUTINAS,
C LAS CUALES SON:
C - OPOINT
C - KMATRIX
C - CHARA

C NOMENCLATURA USADA
C RMOT(1)= Resistencia del estator del Generador.
C RMOT(2)= Resistencia del rotor del Generador.
C XMOT(1)= Reactancia del estator del Generador.
C XMOT(2)= Reactancias del rotor del Generador.
C XMOT(3)= Reactancia de magnetización del Generador
C REQ2=Resistencia equivalente del rotor y
C deslizamiento.
C XC= Reactancia Capacitiva.
C RRED= Resistencia de la Red de Transmisión.
C XRRED= Reactancia de la Red de Transmisión.
C ZEQ= Impedancia del Rotor del Generador.
C ZM= Impedancia de Magnetización del Generador.
C ZF=Impedancia equivalente entre ZEQ y ZM.
C ZLS= Impedancia en el Estator del Generador.
C ZEQ1= Impedancia total del Generador.
C ZMQ= ZEQ1
C ZC= Impedancia del Capacitor.
C ZMC= Impedancia equivalente entre el Generador y
C el capacitor.
C ZRED= Impedancia de la Red de Transmisión.
C ZT= Impedancia total del Sistema Máquina Bus
C Infinito.
C AIT= Corriente total del Sistema Máquina Bus
C Infinito.
C AIDT= Corriente total del Sistema Máquina Bus
C Infinito en el eje d.
C AIQT= Corriente total del Sistema Máquina Bus
C Infinito en el eje q.
C AIC= Corriente en el Capacitor
C AIDC= Corriente en el Capacitor en el eje d
C AIQC= Corriente en el Capacitor en el eje q
C AI1= Corriente en el Estator del Generador.
C AID1= Corriente en el Estator en eje d.
C AIQ1= Corriente en el Estator en eje q.
C AI2= Corriente en el Rotor del Generador.
C AID2= Corriente en el Rotor en eje d.
C AIQ2= Corriente en el Rotor en eje q.
C AIM= Corriente de Magnetización en el Generador.
C AIDM= Corriente de Magnetización en el eje d.
C AIQM= Corriente de Magnetización en el eje q.
C V= Voltaje del Bus Infinito.
C VD= Voltaje del Bus Infinito en el eje d.
C VQ= Voltaje del Bus Infinito en el eje q.
C VRED= Caída de Tensión en la Red de Transmisión.
C VREDD= Caída de Tensión en la Red de Transmisión
C en el eje d
C VREDQ= Caída de Tensión en la Red de Transmisión
C en el eje q
C VMQ= Tensión en las terminales del Generador.
C VMQD= Tensión en las terminales del Generador en
C el eje d
C VMQQ= Tensión en las terminales del Generador en
C el eje q
C VC= Tensión en el Capacitor.
C VCD= Tensión en el Capacitor en el eje d.
C VCQ= Tensión en el Capacitor en el eje q.
C V1= Caída de Tensión en el Estator.
C V1D= Caída de Tensión en el Estator en eje d
C V1Q= Caída de Tensión en el Estator del Generador
C en el eje q.
C V1R= Caída de Tensión en la Resistencia del
C Estator.
C V1RD= Caída de Tensión en la Resistencia del
C Estator en el eje d.
C V1RQ= Caída de Tensión en la Resistencia del
C Estator en el eje q.
C V1X= Caída de Tensión en la Reactancia del Estator
C del Generador.
C V1XD= Caída de Tensión en la Reactancia del
C Estator del Generador en el eje d.

C V1XQ= Caída de Tensión en la Reactancia del
C Estator del Generador en el eje q.
C V2= Caída de Tensión en el Rotor.
C V2D= Caída de Tensión en el Rotor en eje d.
C V2Q= Caída de Tensión en el Rotor en eje q.
C V1l= Caída de Tensión debida al deslizamiento
C V1lD= Caída de Tensión debida al deslizamiento en
C el eje d.
C V1lQ= Caída de Tensión debida al deslizamiento en
C el eje q.
C V12= Caída de Tensión debida a la Resistencia del
C Rotor.
C V12D= Caída de Tensión debida a la Resistencia del
C Rotor en el eje d.
C V12Q= Caída de Tensión debida a la Resistencia del
C Rotor en el eje q.
C V13= Caída de Tensión debida a la Reactancia del
C Rotor.
C V13D= Caída de Tensión debida a la Reactancia del
C Rotor en el eje d.
C V13Q= Caída de Tensión debida a la Reactancia del
C Rotor en el eje q.
C SLIP= Deslizamiento.
C DELTA= Angulo delta.
C FIST= Flujo Electromagnético en el Estator.
C FISD= Flujo Electromagnético en el Estator en el
C eje d.
C FISQ= Flujo Electromagnético en el Estator en el
C eje q.
C FIROT= Flujo Electromagnético en el Rotor.
C FIRD= Flujo Electromagnético en el Rotor en el eje
C d.
C FIRQ= Flujo Electromagnético en el Rotor en el eje
C q.
C TOR1= Par Electromagnético en el estator.
C TOR2= Par Electromagnético en el rotor.
C PROT= Potencia en el rotor.
C WROT= Velocidad en el rotor.
C TORQUE= Comprobación del Par Electromagnético.
C PAI= Pi (3.141516).
C F= Frecuencia del sistema (60 Hz).
C HP= Caballos de Potencia del Generador.
C TMOT= Constante de Inercia del Generador.
C P= Potencia Activa total del Sistema Máquina Bus
C Infinito.
C S= Potencia Aparente total del Sistema Máquina Bus
C Infinito.
C Q= Potencia Reactiva total del Sistema Máquina Bus
C Infinito.
C PC= Potencia Activa en el capacitor.
C SC= Potencia Aparente en el capacitor.
C QC= Potencia Reactiva en el capacitor.
C PRED= Potencia Activa en la Red de Transmisión.
C SRED= Potencia Aparente en la Red de Transmisión.
C QRED= Potencia Reactiva en la Red de Transmisión.
C PMQ= Potencia Activa en el Generador.
C SMQ= Potencia Aparente en el Generador.
C QMQ= Potencia Reactiva en el Generador.
C N= Número de Máquinas para el equivalente.
C ORDEN= Orden del Sistema.
C ANUM= Numero de generadores para el equivalente.
C AKTOR= Contador.
C EVAL= Eigenvalores de la matriz A.
C EVALT= Eigenvalores de la matriz A Transpuesta.
C EVEC= Eigenvectores derechos de la matriz A.
C EVECT= Eigenvectores derechos de la matriz A
C Transpuesta.
C EVECINV= Eigenvectores izquierdos de la matriz A.
C EVECTINV= Eigenvectores izquierdos de la matriz A
C Transpuesta.
C MR1= Matriz Residual de la Matriz A.
C MR2= Matriz Residual de la Matriz A Transpuesta.
C FP1= Matriz de Factores de Participación de la
C Matriz A
C FP2= Matriz de Factores de Participación de la
C Matriz A transpuesta.
C CF= coeficiente de 1
C KOUNT= Contador
C PFAC = Voltaje En El Eje Directo.
C NO,NOR,N1,NNO,NVE,NL = Orden d la Matriz.
C LDA,LDAA,LDAINV= Dimensión de las matrices A y
C A Transpuesta.
C LDEVEC= Dimensión del eigenvector de la matriz.
C AKVAB1= Base Anterior
C AKVAB2= Base Nueva
C MAGV= Magnitud de un número.
C AMAGS,AMAGSB = Valor máximo de un número.

```

PROGRAM FLUREDCAP
  USE MSIMSL
C-----
C
C-----
C SE DECLARAN DATOS
C-----
DIMENSION EVAL(10),EVALT(10)
COMMON CK1(10,10),CK2(10,10),CK3(10,10),CK4(10,10)
COMMON CK5(10,10),CK6(10,10),CK7(10,10),XSOL(10,10)
COMMON A(10,10),AET(10,10),EVEC(10,10),EVECT(10,10)
COMMON EVECINV(10,10),EVECTINV(10,10),MR1(10,10)
COMMON MR2(10,10),FP1(10,10),FP2(10,10),AA(10,10)
COMMON BB(10,10),CMP(10,10),WKS(10),EIGEN(10)
COMMON RMOT(2),XMOT(3),COLUM(10),ORDEN(10)
COMMON DELTA,V,VD,VQ,AID1,AIQ1,AID2,AIQ2,AIDM,AIQM
COMMON FIST,FIRD,FIRQ,REQ2,PAI,F,AKTOR,HP,FMOT,MAGV
COMMON SLIP,WROT,TORQUE,FISD,FISQ,V2,TOR1,TOR2,DXS
COMMON ANUM,PROT,DXM,DRS,DRR,DH,DS,SENS,COEF,AIQC
COMMON I,J,K,XC,NO,NOR,LDA,LFAIL,IDENT,NNO,N1,NVE
COMMON NL,AKVAB1,AKVAB2,AKB,LDEVEC,P,Q,CF,KOUNT,PC
COMMON PFAC,N,S,SB,A11,AI2,AIM,EVAL,V1D,EVALT,SC,QC
COMMON AMAGSB,COLUM1,COLUM2,ZLS,ZEQ,ZM,ZF,ZT,FIROT
COMMON AMAGS,V1Q,V2D,V2Q,V1R,V1X,V1RD,V1RQ,V1XD,DXR
COMMON V1XQ,V1I,V1ID,V1IQ,V12,V12D,V12Q,V13,V13D,ZC
COMMON V13Q,V1,LDAA,LDAINV,VRED,VREDD,VREDQ,RRED
COMMON XRED,ZRED,ZMQ,AIT,AIDT,AIQT,VMQ,VMQD,VMQQ
COMMON SRED,SMQ,PRED,QRED,PMQ,QMQ,ZMC,VC,AIC,AIDC
COMMON V,V1,V1R,V1X,V2,V1I,V12,V13,A11,A12,AIM,ZC
COMMON FIST,FIROT,ZM,ZEQ,ZLS,ZF,ZT,S,EVEC,ORDEN
COMMON SB,EIGEN,AA,BB,COLUM,COLUM1,COLUM2,COEF,VC
COMMON EVAL,EVALT,EVECT,EVECINV,EVECTINV,AMAGS,AIC
COMMON AMAGSB,MR1,MR2,FP1,FP2,VMQ,VRED,AIT,SRED
COMMON SMQ,ZMQ,ZRED,ZMC,SC
REAL MAGV
C-----
C
C-----
C PROGRAMA PRINCIPAL
C-----
OPEN(5,FILE='ARTGRC_B.DAT')
OPEN(6,FILE='ARTGRC_B.SAL')
WRITE(6,100)
C-----
C
C-----
C LEE LOS DATOS DEL GENERADOR
C-----
100 FORMAT(/,23X,'*****',/24X,'DATOS DEL
GENERADOR',/23X,'*****',/)
READ(5,101)(RMOT(I),I=1,2)
READ(5,101)(XMOT(I),I=1,3)
READ(5,101)RRED,XRED,XC
READ(5,101)SLIP,FMOT,HP,ANUM
READ(5,101)MAGV,DELTA
READ(5,101)PAI,F,SENS
101 FORMAT(4F10.5)
C-----
C
C-----
C CAMBIO DE LOS PARÁMETERS DEL GENERADOR PARA LA
C NUEVA BASE
C
C ANUM=NÚMERO DE LOS GENERADORES QUE
C FORMAN EL EQUIVALENTE
C AKVAB1=BASE ANTERIOR,
C AKVAB2=BASE NUEVA
C IGUALES AMBOS SISTEMAS
C-----
AKVAB1=0.746*HP
AKVAB2=AKVAB1
AKB=AKVAB2/AKVAB1
RMOT(1)=RMOT(1)*AKB
RMOT(2)=RMOT(2)*AKB
XMOT(1)=XMOT(1)*AKB
XMOT(2)=XMOT(2)*AKB
XMOT(3)=XMOT(3)*AKB
XC=XC*AKB
RRED=RRED*AKB
XRED=XRED*AKB
WRITE(6,102)RMOT(1),RMOT(2)
102 FORMAT(/5X,'RMOT1=',F10.5,1X,'RMOT2=',F10.5)
C-----
C
C-----
C IMPEDANCIA DE LA RED (RRED,XRED)
C-----
WRITE(6,103)RRED,XRED,XC
103 FORMAT(/6X,'RRED=',F10.5,2X,'XRED=',F10.5,3X,
'XC=',F10.5)
C-----
C
C-----
C XMOT(1)=XM,XMOT(2)=X2,XMOT(3)=X1
C REACTANCIAS DE SALIDA(X1,X2)
C-----
WRITE(6,104)XMOT(1),XMOT(2),XMOT(3)
104 FORMAT(/8X,'XM=',F10.5,4X,'X2=',F10.5,3X,
'X1=',F10.5)
WRITE(6,106)SLIP,FMOT,HP,ANUM
106 FORMAT(/6X,'SLIP=',F10.5,2X,'FMOT=',
F10.5,3X,'HP=',F10.5,3X,'ANUM=',F10.5)
WRITE(6,107)MAGV,DELTA
107 FORMAT(/6X,'MAGV=',F10.5,1X,'DELTA=',F10.5)
WRITE(6,108)PAI,F
108 FORMAT(/7X,'PAI=',F10.5,2X,'FREQ=',F10.5)
C-----
C
C-----
C EMPIEZAN A LLAMAR SUBRUTINAS

