



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
UNIDAD ZACATENCO
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

ESTUDIO DE ESTABILIDAD ANTE PEQUEÑOS DISTURBIOS APLICADO EN AEROGENERADORES DE INDUCCIÓN

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO ELECTRICISTA**

PRESENTAN:

**GALICIA ESCOBAR FÉLIX
MANUEL HERNÁNDEZ ALEJANDRO
MARTÍNEZ RAMÍREZ JAVIER**

ASESORES:

**M. EN C. LÁZARO GONZAGA MERCEDES
DR. OLGUÍN SALINAS DANIEL**



MÉXICO, D.F.

JUNIO 2011.

INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
UNIDAD PROFESIONAL "ADOLFO LOPEZ MATEOS"

TEMA DE TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
POR LA OPCION DE TITULACION
DEBERA(N) DESARROLLAR**

INGENIERO ELECTRICISTA
TESIS COLECTIVA Y EXAMEN ORAL INDIVIDUAL
C. FÉLIX GALICIA ESCOBAR
C. ALEJANDRO MANUEL HERNÁNDEZ
C. JAVIER MARTÍNEZ RAMÍREZ

**"ESTUDIO DE ESTABILIDAD ANTE PEQUEÑOS DISTURBIOS APLICADO EN
AEROGENERADORES DE INDUCCIÓN."**

SE DESARROLLARÁ UN ESTUDIO DE ESTABILIDAD ANTE PEQUEÑOS DISTURBIOS EN MÁQUINAS DE INDUCCIÓN QUE SE EMPLEA EN AEROGENERADORES, DONDE SE ANALIZARÁN LAS OSCILACIONES PROPIAS DEL SISTEMAS.

- GENERADORES DE INDUCCIÓN.
- SISTEMAS AEROGENERADORES.
- MODELADO DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN.
- ESTABILIDAD ANTE PEQUEÑOS DISTURBIOS.
- ANÁLIS DEL ESTUDIO DE ESTABILIDAD ANTE PEQUEÑOS DISTURBIOS CON AEROGENERADORES.
- CONCLUSIONES.
- RECOMENDACIONES.
- REFERENCIAS.
- APÉNDICES.

MÉXICO D.F., 18 DE ABRIL 2012.

ASESORES


M. EN C. MERCEDES LÁZARO GONZAGA.


M. EN C. CHRISTIAN DANIEL ESPERILLA VILLANUEVA.


M. EN C. GUILLERMO FERNANDO BALTAZAR HERNÁNDEZ.


ING. CESAR DAVID RAMÍREZ ORTIZ
JEFE DEL DEPARTAMENTO ACADÉMICO
DE INGENIERÍA ELÉCTRICA.

*Estudio de Estabilidad ante Pequeños Disturbios aplicado en
Aerogeneradores Eléctricos de Inducción*

AGRADECIMIENTOS

Primero que nada le doy gracias a Dios por haberme permitido terminar mi carrera profesional y por la familia que me dio, que cada día estuvieron a mi lado apoyándome para poder cumplir esta meta.

A mis padres les agradezco con amor y cariño por que sin escatimar esfuerzo alguno han sacrificado gran parte de su vida para formarse y educarme por que sin su ejemplo de superación, comprensión y confianza no hubiera sido posible la culminación de mi carrera profesional, el objetivo logrado también es de ustedes y la fuerza que me ayudo a conseguirlo fue su apoyo gracias. ¡Los amo!

Gracias a mi esposa Monserratt y a mi hijo Félix Manuel quienes permitieron que les robara un poco de tiempo para lograr cumplir este objetivo y que siempre fueron mi inspiración a superarme, de verdad mil gracias.

Agradezco muy en especial a nuestro Asesor Técnico la M. en C. Mercedes Lázaro Gonzaga ya que sin su apoyo incondicional, experiencia profesional y conocimientos no hubiésemos logrado esta meta, de verdad mil gracias respeto y admiración.

A los profesores de la ESIME Zacatenco que fueron un gran pilar en mis conocimientos y experiencia, en especial al Dr. Daniel Olguín Salinas y al M. en C. Ismael Albino Padilla, que sin sus conocimientos adquiridos no hubiésemos logrado cumplir este objetivo.

Gracias al Instituto Politécnico Nacional por permitir ser quien ahora soy y a la ESIME Zacatenco que nos permitió desarrollar nuestras habilidades a través de los conocimientos adquiridos.

Finalmente agradezco a todas aquellas personas que de una u otra forma, y de manera desinteresada, me brindaron toda la ayuda necesaria con la finalidad de lograr el desarrollo de un buen trabajo.

Félix Galicia Escobar.

AGRADECIMIENTOS

Primero que nada le doy gracias a Dios por haberme prestado vida para concluir mi carrera profesional.

Agradezco a mis padres por haberme brindado su apoyo, comprensión y tolerancia ya que ellos me formaron como la persona que ahora soy y sé que sin sus consejos no hubiera podido lograr nada en esta vida.

Le agradezco de gran manera a nuestro asesora la M. en C. Mercedes Lázaro Gonzaga ya que nos apoyo de forma incondicional para realizar este trabajo compartiendo su tiempo y sus conocimientos con nosotros y siempre estuvo ahí cuando la necesitábamos ya que siempre se mantuvo al pendiente de nosotros ¡GRACIAS!

También le agradezco al Dr. Daniel Olguín Salinas y al M. en C. Ismael Albino Padilla, que fueron un gran apoyo para poder realizar este trabajo y que siempre estuvieron en el momento que se les necesito ya que con sus conocimientos tiempo y esfuerzo logramos realizar con éxito este trabajo.

Gracias al Instituto Politécnico Nacional por permitirme estudiar en una escuela de alta calidad y a la ESIME Zacatenco que me permitió obtener el conocimiento y aptitudes necesarias para enfrentar esta vida.

Finalmente agradezco a todas aquellas personas que siempre estuvieron conmigo brindándome su apoyo y ayuda en especial a María Guadalupe Parra Cortes que es mi inspiración día a día para seguir adelante ya que me demostró que hay que luchar en cada momento de mi vida ¡GRACIAS!

Manuel Hernández Alejandro.

AGRADECIMIENTOS

A dios por que siempre ha estado presente en los momentos más importantes de mi vida.

Con mucho amor, cariño y respeto a mis padres Javier y Yolanda por haberme dado la vida, la educación, la determinación y la integridad de ser quien soy. Gracias por atreverse a confiar en mí; sin su apoyo este sueño nunca hubiera podido ser completado. Mil palabras no bastarían para agradecerles su apoyo, su comprensión y sus consejos en los momentos difíciles. Felicidades papás este logro es de ustedes.

Con especial amor y dedicación a mi esposa Dulce Leticia y mi hijo Emiliano que siempre me están apoyando para que juntos seamos una gran familia. Ustedes son la causa, razón y motivo que me inspiran a ser mejor cada día, su amor, alegrías y logros me impulsaron a llegar a esta meta.

A mis hermanas Yolanda Ibeth y Tania Karin por haber fomentado en mí el deseo de superación y el anhelo de triunfo en la vida.

A mis amigos y equipo de investigación Félix y Alejandro por su colaboración, interés e inteligencia para desarrollar este trabajo. Lo logramos.

A todos los maestros de la ESIME que de alguna u otra forma nutrieron mi mente y espíritu con su saber y conocimientos.

Un sincero agradecimiento a mi directora de tesis la M. en C. Mercedes Lázaro Gonzaga por su insistencia en abordar este desafío, por su permanente contribución en cada etapa de este trabajo, por su dedicación y aporte intelectual y por el ejemplo brindado ante cada uno de los requerimientos planteados.

Finalmente al Instituto Politécnico Nacional en especial a la gloriosa ESIME Zacatenco por haberme brindado la oportunidad de prepararme profesionalmente.

Javier Martínez Ramírez.

ÍNDICE

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS	i
CARTA CESIÓN DE DERECHOS	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xi
SIMBOLOGÍA	xii
RESUMEN	1
OBJETIVO GENERAL	2
OBJETIVOS PARTICULARES	2
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
JUSTIFICACIÓN	4
ALCANCE	5
ESTADO DEL ARTE	6
CAPÍTULO I: GENERADORES DE INDUCCIÓN	8
1.1 INTRODUCCIÓN	8
1.2 PRINCIPIO DE OPERACIÓN	8
1.2.1 Definición de la máquina de inducción	10
1.3 CONCEPTOS BÁSICOS	10
1.3.1 Deslizamiento del Rotor	10
1.3.2 Frecuencia del Rotor	11
1.4 CIRCUITO EQUIVALENTE	12
1.5 MODOS DE OPERACIÓN	12
1.5.1 Par Inducido	13
1.6 FLUJO DE POTENCIA	16
1.6.1 Distribución de las Potencias	17
1.7 PARTES CONSTITUTIVAS DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN	19
1.8 APLICACIONES	19
1.9 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN	20
CAPÍTULO 2: SISTEMAS AEROGENERADORES	21
2.1 INTRODUCCIÓN	21
2.2 EL AEROGENERADOR	21
2.3 COMPONENTES DEL AEROGENERADOR	21
2.4 CLASIFICACIÓN DE AEROGENERADORES	24
2.4.1 Posición del Aerogenerador	24
2.4.2 Posición del equipo con respecto al tiempo	26
2.4.3 Número de Palas	27

2.5 GENERACIÓN EÓLICA	29
2.5.1 Generación en pequeña escala	30
2.5.2 De interconexión a las redes de distribución	30
2.5.3 Generación en mayor escala	30
2.6 SISTEMAS EÓLICOS AISLADOS	31
2.7 PARQUES EÓLICOS	31
2.7.1 Ventajas de la generación eólica	32
2.7.2 Desventajas de la energía eólica	32
2.7.4 Características de un parque eólico	34
CAPÍTULO III: MODELADO DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN	35
3.1 INTRODUCCIÓN	35
3.2 MODELO MATEMÁTICO.	35
3.3 MODELO EN FUNCIÓN DE CORRIENTES.	40
3.3.1 Modelo en función de flujos	43
3.4 MODELO LINEAL DEL GENERADOR DE INDUCCIÓN-BUS INFINITO.	44
CAPÍTULO IV: ESTABILIDAD ANTE PEQUEÑOS DISTURBIOS	48
4.1 INTRODUCCIÓN	48
4.2 ESTABILIDAD Y CLASIFICACIÓN DE LA ESTABILIDAD DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA	48
4.3 CLASIFICACIÓN DE ESTABILIDAD ANGULAR.	49
4.4 ESTABILIDAD ANTE PEQUEÑOS DISTURBIOS.	50
4.6 LINEALIZACIÓN	53
4.7 RESPUESTA LIBRE DEL SISTEMA	54
4.8 OBTENCIÓN DE VALORES Y VECTORES PROPIOS (EIGENVALORES Y EIGENVECTORES).	55
4.9 INDICES DE AMORTIGUAMIENTO	58
4.10 MODOS DEL SISTEMA	59
4.11 CICLO DE FORMACIÓN DE LAS OSCILACIONES	60
4.12 MATRICES MODALES.	61
4.13 FACTORES DE PARTICIPACIÓN	62
CAPÍTULO V: ANÁLISIS DEL ESTUDIO DE ESTABILIDAD ANTE PEQUEÑOS DISTURBIOS CON AEROGENERADORES	66
5.1 INTRODUCCIÓN	66
5.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE PRUEBA	66
5.3 SISTEMA DE PRUEBA LA VENTA I	66
5.4 PARÁMETROS DEL AEROGENERADOR DE INDUCCIÓN MARCA VESTAS MODELO V-27 225/50kW-480V-60Hz	68

5.5 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD ANTE PEQUEÑOS DISTURBIOS DEL SISTEMA DE PRUEBA	68
5.6 COMPORTAMIENTO DEL DESLIZAMIENTO DE LOS GENERADORES DE INDUCCIÓN QUE SE ENCUENTRAN EN LA VENTA I.....	68
5.7 MODOS DE OSCILACIÓN DEL GENERADOR DE INDUCCIÓN	70
5.7.1 MODOS DE OSCILACION DEL GENERADOR V-27 50kW – 480V- 60Hz	70
5.7.2 MODOS DE OSCILACION DEL GENERADOR V-27 225kW – 480V- 60Hz	70
CONCLUSIONES.....	89
RECOMENDACIONES	90
REFERENCIAS	90

APÉNDICES.

A. PRUEBAS PARA DETERMINACIÓN DE PARAMETROS.....	96
A.1 Prueba de Vacío o de Rotor Libre	96
A.2 Prueba de Corto Circuito o de Rotor Bloqueado.....	98
B. VALORES EN POR UNIDAD DE LOS AEROGENERADORES.....	99
C. DIAGRAMAS DE FLUJO.....	102
D. PROGRAMAS EN FORTRAN.....	107
E. VALORES PARA LOS MODOS DE OSCILACIÓN DE LOS AEROGENERADORES....	123
F. COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS LENGUAJE FORTRAN Y EN MATLAB	131

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Circuito equivalente exacto por fase para una máquina.	12
Figura 1.2 Curva par velocidad Máquina de Inducción régimen de Motor.	13
Figura 1.3 Curva par velocidad Máquina de Inducción régimen Motor.	15
Figura 1.4 Curva par velocidad Máquina de Inducción régimen Generador.	16
Figura 1.5 Distribución de las Potencias en la Máquina de Inducción.	18
Figura 2.1 Componentes de un Aerogenerador.	22
Figura 2.2 Torre de Celosía.	24
Figura 2.3 Torre Tubular.	24
Figura 2.4 Aerogenerador tipo Darrieus.	25
Figura 2.5 Aerogenerador tipo Panemonas.	25
Figura 2.7 Aerogenerador de eje Horizontal.	26
Figura 2.8 Aerogenerador de una Pala.	27
Figura 2.9 Aerogenerador de dos Palas.	27
Figura 2.10 Aerogenerador de tres Palas.	28
Figura 2.11 Aerogenerador Multipalas.	28
Figura 2.12 Gráfica del rendimiento aerodinámico de los tipo de palas.	29
Figura 2.13 Topología de un parque eólico.	33
Figura 3.1 Sistema Maquina Bus Infinito.	35
Figura 3.2 Relación entre los ejes de las fases del estator y rotor con los ejes del marco de referencia dq.	36
Figura 4.1 Clasificación de los problemas de inestabilidad en los Sistemas Eléctricos de Potencia	49
Figura 4.2 Valores Propios y su respuesta asociada, en el tiempo y plano complejo en los Sistemas Eléctricos de Potencia.	57
Figura 4.3 Representación geométrica de la razón de amortiguamiento.	59
Figura 4.4 Representación de valores propios y modos del sistema dinámico.	59
Figura 4.5 Representación de la transformación modal.	62
Figura 5.1 Sistema de prueba.	66
Figura 5.2 Sistema de Generación “La Venta”, Oaxaca.	67
Figura 5.3a Central eoloeléctrica de La Venta, Oaxaca, (CFE, 2004). [11].	67
Figura 5.3b Central eoloeléctrica de La Venta, Oaxaca, (CFE, 2011).	67
Figura 5.4 Curva par – velocidad para el Generador de Inducción Vestas modelo V-27 225/50kW-480V-60Hz.	69
Figura 5.5 Comportamiento de los Eigenvalores de un sistema de 5° orden del Generador de Inducción de 8 polos, Vestas V-27- 50kW-480 V- Δ -60Hz.	71
Figura 5.6 Comportamiento de los Eigenvalores de un sistema de 5° orden del Generador de Inducción de 8 polos, Vestas V-27- 50kW-480 V- Δ -60Hz.	72

Figura 5.7 Comportamiento de los Modos 3, 4 referente al Estator en un sistema de 5° orden del Generador de Inducción de 8 polos, Vestas V-27- 50kW-480 V- Δ -60Hz.	72
Figura 5.8 Comportamiento de los Modos de oscilación de un sistema maquina bus infinito de un Generador de Inducción de 8 polos, Vestas V-27- 50kW-480 V- Δ -60Hz.	73
Figura 5.9 Comportamiento modal de los eigenvectores derechos (caso estable).....	74
Figura 5.10 Comportamiento modal de los eigenvectores izquierdos (caso estable).	74
Figura 5.11 Comportamiento modal de los factores de participación (caso estable).....	75
Figura 5.12 Comportamiento modal de los eigenvectores derechos (caso inestable).....	76
Figura 5.13 Comportamiento modal de los eigenvectores izquierdos (caso inestable).	76
Figura 5.14 Comportamiento modal de los factores de participación (caso inestable).	77
Figura 5.15 Comportamiento modal de los eigenvectores derechos (punto crítico).....	78
Figura 5.16 Comportamiento modal de los eigenvectores izquierdos (punto crítico).	78
Figura 5.17 Comportamiento modal de los Factores de participación (punto crítico).....	79
Figura 5.18 Comportamiento de los Eigenvalores de un sistema de 5° orden del Generador de Inducción de 6 polos, Vestas V-27- 225kW-480 V- Δ -60Hz.	81
Figura 5.19 Comportamiento Modal 3, 4 referente al estator en un sistema de 5° orden del Generador de Inducción 6 polos Vestas V-27 225kW – 480V – Δ – 60Hz.	82
Figura 5.20 Comportamiento Modal 1, 2, 5 en un sistema de 5° orden del Generador de Inducción 6 polos Vestas V-27 225kW – 480V – Δ – 60Hz.	82
Figura 5.21 Comportamiento modal de los eigenvectores derechos (caso estable).....	83
Figura 5.22 Comportamiento modal de los eigenvectores izquierdos (caso estable).	83
Figura 5.23 Comportamiento modal de los factores de participación (caso estable).....	84
Figura 5.24 Comportamiento modal de los eigenvectores derechos (caso inestable).....	85
Figura 5.25 Comportamiento modal de los eigenvectores izquierdos (caso inestable).	85
Figura 5.26 Comportamiento modal de los factores de participación (caso inestable).	86
Figura 5.27 Comportamiento modal de los eigenvectores derechos (punto crítico).....	87
Figura 5.28 Comportamiento modal de los eigenvectores izquierdos (punto crítico).	87
Figura 5.29 Comportamiento modal de los factores de participación (punto crítico).	88
Figura A.1 Circuito equivalente exacto [1, 2, 4].	96
Figura A.2 Circuito equivalente en vacío [1, 2].	97
Figura A.3 Circuito equivalente en cortocircuito [2, 3, 4].	98

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5.1 Parámetros del aerogenerador de inducción marca Vestas modelo V-27 225/50kW-480V-60Hz en unidades reales.....	68
Tabla 5.2 Valores de deslizamiento para los tipos de estado de operación de los generadores de 6 y 8 polos.....	69
Tabla 5.3 Caso estable del comportamiento de los eigenvalores del generador de 8 polos.....	70
Tabla 5.4 Caso inestable del comportamiento de los eigenvalores del generador de 8 polos.....	70
Tabla 5.5 Caso punto crítico del comportamiento de los eigenvalores del generador de 8 polos.....	71
Tabla 5.6 Caso estable del comportamiento de los eigenvalores del generador de 6 polos.....	80
Tabla 5.7 Caso inestable del comportamiento de los eigenvalores del generador de 6 polos.....	80
Tabla 5.8 Caso punto crítico del comportamiento de los eigenvalores del generador de 6 polos.....	81
Tabla B.1 Parametros del Generador de Inducción VESTAS V27-225/50 kW, 60 Hz en pu.....	101

SIMBOLOGÍA

n_{des}	Velocidad de deslizamiento de la máquina, [r.p.m.].
n_{sinc}	Velocidad de los campos magnéticos, [r.p.m.].
n_m	Velocidad mecánica del eje de la máquina, [r.p.m.].
f_e	Frecuencia del sistema, [Hz].
P	Número de polos de la máquina.
R_1	Resistencia del estator, [Ω].
R_2	Resistencia de rotor, [Ω].
R_c	Resistencia de pérdidas en el núcleo, [Ω].
X_1	Reactancia del estator, [Ω].
X_2	Reactancia magnetizante, [Ω].
I_1	Corriente del estator, [A].
I_2	Corriente del rotor, [A].
I_m	Corriente de magnetización, [A].
s	Deslizamiento.
P_{conv}	Potencia convertida por la máquina, [W].
E_1	Tensión del núcleo, [V].
X_m	Reactancia del núcleo, [Ω].
I_e	Corriente del núcleo, [A].
V_1	Tensión en el núcleo, [V].
P_g	Potencia promedio por fase, [W].
H_m	Constante de inercia en segundos.
T_m	Par Mecánico de entrada al generador.
T_e	Par eléctrico del generador.

RESUMEN

Debido al gran avance tecnológico y al crecimiento que ha tenido la industria eléctrica, es necesario conocer las características del equipo que lo forma y el comportamiento que tienen estos, en los sistemas eléctricos de potencia, tanto de sistemas locales como interconectados.

En las últimas décadas se han originado serios problemas de estabilidad en diversos lugares causados por su uso e interconexión, es por ello que se han desarrollado diversas técnicas y métodos para detectar que los causa y cuáles son las zonas más vulnerables a este tipo de fenómenos.

Por otro lado, es necesario especificar qué tipo de dispositivos se encuentran en los sistemas que contribuyen al origen de disturbios o perturbaciones, que dañan al equipo incluyendo al personal que los maneja (en empresas o industrias), e incluso al resto de la población, lo que provoca como consecuencias principales: grandes pérdidas monetarias y mala producción de energía eléctrica hacia los usuarios.

OBJETIVO GENERAL

Se desarrollará un estudio de estabilidad ante pequeños disturbios en máquinas de inducción que se emplea en aerogeneradores, donde se analizarán las oscilaciones propias del sistema.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Conocer las características eléctricas y mecánicas del generador de inducción.
- Conocer y saber cómo se modela una máquina de inducción.
- Conocer y emplear la metodología de variables de estado.
- Conocer la importancia de lo que implica un estudio de estabilidad ante pequeños disturbios.
- Emplear un programa digital para realizar un estudio de estabilidad ante pequeños disturbios.
- Comparación de los resultados empleando dos programas de cómputo para simulación.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Uno de los problemas de estabilidad ante pequeños disturbios más frecuentes son la producción de oscilaciones electromecánicas de baja frecuencia, ya que debido al origen de pequeñas perturbaciones, durante su operación (estado permanente), traen como consecuencia fallas de estabilidad en el sistema. Es decir, se conoce como cambios repentinos de carga, de tal manera que si esta no respeta el límite de potencia en la unidad generadora se puede llegar a perder, en el momento de su operación [5,7,11,12,14].

JUSTIFICACIÓN

Con los resultados obtenidos en el análisis de estabilidad ante pequeños disturbios en la máquina de inducción se puede conocer los límites de sus parámetros que la forman con el objeto de mejorar su operación en función de su diseño y recomendar mejoras de esta para un desempeño óptimo. Así mismo, recomendar como alternativas aquellos parámetros donde la máquina de inducción se comporte como un sistema robusto.

ALCANCE

Comprender el estudio de estabilidad ante pequeños disturbios usando máquinas de inducción que se emplean en aerogeneradores; mediante el uso de programas de cómputo tanto de tipo comercial como de desarrollo.

ESTADO DEL ARTE

Históricamente, la inestabilidad transitoria ha sido el problema de estabilidad dominante en la mayoría de los sistemas, y ha sido el foco de gran parte de la atención de la industria en materia de estabilidad del Sistema Eléctrico de Potencia.

Una clara comprensión de los diferentes tipos de inestabilidad y cómo se interrelacionan es esencial para el diseño y el funcionamiento satisfactorios de los sistemas de potencia.

La estabilidad del sistema de potencia es similar a la estabilidad de cualquier sistema dinámico, y tiene fundamentos matemáticos importantes.

La estabilidad del sistema de alimentación se ha reconocido como un problema importante para el funcionamiento seguro del sistema desde la década de 1920.

La estabilidad del sistema de potencia es la capacidad de un sistema de energía eléctrica, de recuperar un estado de equilibrio de funcionamiento después de ser sometido a una alteración física, haciendo prácticamente que todo el sistema permanezca intacto.

La estabilidad del sistema de alimentación es un problema único, sin embargo, es poco práctico para estudiar como tal. La inestabilidad de un sistema de energía puede tomar diferentes formas y puede estar influenciada por una amplia gama de factores, en el análisis de los problemas de estabilidad, la identificación de los factores esenciales que contribuyen a la inestabilidad y la formación de los métodos para mejorar el funcionamiento estable se facilita en gran medida con la clasificación de la estabilidad en las categorías adecuadas, estos se basan en las siguientes consideraciones [5,11,16]:

- La naturaleza física de la inestabilidad resultante;
- El tamaño de la perturbación en estudio;
- Los dispositivos, procesos y período de tiempo que deben tenerse en cuenta para determinar la estabilidad, y
- El método más apropiado de cálculo y la predicción de la estabilidad.

Debido a la alta dimensionalidad y complejidad de los problemas de estabilidad debemos de hacer simplificaciones para analizar los tipos específicos de problemas usando un grado de detalle apropiado de la representación del sistema y las técnicas analíticas apropiadas. Esto

facilita enormemente la clasificación de la estabilidad en las categorías adecuadas, es esencial para un análisis significativo y la resolución práctica de problemas de estabilidad.

Para realizar el estudio de estabilidad es necesario el conocer los eigenvalores de la matriz característica del sistema y para lograr esto existen dos métodos que son en el dominio de la frecuencia o en el tiempo como técnicas de análisis nodal y técnicas de identificación nodal e integración numérica [5,11,16].

CAPÍTULO I

GENERADORES DE INDUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

Dentro de la gama de máquinas eléctricas, la máquina de inducción es la más empleada debido a su bajo costo de manufactura, su facilidad de manejo y su construcción robusta.

Su principal característica radica en que sólo tiene una fuente de excitación (sencillamente excitado), en tanto que las máquinas de cd y las máquinas síncronas en régimen motor requieren de dos fuentes de excitación (doblemente excitados).

Las corrientes que fluyen en el segundo devanado de la máquina de inducción son establecidas por el proceso de inducción magnética a través del acoplamiento con el devanado sencillamente excitado, de donde se deriva el nombre de máquina inducción [3, 4, 6].

1.2 PRINCIPIO DE OPERACIÓN

El principio de operación de una máquina de inducción está basado en tres leyes fundamentales que son la ley de Faraday, la ley de Lenz y la ley de Lorentz:

Ley de Faraday

- 1) Si el flujo magnético que vincula un lazo (o vuelta) varía como una función de tiempo, se induce un voltaje entre sus terminales.
- 2) El valor de la f.e.m. inducida es proporcional a la velocidad del cambio de flujo.

$$e_{\text{ind}} = \frac{d\phi}{dt} \quad (1.1)$$

Si el flujo magnético varía dentro de una bobina de N vueltas, la f.e.m. inducida está dada por [4,6]:

$$e_{\text{ind}} = N \frac{d\phi}{dt} \quad (1.2)$$

e_{ind} = f.e.m. inducida en la bobina, [V].

donde: N = número de vueltas del alambre en la bobina.

ϕ = flujo magnético que circula en la bobina, [Wb].

Ley de Lenz

Establece que la dirección de la f.e.m. inducida en una bobina es tal que si los extremos de ésta estuvieran en cortocircuito, se produciría en ella una corriente que generaría un flujo opuesto al cambio del flujo inicial.

Si una bobina tiene N espiras y el mismo flujo magnético circula en todas, la f.e.m. inducida en toda la bobina estará dado por [4]:

$$e_{\text{ind}} = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (1.3)$$

Puesto que la f.e.m. inducida se opone al cambio que lo causa, se incluye un signo menos en la ecuación (1.3).

Ley de Lorentz

Cuando un conductor que transporta corriente se coloca en un campo magnético se somete a una fuerza llamada fuerza electromagnética, la cual depende de la orientación del conductor con respecto a la dirección del campo [6].

Para esto primero se induce una tensión inducida en cada uno de los conductores mientras que el flujo pasa por ellos es aquí donde se aplica la ley de Faraday, a continuación la tensión inducida produce una corriente, la cual fluye por el conductor debajo de la cara del polo, a través de las barras extremas y regresa a través de los demás conductores.

Como el conductor que transporta corriente queda en el campo magnético este experimenta una fuerza mecánica también conocida como ley de Lorentz, esta ley siempre actúa en una dirección para arrastrar el conductor junto con el campo magnético [2,6]:

$$F_m = q(u \times B) \quad (1.4)$$

donde F_m es la fuerza electromagnética, B es la intensidad del campo magnético, q es la carga y u es la velocidad de la carga.

1.2.1 Definición de la máquina de inducción

Se sabe que una máquina que sólo tiene los devanados de amortiguamiento es llamada máquina de inducción debido a que la tensión que se produce en el rotor (que origina la corriente y el campo magnético del rotor) es inducido en los devanados del rotor en lugar de estar físicamente conectado a través de alambres.

Una de las características que se observa de una máquina de inducción es que no necesita corriente de campo en corriente directa para que este entre en operación.

En las máquinas de inducción, el devanado del estator se alimenta con corriente alterna directamente proveniente de la red, y el rotor por inducción del estator [3,6].

1.3 CONCEPTOS BÁSICOS

1.3.1 Deslizamiento del Rotor

Puesto que una máquina de inducción depende de la tensión y la corriente del rotor, con frecuencias es más lógico hablar de su velocidad relativa. En general se utilizan dos términos para definir el movimiento relativo entre el rotor y los campos magnéticos. Uno de ellos es la *velocidad de deslizamiento*, definida como la diferencia entre la velocidad sincrónica y la velocidad del rotor [3,4,11]:

$$n_{\text{des}} = n_{\text{sinc}} - n_{\text{m}} \quad (1.5)$$

n_{des} = Velocidad de deslizamiento de la máquina, [r.p.m.].

Donde: n_{sinc} = Velocidad de los campos magnéticos, [r.p.m.].

n_{m} = Velocidad mecánica del eje de la máquina, [r.p.m.].

que a su vez esta dada por:

$$n_{\text{sinc}} = \frac{120 f_e}{P} \quad (1.6)$$

n_{sinc} = Velocidad de los campos magnéticos, [r.p.m.].

Donde: f_e = Frecuencia del sistema, [Hz].

P = Número de polos de la máquina.

El otro término utilizado para describir el movimiento relativo es el deslizamiento, el cual es la velocidad relativa expresada sobre una base en por unidad o en porcentaje. El deslizamiento está definido como [4]:

$$s = \frac{n_{des}}{n_{sinc}} \times 100\% \quad (1.7)$$

$$s = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{des}} \times 100\% \quad (1.8)$$

Esta ecuación también puede expresarse en términos de la velocidad angular ω [rad/seg] como:

$$s = \frac{\omega_{sinc} - \omega_m}{\omega_{des}} \times 100\% \quad (1.9)$$

1.3.2 Frecuencia del Rotor

Un motor de inducción trabaja induciendo tensiones y corrientes en el rotor de la máquina; por esa razón, a veces se le llama transformador rotante. Como transformador, el primario (estator) induce un voltaje en el secundario (rotor) pero, a diferencia del transformador, la frecuencia secundaria no es necesariamente la misma que la frecuencia primaria. Si el rotor de una máquina está bloqueado tal que no puede moverse, el rotor tendrá la misma frecuencia que el estator. Por el contrario, si el rotor gira a velocidad sincrónica, la frecuencia en el rotor será cero.

Para cualquier velocidad intermedia, la frecuencia del rotor es directamente proporcional a la *diferencia* entre la velocidad del campo magnético n_{sinc} y la velocidad del rotor n_m . Puesto que el deslizamiento del rotor está definido como [3,4,11]:

$$s = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} \quad (1.10)$$

La frecuencia del rotor puede ser expresada como:

$$f_r = s f_e \quad (1.11)$$

Existen varias formas alternativas útiles de esta expresión. Una de las expresiones más comunes se obtiene sustituyendo (1.10) del deslizamiento en la ecuación (1.11)

$$f_r = \frac{n_{\text{sinc}} - n_m}{n_{\text{sinc}}} f_e \quad (1.12)$$

1.4 CIRCUITO EQUIVALENTE

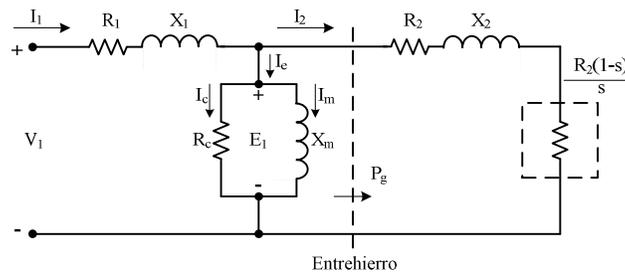


Figura 1.1 Circuito equivalente exacto por fase para una máquina de inducción trifásica como motor [1, 2, 4].

Donde las variables para la máquina de inducción son:

R_1 = Resistencia del estator, [Ω].	I_m = Corriente de magnetización, [A].
R_2 = Resistencia de rotor, [Ω].	s = Deslizamiento en decimales.
R_c = Resistencia de pérdidas en el núcleo, [Ω].	P_{conv} = Potencia convertida por la máquina, [W].
X_1 = Reactancia del estator, [Ω].	E_1 = Tensión del núcleo, [V].
X_2 = Reactancia magnetizante, [Ω].	X_m = Reactancia del núcleo, [Ω].
I_1 = Corriente del estator, [A].	I_e = Corriente del núcleo, [A].
I_2 = Corriente del rotor, [A].	V_1 = Tensión en el núcleo, [V].

1.5 MODOS DE OPERACIÓN

Como se observa en la figura 1.2 se puede encontrar las distintas regiones sobre las cuales la máquina de inducción es capaz de trabajar, estos modos de operación son conocidos como: modo de frenado, modo de motor y modo de generador, los cuales son explicados a continuación.

1.5.1 Par Inducido

El par inducido τ_{ind} en una máquina se define como el par generado por la conversión de energía eléctrica en mecánica. Este par difiere del par real disponible en las terminales de la máquina en una cantidad igual a los pares de rozamiento propio y rozamiento con el aire de la máquina, el par inducido esta dado por la ecuación [2,4,11]:

$$\tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m} \quad (1.13)$$

Donde: P_{conv} = Potencia mecánica desarrollada, [W].
 ω_m = Velocidad mecánica, [Rad/seg].

Este par es también llamado par desarrollado de la máquina.

Dependiendo del valor del deslizamiento, se distinguen tres zonas distintas que caracterizan tres modos de funcionamiento, a saber: motor, generador y freno. Esto se observa en la figura 1.2 siguiente:

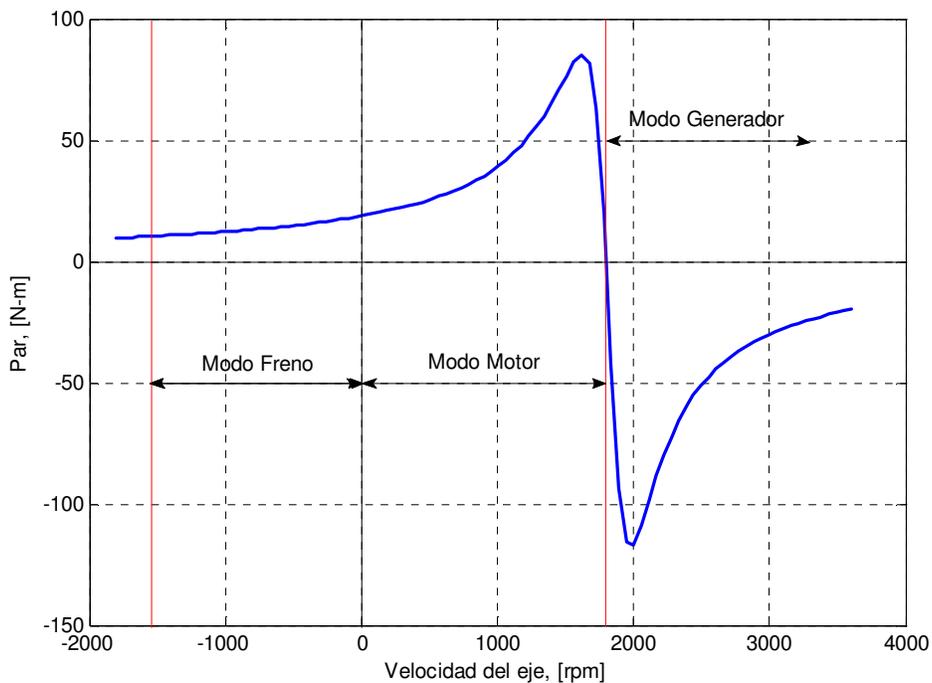


Figura 1.2 Curva par velocidad Máquina de Inducción régimen de Motor, Generador y Freno [2, 3, 4, 6].

1.5.1.1 Freno

Dentro del régimen de frenado en una máquina de inducción este se produce para los deslizamientos superiores a la unidad, lo que corresponde a las velocidades negativas, en esta situación el rotor gira en sentido contrario al campo giratorio, de tal manera que la máquina recibe energía de la red y energía mecánica por el eje, una característica importante de este modo de operación normalmente el deslizamiento toma valores entre 1 y 2 lo que da como resultado que [2, 3, 4, 6]:

La resistencia de carga se hace negativa y en consecuencia la potencia mecánica interna es de igual forma negativa haciendo que la máquina reciba energía mecánica por el eje.

Durante este periodo el frenado de la máquina recibe energía mecánica por el eje y también energía mecánica por la red, ocasionando grandes corrientes rotatorias, con las consiguientes pérdidas por efecto Joule tanto en el estator como en el rotor, que es el lugar donde se disipan las potencias que recibe la máquina en este modo de operación.

Por lo general este modo de operación se utiliza en la práctica cuando se desea parar rápidamente la máquina de inducción.

1.5.1.2 Motor

Representa el modo de funcionamiento más característico y corresponsable al rango de deslizamiento correspondiente entre 0 y 1. De acuerdo con la expresión $s = \frac{n_1 - n}{n_1}$ que nos da la velocidad del rotor en función de s [2, 3, 4, 6]:

$$n = n_1(1 - s) \quad (1.14)$$

El rango anterior corresponde a velocidades comprendidas entre n_1 (velocidad de sincronismo) y 0 (parada).

Si se tiene en cuenta el rango de variación de “ s ” en el régimen de motor entonces se tiene que:

- a) La potencia mecánica interna es positiva. Es decir, se transmite energía mecánica al eje.
- b) La potencia en el entrehierro es positiva, lo que indica un par electromagnético positivo.
- c) Si la potencia en el entrehierro es positiva, quiere decir que se transfiere energía en el sentido estator-rotor.

Como quiera además que la energía en el estator proceda de la red, la potencia eléctrica absorbida tendrá en el sentido de P_a . En definitiva, la potencia eléctrica que absorbe la máquina de la red es positiva. Ver figura 1.3 siguiente:

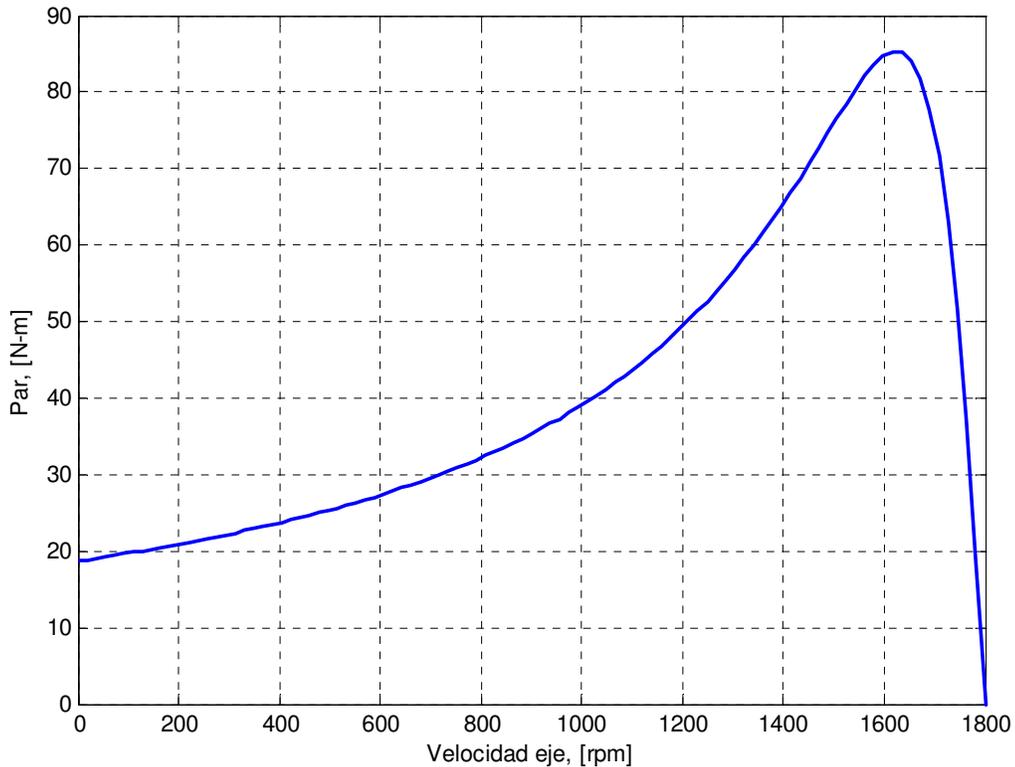


Figura 1.3 Curva par velocidad Máquina de Inducción régimen Motor [2, 3, 4, 6].

1.5.1.3 Generador

Dentro de los sistemas de operación que se conocen en una máquina de inducción, la operación en modo de generador se logra cuando se acciona una máquina de inducción a una velocidad mayor a la síncrona, logrando así la inversión de su par inducido y el funcionamiento de este en modo de generador. Ver figura 1.4.

En los modos de funcionamiento de la máquina de inducción encontramos que existe un par máximo ya sea para motor o para generador, en el caso de modo generador si se llegara a exceder el par máximo de generador vamos a obtener una velocidad excesiva.

Dentro de este modo de operación encontramos que el generador de inducción no es capaz de producir potencia reactiva pero si de consumirla ya que es necesario para poder mantener el campo magnético dentro de su estator, al igual debe de mantener la tensión en las terminales de la

máquina al saber que no existe una corriente de campo lo cual nos va a proporcionar que no pueda ser capaz de controlar su propia tensión de salida [2, 3, 4, 6].

Las ventajas que podemos encontrar dentro de la máquina de inducción en modo de generador es su simplicidad ya que no requiere de circuitos externos, además de que no requiere que se conserve a una velocidad constante ya que únicamente deberá de estar operando a una velocidad mayor a la síncrona.

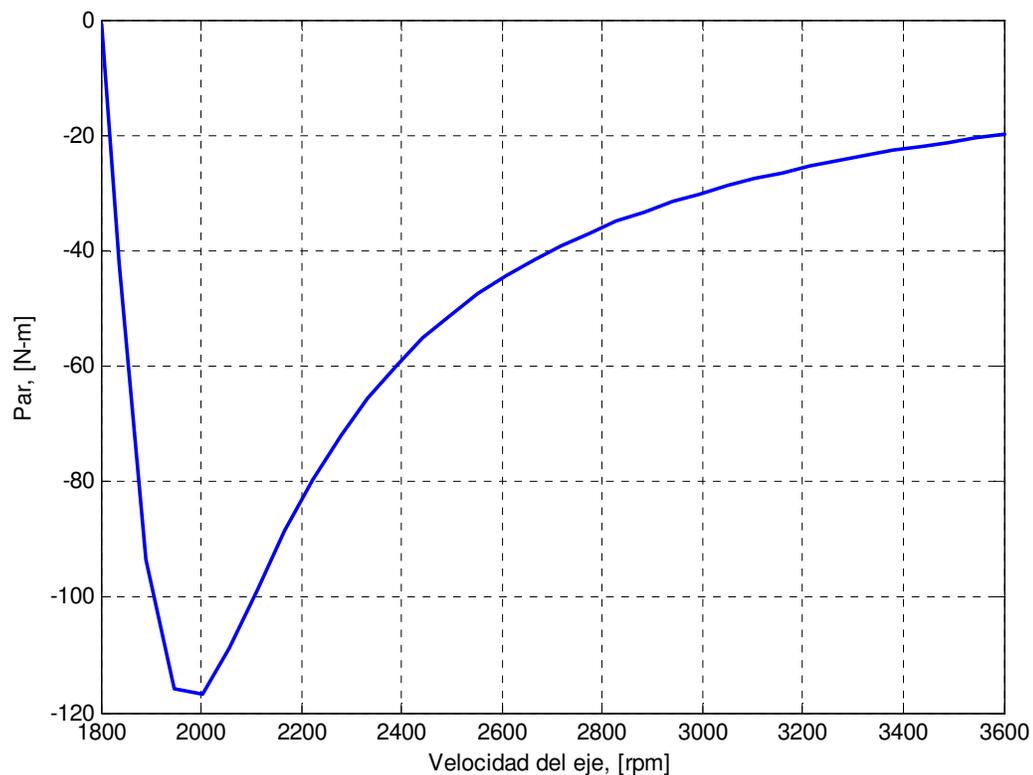


Figura 1.4 Curva par velocidad Máquina de Inducción régimen Generador [2, 3, 4, 6].

1.6 FLUJO DE POTENCIA

Ya que no hay fuentes eléctricas conectadas directamente al rotor de una máquina de inducción, la potencia que cruza el entrehierro en forma magnética antes de ser convertida a su forma eléctrica es la única fuente de la potencia suministrada al rotor. Específicamente, la potencia promedio que cruza el entrehierro debe ser igual a la suma de las pérdidas resistivas del rotor disipadas como calor y la potencia convertida en forma mecánica. La potencia promedio por fase P_g , que cruza el entrehierro para el circuito equivalente por fase de la figura 1.3 está dada por [3,4,11]:

$$P_g = I_2^2 R_2 \frac{R_2}{s} = I_2^2 R_2 + I_2^2 \frac{1-s}{s} R_2 \quad (1.15)$$

Donde:

s = Deslizamiento de la máquina de inducción en %.

P_g = Potencia promedio por fase, [W].

I_2 = Corriente en el rotor, [A].

R_2 = Resistencia en el rotor, [Ω].

Antes de la aplicación del circuito equivalente por fase en cualesquiera cálculos de desempeño, son necesarios los procedimientos de prueba para obtener los valores de los elementos en el circuito equivalente.

1.6.1 Distribución de las Potencias

La potencia que la máquina absorbe de la red, si V_1 es la tensión aplicada por fase, I_1 la corriente por fase y ω_1 el desfaseamiento entre ambas magnitudes, será [1, 2, 4]:

$$P_1 = m_1 V_1 I_1 \cos \omega_1 \quad (1.16)$$

Esa potencia llega al estator, y una parte se transforma en calor por el efecto Joule en sus devanados, cuyo valor es:

$$P_{Cu1} = m_1 R_1 I_1^2 \quad (1.17)$$

Y la otra parte se pierde en el hierro P_{Fe1} . La suma de ambas pérdidas representa la disipación total en el estator:

$$P_{p1} = P_{Cu1} + P_{Fe1} \quad (1.18)$$

La potencia electromecánica que llega al rotor a través del entrehierro, y que se denomina P_a (potencia en el entrehierro), tendrá una magnitud:

$$P_a = P_1 + P_{p1} \quad (1.19)$$

En el rotor aparecen unas pérdidas adicionales debidas al efecto Joule, P_{Cu2} , y de valor:

$$P_{Cu2} = m_2 R_2 I_2^2 \quad (1.20)$$

Las pérdidas en el hierro del rotor son despreciables debido al pequeño valor de f_2 . La potencia que llegara al árbol de la máquina, denominada potencia mecánica interna, P_{mi} , será:

$$P_{mi} = P_a - P_{Cu2} \quad (1.21)$$

La potencia útil en el eje será algo menor, debido a las pérdidas mecánicas por el rozamiento y ventilación; denominado P_m a estas pérdidas y P_u a la potencia útil, resultará:

$$P_u = P_{mi} - P_m \quad (1.22)$$

Lo anterior se muestra en la siguiente figura 1.5:

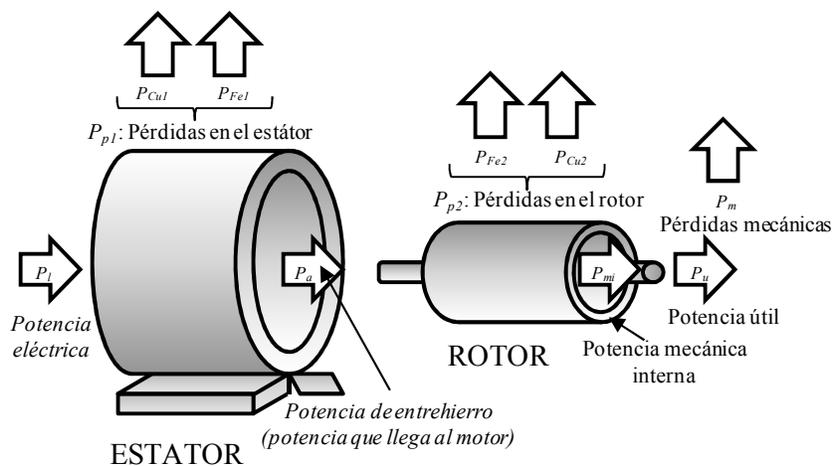


Figura 1.5 Distribución de las Potencias en la Máquina de Inducción [1, 2].

1.7 PARTES CONSTITUTIVAS DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN

Una máquina de inducción tiene físicamente el mismo estator que una máquina sincrónica, pero la construcción del rotor es diferente.

Hay dos tipos diferentes de rotores que pueden disponerse dentro del estator de la máquina de inducción. Uno de ellos se llama rotor de jaula de ardilla, mientras que el otro es llamado rotor devanado.

Un rotor de jaula de ardilla de esta clase consiste en una serie de barras conductoras dispuestas entre ranuras labradas en la cara del rotor y cortocircuitadas en cada extremo por anillos de cortocircuitado. Este diseño hace referencia a un rotor de jaula de ardilla debido a que los conductores examinados en sí mismos se parecerían a los de las ruedas de ejercicio de las ardillas.

El otro tipo de rotor es el devanado. Este tiene un grupo completo de devanados trifásicos que son las imágenes especulares de los devanados del estator. Las fases de los devanados del rotor están conectadas usualmente en Y, y los extremos de los tres alambres del rotor están unidos a anillos rozantes dispuestos sobre el eje del rotor. Los devanados del rotor están cortocircuitados a través de escobillas montadas en los anillos rozantes. En las máquinas de inducción de rotor devanado, sus corrientes rotoricas son accesibles en las escobillas del estator, donde pueden ser examinadas y donde se puede insertar resistencia extra al circuito del rotor. Es posible obtener ventaja de este hecho para modificar la característica par-velocidad de la máquina de inducción [3, 4, 6].

1.8 APLICACIONES

La máquina de inducción en modo generador es empleada normalmente en molinos de viento ya que su tamaño y su simplicidad hacen de este un manejo fácil y seguro, además de que la máquina de inducción es muy útil para la generación debido a que no requiere de mucho mantenimiento, además de que los capacitores pueden ser capaces de poder corregir el factor de potencia logrando así un mejor manejo de economía [4, 6].

1.9 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN

En una máquina de inducción, se inducen corrientes a la frecuencia de deslizamiento en los devanados del rotor, cuando éste se desliza con respecto a la onda de flujo del estator que gira sincrónicamente. Estas corrientes del rotor originan una onda de flujo que al interactuar con la onda de flujo del estator producen un *par*. Cuando la carga en la máquina aumenta, disminuye la velocidad del rotor, ocasionando mayor deslizamiento y mayores corrientes inducidas en el rotor, y por consiguiente, mayor par [1, 4].

Unos de los hechos sobresalientes que afectan a las aplicaciones de la máquina de inducción es que el deslizamiento al cual se tiene el par máximo se puede controlar variando la resistencia del rotor. Una alta resistencia del rotor proporciona condiciones óptimas de arranque pero mal desempeño en el funcionamiento. Sin embargo, una baja resistencia del rotor puede ocasionar condiciones no satisfactorias de arranque [1, 2].

Su única desventaja es su factor de potencia relativamente bajo (de 0.85 a 0.90 a plena carga, para motores de 60 Hz de 4 polos, y es bastante menor a cargas ligeras y para máquinas de menores velocidades nominales). El bajo factor de potencia se debe al hecho de que se debe suministrar toda la excitación mediante potencia reactiva en retraso, que se toma de la fuente de CA [1].

CAPÍTULO II

SISTEMAS AEROGENERADORES

2.1 INTRODUCCIÓN

Los aerogeneradores constituyen el principal elemento de los sistemas de aprovechamiento de la energía eólica, los cuales están constituidos principalmente por un arreglo de palas, generador y torre. Los aerogeneradores funcionan al contrario de un ventilador, en lugar de utilizar electricidad para producir el viento, los aerogeneradores utilizan el viento para producir electricidad. El rotor convierte la fuerza del viento en energía rotatoria del eje, una caja de engranes aumenta la velocidad y un generador transforma la energía del eje en energía eléctrica. Por no ser constante la generación de energía eléctrica, se debe conectar a un sistema de regulación que posteriormente a través de conductores, se va a un transformador que eleva la tensión eléctrica, al aumentar la tensión se puede enviar a un sistema de red eléctrica [8,29,33].

2.2 EL AEROGENERADOR

Son generadores rotatorios que pueden generar según su aplicación en corriente directa en corriente alterna, máquinas síncronas o de inducción. Estos generadores son impulsados por turbinas que usan como fuente principal energía del viento y que pueden dar según las características del viento y las de la turbina, potencias de hasta 7.5 MW según la marca Enercon en la actualidad por unidad generadora [30,31,37].

2.3 COMPONENTES DEL AEROGENERADOR

Debido a la amplia gama de tamaños disponibles y de aplicaciones en los aerogeneradores, en la figura 2.1 se muestra cada una de las partes que conforman a un aerogenerador grande y a continuación se definirán brevemente cada una de ellas:

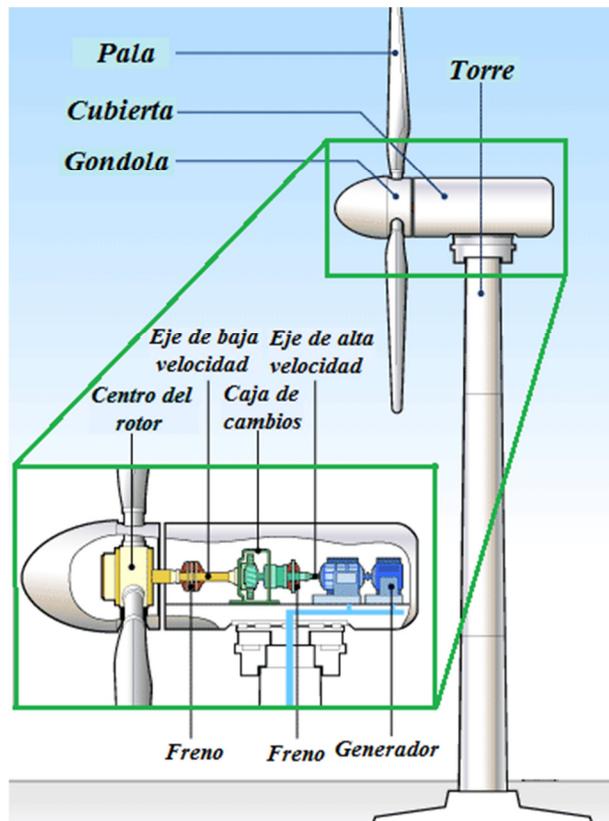


Figura 2.1 Componentes de un Aerogenerador [30].

a) Góndola

Se encuentra en la parte superior y dentro de ella se almacena el multiplicador, el generador eléctrico, anemómetro, controlador electrónico, eje de alta velocidad con su freno mecánico, freno de disco, mecanismo de orientación, sistema hidráulico, unidad de refrigeración y veleta [8,30,31].

Partes que conforman a la Góndola:

- Anemómetro: Su función principal es medir la velocidad del viento indicando en que momento debe operar el aerogenerador.
- Controlador electrónico: Su función es controlar el mecanismo de orientación.

- Eje de alta velocidad con su freno mecánico: Permite el funcionamiento del generador a una velocidad de 1500 y 1800 revoluciones por minuto (r.p.m.) y contiene un freno de disco de emergencia.
- Generador eléctrico: Su función es transformar la energía mecánica a energía eléctrica y en los aerogeneradores se utilizan tres tipos que son el generador jaula de ardilla, de rotor devanado y de imanes permanentes.
- Freno de disco: Es el medio principal de frenado y únicamente se usa cuando la velocidad del rotor es muy baja.
- Multiplicador: Su función es elevar la velocidad del giro para lograr la producción de energía eléctrica.
- Mecanismo de Orientación: Su función principal es mantener al aerogenerador en dirección contraria al viento.
- Sistema Hidráulico: Restaura los frenos aerodinámicos del aerogenerador.
- Unidad de Refrigeración: Se compone de un ventilador eléctrico y una unidad de refrigeración de aceite, el primero enfría el generador eléctrico y el segundo enfría el aceite del multiplicador.
- Veleta: Su función principal es medir la dirección del viento.

b) Turbina Eólica

Su función es recibir la energía del viento para poder transformarla en energía mecánica. Sus componentes que la forman son el buje, carenado y pala [8,30,31].

Partes que conforman la turbina eólica:

- Buje: Es el centro del rotor donde se colocan las palas y por la cual se transmite el movimiento hacia el generador, existen dos tipos de buje dependiendo del número de palas que un aerogenerador pueda tener: Rígido: este es para aerogeneradores de tres palas y Basculante, para aerogeneradores de dos palas.
- Carenado (Nariz): Es la cubierta en forma de cono que va ayudar a direccionar el viento hacia las palas para obtener una mayor movimiento.
- Pala: Su función principal es transformar la energía del viento en energía mecánica.

b) Torre

Es la encargada de soportar al Aerogenerador y cabe mencionar que existen dos tipos de torre como se muestran en la figuras 2.2 y 2.3 [8,21,30]:



Figura 2.2 Torre de Celosía [38].



Figura 2.3 Torre Tubular [37].

2.4 CLASIFICACIÓN DE AEROGENERADORES

En la actualidad existe toda una gran variedad de modelos de aerogeneradores, diferentes entre sí tanto por la potencia que proporcionada así como por el número de palas o incluso por la manera de producir energía eléctrica (aisladamente o en conexión directa con la red de distribución convencional). Pueden clasificarse, pues, atendiendo a distintos criterios [21,30,31]:

2.4.1 Posición del Aerogenerador

Existen dos tipos de posición para los aerogeneradores que a continuación se da una breve explicación de estas:

- a) Eje Vertical: La característica de estos aerogeneradores es que su eje está colocado de forma perpendicular al suelo, son conocidos como “VAWTs” (Vertical Axis Wind Turbines) y que en español significa (Aerogeneradores de eje Vertical).