```

```

C-----
CALL OPOINT
CALL KMATRIX
CALL CHARA
C-----
C EN ESTA PARTE SE OBTIENEN LOS EIGENVALORES Y
C EIGENVECTORES DE LA MATRIZ A Y A(TRANSPUESTA)
C-----
NO=9
LFAIL=1
LDA=10
LDEVEC=10
C-----
C
C-----
C SUBBRUTINA PARA EL CÁLCULO DE LOS
C EIGENVALORES Y EIGENVECTORES
C-----
CALL EVCRCG(NO,A,LDA,EVAL,EVEC,LDEVEC)
CALL EVCRCG(NO,AET,LDA,EVALT,EVECT,LDEVEC)
WRITE(6,200)NO
200 FORMAT(/,15X,'ORDEN DE LA MATRIZ DEL
SISTEMA=',I4,/,/,/,32X,'*****',/33X,'EIGENVALORES',
/32X,'*****',//19X,'MATRIZ "A"',22X,'MATRIZ "A"
TRANSPUESTA'//)
C-----
C
C-----
C CÁLCULO DE LOS EIGENVALORES
C-----
WRITE(6,201)(EVAL(I),EVALT(I),I=1,NO)
201 FORMAT(/,1X,4E20.11)
WRITE(6,207)
207 FORMAT(/29X,'*****',/30X,'EIGENVECTORES
DERECHOS',/29X,'*****',//19X,'MATRIZ
"A"',22X,'MATRIZ "A" TRANSPUESTA'//)
WRITE(6,202)
202 FORMAT(/)
C-----
C
C-----
C NOTA: LA SUBRUTINA DE IMSL CALCULA LOS
C EIGENVECTORES ASOCIADOS CON LOS EIGENVALORES Y
C LOS AJUSTA PARA TENER UNA C NORMA EUCLIDIANA GUAL
C A UNO.
C-----
C
C-----
C CÁLCULO DE LOS EIGENVECTORES DERECHOS
C-----
DO 203 I=1,NO
WRITE(6,201)(EVEC(J,I),EVECT(J,I),J=1,NO)
WRITE(6,202)
203 CONTINUE
C-----
C
C-----
C CÁLCULO DE LOS EIGENVECTORES IZQUIERDOS
C-----
NOR=9
LDAA=10
LDAINV=10
CALL LINGC(NOR,EVEC,LDAA,EVECINV,LDAINV)
CALL LINGC(NOR,EVECT,LDAA,EVECTINV,LDAINV)
WRITE(6,277)
277 FORMAT(/29X,'*****',/30X,'EIGENVECTORES
IZQUIERDOS',/29X,'*****',//19X,'MATRIZ
"A"',22X,'MATRIZ "A" TRANSPUESTA'//)
WRITE(6,272)
272 FORMAT(/)
DO 273 I=1,NOR
WRITE(6,271)(EVECINV(J,I),EVECTINV(J,I),J=1,NOR)
WRITE(6,272)
271 FORMAT(/,1X,4E20.11)
273 CONTINUE
C-----
C
C-----
C CÁLCULO DE LAS MATRICES RESIDUALES
C-----
WRITE(6,279)
279 FORMAT(/24X,'*****',/25X1,'MATRICES
RESIDUALES',/24X,'*****',//19X,'MATRIZ
"A"',22X,'MATRIZ "A" TRANSPUESTA'//)
WRITE(6,572)
572 FORMAT(/)
DO 280 K=1,NOR
DO 281 I=1,NOR
DO 282 J=1,NOR
MR1(I,J)=EVEC(I,K)*EVECINV(K,J)
MR2(I,J)=EVECT(I,K)*EVECTINV(K,J)
282 CONTINUE
281 CONTINUE
280 CONTINUE
DO 287 I=1,NOR
WRITE(6,285)(MR1(J,I),MR2(J,I),J=1,NOR)
WRITE(6,572)
285 FORMAT(/,1X,4E20.11)
287 CONTINUE

```

```

C-----
C CÁLCULO DE LOS FACTORES DE PARTICIPACIÓN
C-----
      WRITE (6,290)
290  FORMAT (//24X, '*****', /25X, 'FACTORES DE PARTICIPACION', /24X, '*****', //19X, 'MATRIZ "A"', 22X, 'MATRIZ "A" TRANSPUESTA'//)
      WRITE (6,472)
472  FORMAT (//)
      DO 291 I=1,NOR
      DO 292 J=1,NOR
          FP1 (I, J)=EVEC (I, J)*EVECINV (J, I)
          FP2 (I, J)=EVECT (I, J)*EVECTINV (J, I)
292  CONTINUE
291  CONTINUE
      DO 297 I=1,NOR
      WRITE (6,295) (FP1 (J, I), FP2 (J, I), J=1,NOR)
      WRITE (6,472)
295  FORMAT (//, 1X, 4E20.11)
297  CONTINUE
      IDENT=0
      NVE=1
      IF (IDENT.LE.0) GOTO 213
      DO 212 K=1,NVE
      NL=NO-K
      N1=NL+1
      IF (XSOL (N1, N1).NE.0.0) GOTO 215
      DO 210 I=1,N1
      DO 210 J=1,N1
210  A (I, J)=XSOL (I, J)
      DO 217 I=1,N1
      DO 217 J=1,N1
          IF (I.GT.1) GOTO 219
          IF (J.GT.1) GOTO 219
          XSOL (I, J)=A (N1, N1)
          GOTO 217
216  XSOL (I, J)=A (N1, J-1)
      GOTO 217
219  IF (J.GT.1) GOTO 218
      XSOL (I, J)=A (I-1, N1)
      GOTO 217
218  XSOL (I, J)=A (I-1, J-1)
217  CONTINUE
      DO 220 I=1,N1
220  WRITE (6,211) (XSOL (I, J), J=1,N1)
221  FORMAT (//5X, 9F12.4)
      CALL EVCRG (N1, XSOL, LDA, EVAL, EVEC, LDEVEC)
      WRITE (6,201) (EVAL (I), I=1,N1)
215  CONTINUE
      DO 212 I=1,NL
      DO 212 J=1,NL
          PT=XSOL (I, N1)*XSOL (N1, J)/XSOL (N1, N1)
212  XSOL (I, J)=XSOL (I, J)-PT
      NNO=NO-NVE
      CALL EVCRG (NNO, XSOL, LDA, EVALT, EVECT, LDEVEC)
      WRITE (6,200) NNO
      WRITE (6,201) (EVAL (I), I=1,NNO)
      WRITE (6,207)
      WRITE (6,202)
      DO 214 I=0,NNO
214  WRITE (6,201) (EVEC (J, I), J=1,NNO)
213  CONTINUE
      END
C-----
C SUBRUTINAS
C-----
C "OPOINT"
C ESTA SUBRUTINA EMPLEA LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL GENERADOR
C-----
C SUBROUTINE OPOINT
C-----
C SE DECLARAN DATOS
C-----
DIMENSION EVAL (10), EVALT (10)
COMMON CK1 (10, 10), CK2 (10, 10), CK3 (10, 10), CK4 (10, 10)
COMMON CK5 (10, 10), CK6 (10, 10), CK7 (10, 10), XSOL (10, 10)
COMMON A (10, 10), AET (10, 10), EVEC (10, 10), EVECT (10, 10)
COMMON EVECINV (10, 10), EVECTINV (10, 10), MR1 (10, 10)
COMMON MR2 (10, 10), FP1 (10, 10), FP2 (10, 10), AA (10, 10)
COMMON BB (10, 10), CMP (10, 10), WKS (10), EIGEN (10)
COMMON RMOT (2), XMOT (3), COLUM (10), ORDEN (10)
COMMON DELTA, V, VD, VQ, AID1, AIQ1, AID2, AIQ2, AIDM, AIQM
COMMON FIST, FIRD, FIRQ, REQ2, PAI, F, AKTOR, HP, TMOT, MAGV
COMMON SLIP, WROT, TORQUE, FISS, FISQ, V2, TOR1, TOR2, DXS
COMMON ANUM, PROT, DXM, DRS, DRR, DH, DS, SENS, COEF, AIQC
COMMON I, J, K, XC, NO, NOR, LDA, LFAIL, IDENT, NNO, N1, NVE
COMMON NL, AKVAB1, AKVAB2, AKB, LDEVEC, P, Q, CF, KOUNT, PC
COMMON PFAC, N, S, SB, AI1, AI2, AIM, EVAL, V1D, EVALT, SC, QC

```

```

COMMON AMAGSB, COLUM1, COLUM2, ZLS, ZEQ, ZM, ZF, ZT, FIROT
COMMON AMAGS, V1Q, V2D, V2Q, V1R, V1X, V1RD, V1RQ, V1XD, DXR
COMMON V1XQ, V1I, V1D, V1IQ, V1I, V1D, V1I2, V1I3, V1I3D, ZC
COMMON V1I3Q, V1, LDA, LDAINV, VRED, VREDD, VREDQ, RRED
COMMON XRED, ZRED, ZMQ, AIT, AIDT, AIQT, VMQ, VMQD, VMQQ
COMMON SRED, SMQ, PRED, QRED, PMQ, QMQ, ZMC, VC, AIC, AIDC
COMPLEX V, V1, V1R, V1X, V2, V1I, V1D, V1I2, V1I3, AI1, AI2, AIM, ZC
COMPLEX FIST, FIROT, ZM, ZEQ, ZLS, ZF, ZT, S, EVEC, ORDEN
COMPLEX SB, EIGEN, AA, BB, COLUM, COLUM1, COLUM2, COEF, VC
COMPLEX EVAL, EVALT, EVECT, EVECINV, EVECTINV, AMAGS, AIC
COMPLEX AMAGSB, MR1, MR2, FP1, FP2, VMQ, VRED, AIT, SRED
COMPLEX SMQ, ZMQ, ZRED, ZMC, SC
REAL MAGV
C-----
C DESARROLLO DE LA SUBRUTINA
C-----
      VQ=MAGV*COS (DELTA*PAI/180.0)
      VD=MAGV*SIN (DELTA*PAI/180.0)
      V=CMPLX (VQ, VD)
      KOUNT=0
C-----
C CÁLCULO DE LAS IMPEDANCIAS
C-----
210  REQ2=RMOT (2) /SLIP
C IMPEDANCIA EN EL ROTOR
      ZEQ=CMPLX (REQ2, XMOT (2))
C IMPEDANCIA DE MAGNETIZACIÓN
      ZM=CMPLX (0.0, XMOT (1))
C IMPEDANCIA COMBINADA (PARALELO ENTRE LA DEL ROTOR Y LA DE MAGNETIZACIÓN)
      ZF= (ZEQ*ZM) / (ZEQ+ZM)
C IMPEDANCIA DEL ESTATOR
      ZLS=CMPLX (RMOT (1), XMOT (3))
C IMPEDANCIA TOTAL DE LA MAQUINA
      ZEQ1=ZLS+ZM*ZEQ/ (ZEQ+ZM)
      ZMQ=ZF+ZLS
C IMPEDANCIA DEL CAPACITOR
      ZC=CMPLX (0.0, -XC)
C ZMC= IMPEDANCIA DE LA MAQUINA-CAPACITOR
      ZMC= (ZMQ*ZC) / (ZMQ+ZC)
C IMPEDANCIA DE LA RED DE TRANSMISION
      ZRED=CMPLX (RRED, XRED)
C IMPEDANCIA TOTAL DEL SISTEMA MAQUINA BUS INFINITO CON MODELADOP DE RED D TRANSMISIÓN
      ZT=ZMC+ZRED
C-----
C NOTA: EL "SIGNO MENOS" EN LA SIGUIENTE FORMULA INDICA QUE LAS ECUACIONES QUE SE EMPLEARON PARA EL MODELO DE UN MOTOR FUERON DE UN GENERADOR POR LO QUE YA SEA LA SIMULACIÓN DE LA MÁQUINA COMO MOTOR O COMO GENERADOR.
C SIEMPRE SE CONSERVA EL SIGNO MENOS EN EL VOLTAJE.
C CORRIENTE TOTAL EN EL CIRCUITO
      AIT=V/ZT
      AIDT=AIMAG (AIT)
      AIQT=REAL (AIT)
C-----
C CON ESTE VALOR DE CORRIENTE SE PROCEDE A CALCULAR EL VALOR DE LA CAIDA DE TENSIÓN EN LA IMPEDANCIA DE LA RED DE TRANSMISION
      VRED=ZRED*AIT
      VREDD=AIMAG (VRED)
      VREDQ=REAL (VRED)
C-----
C LUEGO SE SACA LA DIFERENCIA ENTRE EL VALOR DEL VOLTAJE DEL BUS INFINITO Y LA CAIDA DE TENSIÓN EN LA IMPEDANCIA PARA OBTENER EL VALOR DE VOLTAJE EN LAS TERMINALES DE LA MÁQUINA Y EL CAPACITOR.
      VMQ=V-VRED
      VMQD=AIMAG (VMQ)
      VMQQ=REAL (VMQ)
C-----
C COMO EL CAPACITOR Y LA IMPEDANCIA TOTAL DE LA MÁQUINA ESTAN EN PARALELO EL VALOR DEL VOLTAJE ES EL MISMO PARA AMBOS
      VC=VMQ
      VCD=AIMAG (VC)
      VCQ=REAL (VC)
C-----
C TENIENDO EL VALOR DEL VOLTAJE EN EL NODO DONDE SE ENCUENTRA CONECTADA TANTO LA MÁQUINA COMO EL CAPACITOR SE PROCEDE AL CÁLCULO DE LAS CORRIENTES TANTO EN EL CAPACITOR COMO EN LAS TERMINALES DE LA MÁQUINA, TENIENDO:
      AIC=VC/ZC
      AIDC=AIMAG (AIC)
      AIQC=REAL (AIC)