Existen tres tipos de estos aerogeneradores:

- Darrieus: Consisten en dos o tres arcos que giran alrededor del eje como se muestra en la siguiente figura 2.4:



Figura 2.4 Aerogenerador tipo Darrieus [42].

- Panemonas: Son cuatro o más semicírculos unidos al eje central. Su rendimiento es bajo, como se muestra en la figura 2.5:



Figura 2.5 Aerogenerador tipo Panemonas [43].

- Sabonius: Dos o más filas de semicilindros colocados opuestamente como se observa en la figura 2.6:



Figura 2.6 Aerogenerador tipo Sabonius [43].

- b) Eje horizontal. Son los más habituales y en ellos se ha centrado el mayor esfuerzo de diseño en los últimos años. Se los denomina también "HAWTs" (horizontal axis wind turbines) y que en español significan (Aerogeneradores de eje horizontal), como se muestran en la figura 2.7.



Figura 2.7 Aerogenerador de eje Horizontal [37].

2.4.2 Posición del equipo con respecto al tiempo

Las posiciones principales a las que se encuentra el equipo son las siguientes [21,30,31]:

- a) A Viento arriba: En la configuración viento arriba, el viento pasa primero sobre el rotor y después sobre la torre del aerogenerador, la principal ventaja de los aerogeneradores viento arriba es que se evita el abrigo del viento tras la torre y la mayoría de los aerogeneradores tienen este diseño y utilizan servomecanismos para mantener el plano del rotor en posición perpendicular a la dirección del viento. Estos sistemas no operan a alta velocidad, es decir, no intentan seguir la dirección del viento con gran dinámica. Los sistemas de control cuentan con algoritmos para la toma de decisiones al respecto, por ejemplo, sólo cambian la orientación del rotor cuando las estadísticas de la medición sugieren que la dirección del viento efectivamente ha cambiado. El principal inconveniente de los diseños viento arriba es que el rotor necesita ser bastante inflexible, y estar situado a una cierta distancia de la torre [21,30,31].
- b) A viento abajo: En la configuración viento abajo, el viento pasa primero sobre la torre y después sobre el rotor. Son pocos los diseños con rotores viento abajo, ya que cuando una de las aspas pasa por la "sombra eólica" de la torre se originan esfuerzos adicionales sobre la flecha del rotor, este problema es mayor para rotores de dos aspas, la ventaja que pueden

tener es que pueden ser contruidos sin un mecanismo de orientación, si el rotor y la góndola tienen un diseño apropiado que hace que la góndola siga al viento pasivamente. En aerogeneradores con orientación viento abajo se emplea una técnica de orientación pasiva. Esta técnica está basada en el concepto de conicidad del rotor y, en una flexibilidad mayor de las aspas. Si la máquina ha estado orientándose de forma pasiva en la misma dirección durante un largo periodo de tiempo y no dispone de un mecanismo de orientación, los cables pueden llegar a sufrir una torsión excesiva [21,30,40].

2.4.3 Número de Palas

- a) Una pala: Estos aerogeneradores precisan un contrapeso en el otro extremo para equilibrar, su velocidad de giro es muy elevada, pero el inconveniente es que acorta la vida de la instalación. Un ejemplo de estos aerogeneradores se puede ver en la siguiente figura 2.8:



Figura 2.8 Aerogenerador de una Pala [44]

- b) Dos palas: Este tipo de aerogeneradores tienen la ventaja de ahorrar el costo de una pala y su peso, pero suelen tener dificultades para penetrar en el mercado, en parte porque necesitan una mayor velocidad de giro para producir la misma energía de salida. Esto supone una desventaja tanto en lo que respecta al ruido como al aspecto visual. Un ejemplo de este diseño se puede observar en la figura 2.9:



Figura 2.9 Aerogenerador de dos Palas [42].

- c) Tres palas: La mayoría de los aerogeneradores tienen este diseño, este aerogenerador está colocado como el aerogenerador clave para la generación eólica. La gran mayoría de las turbinas vendidas en los mercados mundiales poseen este diseño. Un ejemplo de esta figura se presenta en la figura 2.10.



Figura 2.10 Aerogenerador de tres Palas [37].

- d) Multípalas: Este tipo de aerogeneradores mejor llamado modelo americano, debido a que una de sus primeras aplicaciones fue la extracción de agua en pozos de las grandes llanuras de aquel continente, contiene más de tres palas, y un ejemplo se puede observar en la siguiente figura 2.11.



Figura 2.11 Aerogenerador Multípalas [45].

2.4.3.1 Rendimiento de los aerogeneradores según el número de palas

En la figura 2.12 siguiente se muestra el rendimiento más favorable que puede llegar a tener el aerogenerador de acuerdo al número de palas y también las conclusiones a las que se llegaron a base de esta gráfica [21,30,31].

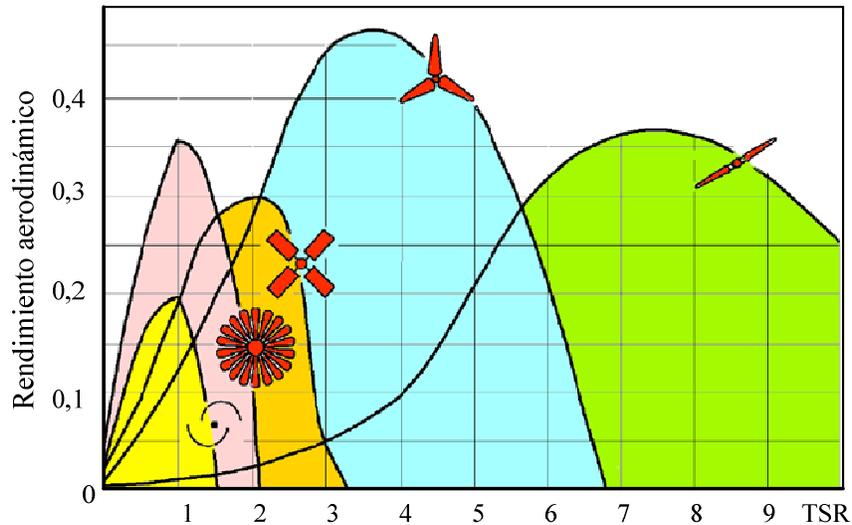


Figura 2.12 Gráfica del rendimiento aerodinámico de los tipos de palas [30].

- Los molinos múltipala y Savonius obtienen su máximo rendimiento aerodinámico para TSR (Relación de Velocidad Periférica) pequeño, es decir, giran a baja velocidad; así mismo funcionan con velocidades de viento pequeño.
- El rendimiento aerodinámico y la potencia útil son superiores en los aparatos Darrieux y hélice.
- El rendimiento aerodinámico se mantiene siempre por debajo del límite de Betz, y se aproximaría a él si el TSR tendiese a infinito.
- Si el TSR es mayor que 3,5 las palas funcionan principalmente por empuje ascensional, y si es menor que 3,5 funcionan por arrastre.

2.5 GENERACIÓN EÓLICA

La generación eólica usa la energía cinética del viento para la producción de energía eléctrica, este tipo de generación no contamina y sólo se aplica en sitios cuyas características del viento la justifiquen pero tiene el inconveniente de operar en forma intermitente según la velocidad del viento en la zona de su instalación, los aerogeneradores también se pueden instalar en el mar en aquellas costas donde no hay presencia de ciclones y debida a su aplicación este tipo de generación se puede clasificar de tres formas básicamente:

2.5.1 Generación en pequeña escala

Es la generación con potencias de 250 KW a 500 KW hasta 1000 KW, estas unidades generadoras se usan para alimentar casas o pequeños ranchos que no pueden tener alimentación eléctrica convencional con redes de distribución y que normalmente requieren un respaldo para cubrir en las horas que no se puede generar la potencia por ausencia del viento.

Este tipo de generación se puede ver aplicada en usos domésticos o agrícolas e incluso en instalaciones industriales para desalación para abastecer electrodomésticos, iluminación, bombeos, instalaciones deportivas, etc. Este tipo de conexiones permite el uso de baterías o acumuladores por si lo que se desea abastecer está condicionado por un horario.

2.5.2 De interconexión a las redes de distribución

La conexión directa a la red viene representada por la utilización de aerogeneradores de potencias grandes (más de 10 ó 100 kW). Recordemos que la mayoría de esta generación es realizada gracias a la unión de varios aerogeneradores dando forma así al sistema y a lo que se conoce como un parque eólico. Por sus condiciones de producción, está limitada en porcentaje al total de energía eléctrica (en la conexión directa a la red). Se considera que el grado de penetración de la energía eólica en grandes redes de distribución eléctrica, puede alcanzar sin problemas del 15 al 20% del total, sin especiales precauciones en la calidad del suministro, ni en la estabilidad de la red.

2.5.3 Generación en mayor escala

Está representada por la utilización de aerogeneradores de potencias grandes (más de 10 ó 100 kW). Recordemos que la mayoría de esta generación es realizada gracias a la unión de varios aerogeneradores dando forma así al sistema y a lo que se conoce como un parque eólico. Por sus condiciones de producción, está limitada en porcentaje al total de energía eléctrica (en la conexión directa a la red). Se considera que el grado de penetración de la energía eólica en grandes redes de distribución eléctrica, puede alcanzar sin problemas del 15 al 20% del total, sin especiales precauciones en la calidad del suministro, ni en la estabilidad de la red.

2.6 SISTEMAS EÓLICOS AISLADOS

Los sistemas de potencia aislados son principalmente usados en áreas remotas donde el servicio de las líneas son anti-económicas para su instalación ya sea debido a la dificultad del terreno, derecho de vía o situaciones concernientes al medio ambiente.

La construcción de nuevas líneas de transmisión tiene un costo bastante alto aun sin contar con las restricciones mencionadas. Siendo así un sistema aislado podría ser más accesible para un lugar remoto que se encuentre a miles de kilómetros de las líneas de transmisión.

Para esto se podría utilizar un sistema eólico aislado, debido a que la energía suministrada por este es más económica en la actualidad, todo esto siempre y cuando se reúna lo necesario para explotar este tipo de energía, la energía eólica es intermitente ya que dependen de las condiciones del viento, por lo tanto este sistemas necesita de algún medio de almacenamiento para el exceso energía por días nublados o días con poco viento.

Cuando la velocidad del viento hace que la potencia entregada por el aerogenerador sea superior a la consumida es necesario algún método para restablecer el equilibrio antes de que las protección de la instalación desconecten al mismo, en estas circunstancias se suelen emplear las cargas de volcado en las que se disipa el exceso de energía, pueden emplearse como cargas de volcado ciertos consumos de accesorios de la instalación y se pueden emplear bancos de resistencia controladas por interruptores estáticos [29,20].

2.7 PARQUES EÓLICOS

Un parque eólico es una agrupación de aerogeneradores que transforman la energía eólica en energía eléctrica.

Los parques eólicos se pueden situar en tierra o en el mar, siendo los primeros los más habituales, aunque los parques en el mar han experimentado un crecimiento importante en Europa en los últimos años.

El número de aerogeneradores que componen un parque es muy variable, y depende fundamentalmente de la superficie disponible y de las características del viento en el emplazamiento. Antes de montar un parque eólico se estudia el viento en el emplazamiento elegido durante un tiempo que suele ser superior a un año. Para ello se instalan veletas y anemómetros. Con los datos recogidos se traza una rosa de los vientos que indica las direcciones predominantes del viento y su velocidad.

Los parques eólicos proporcionan diferente cantidad de energía dependiendo de las diferencias sobre diseño, situación de las turbinas, y por el hecho de que los antiguos diseños de turbinas eran menos eficientes y capaces de adaptarse a los cambios de dirección y velocidad del viento [8,21,28].

2.7.1 Ventajas de la generación eólica

A continuación se mencionaran algunas de las ventajas de la generación eólica:

- Es un tipo de energía renovable ya que tiene su origen en procesos atmosféricos debidos a la energía que llega a la Tierra procedente del Sol.
- Es una energía limpia ya que no produce algún tipo de emisiones que contaminen a la atmósfera ni residuos contaminantes.
- No requiere de combustible que produzca dióxido de carbono (CO_2), por lo que no ayuda al incremento del efecto invernadero ni al cambio en el clima.
- Puede instalarse en espacios no aptos para otros fines, por ejemplo en zonas desérticas, cerca de las costas, en laderas áridas y muy empinadas.
- Puede convivir con otros usos del suelo, por ejemplo prados para uso ganadero o cultivos. Crea un elevado número de puestos de trabajo en las plantas de ensamblaje y las zonas de instalación.
- Su instalación es rápida, entre 4 meses y 9 meses.
- La utilización de esta generación de energía permite la autoalimentación de viviendas, terminando así con la necesidad de conectarse a redes de suministro, pudiendo lograrse autonomías superiores a las 82 horas, sin alimentación desde ninguno de los 2 sistemas.
- Posibilidad de construir parques eólicos en el mar, donde el viento es más fuerte, más constante y el impacto social es menor, aunque aumentan los costes de instalación y mantenimiento.

2.7.2 Desventajas de la energía eólica

Algunas de las desventajas que presenta la generación eólica son las siguientes:

- El aire al ser un fluido de pequeño peso específico, implica fabricar máquinas grandes y en consecuencia caras.

- Desde el punto de vista estético, la energía eólica produce un impacto visual inevitable, ya que por sus características precisa unos emplazamientos que normalmente resultan ser los que más evidencian la presencia de las máquinas.
- En este sentido, la implantación de la energía eólica a gran escala, puede producir una alteración clara sobre el paisaje, que deberá ser evaluada en función de la situación previa existente en cada localización.
- Un impacto negativo es el ruido producido por el giro del rotor, pero su efecto no es más acusado que el generado por una instalación de tipo industrial de similar forma, y siempre que estemos muy próximos a los molinos.
- También ha de tenerse especial cuidado a la hora de seleccionar un parque si en las inmediaciones habitan aves, por el riesgo mortandad al impactar con las palas, situar los molinos adecuadamente dejando espacio a las aves.

2.7.3 Topología de un parque eólico

A nivel mundial, las capacidades comerciales actualmente utilizadas en aerogeneradores van desde 1 hasta 4 MW, con voltaje en terminales de 600 V aproximadamente.

Se utilizan transformadores elevadores para conectar a cada aerogenerador a la red de media tensión (de 12 a 34.5 kV) [8,21,28]. Ver figura 2.13 siguiente:

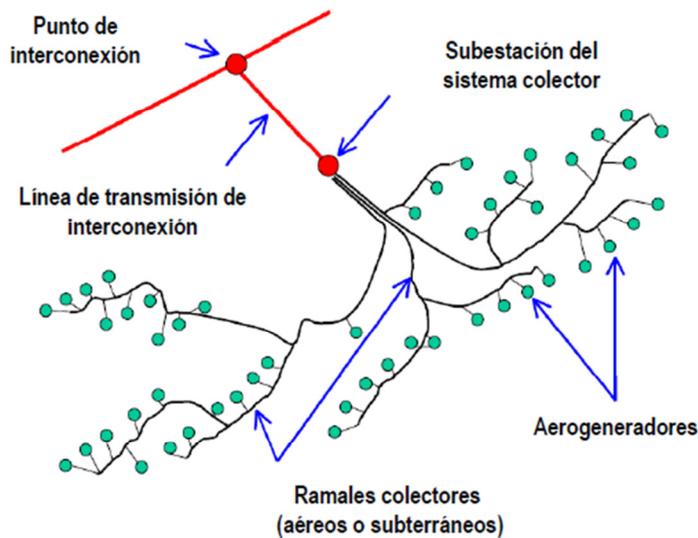


Figura 2.13 Topología de un parque eólico [28].

2.7.4 Características de un parque eólico

- Variabilidad en la generación de energía: La variabilidad la podemos entender como los cambios que hay en la forma de producción de energía eólica debida a las características de viento ya que este no es constante y por consiguiente no se produce la misma cantidad de energía.
- Predicción de capacidad de generación: Para saber qué cantidad de energía eléctrica se puede producir es necesario tener una predicción del error de viento ya que esta es mucho mayor que el error de predicción de la carga, este error de predicción, disminuye cuando se involucran grandes áreas, ya que en un parque eólico el error de predicción de un día en adelante se encuentra entre el 10% y 20%
- Requerimiento en códigos de red: Los códigos de red son criterios de confiabilidad y practicas formalizadas que constituyen la base de la operación, diseño y desarrollo de sistemas eléctricos, estos requerimientos o normas indican las responsabilidades de los productores de potencia y operadores del sistema eléctrico, a la vez que proporcionan a los fabricantes un marco de trabajo para el desarrollo de su equipo.

El código de red tiene como propósito definir los requerimientos mínimos y las condiciones para la conexión de generadores al sistema de energía eléctrica. De tal manera, los proyectos deben cumplir de forma obligatoria los lineamientos expresados en dicho código

- Estabilidad del sistema: Los distintos tipos de aerogeneradores, poseen distintas características de control y como consecuencia diferentes posibilidades de proporcionar un soporte al sistema bajo condiciones normales o ante disturbios. Se requiere definir estrategias de operación y control similares a las centrales de generación convencionales, dependiendo del porcentaje de integración de energía eólica, así como, de la robustez del sistema.

CAPÍTULO III

MODELADO DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN

3.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo 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 trabajo se considera el modelo empleado en 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 3.1; el cual es retomado de la referencia 11.

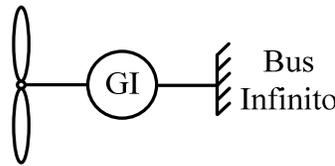


Figura 3.1 Sistema Máquina Bus Infinito.

3.2 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 $\omega_b = \omega_b$ [5,18]. Para el desarrollo del modelo no lineal de la máquina se presenta en el marco de referencia arbitrario.

En la figura 3.2, 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 [15]. 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.

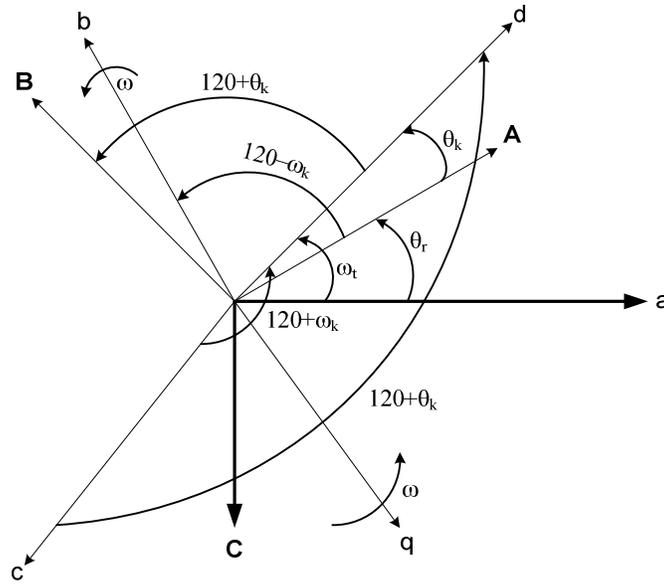


Figura 3.2 Relación entre los ejes de las fases del estator y rotor con los ejes del marco de referencia dq [18].

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 [5,18]:

Estator:

$$-v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt} (\psi_{ds}) + \frac{\omega}{\omega_0} \psi_{qs} \quad (3.1)$$

$$-v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt} (\psi_{qs}) - \frac{\omega}{\omega_0} \psi_{ds} \quad (3.2)$$

Rotor:

$$0 = R_r i_{dr} + \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt} (\psi_{dr}) + S \psi_{qr} \quad (3.3)$$

$$0 = R_r i_{qr} + \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt} (\psi_{qr}) - S \psi_{dr} \quad (3.4)$$

Invirtiendo el signo del deslizamiento (S) a las ecuaciones (3.3) y (3.4), 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.

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 [18]:

Estator:

$$\Psi_{ds} = (X_{da} + X_s) i_{ds} + X_{da} i_{dr} \quad (3.5)$$

$$\Psi_{qs} = (X_{qa} + X_s) i_{qs} + X_{qa} i_{qr} \quad (3.6)$$

Rotor:

$$\Psi_{dr} = X_s i_{dr} + (X_{da} + X_{dr}) i_{ds} \quad (3.7)$$

$$\Psi_{qr} = X_s i_{qr} + (X_s + X_{qr}) i_{qs} \quad (3.8)$$

Potencia Activa:

$$P_s = (V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs}) \quad (3.9)$$

Par Electromecánico:

$$T_{el} = (\Psi_{dr} i_{qr} - \Psi_{qr} i_{dr}) \quad (3.10)$$

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 pares electromagnéticos, teniendo [18]:

Ecuaciones de Voltaje en el Estator:

$$-v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt} (\psi_{ds}) + \frac{\omega}{\omega_0} \psi_{qs} \quad (3.11)$$

$$-v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt} (\psi_{qs}) - \frac{\omega}{\omega_0} \psi_{ds} \quad (3.12)$$

Ecuaciones de Voltaje en el Rotor:

$$0 = R_r i_{dr} + \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt} (\psi_{dr}) + S \psi_{qr} \quad (3.13)$$

$$0 = R_r i_{qr} + \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt} (\psi_{qr}) - S \psi_{dr} \quad (3.14)$$

Flujos Electromagnéticos en el Estator:

$$\psi_{ds} = (X_{da} + X_s) i_{ds} + X_{da} i_{dr} \quad (3.15)$$

$$\psi_{qs} = (X_{qa} + X_s) i_{qs} + X_{qa} i_{qr} \quad (3.16)$$

Flujos Electromagnéticos en el Rotor:

$$\psi_{dr} = X_s i_{dr} + (X_{da} + X_{dr}) i_{ds} \quad (3.17)$$

$$\psi_{qr} = X_s i_{qr} + (X_s + X_{qr}) i_{qs} \quad (3.18)$$

Par Electromecánico:

$$T_e = (\Psi_{ds}i_{qs} - \Psi_{qs}i_{ds}) \quad (3.19)$$

Las ecuaciones de voltajes y flujos se pueden representar en forma compacta como en [18].

Si se sustituye $p = \frac{d}{dt}$ en las ecuaciones (3.11), (3.12), (3.13), (3.14), (3.15), (3.16), (3.17),

(3.18) y (3.19) y además sustituimos $\frac{\omega}{\omega_0} = 1$, se obtienen las siguientes ecuaciones:

Ecuaciones de Voltajes en el Estator:

$$-v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{p}{\omega_0} (\Psi_{ds}) + \Psi_{qs} \quad (3.11.1)$$

$$-v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{p}{\omega_0} (\Psi_{qs}) - \Psi_{ds} \quad (3.12.1)$$

Ecuaciones de Voltajes en el Rotor:

$$0 = R_r i_{dr} + \frac{p}{\omega_0} (\Psi_{dr}) + S \Psi_{qr} \quad (3.13.1)$$

$$0 = R_r i_{qr} + \frac{p}{\omega_0} (\Psi_{qr}) - S \Psi_{dr} \quad (3.14.1)$$

Las reactancias mutuas y propias del rotor y estator se pueden definir como:

$$X_m = X_{da} = X_{qa} = X_{ds} = X_{qs} \quad (3.20)$$

$$X_s = X_{da} + X_s = X_{qa} + X_s \quad (3.21)$$

$$X_r = X_{da} + X_{dr} = X_{qa} + X_{qr} \quad (3.22)$$

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

Ecuaciones de Flujos en el Estator:

$$\Psi_{ds} = X_s i_{ds} + X_m i_{dr} \quad (3.15.1)$$

$$\Psi_{qs} = X_s i_{qs} + X_m i_{qr} \quad (3.16.1)$$

Ecuaciones de Flujos en el Rotor:

$$\Psi_{dr} = X_m i_{ds} + X_r i_{dr} \quad (3.17.1)$$

$$\Psi_{qr} = X_m i_{qs} + X_r i_{qr} \quad (3.18.1)$$

3.3 MODELO EN FUNCIÓN DE CORRIENTES.

La representación matricial de la máquina de inducción para estos fines se puede 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 5° orden; para la realización de un análisis de estabilidad ante pequeños disturbios.

Ecuaciones de Voltajes en el Estator:

$$-v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{p}{\omega_0} (X_s i_{ds} + X_m i_{dr}) + (X_s i_{qs} + X_m i_{qr}) \quad (3.23)$$

$$-v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{p}{\omega_0} (X_s i_{qs} + X_m i_{qr}) - (X_s i_{ds} + X_m i_{dr}) \quad (3.24)$$

Ecuaciones de Voltajes en el Rotor:

$$0 = R_r i_{dr} + \frac{p}{\omega_0} (X_m i_{ds} + X_r i_{dr}) + S(X_m i_{qs} + X_r i_{qr}) \quad (3.25)$$

$$0 = R_r i_{qr} + \frac{p}{\omega_0} (X_m i_{qs} + X_r i_{qr}) - S(X_m i_{ds} + X_r i_{dr}) \quad (3.26)$$

Expresando a las ecuaciones (3.23), (3.24), (3.25) y (3.26), se tiene:

$$\begin{bmatrix} -v_{ds} \\ 0 \\ -v_{qs} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + \frac{p}{\omega_0} X_s & \frac{p}{\omega_0} X_m & X_s & X_m \\ \frac{p}{\omega_0} X_m & R_{dr} + \frac{p}{\omega_0} X_r & SX_m & SX_r \\ -X_s & -X_m & R_s + \frac{p}{\omega_0} X_s & \frac{p}{\omega_0} X_m \\ SX_m & -SX_r & \frac{p}{\omega_0} X_m & R_{qr} + \frac{p}{\omega_0} X_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{dr} \\ i_{qs} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

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

$$T_e = X_s i_{ds} i_{qs} + X_m i_{dr} i_{qs} - X_s i_{qs} i_{ds} - X_m i_{qr} i_{ds} \quad (3.28)$$

Desarrollando y agrupando (3.28), se tiene:

$$T_e = X_m (i_{dr} i_{qs} - i_{qr} i_{ds}) \quad (3.29)$$

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 [10,19], se tiene:

$$\frac{d}{dt}(\omega_r) = \frac{\omega_0}{2H_m} (T_m - T_e) \quad (3.30)$$

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 (3.30) y despejando T_m , se tiene:

$$T_m = \frac{\omega_r}{\omega_0} 2pH_m + T_e \quad (3.31)$$

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 (3.31), resultando:

$$T_m = p2H_m \eta_r + T_e \quad (3.32)$$

y por último se sustituye el par electromecánico (3.29) en la ecuación del par mecánico (3.32), se tiene:

$$T_m = p2H_m \eta_r + X_m i_{rd} i_q - X_m i_{rq} i_d \quad (3.33)$$

de manera que el sistema en forma matricial resultante es:

$$\begin{bmatrix} -v_{ds} \\ 0 \\ -v_{qs} \\ 0 \\ T_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + \frac{p}{\omega_0} X_s & \frac{p}{\omega_0} X_m & X_s & X_m & 0 \\ \frac{p}{\omega_0} X_m & R_{dr} + \frac{p}{\omega_0} X_r & SX_m & SX_r & 0 \\ -X_s & -X_m & R_s + \frac{p}{\omega_0} X_s & \frac{p}{\omega_0} X_m & 0 \\ SX_m & -SX_r & \frac{p}{\omega_0} X_m & R_{qr} + \frac{p}{\omega_0} X_r & 0 \\ -X_m i_{qr} & 0 & X_m i_{dr} & 0 & 2pH_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{dr} \\ i_{qs} \\ i_{qr} \\ \eta_r \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

3.3.1 Modelo en función de flujos

Para formar el modelo de 5° orden en función de flujos electromagnéticos, conservan las ecuaciones de voltaje de la maquina tanto del estator como rotor, (ecuaciones (3.11) a la (3.14), pero se despejan las ecuaciones de los flujos electromagnéticos (ecuaciones (3.15) a la (3.18)), en función de las corrientes del estator y del rotor, obteniendo las siguientes ecuaciones:

$$i_{ds} = \frac{X_r \psi_{ds} - X_m \psi_{dr}}{X_r X_s - X_m^2} \quad (3.35)$$

$$i_{qs} = \frac{X_r \psi_{qs} - X_m \psi_{qr}}{X_r X_s - X_m^2} \quad (3.36)$$

$$i_{dr} = \frac{X_m \psi_{ds} - X_s \psi_{dr}}{X_m^2 - X_s X_r} \quad (3.37)$$

$$i_{qr} = \frac{X_m \psi_{qs} - X_s \psi_{qr}}{X_m^2 - X_s X_r} \quad (3.38)$$

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

$$\begin{bmatrix} -v_{ds} \\ -v_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{R_s}{X_r X_s - X_m^2} \right) X_r + \frac{p}{\omega_0} & 1 & - \left(\frac{R_s}{X_r X_s - X_m^2} \right) X_m & 0 \\ -1 & \left(\frac{R_s}{X_r X_s - X_m^2} \right) X_r + \frac{p}{\omega_0} & 0 & - \left(\frac{R_s}{X_r X_s - X_m^2} \right) X_m \\ \left(\frac{R_r}{X_m^2 - X_s X_r} \right) X_m & 0 & - \left(\frac{R_r}{X_m^2 - X_s X_r} \right) X_s + \frac{p}{\omega_0} & s \\ 0 & \left(\frac{R_r}{X_m^2 - X_s X_r} \right) X_m & -s & - \left(\frac{R_r}{X_m^2 - X_s X_r} \right) X_s + \frac{p}{\omega_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{ds} \\ \psi_{qs} \\ \psi_{dr} \\ \psi_{qr} \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

y sustituyendo corrientes en la ecuación (3.33), el sistema matricial resultante es:

$$\begin{bmatrix} -V_{ds} \\ -V_{qs} \\ 0 \\ 0 \\ T_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{R_s}{X_r X_s - X_m^2} \right) X_r + \frac{p}{\omega_0} & 1 & - \left(\frac{R_s}{X_r X_s - X_m^2} \right) X_m & 0 & 0 \\ -1 & \left(\frac{R_s}{X_r X_s - X_m^2} \right) X_r + \frac{p}{\omega_0} & 0 & - \left(\frac{R_s}{X_r X_s - X_m^2} \right) X_m & 0 \\ \left(\frac{R_r}{X_m^2 - X_r X_s} \right) X_m & 0 & - \left(\frac{R_r}{X_m^2 - X_r X_s} \right) X_s + \frac{p}{\omega_0} & s & -\psi_{qr} \\ 0 & \left(\frac{R_r}{X_m^2 - X_r X_s} \right) X_m & -s & - \left(\frac{R_r}{X_m^2 - X_r X_s} \right) X_s + \frac{p}{\omega_0} & \psi_{dr} \\ - \left(\frac{X_m}{X_r X_s - X_m^2} \right) \psi_{qr} & \left(\frac{X_m}{X_r X_s - X_m^2} \right) \psi_{dr} & \left(\frac{X_m}{X_r X_s - X_m^2} \right) \psi_{qs} & - \left(\frac{X_m}{X_r X_s - X_m^2} \right) \psi_{ds} & 2pH_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{ds} \\ \psi_{qs} \\ \psi_{dr} \\ \psi_{qr} \\ \eta_r \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

3.4 MODELO LINEAL DEL GENERADOR DE INDUCCIÓN-BUS INFINITO.

Siendo este un sistema máquina bus infinito, presentando dos opciones de este modelo, (corrientes o flujos electromagnéticos), por lo que a continuación se muestran estos modelos, pero ya linealizados.