```

```

C-----
C TENIENDO EL VALOR DEL VOLTAJE EN LAS
C TERMINALES DE LA MAQUINA SE PROCEDE A
C CALCULAR EL VALOR DE LA CORRIENTE EN EL
C ESTATOR UTILIZANDO SOLO EL VALOR DE LA
C IMPEDANCIA DE LA MÁQUINA, TENIENDO:
C-----
      AI1=-VMQ/ZMQ
      AID1=AIMAG(AI1)
      AIQ1=REAL(AI1)
C CORRIENTE EN EL ROTOR
      AI2=(VMQ+ZLS*AI1)/ZEQ
      AID2=AIMAG(AI2)
      AIQ2=REAL(AI2)
C CORRIENTE DE MAGNETIZACION AIM
      AIM=AI1-AI2
      AIDM=AIMAG(AIM)
      AIQM=REAL(AIM)
C-----
C CÁLCULO DE LAS CAIDAS DE TENSIÓN
C-----
C CAÍDA DE TENSION DEBIDAS EN EL ESTATOR
      V1=ZLS*AI1
      VID=AIMAG(V1)
      VIQ=REAL(V1)
C CAÍDA DE TENSION DEBIDAS A LA RESISTENCIA DEL
C ESTATOR
      V1R=RMOT(1)*AI1
      V1RD=AIMAG(V1R)
      V1RQ=REAL(V1R)
C CAÍDA DE TENSION DEBIDAS A LA REACTANCIA
C DEL ESTATOR
      V1X=XMOT(3)*AI1
      V1XD=AIMAG(V1X)
      V1XQ=REAL(V1X)
C CAÍDA DE TENSIÓN EN EL ROTOR (VOLTAJE
C INTERNO DE LA MÁQUINA)
      V2=ZF*AI1
      V2D=AIMAG(V2)
      V2Q=REAL(V2)
C CAÍDA DE TENSIÓN EN EL ROTOR TOTAL
      V2=ZF*AI1
      V2D=AIMAG(V2)
      V2Q=REAL(V2)
C CAÍDA DE TENSIÓN DEBIDA AL PRODUCTO DEL
C DESLIZAMIENTO POR EL VOLTAJE INTERNO
      Vi1=SLIP*V2
      Vi1D=AIMAG(Vi1)
      Vi1=REAL(Vi1)
C-----
C CAÍDA DE TENSIÓN DEBIDA AL PRODUCTO DE LA
C RESISTENCIA EN EL ROTOR POR EL VOLTAJE INTERNO
C-----
      Vi2=RMOT(2)*AI2
      Vi2D=AIMAG(Vi2)
      Vi2Q=REAL(Vi2)
C CAÍDA DE TENSIÓN DEBIDA AL PRODUCTO DE LA
C REACTANCIA POR EL VOLTAJE INTERNO
      Vi3=AI2*SLIP*XMOT(2)
      Vi3D=AIMAG(Vi3)
      Vi3Q=REAL(Vi3)
C-----
C CÁLCULO DEL ANGULO DELTA
C-----
      DELTA=ATAN2(VD,VQ)*180.0/PAI
C CÁLCULO DE FLUJOS ELECTROMAGNÉTICOS
C-----
C FLUJOS EN EL ESTATOR
FIST=(XMOT(1)+XMOT(3))*AI1+XMOT(1)*AI2
FIST=(XMOT(1)+XMOT(3))*AI1+XMOT(1)*AI2
FISD=AIMAG(FIST)
FISQ=REAL(FIST)
C FLUJOS EN EL ROTOR
FIROT=XMOT(1)*AI1+(XMOT(1)+XMOT(2))*AI2
FIRD=AIMAG(FIROT)
FIROQ=REAL(FIROT)
C-----
C CÁLCULO DEL PAR ELECTROMAGNÉTICO TANTO
C EN ESTATOR COMO EN ROTOR
C-----
      TOR1=FISD*AIQ1-FISQ*AID1
      TOR2=FIRD*AIQ2-FIROQ*AID2
C-----
C CÁLCULO DE LA POTENCIA DEL ROTOR
C-----
      PROT=(CABS(AI2))*2*REAL(ZEQ)
C-----
C CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DEL ROTOR
C-----
      WROT=1-SLIP
      TORQUE=PROT*(1-SLIP)
      AKTOR=0.0

```

```

C-----
C CÁLCULO DE S, P Y Q
C-----
C CÁLCULO DE LA IMPEDANCIA DE LA RED DE
C TRANSMISIÓN
      SRED=VRED*CONJG(AIT)
      AMAGS=CABS(SRED)
      QRED=AIMAG(SRED)
      PRED=REAL(SRED)
C CÁLCULO DE LA POTENCIA EN LA MÁQUINA
      SMQ=VMQ*CONJG(AI1)
      AMAGS=CABS(SMQ)
      QMQ=AIMAG(SMQ)
      PMQ=REAL(SMQ)
C-----
C CÁLCULO DE LA POTENCIA EN EL CAPACITOR
C-----
      SC=VC*CONJG(AIC)
      AMAGS=CABS(SC)
      QC=AIMAG(SC)
      PC=REAL(SC)
C-----
C CÁLCULO PARA COMPROBAR LA POTENCIA TOTAL DEL
C SISTEMA
C-----
      S=V*CONJG(AIT)
      AMAGS=CABS(S)
      Q=AIMAG(S)
      P=REAL(S)
C CÁLCULO DE LA POTENCIA TOTAL DEL SISTEMA
      S=SMQ-SRED-SC
      AMAGS=CABS(S)
      Q=AIMAG(S)
      P=REAL(S)
      IF(KOUNT.NE.0)GOTO 211
      CF=1.0
      RMOT(1)=RMOT(1)*CF*1.0/ANUM
      RMOT(2)=RMOT(2)*CF*1.0/ANUM
      XMOT(1)=XMOT(1)*CF*1.0/ANUM
      XMOT(2)=XMOT(2)*CF*1.0/ANUM
      XMOT(3)=XMOT(3)*CF*1.0/ANUM
      KOUNT=1
      GOTO 210
211      CONTINUE
      SB=CMPLX(P,Q)
      AMAGSB=CABS(SB)
      PFAC=AMAGS/AMAGSB
      WRITE(6,10001)
C-----
C PUNTO DE OPERACION DE LA MAQUINA
C-----
10001      FORMAT(/,23X,'*****',/24X,'CONDICIONES DE
OPERACION',/23X,'*****',/)
      WRITE(6,10002)
10002      FORMAT(/,16X,'"PARA EL MODELO DE 90. ORDEN"',/)
      WRITE(6,1000)PFAC
1000      FORMAT(/,8X,'PFAC=',F12.6)
C IMPRESION DE LAS IMPEDANCIAS Y SUS
C COMPONENTES
      WRITE(6,229)ZEQ,ZM,ZF
229      FORMAT(/9X,'ZEQ=',2F10.4,5X,'ZM=',2F10.4,3X,
'ZF=',2F10.4)
      WRITE(6,230)ZLS,ZMQ,ZC
230      FORMAT(/9X,'ZLS=',2F10.4,4X,'ZMQ=',2F10.4,3X,
'ZC=',2F10.4)
      WRITE(6,231)ZMC
231      FORMAT(/9X,'ZMC=',2F10.4)
      WRITE(6,232)ZRED
232      FORMAT(/8X,'ZRED=',2F10.4)
      WRITE(6,233)ZT
233      FORMAT(/10X,'ZT=',2F10.4)
C-----
C IMPRESION DE LAS CORRIENTES Y SUS COMPONENTES
C-----
      WRITE(6,234)AIT
234      FORMAT(/9X,'AIT=',2F10.4)
      WRITE(6,235)AI1,AI2,AIM
235      FORMAT(/9X,'AI1=',2F10.4,4X,'AI2=',2F10.4,2X,
'AIM=',2F10.4)
      WRITE(6,236)AIC
236      FORMAT(/9X,'AIC=',2F10.4)
      WRITE(6,237)AIDT,AIQT
237      FORMAT(/8X,'AIDT=',F10.4,5X,'AIQT=',F10.4)
      WRITE(6,238)AID1,AIQ1
238      FORMAT(/8X,'AID1=',F10.4,5X,'AIQ1=',F10.4)
      WRITE(6,239)AIDC,AIQC
239      FORMAT(/8X,'AIDC=',F10.4,5X,'AIQC=',F10.4)
      WRITE(6,240)AID2,AIQ2
240      FORMAT(/8X,'AID2=',F10.4,5X,'AIQ2=',F10.4)
      WRITE(6,241)AIDM,AIQM
241      FORMAT(/8X,'AIDM=',F10.4,5X,'AIQM=',F10.4)

```

```

C-----
C IMPRESION DE LAS CAIDAS DE TENSION Y SUS
C COMPONENTES
C-----
      WRITE (6,242) V, VRED
242 FORMAT (//11X, 'V=' ,2F10.4, 4X, 'VRED=' ,2F10.4)
      WRITE (6,243) VMQ, VC
243 FORMAT (/9X, 'VMQ=' ,2F10.4, 6X, 'VC=' ,2F10.4)
      WRITE (6,244) VD, VQ
244 FORMAT (/10X, 'VD=' ,F10.4, 7X, 'VQ=' ,F10.4)
      WRITE (6,245) VREDD, VREDQ
245 FORMAT (/7X, 'VREDD=' ,F10.4, 4X, 'VREDQ=' ,F10.4)
      WRITE (6,246) VMQD, VMQQ
246 FORMAT (/8X, 'VMQD=' ,F10.4, 5X, 'VMQQ=' ,F10.4)
      WRITE (6,247) VCD, VCQ
247 FORMAT (/9X, 'VCD=' ,F10.4, 6X, 'VCQ=' ,F10.4)
      WRITE (6,248) V1, V2
248 FORMAT (/10X, 'V1=' ,2F10.4, 6X, 'V2=' ,2F10.4)
      WRITE (6,249) V1D, V1Q
249 FORMAT (/9X, 'V1D=' ,F10.4, 6X, 'V1Q=' ,F10.4)
      WRITE (6,250) V2D, V2Q
250 FORMAT (/9X, 'V2D=' ,F10.4, 6X, 'V2Q=' ,F10.4)
      WRITE (6,251) DELTA
251 FORMAT (/7X, 'DELTA=' ,F10.4)
      WRITE (6,252)
252 FORMAT (//, 23X, 'CAÍDAS DE VOLTAJE EN EL
      ESTATOR', /)
      WRITE (6,253) V1R, V1X
253 FORMAT (/8X, 'V1R=' ,2F10.4, 4X, 'V1X=' ,2F10.4)
      WRITE (6,254) V1RD, V1RQ
254 FORMAT (/7X, 'V1RD=' ,F10.4, 6X, 'V1RQ=' ,F10.4)
      WRITE (6,255) V1XD, V1XQ
255 FORMAT (/7X, 'V1XD=' ,F10.4, 6X, 'V1XQ=' ,F10.4)
      WRITE (6,256)
256 FORMAT (//, 23X, 'CAÍDAS DE VOLTAJE EN EL
      ROTOR', /)
      WRITE (6,257) V11, V12, V13
257 FORMAT (/8X, 'V11=' ,2F10.4, 3X, 'V12=' ,2F10.4, 2X,
      'V13=' ,2F10.4)
C-----
C IMPRESION DE LOS FLUJOS ELECTROMAGNETICOS Y SUS
C COMPONENTES
C-----
      WRITE (6,258) FIST, FIROT
258 FORMAT (//7X, 'FIST=' ,2F10.4, 1X, 'FIROT=' ,2F10.4)
      WRITE (6,259) FISD, FISQ
259 FORMAT (/7X, 'FISD=' ,F10.4, 12X, 'FISQ=' ,F10.4)
      WRITE (6,260) FIRD, FIRQ
260 FORMAT (/7X, 'FIRD=' ,F10.4, 12X, 'FIRQ=' ,F10.4)
      WRITE (6,261) PROT, WROT
261 FORMAT (/7X, 'PROT=' ,F10.4, 12X, 'WROT=' ,F10.4)
C-----
C IMPRESION DEL PAR ELECTROMAGNETICO Y SUS
C COMPONENTES
C-----
      WRITE (6,262) TORQUE, AKTOR
262 FORMAT (/5X, 'TORQUE=' ,F10.4, 11X,
      'AKTOR=' ,F10.4)
      WRITE (6,263) TOR1, TOR2
263 FORMAT (/7X, 'TOR1=' ,F10.5, 12X, 'TOR2=' ,F10.5)
      WRITE (6,264) SRED, SMQ
264 FORMAT (/7X, 'SRED=' ,2F10.4, 3X, 'SMQ=' ,2F10.4)
      WRITE (6,265) SC, S
265 FORMAT (/9X, 'SC=' ,2F10.4, 5X, 'S=' ,2F10.4)
      WRITE (6,266) PRED, QRED
266 FORMAT (/7X, 'PRED=' ,F10.5, 12X, 'QRED=' ,F10.5)
      WRITE (6,267) PMQ, QMQ
267 FORMAT (/8X, 'PMQ=' ,F10.5, 13X, 'QMQ=' ,F10.5)
      WRITE (6,268) PC, QC
268 FORMAT (/9X, 'PC=' ,F10.5, 14X, 'QC=' ,F10.5)
      WRITE (6,269) P, Q, AMAGS
269 FORMAT (/10X, 'P=' ,F10.5, 15X, 'Q=' ,F10.5, 8X,
      'AMAGS=' ,F10.5)
      RETURN
      END
C-----
C          "KMATRIX"
C-----
C ESTA SUBROUTINA USA LA REPRESENTACIÓN DE VARIABLES
C DE ESTADOS PARA HACER LA KMATRIX, K1 POR
C INSPECCION
C-----
C          SUBROUTINE KMATRIX
C-----
C          SE DECLARAN DATOS
C-----
DIMENSION EVAL(10), EVALT(10)
COMMON CK1(10,10), CK2(10,10), CK3(10,10), CK4(10,10)
COMMON CK5(10,10), CK6(10,10), CK7(10,10), XSOL(10,10)
COMMON A(10,10), AET(10,10), EVEC(10,10), EVECT(10,10)
COMMON EVECINV(10,10), EVECTINV(10,10), MR1(10,10)
COMMON MR2(10,10), FPL(10,10), FP2(10,10), AA(10,10)
COMMON BB(10,10), CMP(10,10), WKS(10,10), EIGEN(10)
COMMON RMOT(2), XMOT(3), COLUMN(10), ORDEN(10)
COMMON DELTA, V, VD, VQ, AID1, AIQ1, AID2, AIQ2, AIDM, AIQM