En las ecuaciones (3.34) y (3.40) del modelo de la máquina de inducción se les aplica la Series de Taylor, derivando parcialmente cada parámetro que se quiere analizar, obviamente en las ecuaciones del voltaje en el rotor se toma en cuenta el comportamiento del deslizamiento (ecuación (2.5)) como en [10,15] teniendo:

Ecuaciones de Voltaje:

$$-\Delta v_d = \left(R_s + \frac{p}{\omega_0} X_s \right) \Delta i_d + \left(\frac{p}{\omega_0} X_m \right) \Delta i_{rd} + (X_s) \Delta i_q + (X_m) \Delta i_{rq} \quad (3.41)$$

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

Tomando en cuenta S, y sustituyendo en las ecuaciones de los voltajes en el rotor, para luego linealizarlas, se tiene:

$$S = 1 - \eta_r \quad \Delta S = -\Delta \eta_r \quad (3.43)$$

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

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

Ecuación del Par Electromagnético:

$$\Delta T_m = p 2 H_m \Delta \eta_r + X_m i_q \Delta i_{rd} + X_m i_{rd} \Delta i_q - X_m i_d \Delta i_{rq} - X_m i_{rq} \Delta i_d \quad (3.46)$$

Reacomodando las ecuaciones (3.41), (3.42), (3.43), (3.44) y (3.45) en forma matricial tenemos:

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

Si ahora factorizamos a “p” en la ecuación (3.47), se tiene:

$$\frac{p}{\omega_0} \begin{bmatrix} X_s & X_m \\ X_m & X_r \\ & X_s & X_m \\ & X_m & X_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{ds} \\ \Delta i_{dr} \\ \Delta i_{qs} \\ \Delta i_{qr} \\ \Delta \eta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & & & & \\ & R_r & SX_m & SX_r & \\ -X_s & -X_m & R_s & & \\ -SX_m & -SX_r & & R_r & \\ -X_{m\ i\ qr} & X_{m\ i\ qs} & X_{m\ i\ dr} & -X_{m\ i\ ds} & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{ds} \\ \Delta i_{dr} \\ \Delta i_{qs} \\ \Delta i_{qr} \\ \Delta \eta_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\Delta V_{ds} \\ 0 \\ -\Delta V_{qs} \\ 0 \\ \Delta T_m \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

Si descomponemos la ecuación (3.48), se tiene:

$$p \begin{bmatrix} \Delta i \\ \Delta \eta_r \end{bmatrix} = \omega_0 \begin{bmatrix} -X_{mot}^{-1} R_{mot} & -X_{mot}^{-1} \Delta V_1 \\ \frac{1}{-2H\omega_0} \Delta V_2 & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i \\ \Delta \eta_r \end{bmatrix} + \omega_0 \begin{bmatrix} X_{mot}^{-1} & \\ & \frac{1}{2H\omega_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta T_m \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

donde:

$$X_{mot} = \begin{bmatrix} X_s & X_m & & \\ X_m & X_r & & \\ & & X_s & X_m \\ & & X_m & X_r \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

$$R_{mot} = \begin{bmatrix} R_s & & & \\ & R_r & SX_m & SX_r \\ -X_s & -X_m & R_s & \\ -SX_m & -SX_r & & R_r \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

siendo:

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

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

$$\Delta V^T = [-\Delta V_d \quad 0 \quad -\Delta V_q \quad \Delta T_m] \quad (3.52)$$

$$\Delta i^T = [\Delta i_d \quad \Delta i_{rd} \quad \Delta i_q \quad \Delta i_{rq} \quad \Delta \eta_r] \quad (3.53)$$

$$\Delta V_1^T = [0 \quad -(X_m i_q + X_r i_{rq}) \quad 0 \quad (X_m i_d + X_r i_{rd})] \quad (3.54)$$

$$\Delta V_2 = [-X_m i_{rq} \quad X_m i_q \quad X_m i_d \quad -X_m i_d] \quad (3.55)$$

pero,

$$\Delta V = \begin{bmatrix} \Delta V_d \\ 0 \\ \Delta V_q \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

Ahora se hace lo mismo para el modelo de 5° orden en función de flujos (ecuación (3.40)), teniendo:

$$\frac{p}{\omega_0} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2H_m \omega_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \psi_{ds} \\ \Delta \psi_{qs} \\ \Delta \psi_{dr} \\ \Delta \psi_{qr} \\ \Delta \eta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \left(\frac{R_s}{X_r X_s - X_m^2}\right) X_r & 1 & -\left(\frac{R_s}{X_r X_s - X_m^2}\right) X_m & 0 & 0 \\ -1 & \left(\frac{R_s}{X_r X_s - X_m^2}\right) X_r & 0 & -\left(\frac{R_s}{X_r X_s - X_m^2}\right) X_m & 0 \\ \left(\frac{R_r}{X_m^2 - X_r X_s}\right) X_m & 0 & -\left(\frac{R_r}{X_m^2 - X_r X_s}\right) X_s & S & -\psi_{qr} \\ 0 & \left(\frac{R_r}{X_m^2 - X_r X_s}\right) X_m & -S & -\left(\frac{R_r}{X_m^2 - X_r X_s}\right) X_s & \psi_{dr} \\ -\left(\frac{X_m}{X_r X_s - X_m^2}\right) \psi_{qr} & \left(\frac{X_m}{X_r X_s - X_m^2}\right) \psi_{dr} & \left(\frac{X_m}{X_r X_s - X_m^2}\right) \psi_{qs} & -\left(\frac{X_m}{X_r X_s - X_m^2}\right) \psi_{ds} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \psi_{ds} \\ \Delta \psi_{qs} \\ \Delta \psi_{dr} \\ \Delta \psi_{qr} \\ \Delta \eta_r \end{bmatrix} \quad (3.57)$$

$$p \begin{bmatrix} \Delta \psi \\ \Delta \eta_r \end{bmatrix} = \omega_0 \begin{bmatrix} -X_{mot}^{-1} R_{mot} & -X_{mot}^{-1} \Delta i_1 \\ \frac{1}{-2H\omega_0} \Delta i_2 & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \psi \\ \Delta \eta_r \end{bmatrix} + \omega_0 \begin{bmatrix} X_{mot}^{-1} & \\ & \frac{1}{2H\omega_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta T_m \end{bmatrix} \quad (3.58)$$

CAPÍTULO IV

ESTABILIDAD ANTE PEQUEÑOS DISTURBIOS

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan las definiciones y clasificaciones de la estabilidad en los sistemas eléctricos de potencia, además de conocer los criterios de estabilidad ante pequeños disturbios cuando aparecen en ciertos fenómenos, a través de las características que conforman el tamaño del disturbio y el periodo de tiempo al cual está enfocado este tipo de estabilidad.

Históricamente, los fenómenos de inestabilidad transitoria han sido el problema de estabilidad dominante en la mayoría de los sistemas eléctricos de potencia, ya que este campo es similar a la estabilidad de cualquier sistema dinámico, y tiene fundamentos matemáticos importantes [5,11,15].

4.2 ESTABILIDAD Y CLASIFICACIÓN DE LA ESTABILIDAD DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA

La estabilidad es una condición de equilibrio entre fuerzas opuestas. Dependiendo de la topología de red, el estado de funcionamiento del sistema y la forma de la perturbación, habrá diferentes conjuntos de fuerzas opuestas que pueden experimentar un desequilibrio que lleva a las diferentes formas de inestabilidad [5,13,14,15]

Debido a la alta dimensionalidad y complejidad de los problemas de estabilidad se deben de hacer simplificaciones para el análisis de los tipos específicos de problemas usando un grado de detalle apropiado de la representación del sistema y las técnicas analíticas apropiadas. Esto facilita la clasificación de la estabilidad en categorías adecuadas para un análisis significativo y la resolución práctica de problemas de energía a la estabilidad del sistema.

Los criterios a considerar para cada categoría de estabilidad son: de acuerdo a la naturaleza física del fenómeno, en el que la inestabilidad se puede observar; el segundo criterio a considerar es el tamaño de la perturbación, lo que influye en el método de cálculo y la predicción de la estabilidad y por último el periodo de tiempo que puede ser de corto o largo plazo, según los dos primeros criterios.

A continuación se muestra en la siguiente figura 4.1 el problema de estabilidad y su clasificación [5,14,16].

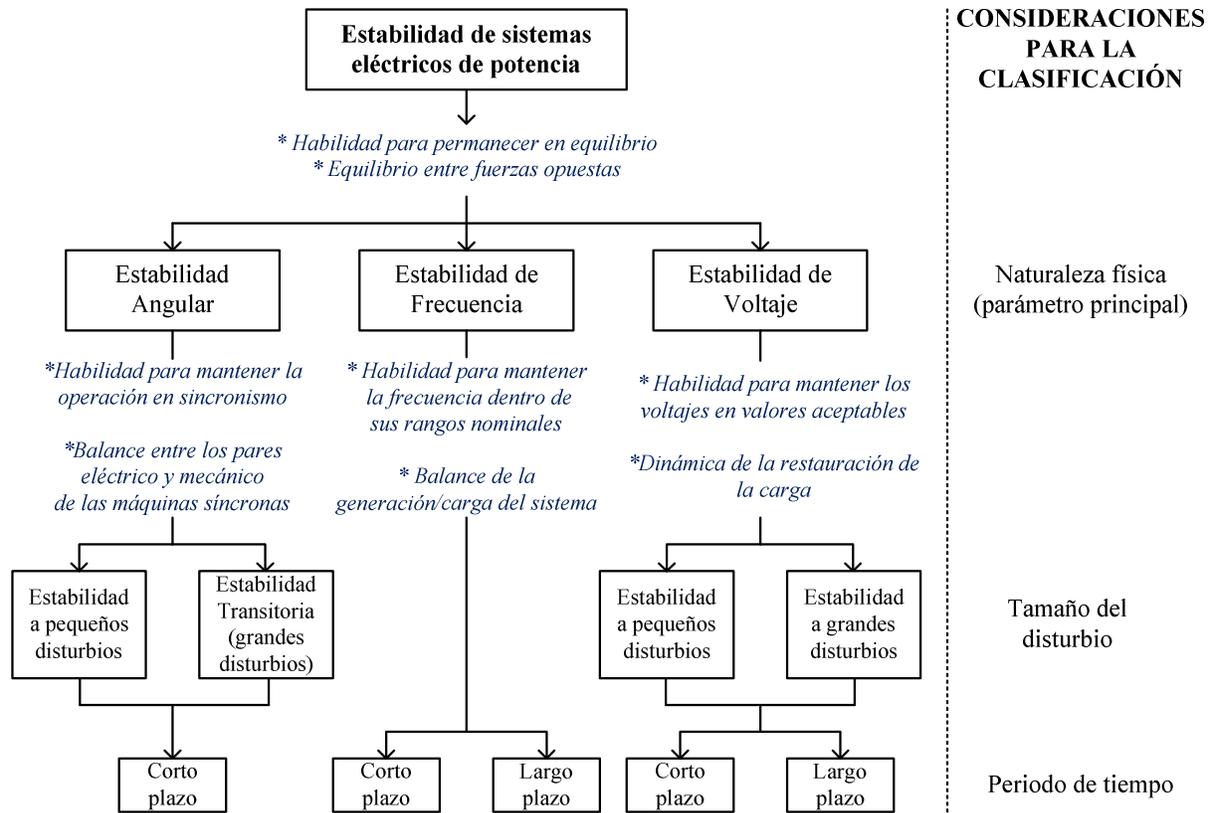


Figura 4.1 Clasificación de los problemas de inestabilidad en los Sistemas Eléctricos de Potencia (Adaptado de [13][16]).

4.3 CLASIFICACIÓN DE ESTABILIDAD ANGULAR.

La estabilidad angular del sistema de potencia puede clasificarse en dos grandes categorías: estabilidad ante grandes disturbios y estabilidad ante pequeños disturbios.

El método de uso más generalizado para el análisis de estabilidad ante grandes disturbios es el método de simulación en el dominio del tiempo que resulta adecuado para las dos categorías. Sin embargo un método cada vez más conocido y estudiado, es el método de análisis modal en el dominio de la frecuencia, el cual es adecuado únicamente para estudios de estabilidad ante pequeños disturbios o de pequeña señal. Se le conoce también ampliamente como “*análisis modal o análisis de valores propios*” y junto con el método de respuesta de frecuencia

conforman el llamado análisis modal [23], a continuación se mencionaran sus ventajas principales:

- La forma sistemática como se obtiene la información revela las características del fenómeno dinámico inherentes al sistema de potencia.
- Los modos débilmente amortiguados e inestables son seleccionados y pueden analizarse en detalle, lo que permite identificar sin ambigüedad el patrón de oscilación.
- No hay necesidad de aplicar disturbios, generalmente para cada condición del flujo de carga con un solo cálculo modal es suficiente.
- Se proporcionan índices para ubicar medidas amortiguadoras atenuantes tales como dispositivos estabilizadores de potencia.

Básicamente el uso de las técnicas de análisis lineal proporciona información de manera cuantitativa a nivel de sistema sobre la naturaleza de los modos dominantes, así determinar la fuente y la naturaleza de las oscilaciones y el desarrollo de posibles medidas correctivas para poder proponer dispositivos en el sistema para el desarrollo de algunas medidas correctivas en situaciones de inestabilidad. [5,11,16,24].

4.4 ESTABILIDAD ANTE PEQUEÑOS DISTURBIOS.

Es la habilidad de los sistemas de potencia para mantener el sincronismo durante pequeños cambios de las condiciones de operación básicamente relacionados con variaciones de cargas y generación. La estabilidad a pequeños disturbios depende del estado de operación inicial del sistema ya que en este tipo de análisis son consideradas únicamente pequeñas perturbaciones.

Ahora las pequeñas perturbaciones, son aquellas en las que es posible linealizar el sistema de estudio de ecuaciones algebraicas y diferenciales que permiten simular el comportamiento de este, más adelante se hablará en detalle sobre este tema.

El rango de tiempo de interés en estudios de estabilidad a pequeños disturbios está en el orden de 10 a 20 segundos aproximadamente después de un disturbio.

4.5 ANALISIS MODAL

REPRESENTACIÓN DE ESPACIO

La sustentación teórica empleada en este estudio se basa en conceptos de espacio de estados.

El estado de un sistema que representa la mínima cantidad de información necesaria acerca de éste en cualquier instante de tiempo, para que su futuro comportamiento pueda ser determinado sin referirse a su estado anterior.

Se definen las variables de estado del sistema, como el conjunto más pequeño de variables que determinan y describen totalmente el comportamiento del sistema en cualquier instante de tiempo, estas variables pueden ser cantidades físicas medibles, por ejemplo ángulo, velocidad, tensión ó pueden ser variables matemáticas abstractas no medibles u observables [12,13,24].

Las técnicas de análisis modal son métodos que consisten en la determinación de los eigenvalores (valores propios) y eigenvectores (vectores propios) a partir de la aplicación de un método lineal del sistema. Esta respuesta es obtenida calculando los eigenvalores de la matriz característica [A]. Sabiendo que la estabilidad se pierde si cualquiera de los eigenvalores tiene una parte real positiva. Para analizar el comportamiento dinámico de un sistema, este se puede describir como un conjunto de n ecuaciones diferenciales de primero o segundo orden que se puede representar como un sistema no lineal de la siguiente manera [5,11,24]:

$$\dot{x}_i = \frac{1}{a^n} = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, u_r; t) \quad (4.1)$$

Donde:

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

n = es el orden del sistema

r = es el número de entradas

Esto se puede escribir de la siguiente manera utilizando notación vectorial de la matriz:

$$\dot{x}_i = f(x, u, t) \quad (4.2)$$

Donde:

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

El vector columna “ \mathbf{x} ” es referido como un *vector de estados*, y x_i son las *entradas de las variables de estado*. El vector columna “ \mathbf{u} ” es el *vector de entradas para el sistema*. Estas son las señales externas que influyen en el desarrollo del sistema. El *tiempo* es denotado por “ t ”, y la *derivada de la variable de estados x con respecto al tiempo* es “ \dot{x} ”. Si las derivadas de las variables de estados no son funciones explícitas del tiempo, el sistema es considerado como *autónomo*, para este caso la ecuación (4.2), es reducida de tal manera que se puede representar como:

$$\dot{x}_i = f(x, u) \quad (4.3)$$

Las variables de salida pueden ser observadas en el sistema expresado en términos de las variables de estado y de las variables de entrada como:

$$y = g(x, u) \quad (4.4)$$

donde:

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

El vector columna “ \mathbf{y} ” es el vector de salidas, y “ \mathbf{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 [5,11,25].

4.6 LINEALIZACIÓN.

La estabilidad de un sistema es completamente independiente de la entrada y el estado de un sistema estable con entrada cero, ya que siempre regresa al origen del espacio de estados, independientemente del estado inicial finito. Para linealizar un sistema se hace suponer que \dot{x}_0 es un vector de estado inicial y \dot{u}_0 un vector de entradas correspondiente a un punto de equilibrio cerca del cual el comportamiento del sistema cerca de una pequeña señal será investigado. Pero como \dot{x}_0 y \dot{u}_0 satisface a la ecuación (4.2), se tiene [5,11,24,38]:

$$\dot{x}_0 = f(x_0, u_0) = 0 \quad (4.5)$$

Perturbando el sistema de la ecuación anterior, tenemos:

$$x = x_0 + \Delta x \quad (4.6)$$

$$u = u_0 + \Delta u \quad (4.7)$$

Donde:

Δ = denota un pequeño disturbio.

Ahora como las perturbaciones al sistema son pequeñas, las funciones no lineales como $f(x, u)$ se pueden expresar en términos de la expansión de las Series de Taylor. Si se desprecian los términos de orden mayor, la aproximación de primer orden al modelo no lineal del comportamiento dinámico del sistema eléctrico de potencia, se puede expresar de la siguiente manera [5,11,26]:

$$\dot{x} = \dot{x}_{i0} + \Delta \dot{x}_i = f_i[(x_0 + \Delta x), (u_0 + \Delta u)] \quad (4.8)$$

$$\dot{x}_i = f_i(x_0, u_0) + \frac{\partial f_i}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial f_i}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial u_r} \Delta u_r \quad (4.9)$$

De tal manera que la expresión lineal del sistema es:

$$\Delta \dot{x} = A\Delta x + B\Delta u \quad (4.10)$$

donde:

Δx = Vector de estados de orden n .

A = Matriz Característica del Sistema de orden $n \times n$.

B = Matriz de Estradas del Sistema de orden $n \times n$.

Δu = Vector de control de entradas de orden n .

La matriz $[A]$ contiene información del comportamiento del mismo durante una pequeña perturbación.

4.7 RESPUESTA LIBRE DEL SISTEMA

La respuesta natural del sistema básicamente representa la respuesta a las condiciones iniciales cuando no existe una fuerza externa de control, en este caso cuando el vector $u = 0$ de tal manera que la podemos expresar como la ecuación (4.10). Ya que la solución \dot{x} , a la ecuación (4.10), es:

$$\Delta \dot{x} = A\Delta x \quad (4.11)$$

Pero considerando el caso multivariable para el valor de A tenemos que la solución natural se puede expresar como:

$$\dot{x}(t) = e^{[A]t} \quad (4.12)$$

donde:

$$e^{[A]t} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{[A]^k t^k}{k!} \quad (4.13)$$

Representando la ecuación (4.13), en forma de un conjunto de ecuaciones lineales con coeficientes constantes se tiene:

$$\Delta x(t) = \sum_{i=1}^n \phi_i c_i e^{\lambda_i t} \quad (4.14)$$

donde $c_i =$ Indica el producto escalar $\Psi_i \Delta x(0)$

Por lo tanto, el valor de la respuesta natural resultante del sistema de estudio sería:

$$\Delta x_i(t) = \phi_{i1} c_1 e^{\lambda_1 t} + \phi_{i2} c_2 e^{\lambda_2 t} + \dots + \phi_{in} c_n e^{\lambda_n t} \quad (4.15)$$

4.8 OBTENCIÓN DE VALORES Y VECTORES PROPIOS (EIGENVALORES Y EIGENVECTORES).

Se dice que un eigenvalor se define como un valor dado por un parámetro escalar λ para un vector ϕ diferente de cero [5,11]:

$$A\phi = \lambda\phi \quad (4.16)$$

Donde:

$A =$ Es una matriz real para sistemas físicos de $n \times n$.

$\phi =$ Vector de $n \times 1$.

Para el cálculo de los eigenvalores la ecuación (4.16), se puede expresar como:

$$(A - \lambda I)\phi = 0 \quad (4.17)$$

Donde I es la matriz identidad de la ecuación (4.16) y para una solución no trivial la expresión es:

$$\det(A - \lambda I) = 0 \quad (4.18)$$

Cabe señalar que los eigenvalores para cualquier sistema pueden ser reales o complejos, en estos últimos, se pueden encontrar en pares conjugados; además si el valor de los eigenvalores de una matriz real son complejos, el valor de los eigenvectores también lo será.

Así mismo las soluciones de $\lambda = \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, son los eigenvalores i -ésimos de la matriz $[A]$.

Para cada eigenvalor λ_i el vector ϕ_i diferente de cero que satisfaga la ecuación (4.18), le corresponde un eigenvalor de λ_i . Se denomina *eigenvector* de la matriz $[A]$, también denominado *eigenvector derecho* del sistema:

$$A\phi_i = \lambda_i\phi_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.19)$$

De donde el eigenvector derecho tiene la siguiente forma:

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

Similarmente, para los *eigenvectores izquierdos* del sistema, se definen como:

$$\psi_i A_i = \lambda_i \psi_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.20)$$

Tanto los eigenvectores izquierdos y derechos que corresponden a diferentes eigenvalores son ortogonales. Si λ_i es diferente a λ_j . Esto es, si ϕ_i es un eigenvector de la matriz $[A]$, correspondiente al eigenvalor λ_i y ψ_j es un eigenvector de la matriz $[A]^T$ correspondiente a un eigenvalor λ_j , entonces $\phi_i \psi_j = 0$ para $\lambda_i \neq \lambda_j$, aplicando el concepto de producto escalar (que no es más que la suma del producto de dos vectores) [5].

Para un valor propio existe por lo menos un vector diferente de cero que satisface la ecuación (4.16), donde $[\phi]$, es llamado vector propio derecho de este valor propio λ . Para un valor propio existe por lo menos un vector diferente de cero que satisface la ecuación:

$$A^T \psi = \lambda \psi \quad (4.21)$$

El comportamiento de los eigenvalores para determinar la estabilidad de un sistema es el siguiente:

- Un eigenvalor real corresponde a un modo no oscilatorio. Un eigenvalor real negativo representa un modo decayendo. En cambio, un eigenvalor real positivo representa una inestabilidad periódica.
- Los eigenvalores complejos se presentan en pares conjugados y cada par corresponde a un modo oscilatorio.

Esto es mostrado en la figura 4.2.

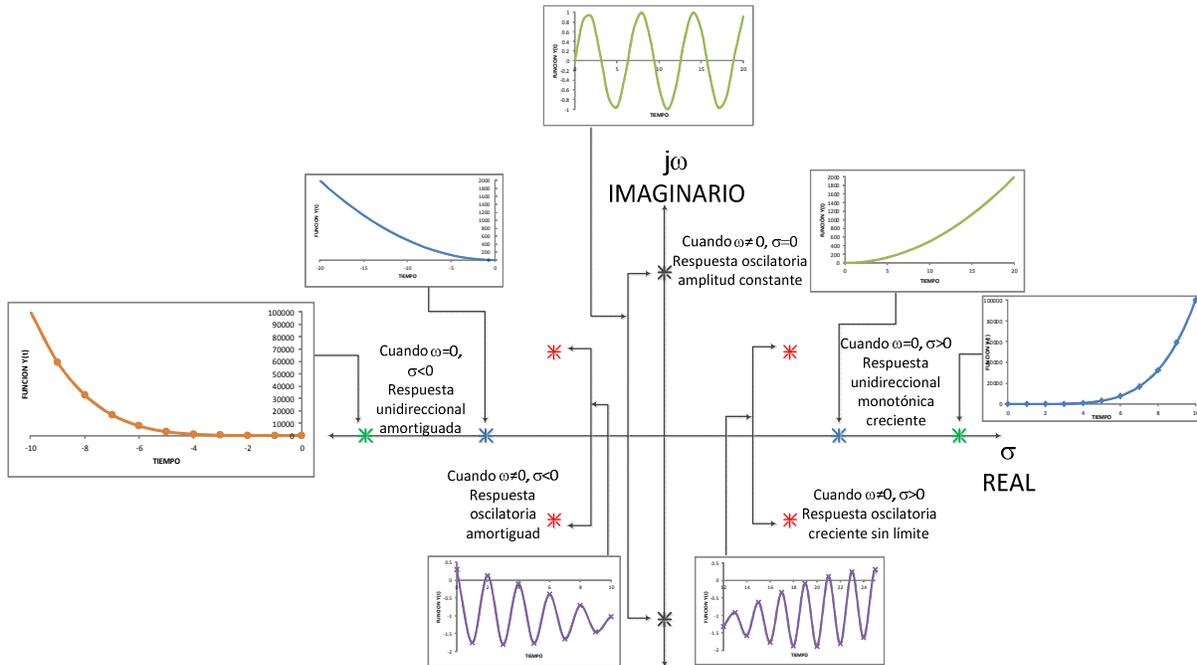


Figura 4.2 Valores Propios y su respuesta asociada, en el tiempo y plano complejo en los Sistemas Eléctricos de Potencia [13].

La componente real de eigenvalor da el amortiguamiento (σ) y la componente imaginaria, da la frecuencia natural o de oscilación (ω). La parte real negativa representa una oscilación amortiguada mientras que la parte real positiva representa una oscilación de amplitud creciente.

De lo anterior podemos decir que la expresión de la respuesta libre depende de tres factores principalmente que son:

- De los eigenvalores que determinan la razón de aumento o decremento de la respuesta.
- De los eigenvectores que determinan la forma de la respuesta.
- De las condiciones iniciales que determinan el grado en que cada modo participa en la respuesta libre del sistema.

4.9 INDICES DE AMORTIGUAMIENTO

El amortiguamiento de los modos puede establecerse mediante tres índices:

- **Amortiguamiento absoluto** (σ_k). Corresponde a la parte real del modo.
- **Constante de tiempo de decaimiento de la amplitud** (τ_σ). Es el periodo de tiempo en el que la magnitud del modo asociado decae un 37% de su valor inicial.

$$\tau_\sigma = -\frac{1}{\sigma} [\text{segundo}] \quad (4.22)$$

- **Razón de amortiguamiento** (ξ). Se le conoce también como amortiguamiento relativo, está dado como:

$$\xi = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \quad (4.23)$$

Geoméricamente la razón de amortiguamiento representa la inclinación de la línea que asocia al modo con el origen del plano s , así $\xi = \cos \alpha$.

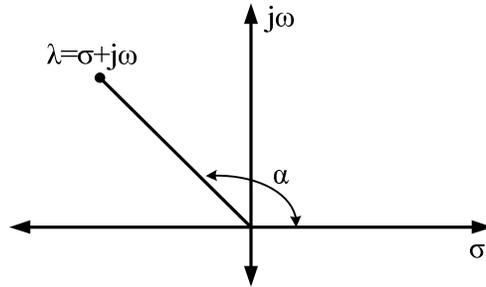


Figura 4.3 Representación geométrica de la razón de amortiguamiento.

4.10 MODOS DEL SISTEMA

Los valores propios son llamados también modos del sistema. El primero es un término matemático mientras que modo es más un término de ingeniería.

$$\lambda_k = \sigma_k \pm j\omega_k \quad (4.24)$$

$$\lambda_k = \sigma_k \quad (4.25)$$

Donde:

$\sigma(1/s)$ = Es el amortiguamiento.

$\omega(1/s)$ = Es la frecuencia angular en radianes/ segundo.

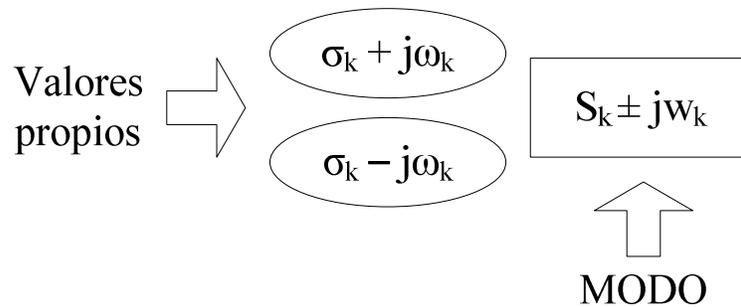


Figura 4.4 Representación de valores propios y modos del sistema dinámico [24].

Generalmente la estabilidad ante pequeños disturbios es básicamente un problema de oscilaciones debidas a pares o torques de amortiguamiento insuficientes, los modos de oscilación de interés para estabilidad de pequeña señal de un sistema de potencia están en el rango de 0.1 a 3.0 Hz y corresponden a modos electromecánicos [25].

4.11 CICLO DE FORMACIÓN DE LAS OSCILACIONES

En ocasiones repentinamente la potencia eléctrica de salida de un generador disminuye creando un desbalance entre su potencia mecánica de entrada y su potencia eléctrica de salida. Este desbalance produce que una potencia de aceleración se almacene en la masa rodante (rotor y turbina), incrementando la velocidad de la unidad por encima de la velocidad síncrona (60 Hz). Esta nueva velocidad en la que se ubica el generador por encima de la velocidad sincrónica hace que el ángulo entre el generador y el sistema tienda a incrementarse lo que causa un incremento de la potencia eléctrica de salida del generador, haciendo que se inicie nuevamente un ciclo en el que el aumento de potencia eléctrica reduzca la potencia de aceleración forzando a otro cambio en el ángulo con lo que una oscilación a empezado [24,25].

A continuación se describe de manera breve los tipos de oscilaciones que se presentan en el sistema; estos pueden ser de tres tipos:

- *Oscilaciones normales o positivamente amortiguadas*: Este tipo de oscilaciones ocurren debido a eventos de rutina en los sistemas de potencia, como por ejemplo: cambios de carga, salidas y maniobras de generadores que pueden causar oscilaciones en el flujo de potencia, tensión, corriente y frecuencia, aquí el sistema no tiene problemas para reducir la amplitud de este tipo de oscilaciones.
- *Oscilaciones sostenidas o no amortiguadas*: Estas oscilaciones se autosustentan y no desaparecen sin una acción correctiva. Las oscilaciones sostenidas no son crecientes pero tampoco tienden a reducirse. Este tipo de oscilaciones son dañinas en el sistema si tienen una amplitud suficientemente grande.

- *Oscilaciones amortiguadas negativamente:* Si una oscilación aparece y crece gradualmente en magnitud, es amortiguada negativa. Este tipo de oscilación puede aparecer como oscilación normal o sostenida y puede crecer en tamaño hasta alcanzar una amplitud que los sistemas de potencia no pueden resistir por mucho tiempo.

4.12 MATRICES MODALES.

Si representamos en forma compacta a los eigenvectores ϕ , y Ψ , podemos tener expresada las propiedades de la matriz:

$$\phi = [\phi_1 \quad \phi_2 \quad \cdots \quad \phi_n] \quad (4.26)$$

$$\Psi = [\psi_1^T \quad \psi_2^T \quad \cdots \quad \psi_n^T] \quad (4.27)$$

Dando como resultado las expresiones modales de los eigenvectores derechos e izquierdos de la matriz [A].

Los vectores propios derecho e izquierdo son ortogonales entre sí esto es:

$$\psi_i^T \phi_i = \phi_i^T \psi_i \neq 0 \quad (4.28)$$

$$\psi_i^T \phi_i = \phi_i^T \psi_j = 0 \quad \text{para } i \neq j \quad (4.29)$$

Generalmente los vectores propios izquierdos y derechos de un valor propio son normalizados:

$$\psi_i^T \phi_i = \phi_i^T \psi_i = 1 \quad (4.30)$$

O bien para un sistema de orden n , la matriz de participación sería:

$$P = \begin{bmatrix} p_{1i} \\ p_{2i} \\ \vdots \\ p_{ni} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{12} & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{1i} \Psi_{i1} \\ \phi_{2i} \Psi_{i2} \\ \vdots \\ \phi_{ni} \Psi_{in} \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

Modos de Oscilación relacionados con estabilidad

A continuación se explicara brevemente los modos de oscilación que se presentan en problemas de estabilidad de pequeña señal en sistemas eléctricos de potencia:

- Modos locales.
- Modos entre áreas.
- Modos de control.
- Modos torsionales.

Estabilidad Local.

Los problemas de estabilidad local agrupan de los modos anteriormente planteados a:

- **Modo local de oscilación o modo máquina-sistema:** Son las oscilaciones que se presentan entre un conjunto de unidades generadoras conectadas en forma remota, a un sistema de potencia relativamente más grande, a través de líneas de transmisión débiles. El término local se refiere a que las oscilaciones están asociadas con una planta de generación o una pequeña parte del sistema. El rango de frecuencia asociado a modos de oscilación local es entre 0.8 a 2 Hz.
- **Modo de oscilación entre máquinas:** En este modo se produce oscilaciones entre los rotores de generadores cercanos en un área, estos modos están relacionados con las oscilaciones de unidades generadoras de una parte del sistema con respecto a unidades generadoras en otras áreas, con gran cantidad de generadores participando en la oscilación.

Usualmente estas oscilaciones de baja frecuencia son debidas a la existencia de enlaces débiles entre dos áreas interconectadas desde el punto de vista de la dinámica del sistema y tienen bajo amortiguamiento. El rango de frecuencia asociado a estas oscilaciones es de 0.1 a 0.8 Hz.

- **Modos interárea:** Estos modos se encuentran generalmente entre las frecuencias extremas de los modos locales e interárea, en estos modos la oscilación se presentan entre un bloque de generación, oscilando contra otro bloque del sistema. Tienen un comportamiento similar al modo local, por lo que serán tratados de esta forma.

- **Modos de control.-** Se encuentran asociados con los controles de unidades de generación. Excitaciones mal sintonizadas, gobernadores de velocidad, convertidores y compensadores estáticos son la causa usual de que este tipo de modos se presenten como inestables.

- **Modos torsionales.-** Estos modos se presentan cuando los controles de excitación, gobernador de velocidad, controles HVDC, compensadores capacitivos serie, interactúan con la dinámica del sistema eje-turbina-generator.

Todos estos tipos de modos de oscilación se encuentran en el rango de frecuencia de 0.7 Hz a 2 Hz [24,25].

Estabilidad Global

Los problemas de estabilidad global son causados por la interacción de un grupo de generadores en un área en contra de otro grupo de generadores de otra área por lo que estas oscilaciones son llamadas modos de oscilaciones entre áreas. En grandes sistemas interconectados se presentan dos formas distintas de oscilaciones entre áreas y son:

- **Modos de muy baja frecuencia (0.1Hz a 0.3Hz):** Implican a todo el sistema dividido en dos partes, con los generadores de una parte oscilando en contra de los generadores de la otra parte.

- **Modos de frecuencia mayor** (0.4Hz a 0.7Hz): Implican a subgrupos de generadores oscilando uno en contra del otro.

Y en cuanto al origen de los diferentes modos de oscilación se tiene que:

- Los modos entre área y los modos locales se presentan por problemas electromecánicos.
- Los modos de control se presentan por problemas de inestabilidad de tensión.
- Los modos torsionales se presentan por problemas de resonancia subsíncrona.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DEL ESTUDIO DE ESTABILIDAD ANTE PEQUEÑOS DISTURBIOS CON AEROGENERADORES

5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se muestran las simulaciones realizadas con un programa desarrollado en FORTRAN *estabilidad.for* y simulaciones en MATLAB para el estudio de la estabilidad ante pequeños disturbios, en este caso referido a los aerogeneradores de inducción marca Vestas modelo V-27 225/50kW-480V-60Hz de 6 y 8 polos observando los valores propios, vectores propios y factores de participación.

Esto se realizó variando el deslizamiento en el generador de inducción simulando variaciones de viento en el modelo para el estudio de estabilidad ante pequeños disturbios.

5.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE PRUEBA

El sistema de prueba que se utilizó en este trabajo terminal es un sistema maquina bus infinito mostrado en la figura 5.1.

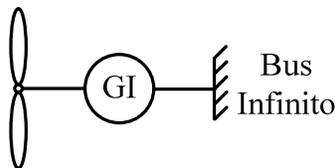


Figura 5.1 Sistema de prueba.

5.3 SISTEMA DE PRUEBA LA VENTA I

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 y están colocadas sobre torres tubulares de 30 metros de altura. En la figura 5.2 se muestra la distribución real de estos aerogeneradores. 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 %.

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.

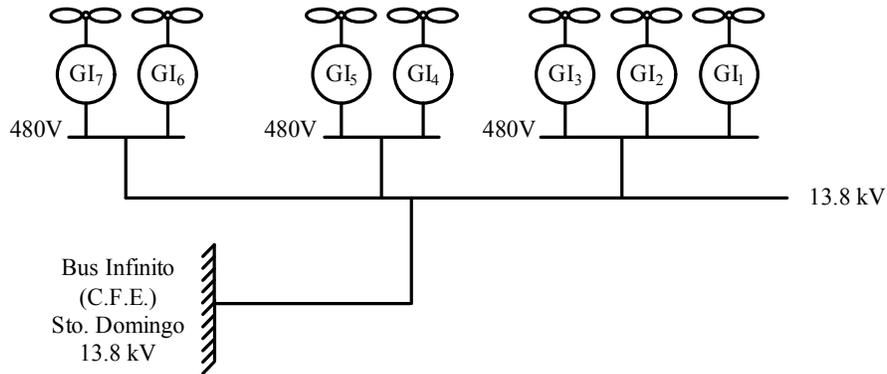


Figura 5.2 Sistema de Generación "La Venta", Oaxaca.

El sistema de la Central Eoloeléctrica "La Venta", Oaxaca, forma parte del SIN (Sistema Interconectado Nacional) en la zona de Tehuantepec, el cual se muestra en la figura 5.2, y está formado por siete unidades aerogeneradoras en donde cada unidad cuenta con dos modos de operación: uno para operar a bajos niveles de velocidad de viento (generador de 8 polos) y el otro para operar a grandes niveles de velocidad de viento (generador de 6 polos); estas unidades se encuentran conectadas en el nodo de Santo Domingo con un valor de alimentación de voltaje de 13.8 kV, el cual es representado por un Sistema Máquina Bus Infinito (SMBI), ver figura 5.3a y 5.3b [6].



Figura 5.3a Central eoloeléctrica de La Venta, Oaxaca, (CFE, 2004). [11].



Figura 5.3b Central eoloeléctrica de La Venta, Oaxaca, (CFE, 2011).

5.4 PARÁMETROS DEL AEROGENERADOR DE INDUCCIÓN MARCA VESTAS MODELO V-27 225/50kW-480V-60Hz.

A continuación se muestran los parámetros del generador con los cuales se trabajó en el programa *estabilidad.for* para el estudio de la estabilidad ante pequeños disturbios:

Tabla 5.1 Parámetros del aerogenerador de inducción marca Vestas modelo V-27 225/50kW-480V-60Hz en unidades reales [11,27].

Generador de Inducción 6 polos Vestas V-27 225kW-480V-60Hz	Generador de Inducción 8 polos Vestas V-27 50kW-480V-60Hz
HP = 302	HP = 67
$I_{nom} = 335A$	$I_{nom} = 85A$
$N_{sinc} = 1200rpm$	$N_{sinc} = 900 rpm$
$R_s = 0.018\Omega$	$R_s = 0.367\Omega$
$R_r = 0.019\Omega$	$R_r = 0.072\Omega$
$X_s = 0.22\Omega$	$X_s = 0.45\Omega$
$X_r = 0.414\Omega$	$X_r = 2.23\Omega$
$X_M = 5.8\Omega$	$X_M = 18.1\Omega$
$J = 7.4 Kg\cdot m^2$	$J = 7.4 Kg\cdot m^2$

5.5 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD ANTE PEQUEÑOS DISTURBIOS DEL SISTEMA DE PRUEBA

En este trabajo se hizo un análisis de estabilidad ante pequeños disturbios en los generadores de inducción, para llevar a cabo este análisis, fue necesario utilizar un programa *estabilidad.for* en el dominio de la frecuencia para estabilidad ante pequeños disturbios.

5.6 COMPORTAMIENTO DEL DESLIZAMIENTO DE LOS GENERADORES DE INDUCCIÓN QUE SE ENCUENTRAN EN LA VENTA I.

En la figura 5.4, se observan las curvas par-velocidad para el generador de inducción de 6 y 8 polos, en tres condiciones de operación; uno de los casos es estable (E), la segunda condición corresponde otro inestable (I) y la tercera representa un estado crítico.

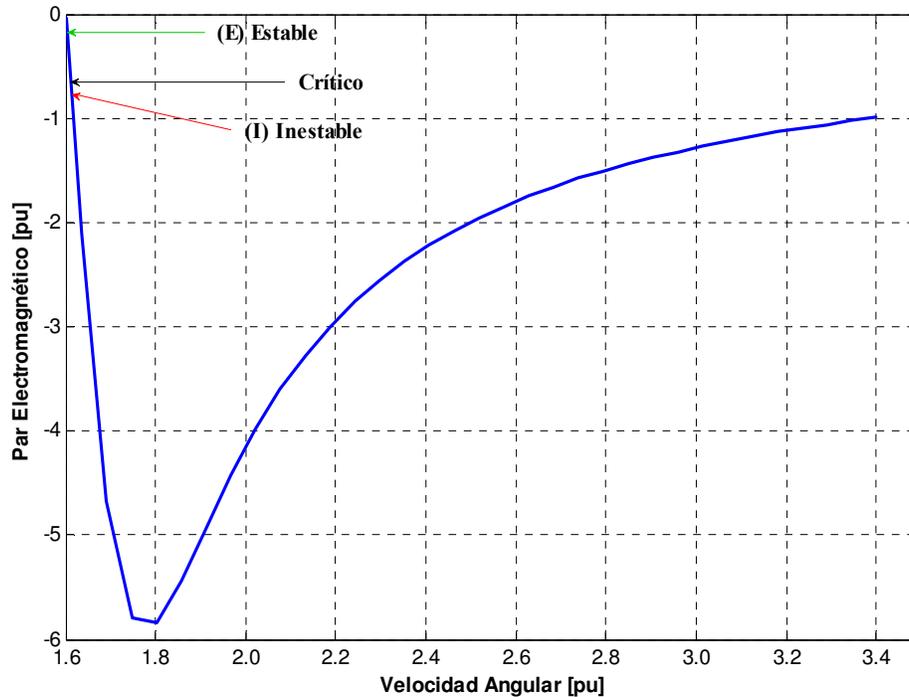


Figura 5.4 Curva par – velocidad para el Generador de Inducción Vestas modelo V-27 225/50kW-480V-60Hz.

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; los valores correspondientes del deslizamiento para cada condición de operación se pueden observar en la tabla 5.2 siguiente:

Tabla 5.2 Valores de deslizamiento para los tipos de estado de operación de los generadores de 6 y 8 polos.

Generador de Inducción de 6 polos		Generador de Inducción de 8 polos	
Estado de operación	Deslizamiento	Estado de operación	Deslizamiento
Estable	-0.002667	Estable	-0.005162
Inestable	-0.030967	Inestable	-0.026692
Pto. Crítico	-0.030320	Pto. Crítico	-0.026610

5.7 MODOS DE OSCILACIÓN DEL GENERADOR DE INDUCCIÓN

5.7.1 MODOS DE OSCILACION DEL GENERADOR V-27 50kW – 480V- 60Hz

A continuación se presentan los valores del comportamiento del generador de 8 polos en modelo de 5° orden:

Considerando un valor de deslizamiento $S=-0.005162$, donde el generador se encuentra trabajando en estado de condición normal (caso estable), se obtuvieron los eigenvalores, amortiguamiento y frecuencia que se muestran en la tabla 5.3:

Tabla 5.3 Caso estable del comportamiento de los eigenvalores del generador de 8 polos.

Eigenvalores* del Generador de 8 polos				
Modos	Eigenvalores	Modelo 5° orden		Variables
		$S=-0.005162$		
		Amortiguamiento	Frecuencia	
1 , 2	$-57.23683 \pm 375.7475i$	0.154126562	± 59.80207198	i_{dr}, i_{qr}
3 , 4	$-4.852478 \pm 38.45736i$	0.1251855366	± 6.120678942	i_{ds}, i_{qs}
5	-9.801091	-1	0	η_r

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

Para un valor de deslizamiento $S=-0.026692$ donde el generador presenta un comportamiento fuera de operación (caso inestable), se obtuvieron los eigenvalores, amortiguamiento y frecuencia mostrados en la tabla 5.4:

Tabla 5.4 Caso inestable del comportamiento de los eigenvalores del generador de 8 polos.

Eigenvalores* del Generador de 8 polos				
Modos	Eigenvalores	Modelo 5° orden		Variables
		$S=-0.00516$		
		Amortiguamiento	Frecuencia	
1 , 2	$-57.01706 \pm 375.7223i$	0.1535313323	± 59.79806127	i_{dr}, i_{qr}
3 , 4	$-9.973501 \pm 18.44575i$	0.6427498235	± 2.935732292	i_{ds}, i_{qs}
5	0.00237175	1	0	η_r

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

El deslizamiento considerado para un estado de operación estable pero refiriéndose a un punto crítico es de $S=-0.026610$, obteniéndose los resultados presentados en la tabla 5.5:

Tabla 5.5 Caso punto crítico del comportamiento de los eigenvalores del generador de 8 polos.

Eigenvalores* del Generador de 8 polos				
Modos	Eigenvalores	Modelo 5° orden		Variables
		S=-0.02661		
		Amortiguamiento	Frecuencia	
1 , 2	$-57.01707 \pm 375.7203i$	0.1535321964	± 59.79774296	i_{dr}, i_{qr}
3 , 4	$-9.954452 \pm 18.45286i$	0.6406686861	± 2.936863883	i_{ds}, i_{qs}
5	-0.03536873	-1	0	η_r

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

En esta sección se puede observar al igual el comportamiento que existe entre los eigenvalores en los tres casos de operación del generador, visualizando así mismo la variación de resultados de amortiguamiento y frecuencia al presentar la variación del deslizamiento.

A continuación se muestran las gráficas de los modos de oscilación obtenidos para el generador de 8 polos variando el deslizamiento en el programa *estabilidad.for* desarrollado en FORTRAN y realizando las simulaciones en MATLAB.

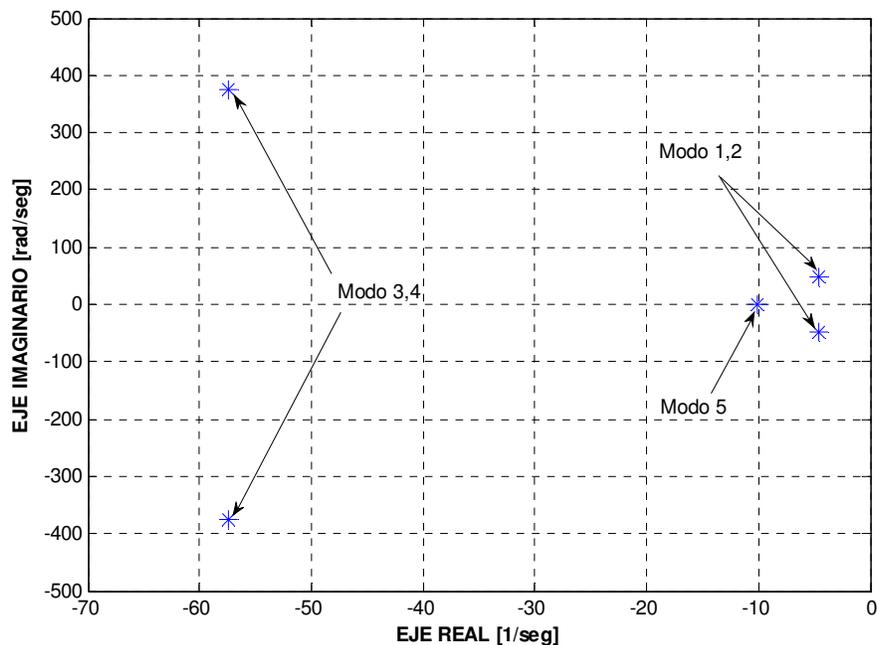


Figura 5.5 Comportamiento de los Eigenvalores de un sistema de 5° orden del Generador de Inducción de 8 polos, Vestas V-27- 50kW-480 V-Δ-60Hz.

La figura 5.5 muestra el comportamiento de los eigenvalores del generador Vestas 8 polos considerando el deslizamiento para una condición normal de operación.

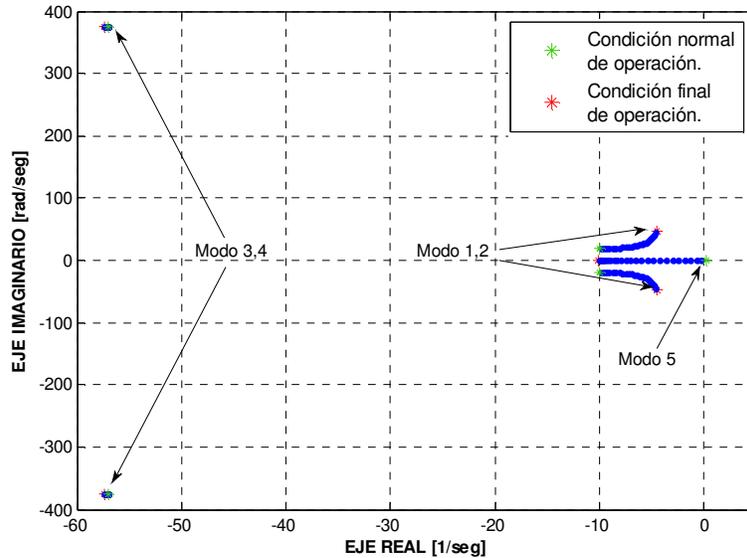


Figura 5.6 Comportamiento de los Eigenvalores de un sistema de 5° orden del Generador de Inducción de 8 polos, Vestas V-27- 50kW-480 V- Δ -60Hz.

La figura 5.6 muestra el comportamiento de los eigenvalores del generador de 8 polos en función de corrientes variando el deslizamiento considerando como condición normal de operación desde un caso estable hasta un caso inestable que corresponde a la condición final de operación.

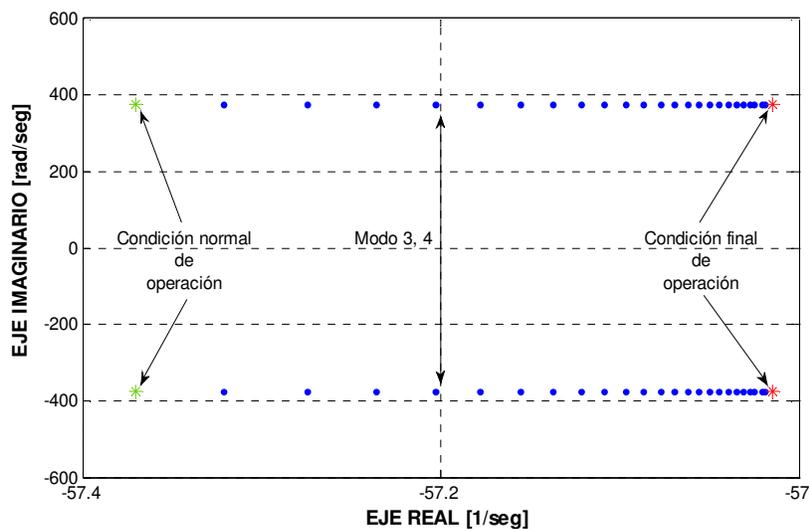


Figura 5.7 Comportamiento de los Modos 3, 4 referente al Estator en un sistema de 5° orden del Generador de Inducción de 8 polos, Vestas V-27- 50kW-480 V- Δ -60Hz.

La figura 5.7 muestra un acercamiento de la figura 5.6 haciendo enfoque a los modos 3, 4 referentes a las corrientes del estator considerando como condición normal de operación desde un caso estable hasta un caso inestable que corresponde a la condición final de operación.

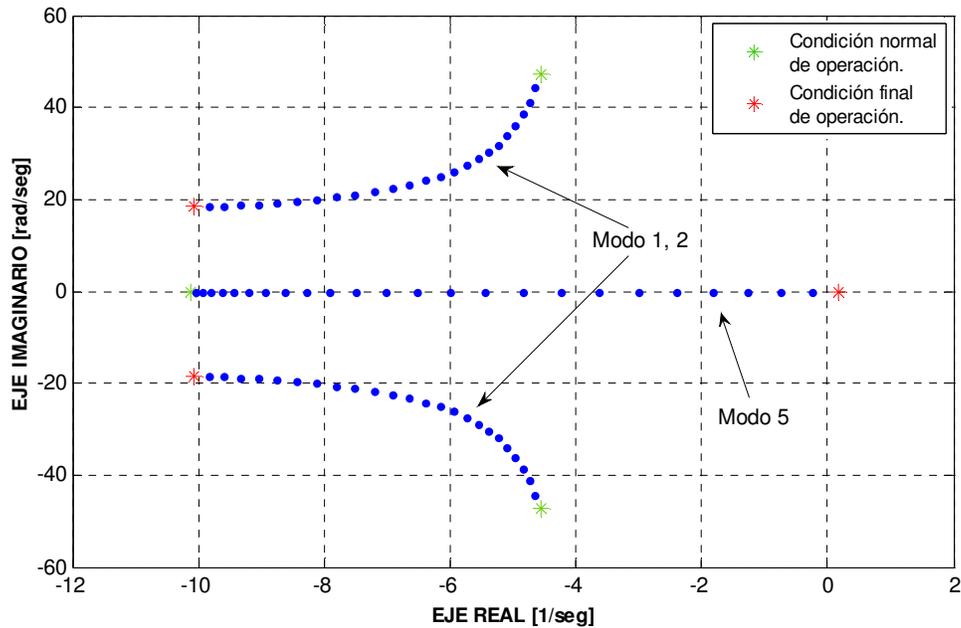


Figura 5.8 Comportamiento de los Modos de oscilación de un sistema máquina bus infinito de un Generador de Inducción de 8 polos, Vestas V-27- 50kW-480 V-Δ-60Hz.

La figura 5.8 muestra un acercamiento de la figura 5.6 haciendo enfoque a los modos 1, 2 y 5 referentes a las corrientes del rotor y el deslizamiento considerando como condición normal de operación desde un caso estable hasta un caso inestable que corresponde a la condición final de operación.

Dentro del estudio de estabilidad realizado se observa que los eigenvalores obtenidos del sistema de 5° orden, se pueden expresar en forma modal para sus eigenvectores derechos, izquierdos y para los factores de participación, logrando obtener un conocimiento más a detalle de las variables que se involucran en el análisis para los tres casos realizados en este estudio, estado estable, estado crítico y estado inestable.

Caso Estable

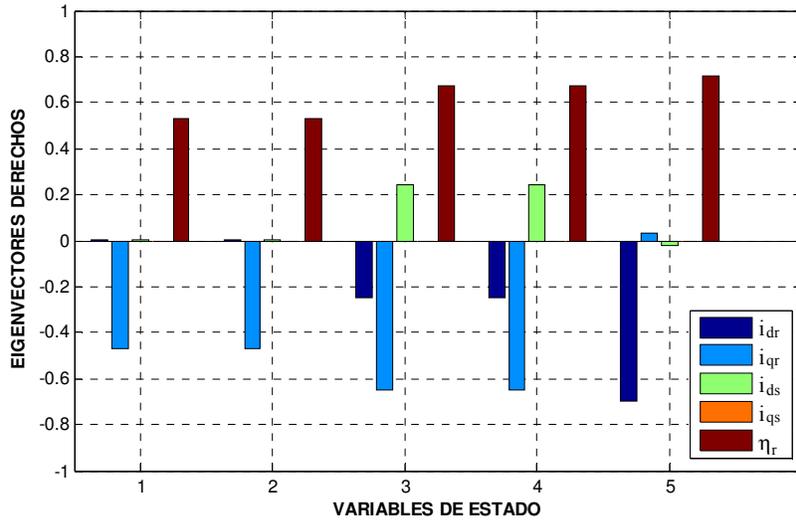


Figura 5.9 Comportamiento modal de los eigenvectores derechos (caso estable).

En la figura 5.9 se observa que en los 5 modos existe una gran variación en la velocidad esto se presenta debido a la variación del deslizamiento, a su vez también se observa como la parte q del rotor va en aumento, en los modos 3 y 4 observamos como comienza a existir un crecimiento por la parte d del estator.