```

```

COMMON FIST, FIRD, FIRQ, REQ2, PAI, F, AKTOR, HP, TMOT, MAGV
COMMON SLIP, WROT, TORQUE, FISD, FISQ, V2, TOR1, TOR2, DXS
COMMON ANUM, PROT, DXM, DRS, DRR, DH, DS, SENS, COEF, AIQC
COMMON I, J, K, XC, NO, NOR, LDA, LFAIL, IDENT, NNO, N1, NVE
COMMON NL, AKVAB1, AKVAB2, AKB, LDEVEC, P, Q, CF, KOUNT, PC
COMMON PFAC, N, S, SB, AI1, AI2, AIM, EVAL, V1D, EVALT, SC, QC
COMMON AMAGSB, COLUMN1, COLUMN2, ZLS, ZEQ, ZM, ZF, ZT, FIROT
COMMON AMAGS, V1Q, V2D, V2Q, V1R, V1X, V1RD, V1RQ, V1XD, DXR
COMMON V1XQ, V11, V1D, V1IQ, V12, V12D, V12Q, V13, V13D, ZC
COMMON V13Q, V1, LDAA, LDAINV, VRED, VREDD, VREDQ, RRED
COMMON XRED, ZRED, ZMQ, AIT, AIDT, AIQT, VMQ, VMQD, VMQQ
COMMON SRED, SMQ, PRED, QRED, PMQ, QMQ, ZMC, VC, AIC, AIDC
COMMON V, V1, V1R, V1X, V2, V11, V12, V13, AI1, AI2, AIM, ZC
COMMON FIST, FIROT, ZM, ZEQ, ZLS, ZF, ZT, S, EVEC, ORDEN
COMMON SB, EIGEN, AA, BB, COLUMN, COLUMN1, COLUMN2, COEF, VC
COMMON EVAL, EVALT, EVECT, EVECINV, AMAGS, AIC
COMMON AMAGSB, MR1, MR2, FPL, FP2, VMQ, VRED, AIT, SRED
COMMON SMQ, ZMQ, ZRED, ZMC, SC
REAL MAGV
C-----
C          DESARROLLO DE LA SUBROUTINA
C-----
      DO 300 I=1,9
      DO 300 J=1,9
      CK1(I,J)=0.0
300 CONTINUE
      CK1(1,1)=-1
      CK1(2,2)=1
      CK1(3,3)=1
      CK1(4,4)=1
      CK1(5,5)=2.0*TMOT*2.0*PAI*F*CABS(S)
      CK1(6,1)=1
      CK1(6,6)=XRED
      CK1(6,8)=RMOT(1)/XC
      CK1(7,2)=1
      CK1(7,7)=XRED
      CK1(7,9)=RMOT(1)/XC
      CK1(8,2)=1
      CK1(8,8)=-1
      CK1(9,1)=1
      CK1(9,9)=1
C-----
C          TMOT=H (CONSTANTE DE INERCIA)
C-----
      WRITE (6,301)
301 FORMAT (/15X, 'MATRIZ K1'/)
      DO 302 I=1,9
302 WRITE(6,303) CK1(I,J), J=1,9)
303 FORMAT (5X,9F10.4)
C-----
C          K2 POR INSPECCION
C-----
      DO 304 I=1,9
      DO 304 J=1,9
      CK2(I,J)=0.0
304 CONTINUE
      CK2(1,1)=RMOT(1)/((XMOT(2)+XMOT(1))*(XMOT(3)+
      XMOT(1))-XMOT(1)**2)*(XMOT(2)+XMOT(1))
      CK2(1,2)=1
      CK2(1,3)=-RMOT(1)/((XMOT(2)+XMOT(1))*(XMOT(3)+
      XMOT(1))-XMOT(1)**2)*XMOT(1)
      CK2(1,8)=1
      CK2(2,1)=-1
      CK2(2,2)=RMOT(1)/((XMOT(2)+XMOT(1))*(XMOT(3)+
      XMOT(1))-XMOT(1)**2)*(XMOT(2)+XMOT(1))
      CK2(2,4)=-RMOT(1)/((XMOT(2)+XMOT(1))*(XMOT(3)+
      XMOT(1))-XMOT(1)**2)*XMOT(1)
      CK2(2,9)=1
      CK2(3,1)=RMOT(2)/(XMOT(1)**2-XMOT(3)+XMOT(1))
      *(XMOT(2)+XMOT(1))*XMOT(1)
      CK2(3,3)=-RMOT(2)/(XMOT(1)**2-(XMOT(3)+XMOT(1))
      *(XMOT(2)+XMOT(1)))*(XMOT(3)+XMOT(1))
      CK2(3,4)=-SLIP
      CK2(3,5)=-FIRQ
      CK2(4,2)=RMOT(2)/(XMOT(1)**2-(XMOT(3)+XMOT(1))
      *(XMOT(2)+XMOT(1)))*XMOT(1)
      CK2(4,3)=-SLIP
      CK2(4,4)=-RMOT(2)/(XMOT(1)**2-(XMOT(3)+XMOT(1))
      *(XMOT(2)+XMOT(1)))*(XMOT(3)+XMOT(1))
      CK2(4,5)=FIRD
      CK2(5,1)=-XMOT(1)/((XMOT(2)+XMOT(1))
      *(XMOT(3)+XMOT(1))-XMOT(1)**2)*FIRQ
      CK2(5,2)=XMOT(1)/((XMOT(2)+XMOT(1))
      *(XMOT(3)+XMOT(1))-XMOT(1)**2)*FIRD
      CK2(5,3)=XMOT(1)/((XMOT(2)+XMOT(1))
      *(XMOT(3)+XMOT(1))-XMOT(1)**2)*FISQ
      CK2(5,4)=-XMOT(1)/((XMOT(2)+XMOT(1))
      *(XMOT(3)+XMOT(1))-XMOT(1)**2)*FISD
      CK2(6,2)=1
      CK2(6,6)=RMOT(1)+RRED
      CK2(6,7)=XRED
      CK2(6,9)=RMOT(1)/XC
      CK2(7,1)=-1

```

```

CK2 (7,6)=-XRED
CK2 (7,7)=RMOT (1)+RRED
CK2 (7,8)=-RMOT (1)/XC
CK2 (8,1)=(XC/(XMOT (2)+XMOT (1)))*(XMOT (3)+
XMOT (1))-XMOT (1)**2*(XMOT (2)+XMOT (1))-1
CK2 (8,2)=RMOT (1)/((XMOT (2)+XMOT (1))*(XMOT (3)+
XMOT (1))-XMOT (1)**2*(XMOT (2)+XMOT (1)))
CK2 (8,3)=-XC/(XMOT (2)+XMOT (1))*(XMOT (3)+
XMOT (1))-XMOT (1)**2*XMOT (1)
CK2 (8,4)=-RMOT (1)/((XMOT (2)+XMOT (1))*(XMOT (3)+
XMOT (1))-XMOT (1)**2*XMOT (1))
CK2 (8,6)=-XC
CK2 (9,1)=RMOT (1)/((XMOT (2)+XMOT (1))*(XMOT (3)+
XMOT (1))-XMOT (1)**2*(XMOT (2)+XMOT (1)))
CK2 (9,2)=1-(XC/(XMOT (2)+XMOT (1))*(XMOT (3)+
XMOT (1))-XMOT (1)**2*(XMOT (2)+XMOT (1)))
CK2 (9,3)=-RMOT (1)/((XMOT (2)+XMOT (1))*(XMOT (3)+
XMOT (1))-XMOT (1)**2*XMOT (1))
CK2 (9,4)=XC/(XMOT (2)+XMOT (1))*(XMOT (3)+XMOT (1))-
XMOT (1)**2*XMOT (1)
CK2 (9,7)=XC
WRITE (6,305)
305 FORMAT (//15X,'MATRIZ K2'/)
DO 306 I=1,9
306 WRITE (6,307) (CK2 (I,J),J=1,9)
307 FORMAT (5X,9F10.4)
RETURN
END
C-----
C "CHARA"
C ESTA SUBROUTINA OBTIENE LA MATRIZ A
C CARACTERISTICA Y LA MATRIZ A TRANSPUESTA
C-----
C NOTA: ¡ESTA SUBROUTINA!
C ¡CK3=CK1 (INV)!
C-----
SUBROUTINE CHARA
C-----
C SE DECLARAN DATOS
C-----
DIMENSION EVAL (10),EVALT (10)
COMMON CK1 (10,10),CK2 (10,10),CK3 (10,10),CK4 (10,10)
COMMON CK5 (10,10),CK6 (10,10),CK7 (10,10),XSOL (10,10)
COMMON A (10,10),AET (10,10),EVEC (10,10),EVECT (10,10)
COMMON EVECINV (10,10),EVECTINV (10,10),MR1 (10,10)
COMMON MR2 (10,10),FP1 (10,10),FP2 (10,10),AA (10,10)
COMMON BB (10,10),CMP (10,10),WKS (10),EIGEN (10)
COMMON RMOT (2),XMOT (3),COLUM (10),ORDEN (10)
COMMON DELTA,V,VD,VQ,AID1,AIQ1,AID2,AIQ2,AIDM,AIQM
COMMON FIST,FIRD,FIRQ,REQ2,PAI,F,AKTOR,HP,TMOT,MAGV
COMMON SLIP,WROT,TORQUE,FISD,FISQ,V2,TOR1,TOR2,DXS
COMMON ANUM,PROT,DXM,DRS,DRR,DH,DS,SENS,COEF,AIQC
COMMON I,J,K,XC,NO,NOR,LDA,LFAIL,IDENT,NNO,N1,NVE
COMMON NL,AKVAB1,AKVAB2,AKB,LDEVEC,P,Q,CF,KOUNT,PC
COMMON PFAC,N,S,SB,A11,A12,AIM,EVAL,V1D,EVALT,SC,QC
COMMON AMAGSB,COLUM1,COLUM2,ZLS,ZEQ,ZM,ZF,ZT,FIROT
COMMON AMAGS,V1Q,V2D,V2Q,V1R,V1X,V1RD,V1RQ,V1XD,DXR
COMMON V1XQ,V11,V11D,V11Q,V12,V12D,V12Q,V13,V13D,ZC
COMMON V13Q,V1,LDAA,LDAINV,VRED,VREDD,VREDQ,RRED
COMMON XRED,ZRED,ZMQ,AIT,AIDT,AIQT,VMQ,VMQD,VMQQ
COMMON SRED,SMQ,PRED,QRED,PMQ,QMQ,ZMC,VC,AIC,AIDC
COMMON V,V1,V1R,V1X,V2,V11,V12,V13,A11,A12,AIM,ZC
COMMON FIST,FIROT,ZM,ZEQ,ZLS,ZF,ZT,S,EVEC,ORDEN
COMMON SB,EIGEN,AA,BB,COLUM,COLUM1,COLUM2,COEF,VC
COMMON EVAL,EVALT,EVECT,EVECINV,EVECTINV,AMAGS,AIC
COMMON AMAGSB,MR1,MR2,FP1,FP2,VMQ,VRED,AIT,SRED
COMMON SMQ,ZMQ,ZRED,ZMC,SC
REAL MAGV
C-----
C DESARROLLO DE LA SUBROUTINA
C-----
CALL INVERT (N,CK1,CK3)
WRITE (6,400)
C-----
C MATRIZ K3 = MATRIZ CK1 INVERSE ES LA
C MATRIZ "B"
C-----
400 FORMAT (//,18X,'*****',/19X,'MATRIZ DE ENTRADAS DEL
SISTEMA "B"',/18X,'*****',/)
DO 401 I=1,N
WRITE (6,402) (CK3 (I,J),J=1,N)
401 CONTINUE
402 FORMAT (5X,9F10.4)
C-----
C MATRIZ CARACTERISTICA A=-CK1 (INV)*CK2
C-----
DO 413 I=1,N
DO 413 J=1,N
A (I,J)=0.0
DO 413 K=1,N
413 A (I,J)=A (I,J)-CK3 (I,K)*CK2 (K,J)*2.0*PAI*F
WRITE (6,414)
414 FORMAT (//,23X,'*****',/24X,'MATRIZ CARACTERISTICA
"A"',/23X,'*****',/)

```

D.3A Subrutina de Sensibilidad

Esta subrutina solo se aplica al modelo de 5° orden de la máquina de inducción como generador, en función de flujos electromagnéticos o corrientes.

```

C-----
C|           "SENSI"           |
C-----
C-----
C |   ESTA SUBROUTINA CALCULA LA SENSITIVIDAD DEL SISTEMA
C |   MATRICIAL |
C-----
SUBROUTINE SENSI
C-----
C|           SE DECLARAN DATOS           |
C-----
DIMENSION EVAL(10),EVALT(10)
COMMON CK1(10,10),CK2(10,10),CK3(10,10),CK4(10,10)
COMMON CK5(10,10),CK6(10,10),CK7(10,10),XSOL(10,10),A(10,10)
COMMON AET(10,10),EVEC(10,10),EVECT(10,10),AA(10,10)
COMMON BB(10,10),ORDEN(10),EVECINV(10,10),EVECTINV(10,10)
COMMON EIGEN(10),COLUM(10),RMOT(2),XMOT(3),WKS(10)
COMMON MR1(10,10),MR2(10,10),FP1(10,10),FP2(10,10)
COMMON DELTA,V,VD,VQ,AID1,AIQ1,AID2,AIQ2,FIST,FIRD,FIRQ
COMMON REQ2,PAI,F,AKTOR,HP,TMOT,MAGV,SLIP,WROT,TORQUE
COMMON FISD,FISQ,TOR1,TOR2,DXS,ANUM,PROT,DXR,DXM,DRS,DRR
COMMON DH,DS,SENS,COEF,I,J,K,NO,NOR,LDA,LFAIL,IDENT,NNO
COMMON N1,NVE,NL,AKVAB1,AKVAB2,AKB,LDEVEC,P,Q,CF,KOUNT,PFAC
COMMON N,LDAA,LDAINV,S,SB,AI1,AI2,AIM,AIDM,AIQM,EVAL,EVALT,A
COMMON MAGSB,AMAGS,COLUM1,COLUM2,Zf,Z1,Z2,ZM,ZT,FIROT,V1
COMMON VD1,VQ1,V2,VD2,VQ2,VT,VDT,VQT
COMPLEX V,V1,V2,VT,AI1,AI2,AIM,FIST,FIROT,ZM,Z2,Z1
COMPLEX Zf,ZT,S,EVEC,ORDEN,SB,EIGEN,AA,BB,MR1,MR2,FP1,FP2
COMPLEX COLUM,COLUM1,COLUM2,EVECT,EVECINV,EVECTINV,AMAGS
COMPLEX AMAGSB,COEF,EVAL,EVALT
REAL MAGV
C-----
C|           DESARROLLO DE LA SUBROUTINA           |
C-----
NO=5
DO 500 I=1,NO
EIGEN(I)=CMPLX(EVAL(I))
CONTINUE
DO 502 I=1,NO
DO 502 J=1,NO
AA(I,J)=CMPLX(EVEC(I,J))
500 BB(I,J)=CMPLX(EVECT(I,J))
READ(5,506)DXS,DXR,DXM,DRS,DRR,DH,DS
WRITE(6,525)
525 FORMAT(/,23X,'*****',
1/24X,'ANALISIS DE SENSITIVIDAD',
2/23X,'*****',/)
WRITE(6,507)DXS,DXR,DXM,DRS,DRR,DH,DS
506 FORMAT(7F10.4)
507 FORMAT(/1X,7F10.4)
DO 508 I=1,NO
DO 508 J=1,NO
CK1(I,J)=0.0
508 CK2(I,J)=0.0
IF(DXS.NE.0.0)GOTO 509
IF(DXR.NE.0.0)GOTO 510
IF(DXM.NE.0.0)GOTO 511
IF(DRS.NE.0.0)GOTO 512
IF(DRR.NE.0.0)GOTO 513
IF(DH.NE.0.0)GOTO 514
IF(DS.NE.0.0)GOTO 515
509 CK1(1,1)=1.0
CK1(3,3)=1.0
CK2(1,3)=1.0
CK2(3,1)=-1.0
GOTO 516
510 CK1(2,2)=1.0
CK1(4,4)=1.0
CK2(2,4)=SLIP
CK2(2,5)=-AIQ2
CK2(4,2)=-SLIP
CK2(4,5)=AID2
GOTO 516
511 CK1(1,1)=1.0
CK1(1,2)=1.0
CK1(2,1)=1.0
CK1(2,2)=1.0
CK1(3,3)=1.0
CK1(3,4)=1.0
CK1(4,3)=1.0
CK1(4,4)=1.0
CK2(1,3)=1.0
CK2(1,4)=1.0
CK2(2,3)=SLIP
CK2(2,4)=SLIP
CK2(2,5)=-AIQ1
CK2(3,1)=-1.0
CK2(3,2)=-1.0
CK2(4,1)=-SLIP
CK2(4,2)=-SLIP
CK2(4,5)=AID1
CK2(5,1)=-AIQ2
CK2(5,2)=AIQ1
CK2(5,3)=AID2
CK2(5,4)=-AID1
GOTO 516
512 CK2(1,1)=1.0
CK2(3,3)=1.0
GOTO 516
513 CK2(2,2)=1.0
CK2(4,4)=1.0
GOTO 516
514 CK1(5,5)=2.0
GOTO 516
515 CK2(2,3)=XMOT(1)
CK2(2,4)=XMOT(2)+XMOT(1)
CK2(4,1)=-XMOT(1)
CK2(4,2)=-XMOT(2)-XMOT(1)
516 CONTINUE
DO 517 I=1,NO
DO 517 J=1,NO
CK4(I,J)=0.0
DO 517 K=1,NO
CK4(I,J)=CK4(I,J)-CK3(I,K)*CK1(K,J)
517 DO 518 I=1,NO
DO 518 J=1,NO
CK5(I,J)=0.0
DO 518 K=1,NO
CK5(I,J)=CK5(I,J)+CK4(I,K)*XSOL(K,J)
518 DO 519 I=1,NO
DO 519 J=1,NO
CK6(I,J)=0.0
DO 519 K=1,NO
CK6(I,J)=CK6(I,J)-2.0*PAI*F*CK3(I,K)*CK2(K,J)
519 IF(DXS.NE.0.0)SCHP=DXS*XMOT(3)
IF(DXR.NE.0.0)SCHP=DXR*XMOT(2)
IF(DXM.NE.0.0)SCHP=DXM*XMOT(1)
IF(DRS.NE.0.0)SCHP=DRS*RMOT(1)
IF(DRR.NE.0.0)SCHP=DRR*RMOT(2)
IF(DH.NE.0.0)SCHP=DH*TMOT*CABS(S)
IF(DS.NE.0.0)SCHP=DS*SLIP
DO 520 I=1,NO
DO 520 J=1,NO
CK7(I,J)=(CK5(I,J)+CK6(I,J))*SCHP
DO 526 K=1,NO
DO 521 I=1,NO
COLUM(I)=0.0
DO 521 J=1,NO
COLUM(I)=COLUM(I)+CK7(I,J)*AA(J,K)
521 COLUM1=0.0
DO 522 I=1,NO
COLUM1=COLUM1+COLUM(I)*BB(I,K)
COLUM2=0.0
DO 523 I=1,NO
COLUM2=COLUM2+AA(I,K)*BB(I,K)
COEF=COLUM1/COLUM2
EIGEN(K)=EIGEN(K)+COEF
524 WRITE(6,524)EIGEN(K)
526 FORMAT(/1X,2E20.11)
CONTINUE
RETURN
END