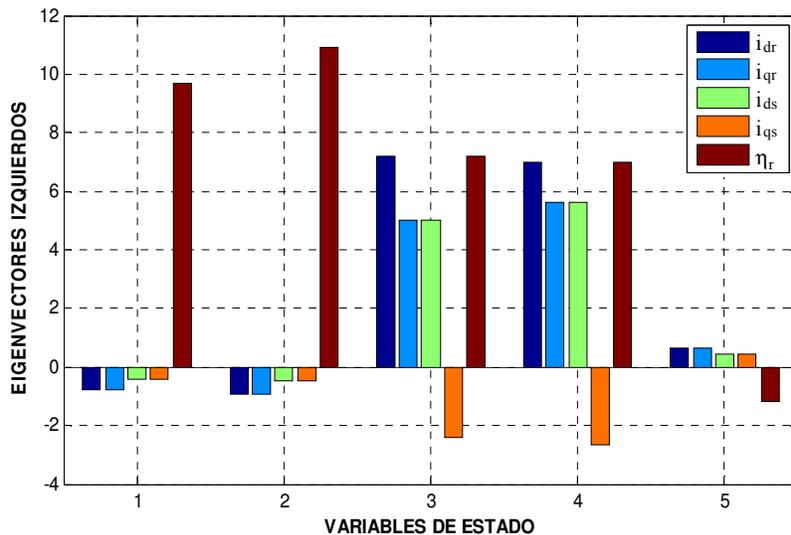


Figura 5.10 Comportamiento modal de los eigenvectores izquierdos (caso estable).

La figura 5.10 muestra el comportamiento de los eigenvectores izquierdos y podemos observar que en los modos 1, 2 existe un crecimiento en la velocidad debido al deslizamiento que

se está involucrando para este análisis, en los modos 3 y 4 observamos el aumento en el eje d del rotor al igual que la velocidad y en el modo 5 se presenta un aumento en los ejes d y q para el rotor y estator.

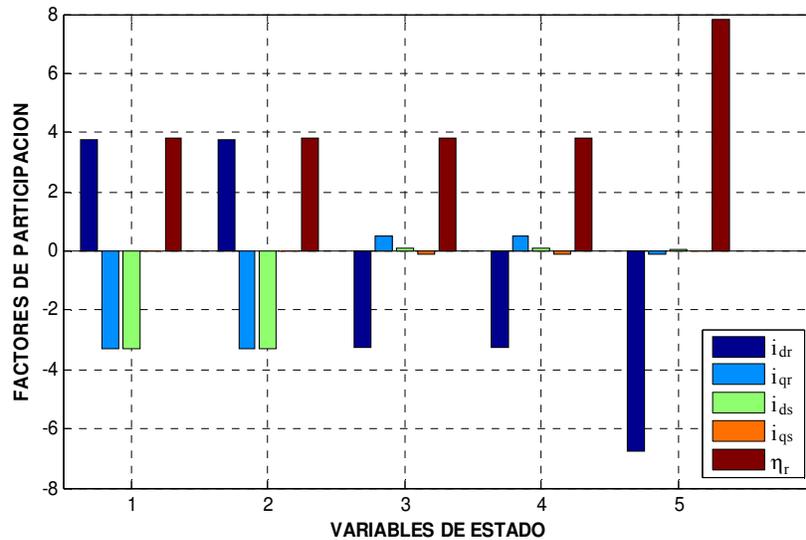


Figura 5.11 Comportamiento modal de los factores de participación (caso estable).

Se puede apreciar en la figura 5.11 el comportamiento de los factores de participación donde podemos observar que en los 5 modos predomina la velocidad debido al comportamiento que tiene los eigenvalores con el valor de deslizamiento utilizado, pero en los modos 1 y 2 observamos que se presenta una variación en d del rotor debido a la relación con el deslizamiento. Los datos se muestran en la tabla 5.3.

Caso Inestable

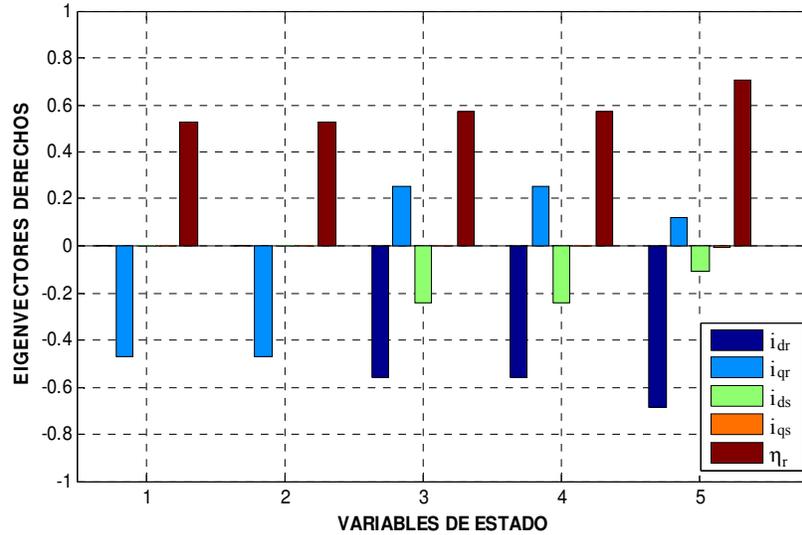


Figura 5.12 Comportamiento modal de los eigenvectores derechos (caso inestable).

En la figura 5.12 se observa que en los 5 modos existe una gran variación en la velocidad esto se presenta debido a el deslizamiento ya que se está presentando un modelo inestable y a su vez también se observa como en los modos 3, 4 y 5 existe una variación en el eje d del rotor y en el eje d del estator y rotor debido al aumento de la velocidad, lo cual también se ve reflejado para los modos 1 y 2 en la velocidad y en el eje q del rotor.

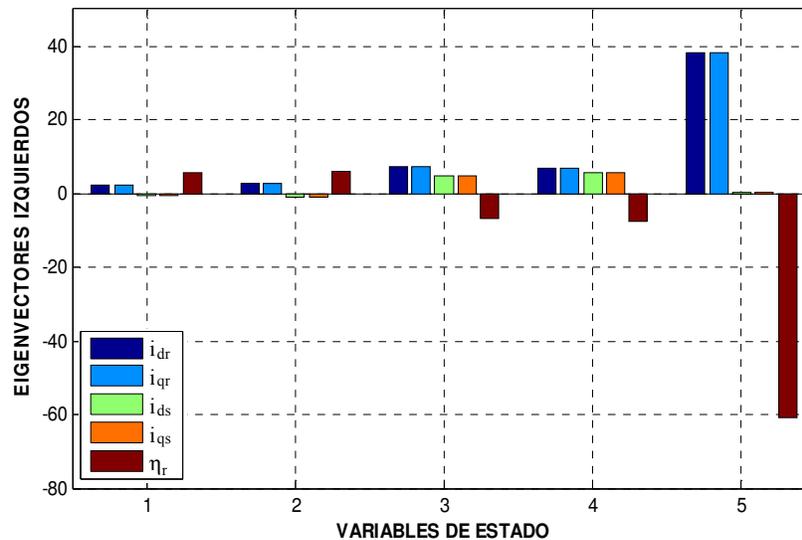


Figura 5.13 Comportamiento modal de los eigenvectores izquierdos (caso inestable).

La figura 5.13 muestra el comportamiento de los eigenvectores izquierdos y podemos observar que en los modos 1 y 2 existe un crecimiento en la velocidad y en los ejes d y q del rotor y en los ejes d y q del estator decrecen debido a que se está presentando un caso inestable lo cual el estado de operación del generador es afectado y se observa en estos dos primeros modos, en el modo 5 se observa un aumento en los ejes d y q del rotor ya que está en función de la velocidad del generador, para los modos 3 y 4 observamos nuevamente el aumento en los ejes d y q del estator y rotor y un aumento en la velocidad en sentido contrario a un estado estable.

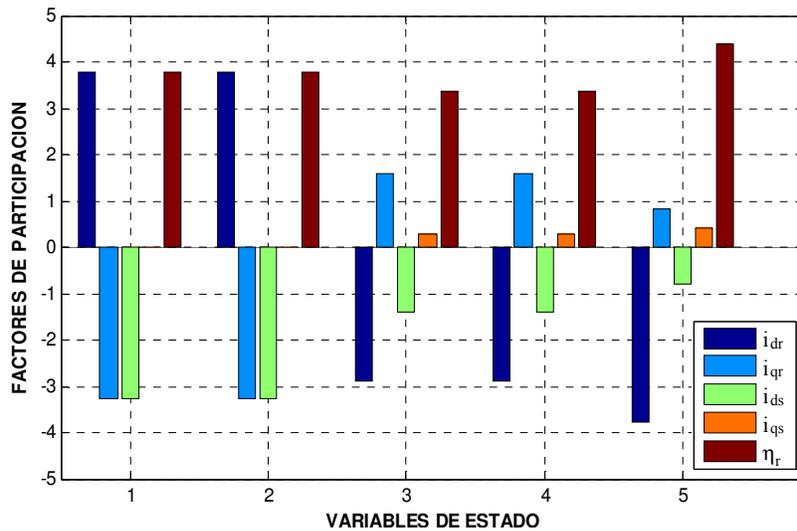


Figura 5.14 Comportamiento modal de los factores de participación (caso inestable).

En la figura 5.14 se observa el comportamiento de los factores de participación donde podemos observar que en los 5 modos predomina la velocidad debido a que el sistema está fuera de operación por el aumento en el deslizamiento afectando de esta forma a los ejes d y q del estator y rotor. Los datos se muestran en la tabla 5.4.

Punto Crítico

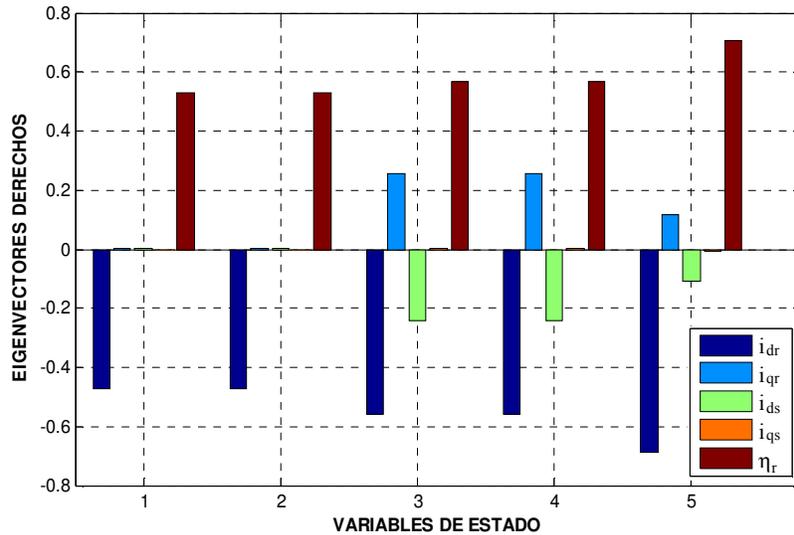


Figura 5.15 Comportamiento modal de los eigenvectores derechos (punto crítico).

En la figura 5.15 se puede observar el comportamiento de los eigenvectores derechos para un caso de punto crítico donde si comparamos esta gráfica con las de un estado estable se puede encontrar que son afectadas las dos por la velocidad pero al igual son repercutidas en el eje d del rotor ya que muestran al igual un aumento en los 5 modos, en los modos 3, 4 y 5 se ve la variación que existe al observarse el incremento en el eje d del estor y el eje q el rotor.

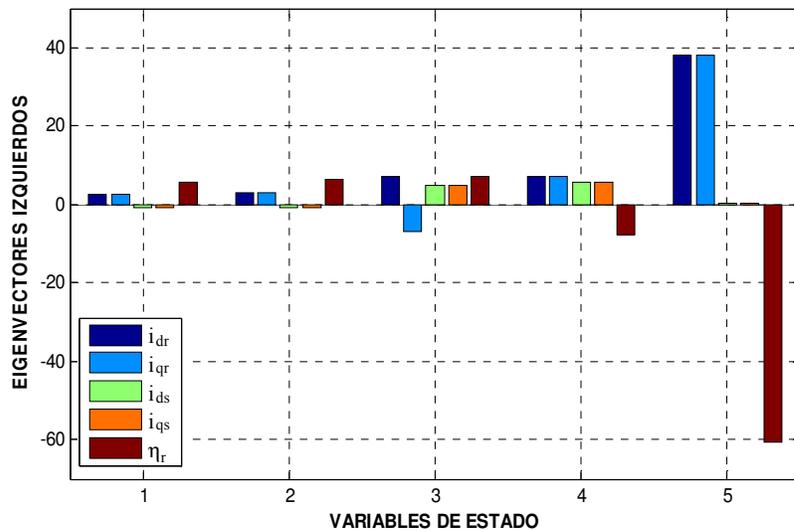


Figura 5.16 Comportamiento modal de los eigenvectores izquierdos (punto crítico).

La figura 5.16 muestra como en los 5 modos predomina el eje d del rotor y en el modo 1,2 y 3 predomina la velocidad, al igual se puede observar en el modo 5 que los valores que predominan son los del eje d y q del rotor debido al aumento de la velocidad antes de quedar fuera de operación y repercute en el deslizamiento de la máquina.

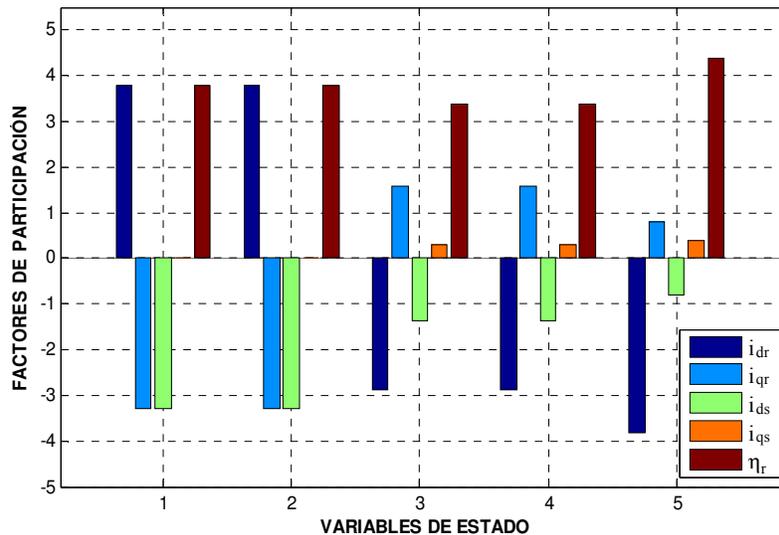


Figura 5.17 Comportamiento modal de los Factores de participación (punto crítico).

En la figura 5.17 se puede observar el comportamiento de los factores de participación para un punto crítico y se observa que para los 5 modos predomina la velocidad y repercute en los modos 1 y 2 en el eje q al rotor y en el eje d al estator, esto se puede observar debido a que en el generador esta existiendo una variación en el deslizamiento debido a la velocidad en aumento del generador y esto repercute en el rotor y estator del mismo. Los datos se muestran en la tabla 5.5.

5.7.2 MODOS DE OSCILACION DEL GENERADOR V-27 225kW – 480V- 60Hz

A continuación se presentan los valores del comportamiento del generador de 6 polos en modelo de 5° orden.

Considerando un valor de deslizamiento $S=-0.002667$, donde el generador se encuentra trabajando en estado de condición normal (caso estable), se obtuvieron los eigenvalores, amortiguamiento y frecuencia que se muestran en la tabla 5.6:

Tabla 5.6 Caso estable del comportamiento de los eigenvalores del generador de 6 polos.

Eigenvalores* del Generador de 6 polos				
Modos	Eigenvalores	Modelo 5° orden		Variables
		$S=-0.002667$		
		Amortiguamiento	Frecuencia	
1 , 2	$-11.41481 \pm 376.6882i$	0.03031699582	± 59.95178903	i_{dr}, i_{qr}
3 , 4	$-5.537613 \pm 77.51788i$	0.0716195676	± 12.33735378	i_{ds}, i_{qs}
5	-11.36841	-1	0	η_r

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

Para un valor de deslizamiento $S=-0.030967$ donde el generador presenta un comportamiento fuera de operación (caso inestable), se obtuvieron los eigenvalores, amortiguamiento y frecuencia mostrados en la tabla 5.7:

Tabla 5.7 Caso inestable del comportamiento de los eigenvalores del generador de 6 polos.

Eigenvalores* del Generador de 6 polos				
Modos	Eigenvalores	Modelo 5° orden		Variables
		$S=-0.030967$		
		Amortiguamiento	Frecuencia	
1 , 2	$-11.20754 \pm 376.6972i$	0.02976529608	± 59.95322143	i_{dr}, i_{qr}
3 , 4	$-11.587 \pm 26.31860i$	0.4903450540	± 4.188735285	i_{ds}, i_{qs}
5	0.3180242	1	0	η_r

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

El deslizamiento considerado para un estado de operación estable pero refiriéndose a un punto crítico es de $S=-0.026610$, obteniéndose los resultados presentados en la tabla 5.8:

Tabla 5.8 Caso punto crítico del comportamiento de los eigenvalores del generador de 6 polos.

Eigenvalores* del Generador de 6 polos				
Modos	Eigenvalores	Modelo 5° orden		Variables
		S=-0.030320		
		Amortiguamiento	Frecuencia	
1 , 2	-11.20975±376.6974i	0.02977115484	±59.95325326	i_{dr} , i_{qr}
3 , 4	-11.41958±26.48170i	0.4779474414	±4.214693456	i_{ds} , i_{qs}
5	-0.01371023	-1	0	η_r

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

En la figura 5.18 se muestran los eigenvalores obtenidos para un generador de 6 polos marca Vestas modelo V-27 225kW-480V-60Hz, estos valores se obtuvieron variando el deslizamiento en el programa *estabilidad.for* y realizando las simulaciones en MATLAB.

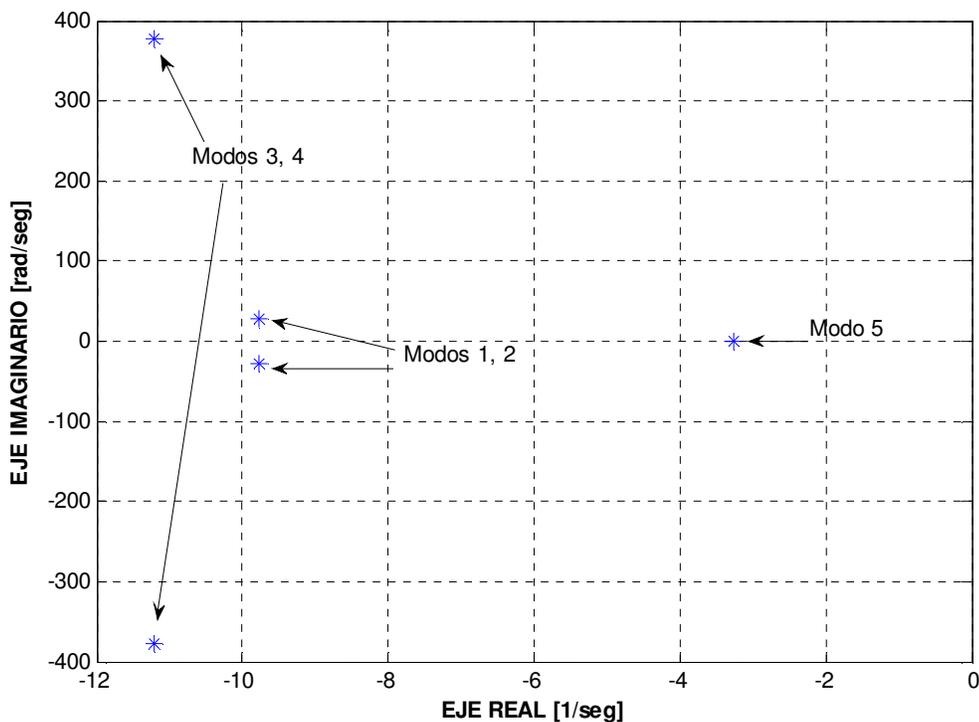


Figura 5.18 Comportamiento de los Eigenvalores de un sistema de 5° orden del Generador de Inducción de 6 polos, Vestas V-27- 225kW-480 V-Δ-60Hz.

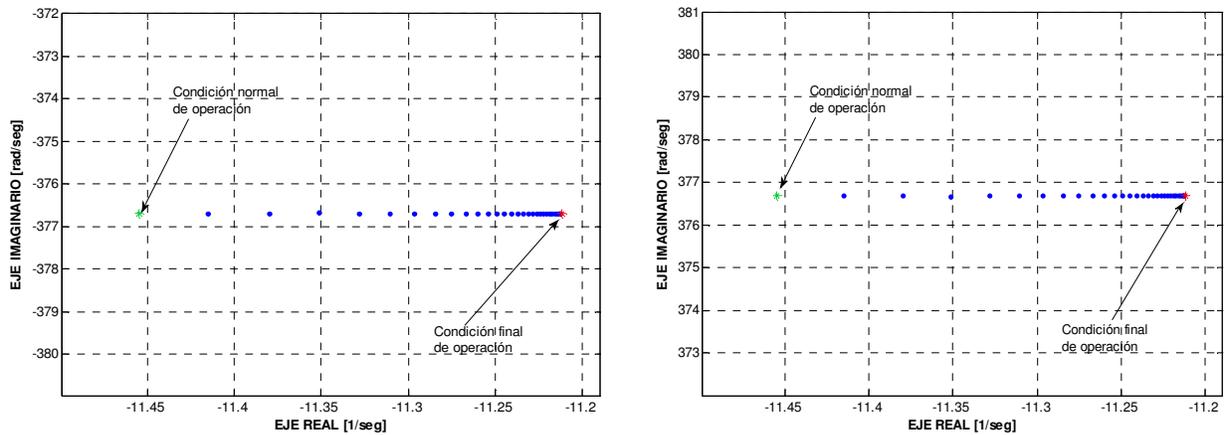


Figura 5.19 Comportamiento Modal 3, 4 referente al estator en un sistema de 5° orden del Generador de Inducción 6 polos Vestas V-27 225kW – 480V – Δ – 60Hz.

La figura 5.19 muestra el comportamiento de los modos 3, 4 referentes a las corrientes del estator considerando como condición normal de operación desde un caso estable hasta un caso inestable que corresponde a la condición final de operación.

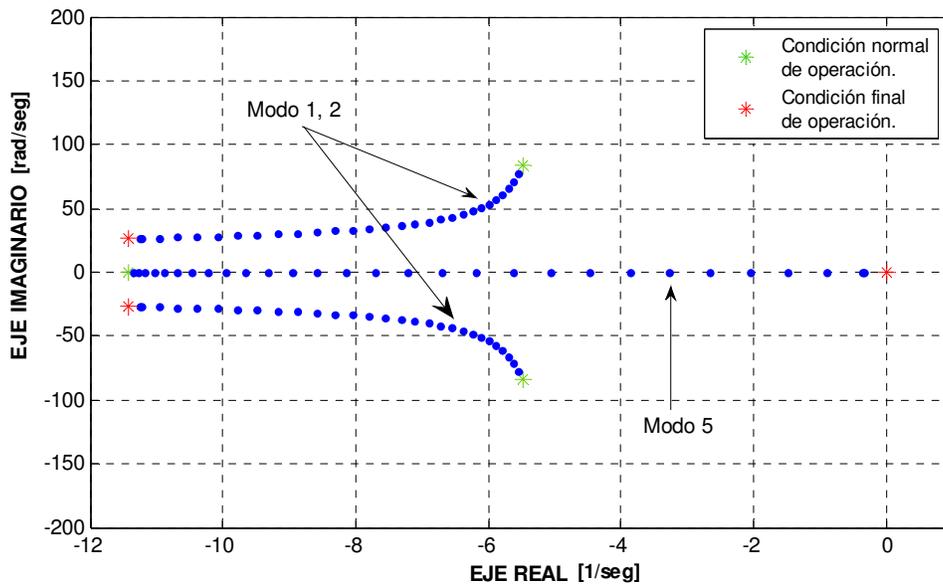


Figura 5.20 Comportamiento Modal 1, 2, 5 en un sistema de 5° orden del Generador de Inducción 6 polos Vestas V-27 225kW – 480V – Δ – 60Hz.

La figura 5.20 muestra el comportamiento de los modos 1, 2 referentes a las corrientes del rotor y el modo 5 referente al deslizamiento considerando como condición normal de operación desde un caso estable hasta un caso inestable que corresponde a la condición final de operación.

Caso Estable

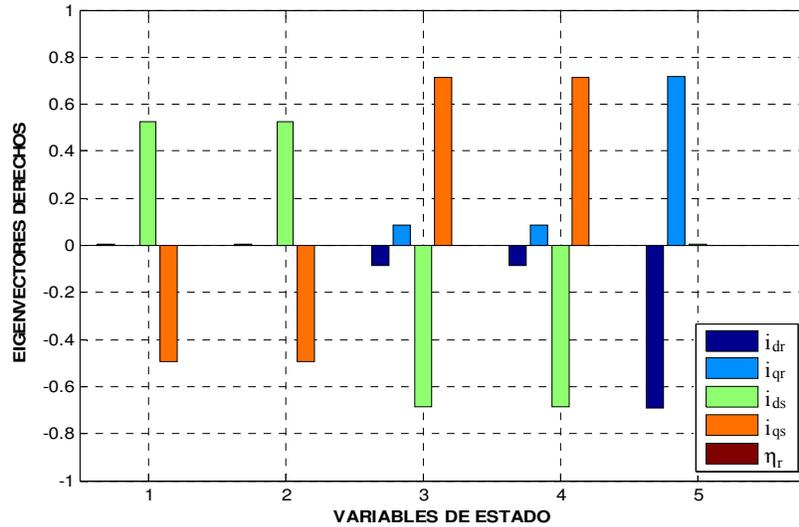


Figura 5.21 Comportamiento modal de los eigenvectores derechos (caso estable).

En el comportamiento modal de los eigenvectores derechos de la figura 5.21 se observa que en los modos 1, 2 la corriente en el eje d del estator es mayor con respecto a la corriente del eje en cuadratura del estator. En los modos 3, 4 las corrientes en el rotor notoriamente aumentan del mismo modo que la corriente en cuadratura del estator con respecto a la referente al eje d del mismo. En el modo 5 las corrientes en el estator decrecen considerablemente. En los 5 modos es evidente que la velocidad es mínima.

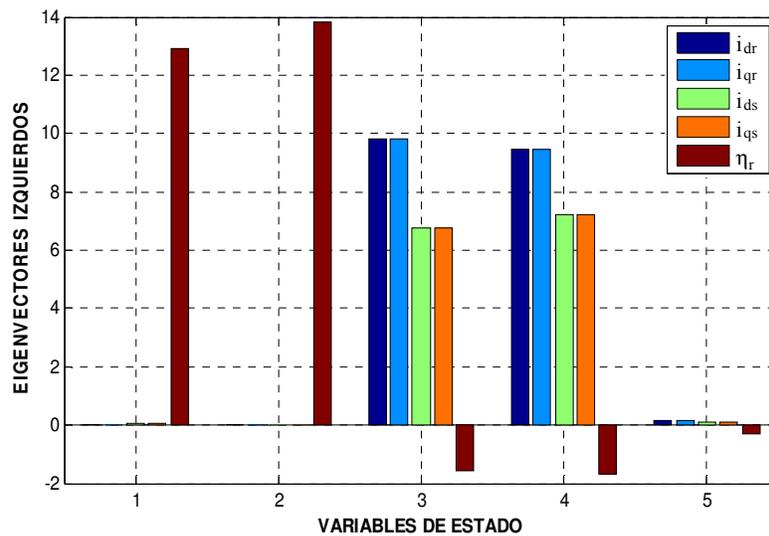


Figura 5.22 Comportamiento modal de los eigenvectores izquierdos (caso estable).

En el comportamiento modal de los eigenvectores izquierdos de la figura 5.22 se observa que en los modos 1,2 las corrientes tanto en el rotor como en el estator son relativamente pequeñas pudiéndose apreciar que la velocidad con respecto a la variación en el deslizamiento es considerablemente grande. En los modos 3,4 se observa que las corrientes en el rotor son mayores a las del estator y que la velocidad decrece. En el modo 5 se observa una disminución de corrientes tanto del rotor como del estator y que la velocidad tiene un comportamiento similar a estas.

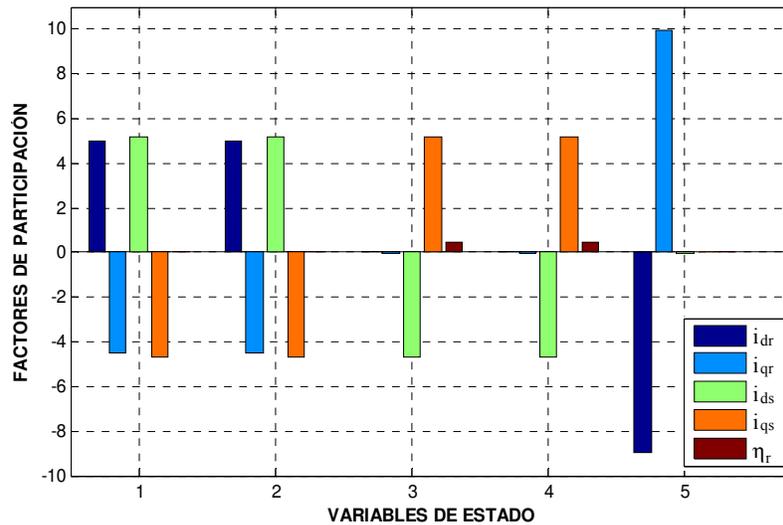


Figura 5.23 Comportamiento modal de los factores de participación (caso estable).