```

D.4 Programa de Análisis en el Tiempo

```

C-----
C          INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
C          ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA
C          MECANICA Y ELÉCTRICA
C          UNIDAD ZACATENCO
C          S.E.P.I
C          PROGRAMAS DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
C-----
C          PROGRAMA DE ANÁLISIS EN EL TIEMPO
C          UTILIZANDO EL MODELO LINEAL DE SÉPTIMO
C          ORDEN QUE CONSTA DE UNA MÁQUINA DE INDUCCIÓN,
C          EN MODO GENERADOR CON IMPEDANCIA DE RED DE
C          TRANSMISIÓN Y CON CAPACITOR PARA
C          SU AUTOEXCITACIÓN
C-----
C ESTE PROGRAMA CONSTA DE OCHO SUBROUTINAS:
C LAS CUALES SON:
C - OPOINT
C - KMATRIX
C - CHARA
C - INVERT
C - SOLUC
C - OUTF
C - RUNKUT
C - FCT
C-----
C          NOMENCLATURA USADA
C          RMOT(1)= Resistencia del estator del Generador.
C          RMOT(2)= Resistencia del rotor del Generador.
C          XMOT(1)= Reactancia del estator del Generador.
C          XMOT(2)= Reactancias del rotor del Generador.
C          XMOT(3)= Reactancia de magnetización del Generador
C          REQ2=Resistencia equivalente del rotor y
C          deslizamiento.
C          XC= Reactancia Capacitiva.
C          RRED= Resistencia de la Red de Transmisión.
C          XRED= Reactancia de la Red de Transmisión.
C          ZEQ= Impedancia del Rotor del Generador.
C          ZM= Impedancia de Magnetización del Generador.
C          ZF=Impedancia equivalente entre ZEQ y ZM.
C          ZLS= Impedancia en el Estator del Generador.
C          ZE1= Impedancia total del Generador.
C          ZM1= ZE1
C          ZC= Impedancia del Capacitor.
C          ZMC= Impedancia equivalente entre el Generador y
C          el capacitor.
C          ZRED= Impedancia de la Red de Transmisión.
C          ZT= Impedancia total del Sistema Máquina Bus
C          Infinito.
C          AIT= Corriente total del Sistema Máquina Bus
C          Infinito.
C          AIDT= Corriente total del Sistema Máquina Bus
C          Infinito en el eje d.
C          AIQT= Corriente total del Sistema Máquina Bus
C          Infinito en el eje q.
C          AIC= Corriente en el Capacitor
C          AIDC= Corriente en el Capacitor en el eje d
C          AIQC= Corriente en el Capacitor en el eje q
C          AI1= Corriente en el Estator del Generador.
C          AID1= Corriente en el Estator en eje d.
C          AIQ1= Corriente en el Estator en eje q.
C          AI2= Corriente en el Rotor del Generador.
C          AID2= Corriente en el Rotor en eje d.
C          AIQ2= Corriente en el Rotor en eje q.
C          AIM= Corriente de Magnetización en el Generador.
C          AIDM= Corriente de Magnetización en el eje d.
C          AIQM= Corriente de Magnetización en el eje q.
C          V= Voltaje del Bus Infinito.
C          VD= Voltaje del Bus Infinito en el eje d.
C          VQ= Voltaje del Bus Infinito en el eje q.
C          VRED= Caída de Tensión en la Red de Transmisión.
C          VREDD= Caída de Tensión en la Red de Transmisión
C          en el eje d
C          VREDQ= Caída de Tensión en la Red de Transmisión
C          en el eje q
C          VMQ= Tensión en las terminales del Generador.
C          VMQD= Tensión en las terminales del Generador en
C          el eje d
C          VMQQ= Tensión en las terminales del Generador en
C          el eje q
C          VC= Tensión en el Capacitor.
C          VCD= Tensión en el Capacitor en el eje d.
C          VCO= Tensión en el Capacitor en el eje q.
C          V1= Caída de Tensión en el Estator.
C          V1D= Caída de Tensión en el Estator en eje d
C          V1Q= Caída de Tensión en el Estator del Generador
C          en el eje q.
C          V1R= Caída de Tensión en la Resistencia del
C          Estator.
C          V1RD= Caída de Tensión en la Resistencia del
C          Estator en el eje d.
C          V1RQ= Caída de Tensión en la Resistencia del

```

```

C          Estator en el eje q.
C          V1X= Caída de Tensión en la Reactancia del Estator
C          del Generador.
C          V1XD= Caída de Tensión en la Reactancia del
C          Estator del Generador en el eje d.
C          V1XQ= Caída de Tensión en la Reactancia del
C          Estator del Generador en el eje q.
C          V2= Caída de Tensión en el Rotor.
C          V2D= Caída de Tensión en el Rotor en eje d.
C          V2Q= Caída de Tensión en el Rotor en eje q.
C          V11= Caída de Tensión debida al deslizamiento
C          V11D= Caída de Tensión debida al deslizamiento en
C          el eje d.
C          V11Q= Caída de Tensión debida al deslizamiento en
C          el eje q.
C          V12= Caída de Tensión debida a la Resistencia del
C          Rotor.
C          V12D= Caída de Tensión debida a la Resistencia del
C          Rotor en el eje d.
C          V12Q= Caída de Tensión debida a la Resistencia del
C          Rotor en el eje q.
C          V13= Caída de Tensión debida a la Reactancia del
C          Rotor.
C          V13D= Caída de Tensión debida a la Reactancia del
C          Rotor en el eje d.
C          V13Q= Caída de Tensión debida a la Reactancia del
C          Rotor en el eje q.
C          SLIP= Deslizamiento.
C          DELTA= Angulo delta.
C          FIST= Flujo Electromagnético en el Estator.
C          FISD= Flujo Electromagnético en el Estator en el
C          eje d.
C          FISQ= Flujo Electromagnético en el Estator en el
C          eje q.
C          FIROT= Flujo Electromagnético en el Rotor.
C          FIRQ= Flujo Electromagnético en el Rotor en el eje
C          d.
C          FIRQ= Flujo Electromagnético en el Rotor en el eje
C          q.
C          TOR1= Par Electromagnético en el estator.
C          TOR2= Par Electromagnético en el rotor.
C          PROT= Potencia en el rotor.
C          WROT= Velocidad en el rotor.
C          TORQUE= Comprobación del Par Electromagnético.
C          PAI= Pi (3.141516).
C          F= Frecuencia del sistema (60 Hz).
C          HP= Caballos de Potencia del Generador.
C          TMOT= Constante de Inercia del Generador.
C          P= Potencia Activa total del Sistema Máquina Bus
C          Infinito.
C          S= Potencia Aparente total del Sistema Máquina Bus
C          Infinito.
C          Q= Potencia Reactiva total del Sistema Máquina Bus
C          Infinito.
C          PC= Potencia Activa en el capacitor.
C          SC= Potencia Aparente en el capacitor.
C          QC= Potencia Reactiva en el capacitor.
C          PRED= Potencia Activa en la Red de Transmisión.
C          SRED= Potencia Aparente en la Red de Transmisión.
C          QRED= Potencia Reactiva en la Red de Transmisión.
C          PMQ= Potencia Activa en el Generador.
C          SMQ= Potencia Aparente en el Generador.
C          QMQ= Potencia Reactiva en el Generador.
C          N= Número de Máquinas para el equivalente.
C          ORDEN= Orden del Sistema.
C          ANUM= Numero de generadores para el equivalente.
C          AKTOR= Contador.
C          CF= coeficiente de 1
C          KOUNT= Contador
C          PFAC = Voltaje En El Eje Directo.
C          AKVAB1= Base Anterior
C          AKVAB2= Base Nueva
C          MAGV= Magnitud de un número.
C          AMAGS,AMAGSB = Valor máximo de un número.
C-----
C          INICIO DEL PROGRAMA
C-----
C          PROGRAM MAQREDTMP
C-----
C          SE DECLARAN DATOS
C-----
COMMON CK1 (10,10) ,CK2 (10,10) ,CK4 (10,10) ,CK5 (10,10)
COMMON CK6 (10,10) ,CK7 (10,10) ,WKS (10) ,RMOT (4)
COMMON DELTA, V, VD, VQ, AID1, AIQ1, AID2, AIQ2, FIST, REQ2
COMMON PAI, F, AKTOR, HP, TMOT, MAGV, SLIP, WROT, TORQUE, ZF
COMMON TOR1, TOR2, DXS, ANUM, PROT, DXR, DXM, DRS, DRR, DH
COMMON DS, SENS, I, J, K, AIDM, AIQM, AIM, AI1, AI2, AIT, ZM1
COMMON ZT, V1Q, V2D, N1, AKVAB1, AKVAB2, AKB, P, Q, CF, KOUNT
COMMON PFAC, SB, AMAGSB, AMAGS, ZEQ, ZLS, ZM, FIROT, XC, V2Q
COMMON V1R, V1X, V1RD, V2, V1, V1D, V1RQ, V1XD, V1XQ, V11, VC
COMMON V11D, V11Q, V12, V12D, V12Q, V13, V13D, V13Q, VRED
COMMON VREDD, VREDQ, VMQ, RRED, XRED, ZRED, AIDT, AIQT, AIC
COMMON VMQD, VMQQ, SRED, SMQ, PRED, QRED, PMQ, QMQ, S, ZMC
COMMON AIDC, AIQC, SC, QC, PC, ZC