La figura 5.23 muestra el comportamiento de los factores de participación donde se observa en los modos 1 y 2 que las corrientes en el eje d del rotor y estator son mayores a las corrientes en cuadratura. La velocidad es casi despreciable.

Caso Inestable

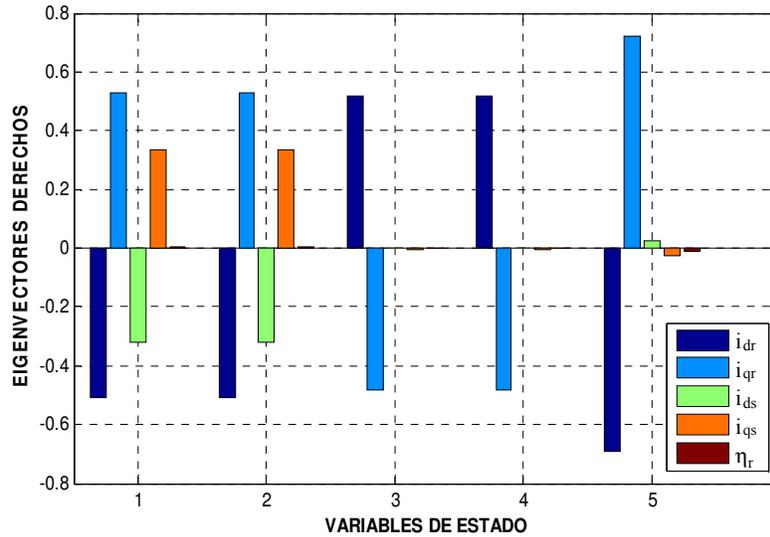


Figura 5.24 Comportamiento modal de los eigenvectores derechos (caso inestable).

En el comportamiento modal de los eigenvectores derechos de la figura 5.24 se observa que en los modos 1, 2 las corrientes en el tanto en el rotor como en el estator tiene un comportamiento similar apreciándose este mismo comportamiento en los modos 3, 4 pero con una velocidad mínima. El comportamiento de las corrientes en el rotor del modo 5 es considerablemente mayor.

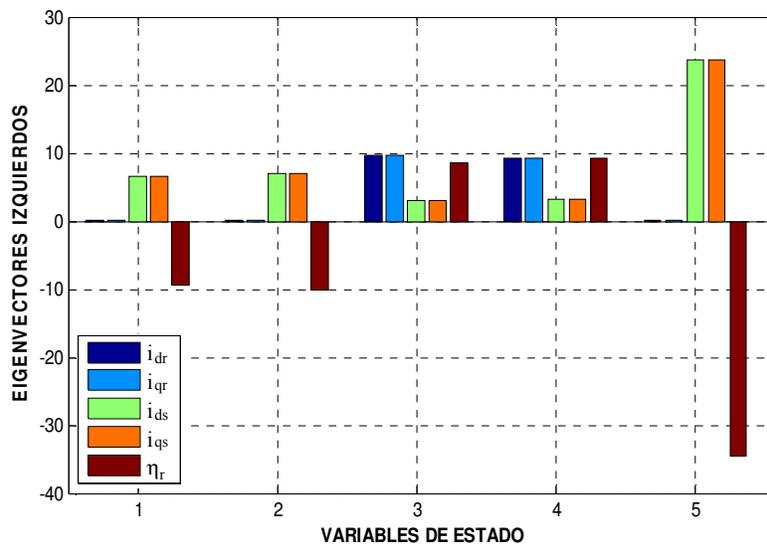


Figura 5.25 Comportamiento modal de los eigenvectores izquierdos (caso inestable).

En el comportamiento modal de los eigenvectores izquierdos de la figura 5.25 se observa que la velocidad va en aumento con respecto a la variación del deslizamiento. Para los modos 1, 2 se observa un comportamiento de mayores corrientes en el estator con respecto al rotor, caso contrario a los modos 3, 4.

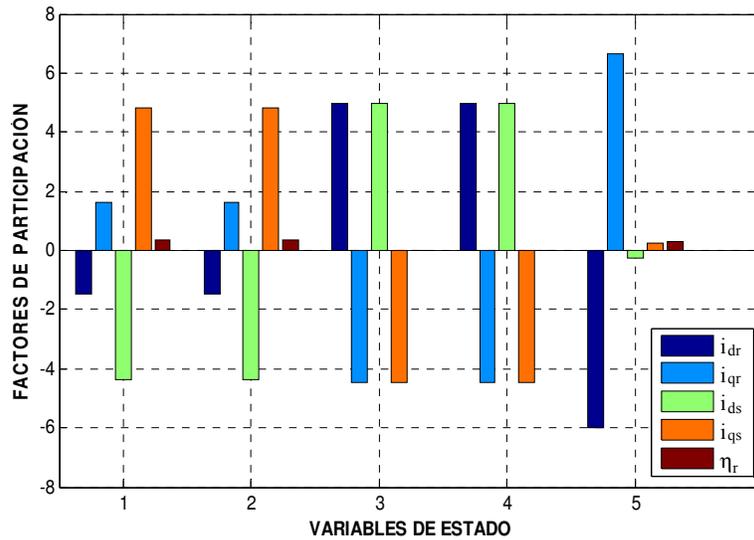


Figura 5.26 Comportamiento modal de los factores de participación (caso inestable).

En la figura 5.26 el comportamiento de los factores de participación en los modos 1, 2 se observa un comportamiento similar en las corrientes del estator y el rotor pero apreciándose menores las corrientes en los ejes d y q del rotor, caso contrario a los modos 3, 4. La velocidad se aprecia pequeña.

Punto Crítico

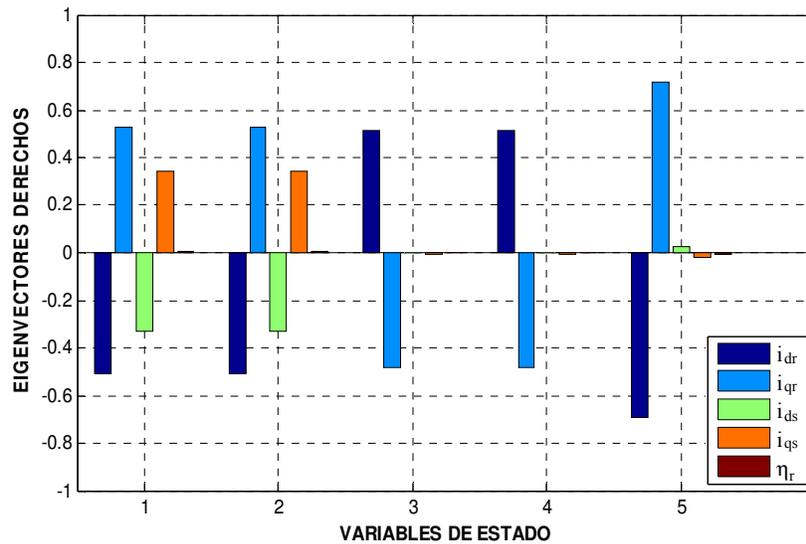


Figura 5.27 Comportamiento modal de los eigenvectores derechos (punto crítico).

En el comportamiento modal de los eigenvectores derechos de la figura 5.27 se observa que en los modos 1,2 las corrientes en el tanto en el rotor como en el estator tiene un comportamiento similar apreciándose este mismo comportamiento en los modos 3, 4 pero con una velocidad casi inapreciable. El comportamiento de las corrientes en el rotor del modo 5 es considerablemente mayor.

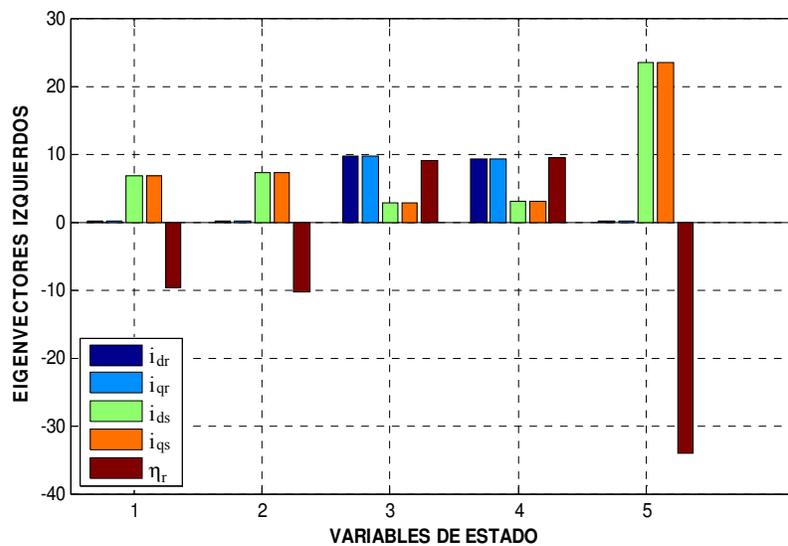


Figura 5.28 Comportamiento modal de los eigenvectores izquierdos (punto crítico).

En el comportamiento modal de los eigenvectores izquierdos de la figura 5.28 se observa que en los modos 1,2 las corrientes en los ejes dq del estator son mayores a las corrientes del rotor. En los modos 3,4 se observa que las corrientes en el rotor son mayores a las del estator y que la velocidad aumenta. En el modo 5 se observa un aumento de corrientes en el estator y que la velocidad es mucho mayor.

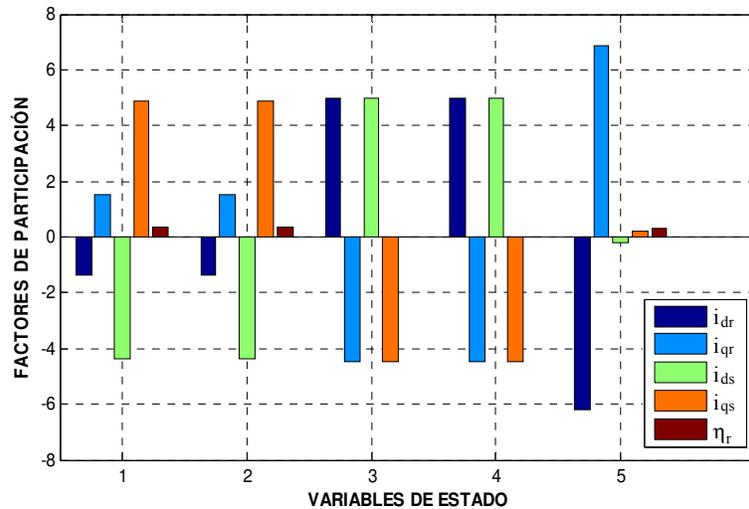


Figura 5.29 Comportamiento modal de los factores de participación (punto crítico).

En la figura 5.29 el comportamiento de los factores de participación donde se observa en los modos 1 y 2 que las corrientes en el eje de del estator son mayores a las referidas al rotor. En los modos 3, 4 el comportamiento de las corrientes tanto del estator como del rotor son casi similares. En el modo 5 Las corrientes del rotor son mayores a las referidas en los ejes dq del estator. En los 5 modos se puede apreciar que la velocidad es mínima.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Los estudios de estabilidad permiten conocer el comportamiento de un sistema eléctrico de potencia al ser sometido a perturbaciones, y tienen una gran importancia en la operación del sistema, pues sus resultados permitirán tomar las decisiones más adecuadas, para que este opere en condiciones óptimas.

Un conocimiento adecuado sobre el comportamiento del sistema en condiciones dinámicas, permitirá manejar adecuadamente los riesgos vinculados con perturbaciones y contingencias, minimizando los efectos para el sistema, y evitando de esta manera, las pérdidas económicas que el desconocimiento pueda acarrear.

Este trabajo, ha permitido corroborar que la complejidad de los estudios de estabilidad no solamente radica en la formulación matemática del problema, sino sobre todo en la identificación de los modelos más adecuados, que permitan representar apropiadamente a cada uno de los elementos del sistema, a fin de que los resultados que se obtengan representen fielmente el comportamiento del sistema.

En el desarrollo del estudio de estabilidad se realizó una prueba de manera práctica con valores reales para lograr observar el comportamiento de manera gráfica de cuando influía un factor que alterara el sistema, por ello se consideró el viento como factor principal de la inestabilidad del sistema.

Se observa el estudio del análisis de estabilidad ante pequeños disturbios aplicado en aerogeneradores de la central Eoloeléctrica de La Venta, Oaxaca, a través del comportamiento modal de los dos tipos de aerogeneradores con los cuales opera dicha central.

Se observa el comportamiento que presentan los eigenvalores y a su vez las variables de estado en determinados modos de oscilación, dentro de este estudio se observa el amortiguamiento y la estabilidad que puede tener cada eigenvalor.

Los resultados que se presentan en el capítulo VI, son los resultados de un estudio de análisis de estabilidad ante pequeños disturbios en aerogeneradores de inducción, haciendo una variación en cuanto al valor del deslizamiento, para el aerogenerador Vestas V-27 de 8 polos y 6 polos, se observó 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 polos como de 8 polos. El comportamiento de los eigenvalores se especifica en función de los parámetros del generador que esté operando. Permitiendo observar en qué momento el aerogenerador de inducción se encuentra operando en una condición de estado estable o inestable (considerado fuera de su estado de operación).

RECOMENDACIONES

Para el análisis de los problemas de estabilidad, y sobre todo para la identificación de los factores esenciales que contribuyen a la inestabilidad, y para la identificación de la modalidad de estudio que realizarse, es recomendable tomar en cuenta lo siguiente:

- La naturaleza física del modo resultante de inestabilidad.
- El alcance del disturbio considerado.
- Los componentes, procesos, y el tiempo que debe ser tomado dentro de la consideración en orden de determinar la estabilidad.

Como resultado de los estudios de estabilidad, pueden identificarse algunas perturbaciones que pueden llevar al sistema a condiciones de inestabilidad.

Por lo que es recomendable realizar un estudio para determinar la probabilidad de ocurrencia de estos eventos que involucran peligro para el sistema y sobre esta base, diseñar las medidas de tipo operativo que pueden implementarse.

El problema de la estabilidad ante pequeños disturbios se empezó a analizar en México desde las últimas dos décadas del siglo pasado, la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de ingeniería Mecánica y Eléctrica cuenta con extensa información y diversos trabajos a nivel maestría y doctorado sobre el tema de la Estabilidad por lo que cabe recomendar:

- ☑ La impartición de cursos de Estabilidad ante pequeños y grandes disturbios en aerogeneradores a nivel ingeniería.
- ☑ Cursos de Estabilidad en el programa de ingeniería.
- ☑ Implementación de cursos de Programación para el desarrollo de simuladores gráficos que permitan el análisis de los sistemas eléctrico de potencia.
- ☑ Desarrollar trabajos que requieran la aplicación del análisis modal ya que mediante este se pueda obtener más información acerca de las variables del sistema, esto es ver su comportamiento en función de sus trayectorias realizando variaciones en la condiciones de operación del sistema, para el diseño de estrategias que permitan el mejor aprovechamiento en cuanto a su operación.

REFERENCIAS

LIBROS

- [1] A.E., Fitzgerald, *Teoria y Analisis de las Máquinas Eléctricas*, Editorial Hispano Europea, Barcelona España, 1975, pp. 589.
- [2] Fraile Mora, Jesús. *Máquinas Eléctricas*. Editorial McGraw-Hill, 5ª Edición, Aravaca Madrid, 2003, pp. 757.
- [3] J. Cathey, Jimmie. *Maquinas Electricas, Análisis y diseño aplicando Matlab*. Editorial McGraw-Hill, México, 2002, pp. 530.
- [4] J. Chapman, Stephen. *Máquinas Eléctricas*. Editorial McGraw-Hill, 4ª Edición, Bogotá Colombia, 1987, pp. 768.
- [5] Prabha Kundur. *Power System Stability and Control*. Editorial McGraw-Hill, United States of America, 1994, pp. 1776.
- [6] Wildi, Theodore. *Maquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia*. Editorial Pearson Educación, 6ª Edición, México, 2006, pp. 960.
- [7] J. Grainger John, D. Stevenson Ailliam. *Análisis de Sistemas de Potencia*. Trd. Carlos Lozano Sousa, Editorial McGraw Hill, México, 1996, pp. 740
- [8] Borja D. M., *Estado del arte y tendencias de la tecnología eoloeléctrica*, Ed. Arbol, México, D.F., 1999.
- [9] Messina,R. 1995. Experence with the Analysis of Small Signal Stability in Longitudinal Systems, a Case Study whith the Mexican Interconnected System. int Journal of Electrical Power & Energy Systems. Volumen 17. Número 5.páginas 291-299.
- [10] P.C. Krause Paul, *Analysis of Electric Machinery*, 2da edición, editorial McGraw Hill, New York, state, 2002, pp. 564.

TESIS

- [11] Lazaro Gonzaga, Mercedes. *Análisis de Estabilidad ante Pequeños Disturbios de los Generadores de Inducción en Sistemas Eléctricos de Potencia*. Tesis de Grado de Maestría. Instituto Politécnico Nacional, SEPI ESIME, México, D.F., 2005.
- [12] López Luis, Enrique. *Análisis de la Estabilidad de Voltaje de Sistemas Eléctricos de Potencia Utilizando el Metodo de Flujos de Potencia de Continuación*. Tesis de Grado de Maestría. Instituto Politécnico Nacional, SEPI ESIME, México, D.F., 2006.

- [13] Daniel Ruiz Vega, (2002). *Dynamic Security Assessment and Control: Transient and Small Signal Stability*. Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias Aplicadas. Universidad de Lieja, Instituto Montefiore. Sart-Tilman B28, B 4000, Lieja, Bélgica. Director de tesis: Prof. Dr. Mania Pavella.
- [14] Minoru Javier Ishijara Miyaki “Modelos Simplificados de Aerogeneradores de Inducción para Estudios de Estabilidad a Corto Plazo de Sistemas Eléctricos de Potencia”. En la SEPI-ESIME-Zacatenco, México D. F,
- [15] Elmer Santos Mora. *Interacción del Generador de Inducción con un Sistema Eléctrico de Potencia*. Tesis de Grado de Maestría, IPN, SEPI ESIME, México, D.F., Marzo, 1998.

ARTICULOS (IEEE)

- [16] Prabha Kundur (Canada, Convener), John Paserba (USA, Secretary), Venkat Ajjarapu (USA), Göran Andersson (Switzerland), Anjan Bose (USA), Caludio 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.
- [17] Elmer Santos Mora, Tomas 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.
- [18] M. Machmoum, F. Poitiers, C. Darengosse, A. Queric, *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.
- [19] Raúl Rabinovici, *Autonomous Excitation of Induction Generators*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 34, No. 3, 1998, pp. 664-670.

ARTICULOS

- [20] Morales Vázquez Gregorio, Enríquez Harper Gilberto, *Estudio del comportamiento de las Redes de Distribución con Generación Eólica*. Artículo presentado en el XII Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas, IPN SEPI-ESIME, México D.F., Del 8-12 de Noviembre de 2010.
- [21] Escudero López, *Manual de energía eólica*, Ed. Mundi-Prensa, México, D.F., 2003. Cadenas Tovar Roberto, *Central Eoloeléctrica La Venta II*, Comisión Federal de Electricidad CFE, Vol. 8 Número 12, 10 de Diciembre de 2007.

- [22] Casas L.P. & Rudnick H. 1991. El estabilizador de potencia en el amortiguamiento de las oscilaciones electromecánicas en sistemas eléctricos multimáquina. Publicación Universidad católica de Chile. Páginas 1-9.
- [23] Wang, L.-X (1997). Acouerse in fuzzy systems and control. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- [24] E. Ruiz. Estudio de pequeña señal en el sistema eléctrico Colombiano. Universidad de los Andes, Bogotá, Cundinamarca, Colombia A. Torres Asesor, Universidad de los Andes, Bogotá, Cundinamarca, Colombia
- [25] Estudio de estabilidad de pequeña señal en el sistema interconectado aplicado al método de análisis modal Arguello Gabriel, Ing., Flores Hermógenes, Ing., Escuela Politécnica Nacional XIX Jornadas en Ingeniería y Electrónica.
- [26] CIGRÉ. “Analysis and Control of Power System Oscillations”. Task Force 07 of Advisory Group 01 or Study Committee 38, December 1996.
- [27] Especificaciones generales de VESTAS V27-225 kW, 60Hz, WINDTURBINE-(US) with Tubular/Lattice Tower, ITEM No: 941130. 4 January, 1995.

PAGINAS WEB

- [28] Cigre: www.cigre.org.mx/.../Integracion_Proyectos_Eolicos_SEP_C_Gallardo.pdf
- [29] <http://webs.uvigo.es/carrillo/publicaciones/Tesis.pdf>
- [30] Monografías:
<http://www.monografias.com/trabajos82/aerogeneradores-generadores-electricidad-y-productores-agua/aerogeneradores-generadores-electricidad-y-productores-agua4.shtml>
- [31] <http://www.scribd.com/doc/6683073/Aerogeneradores>
- [32] Instituto de Investigaciones Eléctricas: <http://www.iie.org.mx/sitio/insafi.htm>
- [33] Comisión Federal de Electricidad:
<http://www.cfe.gob.mx/sustentabilidad/energiarenovable/Paginas/default.aspx>
- [34] Comisión Federal de Electricidad:
http://www.cfe.gob.mx/sustentabilidad/publicaciones/genElectricidad/Paginas/Generacion_deelectricidad.aspx
- [35] Comisión Nacional de energía
http://www.conae.gob.mx/wb/CONAE/CONA_620_tecnologia_de_la_ene
- [36] Compañía Enercon: <http://www.enercon.de/de-de/>

- [37] Aeolos
<http://www.windturbinestar.com/uploads/images/latticetower.jpg&imgrefurl>
- [38] Energia renovables
<http://www.renovables-energia.com/wp-content/uploads/2009/09/aerogenerador-darrieus.jpg>
- [39] Ecovive: <http://www.ecovive.com/?p=1536>
- [40] Ecovive: <http://www.ecovive.com/los-aerogeneradores-segun-el-numero-depalas>
- [41] Instituto de Investigaciones Eléctricas: <http://www.iie.org.mx/sitio/insafi.htm>
- [42] <http://amazings.es/2010/10/25/cuando-la-nasa-construia-aerogeneradores/>
- [43] <http://bricoenergia.7forum.biz/search.forum?>
- [44] <http://www.actualidaduniversitaria.com/2010/08/un-novedoso-aerogenerador-de-250-kw>
- [45] <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia40/HTML/articulo06.htm>

APÉNDICE A

PRUEBAS PARA DETERMINACIÓN DE PARAMETROS

Las pruebas que se realizan para una máquina de inducción nos ayudan a determinar los parámetros que permiten determinar el circuito equivalente de la máquina de inducción, para esto existen dos tipos de ensayos que se denominan: prueba de vacío o de rotor libre y prueba de corto circuito o rotor bloqueado. A continuación se explicara cada una de estas pruebas.

A.1 Prueba de Vacío o de Rotor Libre

Consiste en hacer funcionar la máquina sin ninguna carga mecánica en el eje, es decir, la máquina trabaja a rotor libre. Se debe aplicar la tensión asignada al primario V_{In} , midiendo la potencia absorbida P_0 y la corriente de vacío I_0 . Si la máquina pudiera funcionar en esta prueba a la velocidad de sincronismo $n = n_s$, el deslizamiento sería igual a cero, lo que indicaría, en el circuito equivalente exacto de la figura A.1, que la resistencia de carga, R_c se hace infinita y, en consecuencia, I_2 sería nula y no existiría ningún par electromagnético en el eje. En estas circunstancias lo que sucede realmente es que la máquina en vacío gira a una velocidad muy cercana a la del campo giratorio, lo que indica, desde el punto de vista del circuito de la figura A.1, que la resistencia de carga R_c tiene un valor muy elevado pero no infinito; como no se ejerce ningún par de carga en el eje, la potencia disipada en esta resistencia representa la pérdida en rozamiento y ventilación de la maquina [2, 3, 4].

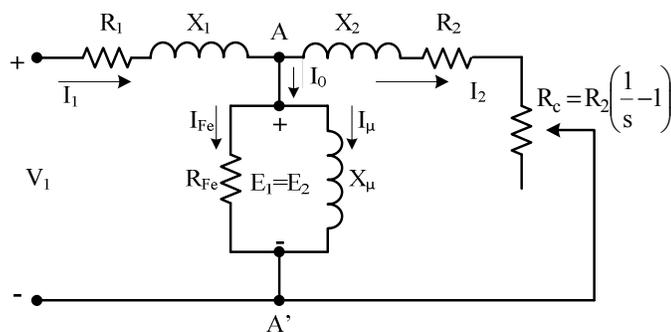


Figura A.1 Circuito equivalente exacto [1, 2, 4].

Denominando P_0 a la potencia absorbida P_{Cu} , las pérdidas en el cobre del estator en esta prueba P_{Fe} , a las pérdidas en el hierro y P_m , a las pérdidas mecánicas se cumplirá:

$$P_0 = P_{Cu} + P_{Fe} + P_m \quad (\text{A.1})$$

Conocidas las pérdidas P_{Fe} (separada de P_m) se podrá calcular la rama paralelo del circuito equivalente como muestra la figura A.2 que absorberá la potencia P_{Fe} , de acuerdo con las siguientes expresiones aproximadas:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_{Fe}}{m_1 V_{1n} I_0}; \quad I_{Fe} = I_0 \cos \varphi_0; \quad I_\mu = I_0 \text{sen } \varphi_0 \quad (\text{A.2})$$

De donde se deduce:

$$R_{Fe} = \frac{V_{1n}}{I_{Fe}}; \quad X_\mu = \frac{V_{1n}}{I_\mu} \quad (\text{A.3})$$

Donde:

φ_0 = Flujo magnético, [Webers].
 m_1 = Fase de la máquina.
 V_{1n} = Tensión nominal en el estator, [V].
 I_0 = Corriente del núcleo, [A].

P_{Fe} = Pérdidas en el hierro.
 R_{Fe} = Resistencia en el hierro, [Ω].
 X_μ = Reactancia, [Ω].
 I_{Fe} = Corriente en el hierro, [A].

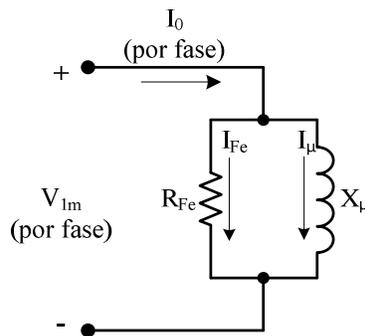


Figura A.2 Circuito equivalente en vacío [1, 2].

A.2 Prueba de Corto Circuito o de Rotor Bloqueado

Esta prueba se realiza bloqueando el rotor impidiéndole que gire la máquina, es decir, $n_m = 0$, por lo que se tendrá: $s = 1$, lo que indica que la máquina se comporta como un transformador con el secundario en cortocircuito. Al estator se le aplica una tensión creciente, partiendo de cero, hasta que la corriente absorbida sea la asignada, $I_{cc} = I_{1n}$ (por fase), midiendo a la vez la tensión aplicada V_{1cc} (fase) y la potencia absorbida P_{cc} (total). La corriente de vacío I_0 es entonces despreciable frente a I_{1n} debido a la pequeña tensión necesaria, resultando el circuito equivalente de la figura A.2. De las medidas efectuadas puede obtenerse el f.d.p. en cortocircuito [2, 3, 4]:

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{m_1 V_{1cc} I_{1n}} \quad (\text{A.4})$$

Y de aquí resultan los valores:

$$R_{cc} = R_1 + R_2 = \frac{V_{1cc}}{I_{1n}} \cos \varphi_{cc}; \quad X_{cc} = X_1 + X_2 = \frac{V_{1cc}}{I_{1n}} \sin \varphi_{cc} \quad (\text{A.5})$$

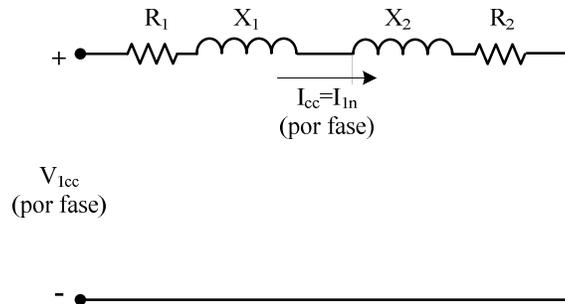


Figura A.3 Circuito equivalente en cortocircuito [2, 3, 4].

En consecuencia, el ensayo de cortocircuito permite obtener los parámetros de la rama serie de la máquina.

APÉNDICE B

VALORES EN POR UNIDAD DE LOS AEROGENERADORES

Las líneas de transmisión de potencia se operan a niveles en los que el kilovolt (kV) es la unidad más conveniente para expresar sus voltajes. Debido a que se transmite una gran cantidad de potencia, los términos comunes son los kilowatts o megawatts y los kilovoltamperes o megavoltamperes. Sin embargo estas cantidades al igual que los amperes y los ohms, se expresan frecuentemente en por ciento o en por unidad de un *valor base* o de *referencia* especificado para cada una. Estas cantidades se denominan por unidad (y designan p.u.) y se define como la relación de la cantidad a su base y se expresa como un decimal, en la siguiente forma [7]:

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

El voltaje, la corriente, los kilovoltamperes y la impedancia están relacionados de tal manera que la selección de los valores base para cualquiera 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 kilovoltamperes. 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 [7].