```

```

COMMON /S3/N
COMMON /S4/A(40,40),CK3(10,10),N81,PE,FISD,FISQ
COMMON /S4/FIRD,FIRQ,XMOT(4)
DOUBLE PRECISION A,CK3
EXTERNAL FCT,OUTP
COMPLEX AI1,AI2,FIST,FIROT,ZEQ,ZLS,S,SB,AMAGS
COMPLEX AMAGSB,SRED,SMQ,ZF,V,VMQ,V1,V1R,V1X,V2
COMPLEX V11,V12,V13,VRED,AIT,AIM,ZMQ,ZRED,ZT,ZM
COMPLEX ZC,ZMC,VC,AIC,SC
REAL MAGV
-----
C
C          PROGRAMA PRINCIPAL
-----
C
OPEN(5,FILE='1HPGRC.DAT')
OPEN(6,FILE='1HPGRC.SAL')
WRITE(6,100)
-----
C
C          LEE LOS DATOS DEL GENERADOR
-----
C
100      FORMAT(/,23X,'*****',/24X,'DATOS          DEL
GENERADOR',/23X,'*****',/)
      READ(5,101)(RMOT(I),I=1,2)
      READ(5,101)(XMOT(I),I=1,3)
      READ(5,101)RRED,XRED,XC
      READ(5,101)SLIP,TMOT,HP,ANUM
      READ(5,101)MAGV,DELTA
      READ(5,101)PAI,F,SENS
101      FORMAT(4F10.5)
-----
C
C CAMBIO DE LOS PARÁMETROS DEL GENERADOR PARA LA
C NUEVA BASE
C ANUM=NÚMERO DE LOS GENERADORES QUE FORMAN EL
C EQUIVALENTE
C AKVAB1=BASE ANTERIOR,AKVAB2=BASE NUEVA IGUALES AMBOS
SISTEMAS
-----
C
      AKVAB1=0.746*HP
      AKVAB2=AKVAB1
      AKB=AKVAB2/AKVAB1
      RMOT(1)=RMOT(1)*AKB
      RMOT(2)=RMOT(2)*AKB
      XMOT(1)=XMOT(1)*AKB
      XMOT(2)=XMOT(2)*AKB
      XMOT(3)=XMOT(3)*AKB
      XC=XC*AKB
      RRED=RRED*AKB
      XRED=XRED*AKB
      WRITE(6,102)RMOT(1),RMOT(2)
102      FORMAT(/5X,'RMOT1=',F10.5,1X,'RMOT2=',F10.5)
-----
C
C IMPEDANCIA DE LA RED (RRED,XRED)
-----
C
      WRITE(6,103)RRED,XRED,XC
103      FORMAT(/6X,'RRED=',F10.5,2X,'XRED=',F10.5,3X,
'XC=',F10.5)
-----
C
C XMOT(1)=XM,XMOT(2)=X2,XMOT(3)=X1
C REACTANCIAS DE SALIDA(X1,X2)
-----
C
      WRITE(6,104)XMOT(1),XMOT(2),XMOT(3)
104      FORMAT(/8X,'XM=' ,F10.5,4X,'X2=' ,F10.5,3X,
'X1=' ,F10.5)
      WRITE(6,106)SLIP,TMOT,HP,ANUM
106      FORMAT(/6X,'SLIP=' ,F10.5,2X,'TMOT=' ,F10.5,3X,
'HP=' ,F10.5,3X,'ANUM=' ,F10.5)
      WRITE(6,107)MAGV,DELTA
107      FORMAT(/6X,'MAGV=' ,F10.5,1X,'DELTA=' ,F10.5)
      WRITE(6,108)PAI,F
108      FORMAT(/7X,'PAI=' ,F10.5,2X,'FREQ=' ,F10.5)
-----
C
C          EMPIEZAN A LLAMAR SUBRUTINAS
-----
C
      CALL OPOINT
      CALL KMATRIX
      CALL CHARA
      STOP
END
-----
C
C          SUBRUTINAS
-----
C
C          "OPOINT"
C ESTA SUBRUTINA EMPLEA LAS CONDICIONES DE
C OPERACIÓN DEL GENERADOR
-----
C
C          SUBROUTINE OPOINT
-----
C
C          DECLARACION LOS DATOS
-----
C
C          SE DECLARAN DATOS
-----
C
COMMON CK1(10,10),CK2(10,10),CK4(10,10),CK5(10,10)
COMMON CK6(10,10),CK7(10,10),WKS(10),RMOT(4)
COMMON DELTA,V,VD,VQ,AID1,AIQ1,AID2,AIQ2,FIST,REQ2
COMMON PAI,F,AKTOR,HP,TMOT,MAGV,SLIP,WROT,TORQUE,ZF
COMMON TOR1,TOR2,DXS,ANUM,PROT,DXR,DXM,DRS,DRR,DH

```

```

COMMON DS,SENS,I,J,K,AIDM,AIQM,AIM,AI1,AI2,AIT,ZMQ
COMMON ZT,V1Q,V2D,N1,AKVAB1,AKVAB2,AKB,P,Q,CF,KOUNT
COMMON PFAC,SB,AMAGSB,AMAGS,ZEQ,ZLS,ZM,FIROT,XC,V2Q
COMMON V1R,V1X,V1RD,V2,V1,V1D,V1RQ,V1XD,V1XQ,V11,VC
COMMON V11D,V11Q,V12,V12D,V12Q,V13,V13D,V13Q,VRED
COMMON VREDD,VREDQ,VMQ,RRED,XRED,ZRED,AIDT,AIQT,AIC
COMMON VMQD,VMQQ,SRED,SMQ,PRRED,QRED,PMQ,QMQ,S,ZMC
COMMON AIDC,AIQC,SC,QC,PC,ZC
COMMON /S3/N
COMMON /S4/A(40,40),CK3(10,10),N81,PE,FISD,FISQ
COMMON /S4/FIRD,FIRQ,XMOT(4)
DOUBLE PRECISION A,CK3
EXTERNAL FCT,OUTP
COMPLEX AI1,AI2,FIST,FIROT,ZEQ,ZLS,S,SB,AMAGS
COMPLEX AMAGSB,SRED,SMQ,ZF,V,VMQ,V1,V1R
COMPLEX V1X,V2,V11,V12,V13,VRED,AIT,AIM,ZMQ
COMPLEX ZRED,ZT,ZM,ZC,ZMC,VC,AIC,SC
REAL MAGV
-----
C
C          DESARROLLO DE LA SUBRUTINA
-----
C
      VQ=MAGV*COS(DELTA*PAI/180.0)
      VD=MAGV*SIN(DELTA*PAI/180.0)
      V=CMPLX(VQ,VD)
      KOUNT=0
-----
C
C          CÁLCULO DE LAS IMPEDANCIAS
-----
C
210      REQ2=RMOT(2)/SLIP
C IMPEDANCIA EN EL ROTOR
      ZEQ=CMPLX(REQ2,XMOT(2))
C IMPEDANCIA DE MAGNETIZACIÓN
      ZM=CMPLX(0.0,XMOT(1))
C IMPEDANCIA COMBINADA (PARALELO ENTRE LA DEL ROTOR
C Y LA DE MAGNETIZACIÓN)
      ZF=(ZEQ*ZM)/(ZEQ+ZM)
C IMPEDANCIA DEL ESTATOR
      ZLS=CMPLX(RMOT(1),XMOT(3))
C IMPEDANCIA TOTAL DE LA MAQUINA
C
      ZEQ1=ZLS+ZM*ZEQ/(ZEQ+ZM)
      ZMQ=ZF+ZLS
C
      ZC= IMPEDANCIA DEL CAPACITOR
      ZC=CMPLX(0.0,-XC)
C ZMC= IMPEDANCIA DE LA MAQUINA-CAPACITOR
      ZMC=(ZMQ*ZC)/(ZMQ+ZC)
C IMPEDANCIA DE LA RED DE TRANSMISION
      ZRED=CMPLX(RRED,XRED)
C IMPEDANCIA TOTAL DEL SISTEMA MAQUINA BUS INFINITO
C CON MODELADOP DE RED D TRANSMISIÓN
      ZT=ZMC+ZRED
-----
C
C          NOTA: EL "SIGNO MENOS" EN LA SIGUIENTE
C FORMULA INDICA QUE LAS ECUACIONES
C QUE SE EMPLEARON PARA EL MODELO DE UN
C GENERADOR FUERON DE UN GENERADOR POR LO QUE
C YA SEA LA SIMULACIÓN DE LA MÁQUINA COMO
C MOTOR O COMO GENERADOR SIEMPRE SE
C CONSERVA EL SIGNO MENOS EN EL VOLTAJE.
-----
C
C          CORRIENTE TOTAL EN EL CIRCUITO
      AIT=V/ZT
      AIDT=AIMAG(AIT)
      AIQT=REAL(AIT)
-----
C
C          CON ESTE VALOR DE CORRIENTE SE PROCEDE A
C CALCULAR EL VALOR DE LA CAIDA DE TENSIÓN EN LA
C IMPEDANCIA DE LA RED DE TRANSMISION
-----
C
      VRED=ZRED*AIT
      VREDD=AIMAG(VRED)
      VREDQ=REAL(VRED)
-----
C
C          LUEGO SE SACA LA DIFERENCIA ENTRE EL VALOR
C DEL VOLTAJE DEL BUS INFINITO Y LA CAÍDA DE
C TENSIÓN EN LA IMPEDANCIA PARA OBTENER EL
C VALOR DE VOLTAJE EN LAS TERMINALES DE LA
C MAQUINA Y EL CAPACITOR.
-----
C
      VMQ=V-VRED
      VMQD=AIMAG(VMQ)
      VMQQ=REAL(VMQ)
-----
C
C          COMO EL CAPACITOR Y LA IMPEDANCIA TOTAL
C DE LA MAQUINA ESTAN EN PARALELO EL VALOR
C DEL VOLTAJE ES EL MISMO PARA AMBOS
-----
C
      VC=VMQ
      VCD=AIMAG(VC)
      VCQ=REAL(VC)
-----
C
C          TENIENDO EL VALOR DEL VOLTAJE EN EL NODO
C DONDE SE ENCUENTRA CONECTADA TANTO LA
C MÁQUINA COMO EL CAPACITOR SE PROCEDE AL
C CÁLCULO DE LAS CORRIENTES TANTO EN EL
C CAPACITOR COMO EN LAS TERMINALES DE LA

```

```

C MÁQUINA, TENIENDO:
C-----
      AIC=VC/ZC
      AIDC=AIMAG(AIC)
      AIQC=REAL(AIC)
C-----
C TENIENDO EL VALOR DEL VOLTAJE EN LAS
C TERMINALES DE LA MAQUINA SE PROCEDE A
C CALCULAR EL VALOR DE LA CORRIENTE EN EL
C ESTATOR UTILIZANDO SOLO EL VALOR DE LA
C IMPEDANCIA DE LA MÁQUINA, TENIENDO:
C-----
      AI1=-VMQ/ZMQ
      AID1=AIMAG(AI1)
      AIQ1=REAL(AI1)
C      CORRIENTE EN EL ROTOR
      AI2=(VMQ+ZLS*AI1)/ZEQ
      AID2=AIMAG(AI2)
      AIQ2=REAL(AI2)
C      CORRIENTE DE MAGNETIZACION AIM
      AIM=AI1-AI2
      AIDM=AIMAG(AIM)
      AIQM=REAL(AIM)
C-----
C CÁLCULO DE LAS CAIDAS DE TENSION
C-----
C CAÍDA DE TENSION DEBIDAS EN EL ESTATOR
      V1=ZLS*AI1
      V1D=AIMAG(V1)
      V1Q=REAL(V1)
C CAÍDA DE TENSION DEBIDAS A LA RESISTENCIA DEL
C ESTATOR
      V1R=RMOT(1)*AI1
      V1RD=AIMAG(V1R)
      V1RQ=REAL(V1R)
C CAÍDA DE TENSION DEBIDAS A LA REACTANCIA
C DEL ESTATOR
      V1X=XMOT(3)*AI1
      V1XD=AIMAG(V1X)
      V1XQ=REAL(V1X)
C CAÍDA DE TENSION EN EL ROTOR (VOLTAJE INTERNO DE
C LA MÁQUINA)
      V2=ZF*AI1
      V2D=AIMAG(V2)
      V2Q=REAL(V2)
C CAÍDA DE TENSION EN EL ROTOR TOTAL
      V2=ZF*AI1
      V2D=AIMAG(V2)
      V2Q=REAL(V2)
C CAÍDA DE TENSION DEBIDA AL PRODUCTO DEL
C-----
C DESLIZAMIENTO POR EL VOLTAJE INTERNO
C-----
      V1=SLIP*V2
      V1D=AIMAG(V1)
      V1=REAL(V1)
C CAÍDA DE TENSION DEBIDA AL PRODUCTO DE LA
C RESISTENCIA EN EL ROTOR POR EL VOLTAJE
C INTERNO
      V2=RMOT(2)*AI2
      V2D=AIMAG(V2)
      V2Q=REAL(V2)
C CAÍDA DE TENSION DEBIDA AL PRODUCTO DE LA
C REACTANCIA POR EL VOLTAJE INTERNO
      V3=AI2*SLIP*XMOT(2)
      V3D=AIMAG(V3)
      V3Q=REAL(V3)
C-----
C      CÁLCULO DEL ANGULO DELTA
C-----
      DELTA=ATAN2(VD,VQ)*180.0/PAI
C-----
C CÁLCULO DE FLUJOS ELECTROMAGNÉTICOS
C-----
C      FLUJOS EN EL ESTATOR
      FIST=(XMOT(1)+XMOT(3))*AI1+XMOT(1)*AI2
      FIST=(XMOT(1)+XMOT(3))*AI1+XMOT(1)*AI2
      FISD=AIMAG(FIST)
      FISQ=REAL(FIST)
C      FLUJOS EN EL ROTOR
      FIROT=XMOT(1)*AI1+(XMOT(1)+XMOT(2))*AI2
      FIR=AIMAG(FIROT)
      FIRQ=REAL(FIROT)
C-----
C CÁLCULO DEL PAR ELECTROMAGNÉTICO TANTO
C EN ESTATOR COMO EN ROTOR
C-----
      TOR1=FISD*AIQ1-FISQ*AID1
      TOR2=FIR*AIQ2-FIRQ*AID2
C CÁLCULO DE LA POTENCIA DEL ROTOR
      PROT=(CABS(AI2))*2*REAL(ZEQ)
C CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DEL ROTOR
      WROT=1-SLIP
      TORQUE=PROT*(1-SLIP)
      AKTOR=0.0

C-----
C      CÁLCULO DE S, P Y Q
C-----
C CÁLCULO DE LA IMPEDANCIA DE LA RED DE
C TRANSMISIÓN.
      SRED=VRED*CONJG(AIT)
      AMAGS=CABS(SRED)
      QRED=AIMAG(SRED)
      PRED=REAL(SRED)
C CÁLCULO DE LA POTENCIA EN LA MÁQUINA
      SMQ=VMQ*CONJG(AI1)
      AMAGS=CABS(SMQ)
      QMQ=AIMAG(SMQ)
      PMQ=REAL(SMQ)
C CÁLCULO DE LA POTENCIA EN EL CAPACITOR
      SC=VC*CONJG(AIC)
      AMAGS=CABS(SC)
      QC=AIMAG(SC)
      PC=REAL(SC)
C CÁLCULO PARA COMPROBAR LA POTENCIA
C TOTAL DEL SISTEMA
      S=V*CONJG(AIT)
      AMAGS=CABS(S)
      Q=AIMAG(S)
      P=REAL(S)
C CÁLCULO DE LA POTENCIA TOTAL DEL SISTEMA
      S=SMQ-SRED-SC
      AMAGS=CABS(S)
      Q=AIMAG(S)
      P=REAL(S)
      IF(KOUNT.NE.0)GOTO 211
      CF=1.0
      RMOT(1)=RMOT(1)*CF*1.0/ANUM
      RMOT(2)=RMOT(2)*CF*1.0/ANUM
      XMOT(1)=XMOT(1)*CF*1.0/ANUM
      XMOT(2)=XMOT(2)*CF*1.0/ANUM
      XMOT(3)=XMOT(3)*CF*1.0/ANUM
      KOUNT=1
      GOTO 210
211      CONTINUE

      SB=CMPLX(P,Q)
      AMAGSB=CABS(SB)
      PFAC=AMAGS/AMAGSB
      WRITE(6,10001)
C-----
C PUNTO DE OPERACION DE LA MAQUINA
C-----
10001      FORMAT(//,23X,'*****',/24X,'CONDICIONES DE
OPERACION',/23X,'*****',//)
      WRITE(6,10002)
10002      FORMAT(/,16X,'PARA EL MODELO DE 90. ORDEN',//)
      WRITE(6,1000)PFAC
1000      FORMAT(//8X,'PFAC=',F12.6)
C-----
C IMPRESION DE LAS IMPEDANCIAS Y SUS COMPONENTES
C-----
      WRITE(6,229)ZEQ,ZM,ZF
229      FORMAT(/9X,'ZEQ=',2F10.4,5X,'ZM=',2F10.4,3X,
'ZF=',2F10.4)
      WRITE(6,230)ZLS,ZMQ,ZC
230      FORMAT(/9X,'ZLS=',2F10.4,4X,'ZMQ=',2F10.4,3X,
'ZC=',2F10.4)
      WRITE(6,231)ZMC
231      FORMAT(/9X,'ZMC=',2F10.4)
      WRITE(6,232)ZRED
232      FORMAT(/8X,'ZRED=',2F10.4)
      WRITE(6,233)ZT
233      FORMAT(/10X,'ZT=',2F10.4)
C-----
C IMPRESION DE LAS CORRIENTES Y SUS COMPONENTES
C-----
      WRITE(6,234)AIT
234      FORMAT(/9X,'AIT=',2F10.4)
      WRITE(6,235)AI1,AI2,AIM
235      FORMAT(/9X,'AI1=',2F10.4,4X,'AI2=',2F10.4,2X,
'AIM=',2F10.4)
      WRITE(6,236)AIC
236      FORMAT(/9X,'AIC=',2F10.4)
      WRITE(6,237)AIDT,AIQT
237      FORMAT(/8X,'AIDT=',F10.4,5X,'AIQT=',F10.4)
      WRITE(6,238)AID1,AIQ1
238      FORMAT(/8X,'AID1=',F10.4,5X,'AIQ1=',F10.4)
      WRITE(6,239)AIDC,AIQC
239      FORMAT(/8X,'AIDC=',F10.4,5X,'AIQC=',F10.4)
      WRITE(6,240)AID2,AIQ2
240      FORMAT(/8X,'AID2=',F10.4,5X,'AIQ2=',F10.4)
      WRITE(6,241)AIDM,AIQM
241      FORMAT(/8X,'AIDM=',F10.4,5X,'AIQM=',F10.4)
      WRITE(6,242)V,VRED
242      FORMAT(/11X,'V=',2F10.4,4X,'VRED=',2F10.4)
      WRITE(6,243)VMQ,VC
243      FORMAT(/9X,'VMQ=',2F10.4,6X,'VC=',2F10.4)
      WRITE(6,244)VD,VQ
244      FORMAT(/10X,'VD=',F10.4,7X,'VQ=',F10.4)

```

```

WRITE(6,245)VREDD,VREDQ
245 FORMAT(/7X,'VREDD=',F10.4,4X,'VREDQ=',F10.4)
WRITE(6,246)VMQD,VMQQ
246 FORMAT(/8X,'VMQD=',F10.4,5X,'VMQQ=',F10.4)
WRITE(6,247)VCD,VCQ
247 FORMAT(/9X,'VCD=',F10.4,6X,'VCQ=',F10.4)
WRITE(6,248)V1,V2
248 FORMAT(/10X,'V1=',2F10.4,6X,'V2=',2F10.4)
WRITE(6,249)V1D,V1Q
249 FORMAT(/9X,'V1D=',F10.4,6X,'V1Q=',F10.4)
WRITE(6,250)V2D,V2Q
250 FORMAT(/9X,'V2D=',F10.4,6X,'V2Q=',F10.4)
WRITE(6,251)DELTA
251 FORMAT(/7X,'DELTA=',F10.4)
WRITE(6,252)
252 FORMAT(/3X,'CAÍDAS DE VOLTAJE EN EL ESTATOR',/)
WRITE(6,253)V1R,V1X
253 FORMAT(/8X,'V1R=',2F10.4,4X,'V1X=',2F10.4)
WRITE(6,254)V1RD,V1RQ
254 FORMAT(/7X,'V1RD=',F10.4,6X,'V1RQ=',F10.4)
WRITE(6,255)V1XD,V1XQ
255 FORMAT(/7X,'V1XD=',F10.4,6X,'V1XQ=',F10.4)
WRITE(6,256)
256 FORMAT(/3X,'CAÍDAS DE VOLTAJE EN EL ROTOR',/)
WRITE(6,257)V11,V12,V13
257 FORMAT(/8X,'V11=',2F10.4,3X,'V12=',2F10.4,2X,
'V13=',2F10.4)
WRITE(6,258)F1ST,FIROT
258 FORMAT(/7X,'F1ST=',2F10.4,1X,'FIROT=',2F10.4)
WRITE(6,259)F1SD,F1SQ
259 FORMAT(/7X,'F1SD=',F10.4,12X,'F1SQ=',F10.4)
WRITE(6,260)F1RD,F1RQ
260 FORMAT(/7X,'F1RD=',F10.4,12X,'F1RQ=',F10.4)
WRITE(6,261)PROT,WROT
261 FORMAT(/7X,'PROT=',F10.4,12X,'WROT=',F10.4)
WRITE(6,262)TORQUE,AKTOR
262 FORMAT(/5X,'TORQUE=',F10.4,11X,
'AKTOR=',F10.4)
WRITE(6,263)TOR1,TOR2
263 FORMAT(/7X,'TOR1=',F10.5,12X,'TOR2=',F10.5)
WRITE(6,264)SRED,SMQ
264 FORMAT(/7X,'SRED=',2F10.4,3X,'SMQ=',2F10.4)
WRITE(6,265)SC,S
265 FORMAT(/9X,'SC=',2F10.4,5X,'S=',2F10.4)
WRITE(6,266)PRED,QRED
266 FORMAT(/7X,'PRED=',F10.5,12X,'QRED=',F10.5)
WRITE(6,267)PMQ,QMQ
267 FORMAT(/8X,'PMQ=',F10.5,13X,'QMQ=',F10.5)
WRITE(6,268)PC,QC
268 FORMAT(/9X,'PC=',F10.5,14X,'QC=',F10.5)
WRITE(6,269)P,Q,AMAGS
269 FORMAT(/10X,'P=',F10.5,15X,'Q=',F10.5,8X,
'AMAGS=',F10.5)
RETURN
END
C-----
C "KMATRIX"
C ESTA SUBROUTINA USA LA REPRESENTACIÓN DE
C VARIABLES DE ESTADOS PARA HACER LA
C KMATRIX, K1 POR INSPECCION
C-----
SUBROUTINE KMATRIX
C-----
C DECLARACION LOS DATOS
C-----
COMMON CK1(10,10),CK2(10,10),CK4(10,10),CK5(10,10)
COMMON CK6(10,10),CK7(10,10),WKS(10),RMOT(4)
COMMON DELTA,V,VD,VQ,AID1,AIQ1,AID2,AIQ2,F1ST,REQ2
COMMON PAI,F,AKTOR,HP,TMOT,MAGV,SLIP,WROT,TORQUE,ZF
COMMON TOR1,TOR2,DXS,ANUM,PROT,DXR,DXM,DRS,DRR,DH
COMMON DS,SENS,I,J,K,AIDM,AIQM,AIM,AI1,AI2,AIT,ZMQ
COMMON ZT,V1Q,V2D,N1,AKVAB1,AKVAB2,AKB,P,Q,CF,KOUNT
COMMON PFAC,SB,AMAGSB,AMAGS,ZEQ,ZLS,ZM,FIROT,XC,V2Q
COMMON V1R,V1X,V1RD,V2,V1,V1D,V1RQ,V1XD,V1XQ,V11,VC
COMMON V11D,V11Q,V12,V12D,V12Q,V13,V13D,V13Q,VRED
COMMON VREDD,VREDQ,VMQ,RRED,XRED,ZRED,AIDT,AIQT,AIC
COMMON VMQD,VMQQ,SRED,SMQ,PRED,QRED,PMQ,QMQ,S,ZMC
COMMON AIDC,AIQC,SC,QC,PC,ZC
COMMON /S3/N
COMMON /S4/A(40,40),CK3(10,10),N81,PE,F1SD,F1SQ
COMMON /S4/FIRD,FIRQ,XMOT(4)
DOUBLE PRECISION A,CK3
EXTERNAL FCT,OUTP
COMPLEX AI1,AI2,F1ST,FIROT,ZEQ,ZLS,S,SB,AMAGS
COMPLEX AMAGSB,SRED,SMQ,ZF,V,VMQ,V1,V1R,V1X,V2
COMPLEX V11,V12,V13,VRED,AIT,AIM,ZMQ,ZRED,ZT,ZM
COMPLEX ZC,ZMC,VC,AIC,SC
REAL MAGV
C-----
C DESARROLLO DE LA SUBROUTINA
C-----
DO 300 I=1,9
DO 300 J=1,9
CK1(I,J)=0.0
300 CONTINUE
CK1(1,1)=1
CK1(2,2)=1
CK1(3,3)=1
CK1(4,4)=1
CK1(5,5)=2.0*TMOT*2.0*PAI*F*CABS(S)
CK1(6,1)=1
CK1(6,6)=XRED
CK1(6,8)=RMOT(1)/XC
CK1(7,2)=1
CK1(7,7)=XRED
CK1(7,9)=RMOT(1)/XC
CK1(8,2)=1
CK1(8,8)=-1
CK1(9,1)=1
CK1(9,9)=1
C-----
C TMOT=H (CONSTANTE DE INERCIA)
C-----
WRITE(6,301)
301 FORMAT(/15X,'MATRIZ K1'/)
DO 302 I=1,9
302 WRITE(6,303)(CK1(I,J),J=1,9)
303 FORMAT(5X,9F10.4)
C-----
C K2 POR INSPECCION
C-----
DO 304 I=1,9
DO 304 J=1,9
CK2(I,J)=0.0
304 CONTINUE
CK2(1,1)=RMOT(1)/((XMOT(2)+XMOT(1))*(XMOT(3)+
XMOT(1))-XMOT(1)**2)*(XMOT(2)+XMOT(1))
CK2(1,2)=1
CK2(1,3)=-RMOT(1)/((XMOT(2)+XMOT(1))*(XMOT(3)+
XMOT(1))-XMOT(1)**2)*XMOT(1)
CK2(1,8)=1
CK2(2,1)=-1
CK2(2,2)=RMOT(1)/((XMOT(2)+XMOT(1))*(XMOT(3)+
XMOT(1))-XMOT(1)**2)*(XMOT(2)+XMOT(1))
CK2(2,4)=-RMOT(1)/((XMOT(2)+XMOT(1))*(XMOT(3)+
XMOT(1))-XMOT(1)**2)*XMOT(1)
CK2(2,9)=1
CK2(3,1)=RMOT(2)/(XMOT(1)**2-XMOT(3)+XMOT(1))
*(XMOT(2)+XMOT(1))*XMOT(1)
CK2(3,3)=-RMOT(2)/(XMOT(1)**2-(XMOT(3)+XMOT(1))*
(XMOT(2)+XMOT(1)))*(XMOT(3)+XMOT(1))
CK2(3,4)=SLIP
CK2(3,5)=-FIRQ
CK2(4,2)=-RMOT(2)/(XMOT(1)**2-(XMOT(3)+XMOT(1))
*(XMOT(2)+XMOT(1)))*XMOT(1)
CK2(4,3)=-SLIP
CK2(4,4)=-RMOT(2)/(XMOT(1)**2-(XMOT(3)+XMOT(1))*
(XMOT(2)+XMOT(1)))*(XMOT(2)+
XMOT(1))*(XMOT(3)+XMOT(1))
CK2(4,5)=FIRD
CK2(5,1)=-XMOT(1)/((XMOT(2)+XMOT(1))*
(XMOT(3)+XMOT(1))-XMOT(1)**2)*FIRQ
CK2(5,2)=-XMOT(1)/((XMOT(2)+XMOT(1))*(XMOT(3)+
XMOT(1))-XMOT(1)**2)*FIRD
CK2(5,3)=-XMOT(1)/((XMOT(2)+XMOT(1))*(XMOT(3)+
XMOT(1))-XMOT(1)**2)*FISQ
CK2(5,4)=-XMOT(1)/((XMOT(2)+XMOT(1))*(XMOT(3)+
XMOT(1))-XMOT(1)**2)*FISD
CK2(6,2)=1
CK2(6,6)=RMOT(1)+RRED
CK2(6,7)=XRED
CK2(6,9)=RMOT(1)/XC
CK2(7,1)=-1
CK2(7,6)=-XRED
CK2(7,7)=RMOT(1)+RRED
CK2(7,8)=-RMOT(1)/XC
CK2(8,1)=(XC/((XMOT(2)+XMOT(1))*(XMOT(3)+
XMOT(1))-XMOT(1)**2)*(XMOT(2)+XMOT(1)))-1
CK2(8,2)=RMOT(1)/((XMOT(2)+XMOT(1))*(XMOT(3)+
XMOT(1))-XMOT(1)**2)*(XMOT(2)+XMOT(1))
CK2(8,3)=-XC/((XMOT(2)+XMOT(1))*(XMOT(3)+
XMOT(1))-XMOT(1)**2)*XMOT(1)
CK2(8,4)=-RMOT(1)/((XMOT(2)+XMOT(1))*(XMOT(3)+
XMOT(1))-XMOT(1)**2)*XMOT(1)
CK2(8,6)=-XC
CK2(9,1)=RMOT(1)/((XMOT(2)+XMOT(1))*(XMOT(3)+
XMOT(1))-XMOT(1)**2)*(XMOT(2)+XMOT(1))
CK2(9,2)=1-(XC/((XMOT(2)+XMOT(1))*(XMOT(3)+
XMOT(1))-XMOT(1)**2)*(XMOT(2)+XMOT(1)))
CK2(9,3)=-RMOT(1)/((XMOT(2)+XMOT(1))*(XMOT(3)+
XMOT(1))-XMOT(1)**2)*XMOT(1)
CK2(9,4)=-XC/((XMOT(2)+XMOT(1))*(XMOT(3)+XMOT(1))-
XMOT(1)**2)*XMOT(1)
CK2(9,7)=XC
305 FORMAT(/15X,'MATRIZ K2'/)
DO 306 I=1,9
306 WRITE(6,307)(CK2(I,J),J=1,9)
307 FORMAT(5X,9F10.4)
RETURN
END

```

```

C-----
C          "CHARA"
C ESTA SUBROUTINA OBTIENE LA MATRIZ A
C CARACTERISTICA Y LA MATRIZ A TRANSPUESTA
C-----
          SUBROUTINE CHARA
C-----
C          NOTA: ESTA SUBROUTINA!
C          ;CK3=CK1 (INV) !
C-----
C          DECLARACION LOS DATOS
C-----
COMMON CK1(10,10),CK2(10,10),CK4(10,10),CK5(10,10)
COMMON CK6(10,10),CK7(10,10),WKS(10),RMOT(4)
COMMON DELTA,V,VD,VQ,AID1,AIQ1,AID2,AIQ2,FIST,REQ2
COMMON PAI,F,AKTOR,HP,TMOT,MAGV,SLIP,WROT,TORQUE,ZF
COMMON TOR1,TOR2,DXS,ANUM,PROT,DXR,DXM,DRS,DRR,DH,P
COMMON DS,SENS,I,J,K,AIDM,AIQM,AIM,AI1,AI2,AIT,ZMQ
COMMON ZT,V1Q,V2D,N1,AKVAB1,AKVAB2,AKB,CF,KOUNT,ZC
COMMON PFAC,SB,AMAGSB,AMAGS,ZEQ,ZLS,ZM,FIROT,XC,V2Q
COMMON V1R,V1X,V1RD,V2,V1,V1D,V1RQ,V1XD,V1XQ,V1,VC
COMMON V11D,V11Q,V12,V12D,V12Q,V13,V13D,V13Q,VRED,Q
COMMON VREDD,VREDQ,VMQ,RRED,XRED,ZRED,AIDT,AIQT,AIC
COMMON VMQD,VMQQ,SRED,SMQ,PRED,QRED,PMQ,QMQ,S,ZMC
COMMON AIDC,AIQC,SC,QC,PC
COMMON /S3/N
COMMON /S4/A(40,40),CK3(10,10),N81,PE,FISD,FISQ
COMMON /S4/FIRD,FIRQ,XMOT(4)
DOUBLE PRECISION A,CK3
EXTERNAL FCT,OUTP
COMPLEX AI1,AI2,FIST,FIROT,ZEQ,ZLS,S,SB,AMAGS
COMPLEX AMAGSB,SRED,SMQ,ZF,V,VMQ,V1,V1R,V1X,V2
COMPLEX V1,V12,V13,VRED,AIT,AIM,ZMQ,ZRED,ZT,ZM
COMPLEX ZC,ZMC,VC,AIC,SC
REAL MAGV
C-----
C          DESARROLLO DE LA SUBROUTINA
C-----
CALL INVERT(N,CK1,CK3)
WRITE(6,400)
C-----
C MATRIZ K3 = MATRIZ CK1 INVERSE ES
C LA MATRIZ "B"
C-----
400 FORMAT(/,18X,'*****',/19X,'MATRIZ DE ENTRADAS DEL
SISTEMA "B"',/18X,'*****',/)
      DO 401 I=1,N
        WRITE(6,402)(CK3(I,J),J=1,N)
401 CONTINUE

402 FORMAT(5X,9F12.4)
C-----
C MATRIZ CARACTERISTICA A=-K1 (INV)*K2
C-----
      DO 413 I=1,N
        DO 413 J=1,N
          A(I,J)=0.0
        DO 413 K=1,N
413 A(I,J)=A(I,J)-CK3(I,K)*CK2(K,J)*2.0*PAI*F
          IF(N.EQ.5)GOTO 415
          WRITE(6,414)
414   FORMAT(/,23X,'****',/24X,'MATRIZ CARACTERISTICA
"A"',/23X,'****',/)
          WRITE(6,31)((A(I,J),J=1,N),I=1,N)
31   FORMAT(5X,9F12.4)
          GOTO 417
415   WRITE(6,414)
          WRITE(6,416)((A(I,J),J=1,N),I=1,N)
416 FORMAT(5X,9F12.4)
417 CALL SOLUC
      STOP
      END
C-----
C          "INVERT"
C SUBROUTINA PARA LA INVERSION DE MATRICES CON
C DOBLE PRECISION
C-----
          SUBROUTINE INVERT(N,OCU,SAL)
C-----
C          DECLARACION LOS DATOS
C-----
DIMENSION OCU(10,10),SAL(10,10),E(20,20)
DOUBLE PRECISION SAL,E
C-----
C          DESARROLLO DE LA SUBROUTINA
C-----
      N=9
      N2=N
      N1=N
      DO 10 I=1,N1
        DO 5 J=1,N1
          E(I,J)=OCU(I,J)
          E(I,N1+J)=0.0
5 CONTINUE

```

```

          E(I,N1+I)=1.0
10 CONTINUE

125 FORMAT(8F10.5)
      N2P=N2*2
      DO 100 I=1,N1
        T=E(I,I)
        DO 20 K=1,N2P
          E(I,K)=E(I,K)/T
20 CONTINUE

        DO 30 L=1,N1
          IF(L.EQ.I)GOTO 31
          AK=-E(L,I)
          DO 32 K=1,N2P
            E(L,K)=E(L,K)+E(I,K)*AK
32 CONTINUE
31 CONTINUE
30 CONTINUE

100 CONTINUE

      DO 120 I=1,N1
        DO 120 J=1,N1
120 SAL(I,J)=E(I,N1+J)
      RETURN
      END
C-----
C PROGRAMA CONFECIONADO PARA OBTENER
C LAS VARIABLES DE ECUACIONES
C DIFERENCIALES POR VARIABLES DE ESTADO
C-----
          SUBROUTINE SOLUC
C-----
C          DECLARACION LOS DATOS
C-----
DIMENSION PRMT(5),Y(20),DERY(20),AUX(10,20)
COMMON /S1/NS,T(900)
COMMON /S2/NORD
COMMON /S3/NDIM
COMMON /S4/A99(40,40),CK3(10,10),N81,PE,FISD
COMMON /S4/FISQ,FIRD,FIRQ
COMMON /S4/XMOT(4)
EXTERNAL FCT,OUTP
DOUBLE PRECISION Y,DERY,AUX,PRMT
DOUBLE PRECISION T,A99,CK3
C-----
C SE LEEN LOS DATOS PARA EL DESARROLLO DEL SISTEMA
C UTILIZANDO EL METODO NUMÉRICO
C-----
      NORD = 1
      READ(5,*) (PRMT(I),I=1,5)
      N81 = NDIM*NORD
C-----
C SE LEE 1 TIEMPO DE INICIO DE ESTUDIO PRMT(1)
C SE LEE 2 TIEMPO FINAL DE ESTUDIO PRMT(2)
C SE LEE 3 PASO DE INTEGRACION PRMT(3)
C SE LEE 4 TOLERANCIA DE ERROR PRMT(4)
C SE LEE 5 CONTROL INT. DEL METODO PRMT(5)
C-----
      NORD1=NORD+1
C-----
C SE LEEN CONDICIONES INICIALES
C PARA LA MATRIZ CARACTERISTICA "A"
C-----
      READ(5,*) (Y(I),I=1,NDIM)
C-----
C LEEN Y SE ESCRIBEN EN EL ARCHIVO DE SALIDA
C LAS CONDICIONES INICIALES (DISTURBIOS)
C PARA LA MATRIZ CARACTERISTICA "A"
C-----
      WRITE(6,65)
65 FORMAT(/,13X,'*****',/14X,'DITURBIOS PARA LA MATRIZ
CARACTERISTICA "A"',/13X,'*****',/)
      WRITE(6,70)(Y(I),I=1,N81)
70 FORMAT(/,30X,D10.3)
      WRITE(6,71)
71 FORMAT(/)
C-----
C LLENADO DEL PRIMER VALOR DE LAS
C VARIABLES DE SALIDA
C-----
      NS = 1
      T(NS) = PRMT(1)
      NI = (PRMT(2) - PRMT(1)) / PRMT(3)
      WRITE(6,("20X,'TIEMPO',T44,'FDS',T67,'FQS',T90,'FDR',T113,'F
QR',T134,'VELOCIDAD',T160,'IDL',T183,'IQL',T203,'VDC',T226,'
VQC',T249,'PE')")
      WRITE(6,243)T(NS),Y(1),Y(2),Y(3),Y(4),Y(5),Y(6),Y(7),Y(8),Y(
9),PE
243 FORMAT(10X,F20.15,3X,F20.15,3X,F20.15,3X,F20.
15,3X,F20.15,3X,F20.15,3X,F20.15,3X,F20.15,3X,F20.15,
3X,F20.15)

```



```

22      AUX(7,I) = DERY(I)
      GOTO 9
C-----
C CÁLCULO DEL VALOR DE PRUEBA DELT
C-----
23      DELT = 0.D0
      DO 24 I = 1,NDIM
24      DELT = DELT + AUX(8,I)*DABS(AUX(4,I) - Y(I))
      IF (DELT - PRMT(4))28,28,25
C-----
C          EL ERROR ES GRANDE
C-----
25      IF (IHLF - 10)26,36,36
26      DO 27 I = 1,NDIM
      27  AUX(4,I) = AUX(5,I)
      ISTEP = ISTEP + ISTEP - 4
      X = X - H
      IEND = 0
      GOTO 18
C-----
C LOS VALORES DEL RESULTADO SON BUENOS
C-----
28      CALL FCT(Y,DERY)
      DO 29 I = 1,NDIM
      AUX(1,I) = Y(I)
      AUX(2,I) = DERY(I)
      AUX(3,I) = AUX(6,I)
      Y(I) = AUX(5,I)
29      DERY(I) = AUX(7,I)
      CALL OUTP(X - H,IHLF,PRMT)
      IF (PRMT(5))40,30,40
30      DO 31 I = 1,NDIM
      Y(I) = AUX(1,I)
31      DERY(I) = AUX(2,I)
      IREC = IHLF
      IF (IEND)32,32,39
C-----
C          EL INCREMENTO ES DOBLADO
C-----
32      IHLF = IHLF - 1
      ISTEP = ISTEP/2
      H = H + H
      IF (IHLF)4,33,33
33      IMOD = ISTEP/2
      IF (ISTEP - IMOD - IMOD)4,34,4
34      IF (DELT - 0.02D0*PRMT(4))35,35,4
35      IHLF = IHLF - 1
      ISTEP = ISTEP/2
      H = H + H
      GOTO 4
C-----
C REGRESANDO AL LLAMADO DEL PROGRAMA
C-----
36      IHLF = 11
      CALL FCT(Y,DERY)
      GOTO 39
37      IHLF = 12
      GOTO 39
38      IHLF = 13
39      CALL OUTP(X,IHLF,PRMT)
40      RETURN
      END
C-----
C          SUBROUTINA FCT
C-----
C          SUBROUTINE FCT(Y,DERY)
C-----
C          DECLARACION LOS DATOS
C-----
DIMENSION Y(20),U(20),DERY(20)
COMMON /S3/ NDIM
COMMON /S4/A99(40,40),CK3(10,10),N81,PE
COMMON /S4/FISD,FISQ,FIRD,FIRQ
COMMON /S4/XMOT(4)
DOUBLE PRECISION Y,U,DERY,A99,CK3
C-----
C          DESARROLLO DE LA SUBROUTINA
C-----
      DO 999 I=1,N81
      DERY(I) = 0.D0
      DO 999 J=1,N81
999  DERY(I) = DERY(I) + A99(I,J)*Y(J)
      IF (5.EQ.N81)GOTO 5
C-----
C CÁLCULO DE LA PARTE NO LINEAL DEL MODELO DE 5
C VARIABLES. EN ESTE CASO EL VECTO U(I) ES EL
C DISTURBIO QUE SE APLICA A LA MATRIZ DE ENTRADAS
C DEL SISTEMA (MATRIZ "B").
C UNA DE LAS FORMAS DE APLICARLE EL DISTURBIO A LAS
C MATRICES ES POR MEDIO DE UN DISTURBIO CONTINUO
C DURANTE TODO EL TIEMPO DEL ESTUDIO "CONTINUO":
C DX=AX+BU
C DONDE EN LA VARIABLE A INCREMENTAR EL DISTURBIO
C ES APLICADA DIRECTAMENTE EN EL VECTOR DE ENTRADAS
C U(I).

```

```

C-----
5  U(1)=0.0D0
      U(2)=0.0D0
      U(3)=0.0D0
      U(4)=0.0D0
      U(5)=0.05D0
      U(6)=0.0D0
      U(7)=0.0D0
      U(8)=0.0D0
      U(9)=0.0D0
C DONDE:
C U(1) = VOLTAJE EN D DEL ESTATOR
C U(2) = VOLTAJE EN Q DEL ESTATOR
C U(3) = VOLTAJE EN D DEL ROTOR = 0
C U(4) = VOLTAJE EN Q DEL ROTOR = 0
C U(5) = PAR MECANICO
C U(6) = VOLTAJE EN D DE LA LINEA
C U(7) = VOLTAJE EN Q DE LA LINEA
      GOTO 208
208 DO 500 I=1,N81
      DO 500 J=1,N81
      DERY(I)=DERY(I)+CK3(I,J)*U(J)
500 CONTINUE
C-----
C          CÁLCULO DE LA POTENCIA ELÉCTRICA
C-----
PE=- (XMOT(1) / ((XMOT(2)+XMOT(1)) * (XMOT(3) +
XMOT(1))-XMOT(1)**2)*FIRQ)*Y(1) + (XMOT(1)
/ ((XMOT(2)+XMOT(1)) * (XMOT(3)+XMOT(1)) - XMOT(1)
**2)*FIRD)*Y(2) + (XMOT(1) / ((XMOT(2)+XMOT(1)) * (XMOT(3)+XMOT(1)
)- XMOT(1)**2)*FISQ)*Y(3) - (XMOT(1)
/ ((XMOT(2)+XMOT(1)) * (XMOT(3)+XMOT(1)) - XMOT(1)
**2)*FISD)*Y(4)
RETURN
END

```