A continuación se presentan las formulas que se emplearon para expresar los parametros de la máquina en p.u.:

Para calcular el valor de la impedancia base:

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

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

Para calcular la impedancia base, primero se debe de conocer el voltaje base y los kilovoltamperes base teniendo:

Voltaje base:

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

Conociendo:

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

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

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

Cálculo 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 de las reactancias X_1 , X_2 y X_M :

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

$$X_2 = (L_2 - L_M)2\pi f$$

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

Cálculo de la constante de inercia H:

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

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

Donde:

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

Ω_{0m} = Velocidad angular de la máquina en rad/seg.

Teniendo:

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

$$S_{Bm} = 3(V_{\text{efbase}} i_{\text{efbase}}) \quad (\text{B.13})$$

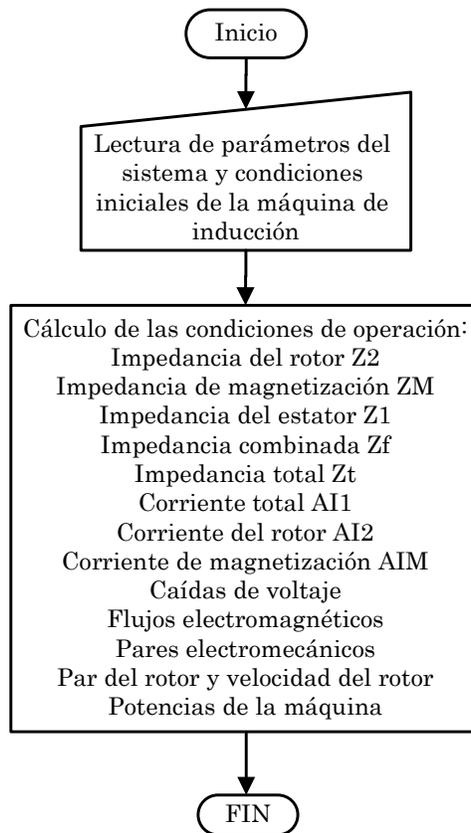
Tabla B.1 Parámetros del Generador de Inducción VESTAS V27-225/50 kW, 60 Hz en pu[27]

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

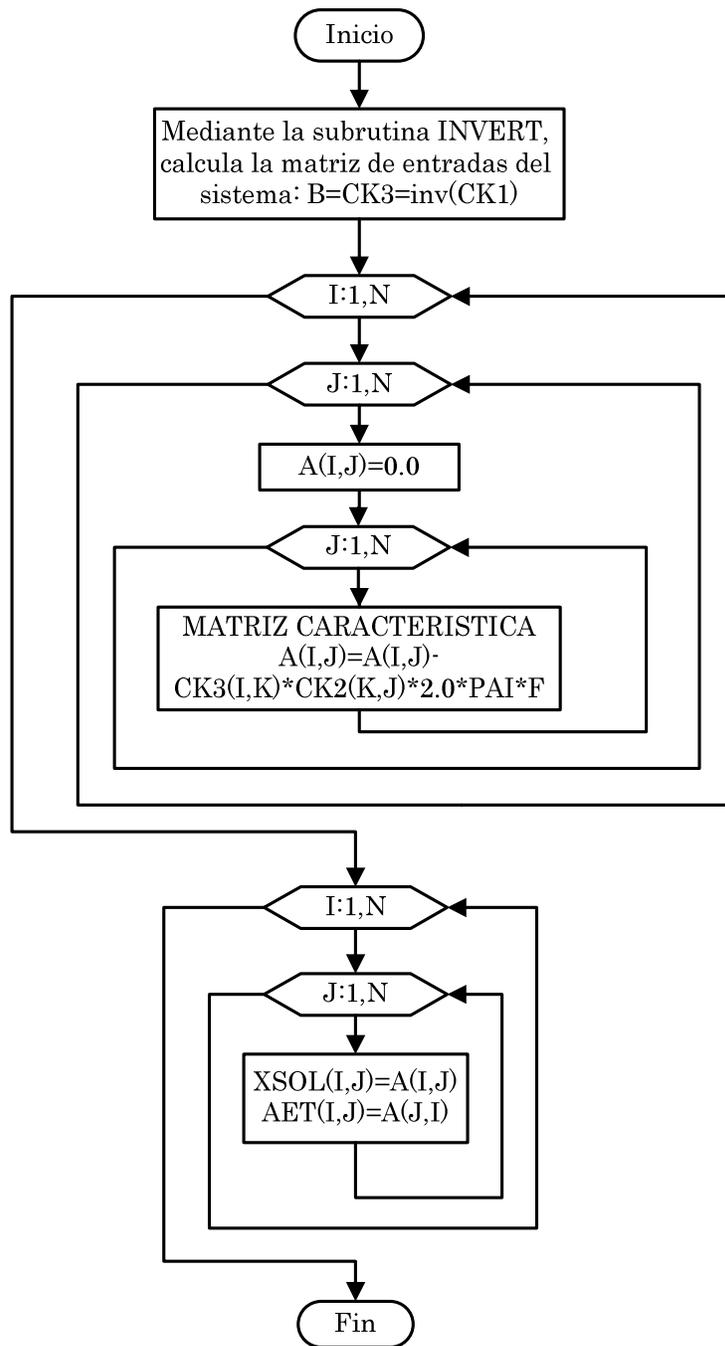
APÉNDICE C

DIAGRAMAS DE FLUJO

C.1 SUBROUTINA OPOINT

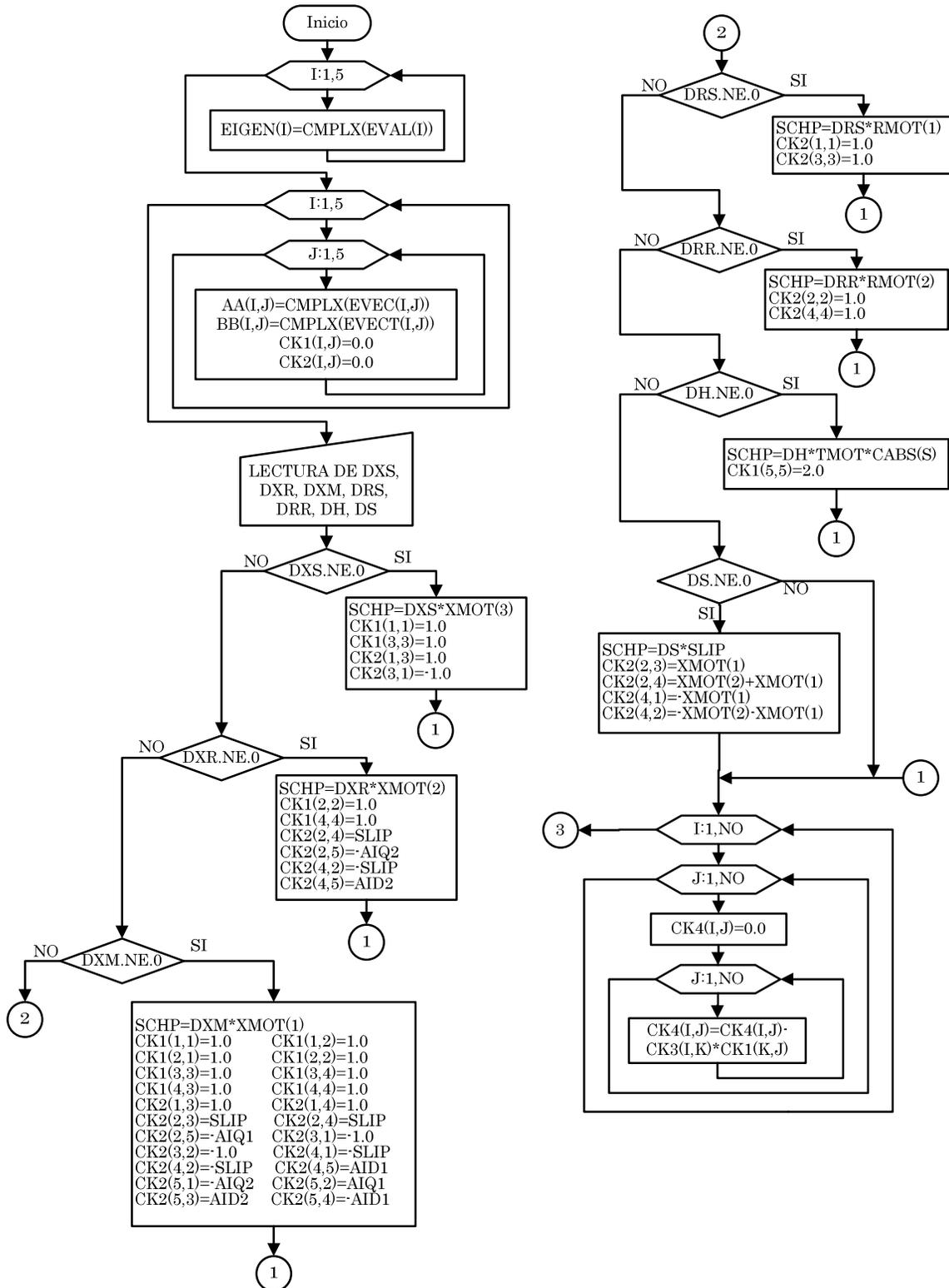


C.3 SUBROUTINA CHARA

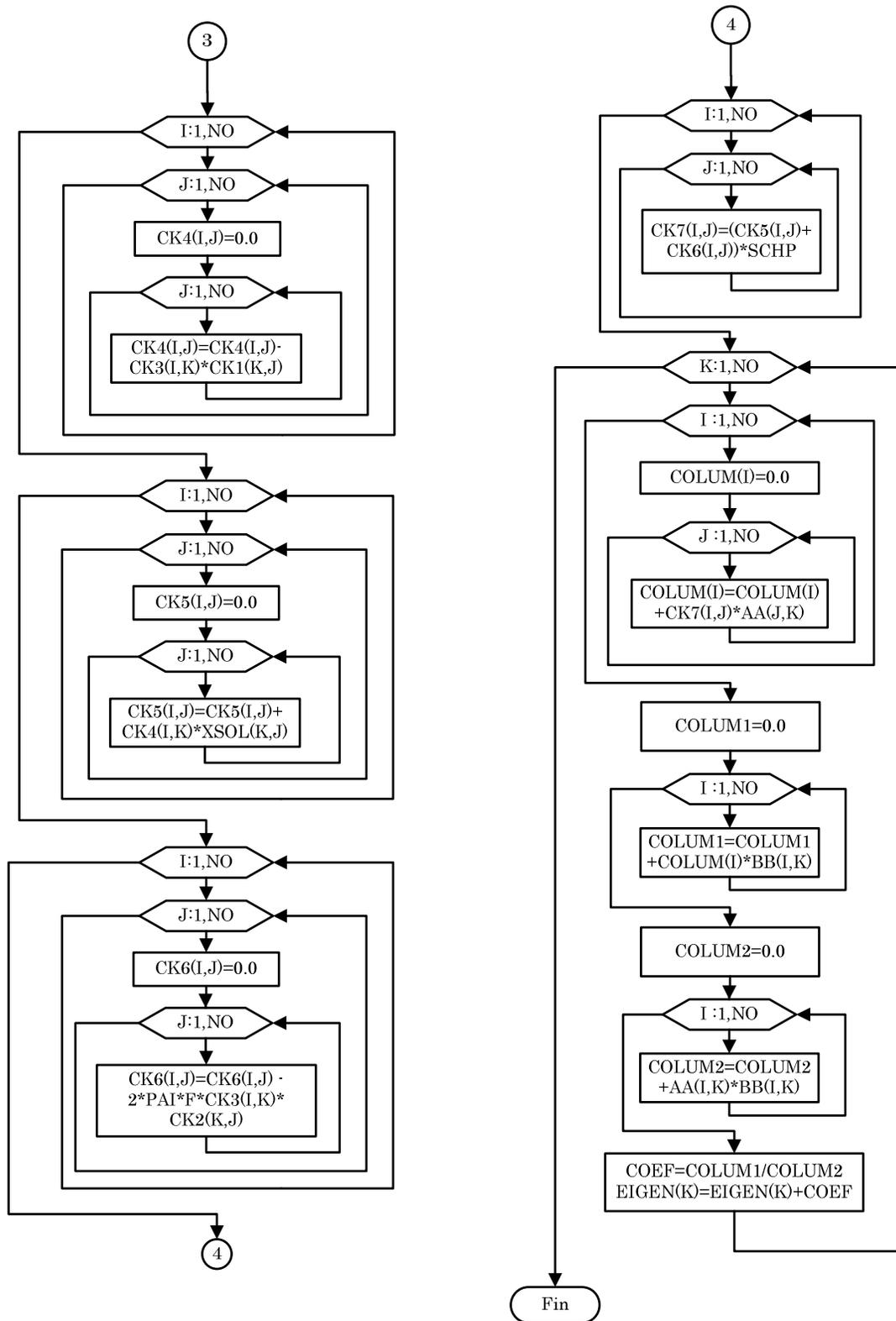


C.4 SUBROUTINA SENSI

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  
-0.03111,0.11280,1.00000,1.00000  
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 sólo 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 9o. 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  AI1= .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
VMQQ= .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

```

V1R= .0763  .1449  V1X= .0420  .0797  V1RD= .1449  V1RQ= .0763  V1XD= .0797  V1XQ= .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      FIRQ= -.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-----
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 LA FRECUENCIA
C      UTILIZANDO EL MODELO LINEAL DE QUINTO
C      ORDEN QUE CONSTA DE UNA MÁQUINA DE INDUCCIÓN,
C      EN MODO GENERADOR
C-----
C ESTE PROGRAMA CONSTA DE TRES SUBRUTINAS,
C LAS CUALES SON:
C - OPOINT
C - KMATRIX
C - CHARA
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      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      AII= 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      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      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      EVECTINV= 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 GENVESTAS
USE MSIMS

```

```

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,NOR,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, VID, 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, LDA, LDAINV, VRED, VREDD, VREDQ, RRED
COMMON XRED, ZRED, ZMQ, AIT, AIDT, AIQT, VMO, VMQD, VMQO
COMMON SRED, SMQ, PRED, QRED, PMQ, QMQ, ZMC, VC, AIC, AIDC
COMPLEX V, V1, V1R, V1X, V2, V1I, V12, V13, 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          PROGRAMA PRINCIPAL
C-----
OPEN(5, FILE='V8PG.DAT')
OPEN(6, FILE='V8PG.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 PARÁMETERS DEL GENERADOR PARA LA
C NUEVA BASE
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          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
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          SUBRUTINA 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          CÁLCULO DE LOS EIGENVALORES
C-----
WRITE(6,201)(EVAL(I),EVALT(I),I=1,N0)
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          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          CÁLCULO DE LOS EIGENVECTORES DERECHOS
C-----
DO 203 I=1,N0
WRITE(6,201)(EVEC(J,I),EVECT(J,I),J=1,N0)
WRITE(6,202)
203  CONTINUE
C-----
C          CÁLCULO DE LOS EIGENVECTORES IZQUIERDOS
C-----
NOR=9
LDA=10
LDAINV=10
CALL LINGC(NOR,EVEC,LDA,EVECINV,LDAINV)
CALL LINGC(NOR,EVECT,LDA,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          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 216
                      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)
211  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
C  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, FIRO, 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, VID, 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
COMPLEX V, V1, V1R, V1X, V2, V11, V12, V13, 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
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 MÁQUINA
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 MÁQUINA-CAPACITOR
          ZMC=(ZMQ*ZC)/(ZMQ+ZC)
C  IMPEDANCIA DE LA RED DE TRANSMISIÓN
          ZRED=CMPLX (RRED, XRED)
C  IMPEDANCIA TOTAL DEL SISTEMA MÁQUINA BUS INFINITO
C  CON MODELADOP DE RED D TRANSMISIÓN
          ZT=ZMC+ZRED
C-----
C  NOTA: EL "SIGNO MENOS" EN LA SIGUIENTE FORMULA
C  INDICA QUE LAS ECUACIONES QUE SE EMPLEARON PARA
C  EL MODELO DE UN MOTOR FUERON DE UN GENERADOR POR
C  LO QUE YA SEA LA SIMULACIÓN DE LA MÁQUINA COMO
C  MOTOR O COMO GENERADOR.
C-----
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
C  CALCULAR EL VALOR DE LA CAIDA DE TENSIÓN
C  EN LA IMPEDANCIA DE LA RED DE TRANSMISIÓN
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  MÁQUINA Y EL CAPACITOR.
C-----
          VMQ=V-VRED
          VMQD=AIMAG (VMQ)
          VMQQ=REAL (VMQ)
C-----
C  COMO EL CAPACITOR Y LA IMPEDANCIA TOTAL DE LA
C  MÁQUINA ESTAN EN PARALELO EL VALOR DEL VOLTAJE ES
C  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 MÁQUINA 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
      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 TENSION EN EL ROTOR (VOLTAJE
C INTERNO DE 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 DESLIZAMIENTO POR EL VOLTAJE INTERNO
      Vi1=SLIP*V2
      Vi1D=AIMAG(Vi1)
      Vi1=REAL(Vi1)
C-----
C CAÍDA DE TENSION 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 TENSION 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-----
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)
      FIRQ=REAL(FIROT)
C-----
C CÁLCULO DEL PAR ELECTROMAGNÉTICO TANTO
C EN ESTATOR COMO EN ROTOR
C-----
      TOR1=FISD*AIQ1-FISQ*AID1
      TOR2=FIRD*AIQ2-FIRQ*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=CMLPX(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)Vi1,Vi2,Vi3
257 FORMAT (/8X,'Vi1=',2F10.4,3X,'Vi2=',2F10.4,2X,
'Vi3=',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),FP1(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,AI1,AID2,AI2,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,COLUM1,COLUM2,ZLS,ZEQ,ZM,ZF,ZT,FIROT
COMMON AMAGS,V1Q,V2D,V2Q,V1R,V1X,V1RD,V1RQ,V1XD,DXR
COMMON V1XQ,Vi1,Vi1D,Vi1Q,Vi2,Vi2D,Vi2Q,Vi3,Vi3D,ZC
COMMON Vi3Q,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,Vi1,Vi2,Vi3,AI1,AI2,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,EVECTINV,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-----
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-----
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,DR,DS,SENS,COEF,AIQC
COMMON I,J,K,XC,NOR,LDA,LEFALL,IDENT,NNO,N1,NVE
COMMON NL,AKVAB1,AKVAB2,AKB,LDEVEC,P,Q,CF,KOUNT,PC
COMMON PFAC,N,S,SB,AI1,AI2,AIM,EVAL,VID,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,VMQC
COMMON SRED,SMQ,PRED,QRED,PMQ,QMQ,ZMC,VC,AIC,AIDC
COMMON COMPLEX V,V1,V1R,V1X,V2,V11,V12,V13,AI1,AI2,AIM,ZC
COMMON COMPLEX FIST,FIROT,ZM,ZEQ,ZLS,ZF,ZT,S,EVEC,ORDEN
COMMON COMPLEX SB,EIGEN,AA,BB,COLUM,COLUM1,COLUM2,COEF,VC
COMMON COMPLEX EVAL,EVALT,EVECT,EVECINV,EVECTINV,AMAGS,AIC
COMMON COMPLEX AMAGSB,MR1,MR2,FP1,FP2,VMQ,VRED,AIT,SRED
COMMON COMPLEX SMQ,ZMQ,ZRED,ZMC,SC
REAL MAGV
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,'*****',/)
DO 415 I=1,N
415 WRITE(6,416)(A(I,J),J=1,N)
416 FORMAT(5X,9F12.4)
C-----

```

```

C-----
C MATRIZ A TRANSPUESTA
C-----
DO 417 I=1,N
DO 417 J=1,N
XSOL(I,J)=A(I,J)
417 AET(I,J)=A(I,J)
WRITE(6,418)
418 FORMAT(/,18X,'*****',/19X,'MATRIZ
CARACTERISTICA "A" TRANSPUESTA',/18X,
'*****',/)
DO 419 I=1,N
419 WRITE(6,420)(AET(I,J),J=1,N)
420 FORMAT(5X,9F12.4)
RETURN
END
C-----
C "INVERT"
C SUBROUTINA PARA LA INVERSION DE MATRICES CON
C DOBLE PRECISION
C-----
SUBROUTINE INVERT(N,CK1,CK3)
C-----
DECLARACION LOS DATOS
C-----
DIMENSION CK1(10,10),CK3(10,10),A(20,20)
C-----
DESARROLLO DE LA SUBROUTINA
C-----
N=9
N2=N
N1=N
DO 10 I=1,N1
DO 5 J=1,N1
A(I,J)=CK1(I,J)
A(I,N1+J)=0.0
5 CONTINUE
A(I,N1+I)=1.0
10 CONTINUE
125 FORMAT(8F10.5)
N2P=N2*2
DO 100 I=1,N1
T=A(I,I)
DO 20 K=1,N2P
A(I,K)=A(I,K)/T
20 CONTINUE
DO 30 L=1,N1
IF(L.EQ.I)GOTO 31
AK=-A(L,I)
DO 32 K=1,N2P
A(L,K)=A(L,K)+A(I,K)*AK
32 CONTINUE
31 CONTINUE
30 CONTINUE
100 CONTINUE
DO 120 I=1,N1
DO 120 J=1,N1
CK3(I,J)=A(I,N1+J)
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 QUINTO
C          ORDEN QUE CONSTA DE UNA MÁQUINA DE INDUCCIÓN,
C          EN MODO GENERADOR
C-----
C ESTE PROGRAMA CONSTA DE OCHO SUBROUTINAS:
C LAS CUALES SON:
C - OPOINT
C - KMATRIX
C - CHARA
C - INVERT
C - SOLUC
C - OUTP
C - RUNKUT
C - PCT
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          RRRED= 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          ZEQL= Impedancia total del Generador.
C          ZMQ= ZEQL
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          AII= 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          Vi1= Caída de Tensión debida al deslizamiento
C          Vi1D= Caída de Tensión debida al deslizamiento en
C          el eje d.
C          Vi1Q= Caída de Tensión debida al deslizamiento en
C          el eje q.
C          Vi2= Caída de Tensión debida a la Resistencia del
C          Rotor.
C          Vi2D= Caída de Tensión debida a la Resistencia del
C          Rotor en el eje d.
C          Vi2Q= Caída de Tensión debida a la Resistencia del
C          Rotor en el eje q.
C          Vi3= Caída de Tensión debida a la Reactancia del
C          Rotor.
C          Vi3D= Caída de Tensión debida a la Reactancia del
C          Rotor en el eje d.
C          Vi3Q= 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          CF= coeficiente de 1
C          KOUNT= Contador
C          PFC = 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 MAQGENVESTAS
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,VIQ,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 Vi1D,Vi1Q,Vi2,Vi2D,Vi2Q,Vi3,Vi3D,Vi3Q,VRED
COMMON VREDD,VREDQ,VMQ,RRRED,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='V8PG.DAT')
      OPEN(6,FILE='V8PG.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=',F10.5,2X,'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,DKS,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,FRED,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=CMLPX(VQ,VD)
      KOUNT=0
C-----
C          CÁLCULO DE LAS IMPEDANCIAS
C-----
210   REQ2=RMOT(2)/SLIP
C IMPEDANCIA EN EL ROTOR
      ZEQ=CMLPX(REQ2,XMOT(2))
C IMPEDANCIA DE MAGNETIZACIÓN
      ZM=CMLPX(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=CMLPX(RMOT(1),XMOT(3))
C IMPEDANCIA TOTAL DE LA MAQUINA
      ZEQ1=ZLS+ZM*ZEQ/(ZEQ+ZM)
      ZMQ=ZF+ZLS
C          ZC= IMPEDANCIA DEL CAPACITOR
      ZC=CMLPX(0.0,-XC)
C          ZMC= IMPEDANCIA DE LA MAQUINA-CAPACITOR
      ZMC=(ZMQ*ZC)/(ZMQ+ZC)
C IMPEDANCIA DE LA RED DE TRANSMISION
      ZRED=CMLPX(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 MÁQUINA 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 MÁQUINA 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
C CORRIENTE EN EL ROTOR
      AI2=(VMQ+ZLS*AI1)/ZEQ
      AID2=AIMAG(AI2)
      AIQ2=REAL(AI2)
C
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
      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 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 DESLIZAMIENTO POR EL VOLTAJE INTERNO
      V1=SLIP*V2
      VID=AIMAG(V1)
      VI1=REAL(V1)
C CAÍDA DE TENSION DEBIDA AL PRODUCTO DE LA
C RESISTENCIA EN EL ROTOR POR EL VOLTAJE
C INTERNO
      V12=RMOT(2)*AI2
      V12D=AIMAG(V12)
      V12Q=REAL(V12)
C CAÍDA DE TENSION DEBIDA AL PRODUCTO DE LA
C REACTANCIA POR EL VOLTAJE INTERNO
      V13=AI2*SLIP*XMOT(2)
      V13D=AIMAG(V13)
      V13Q=REAL(V13)
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
C FLUJOS EN EL ROTOR
      FIROT=XMOT(1)*AI1+(XMOT(1)+XMOT(2))*AI2
      FIRD=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=FIRD*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
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 (///, 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)
WRITE (6, 258) F1ST, FIROT
258 FORMAT (///7X, 'F1ST=', 2F10.4, 1X, 'FIROT=', 2F10.4)
WRITE (6, 259) F1SD, FISQ
259 FORMAT (/7X, 'F1SD=', F10.4, 12X, 'FISQ=', 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, FISQ
COMMON /S4/FIRD, FIRQ, XMOT (4)
DOUBLE PRECISION A, CK3
EXTERNAL FCT, OUTP
COMPLEX A11, A12, 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 (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,VREDO,VMQ,RRED,ZRED,AIDT,AIQT,AIC
COMMON VMQD,VMQO,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 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-----
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 CONFECCIONADO 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)

```

```

C DONDE:
C Y(1)= FLUJO D DEL ESTATOR
C Y(2)= FLUJO Q DEL ESTATOR
C Y(3)= FLUJO D DEL ROTOR
C Y(4)= FLUJO Q DEL ROTOR
C Y(5)= VELOCIDAD
C Y(6)= CORRIENTE EN D DE LA LINEA
C Y(7)= CORRIENTE EN Q DE LA LINEA
C Y(8)= VOLTAJE EN D DEL CAPACITOR
C Y(9)= VOLTAJE EN Q DEL CAPACITOR
      DO 96 L=1, INT(NI)
C-----
C LLENADO DE LOS FACTORES DE PESO Y
C LLAMADO DE LA SUBROUTINA "RUNKUT"
C-----
DO 120 I=1,N81
120 DERY(I)=1.D0/N81
CALL RUNKUT(PRMT,Y,DERY,N81,IHLF,FCT,OUTP,AUX)
      IF(IHLF.GT.11) GOTO 130
      IF(IHLF.EQ.11) GOTO 130
WRITE(6,250)T(NS),Y(1),Y(2),Y(3),Y(4),Y(5),Y(6),Y(7),Y(8),Y(
9),PE
250 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,F20.15,3X,F20
.15,3X,F20.15)
      IF(T(NS).GE.PRMT(2)) GOTO 130
      PRMT(1)=T(NS)
96 CONTINUE
130 RETURN
      END
C-----
C LLAMADO DE SUBROUTINA OUTP
C-----
SUBROUTINE OUTP(X,IHLF,PRMT)
C-----
C DECLARACION LOS DATOS
C-----
DIMENSION PRMT(5)
COMMON /S1/NS,T(900)
DOUBLE PRECISION X,PRMT,T
C-----
C DESARROLLO DE LA SUBROUTINA
C-----
X=IDINT(X*1000.0 + 0.5)
X=X/1000.0
IF(IHLF.EQ.13)GOTO 10
IF(IHLF.EQ.12)GOTO 30
IF(IHLF.EQ.11)GOTO 50
TS=PRMT(3)*NS
IF(X.LT.TS)GOTO 70
NS=NS+1
T(NS)=X
PRMT(5)= 1.D0
GOTO 70
10 WRITE(6,20)
20 FORMAT(//,10X,'ERROR EN EL SIGNO DE H O EN EL SIGNO
DE',/10X,'XEND, O X ES MAYOR QUE XEND',//)
GOTO 70
30 WRITE(6,40)
40 FORMAT(//,10X,'ERROR YA QUE X=XEND O H=0',//)
GOTO 70
50 WRITE(6,60)
60 FORMAT(//,10X,'ERROR EN LA ULTIMA FILA DE
RESULTADOS',//,'YA QUE SON NECESARIAS MAS DE 10
BISECCIONES',//,'DEL INCREMENTO INICIAL PARA LLEGAR A UNA
APROXIMACION',//,
'SATISFACTORIA POR LO QUE NO SE IMPRIME',//)
70 RETURN
      END
C-----
C SUBROUTINA DE INTEGRACION
C-----
SUBROUTINE RUNKUT(PRMT,Y,DERY,NDIM,IHLF,FCT,OUTP,AUX)
C-----
C DECLARACION LOS DATOS
C-----
DIMENSION Y(20),DERY(20),AUX(8,1),A(4),B(4),C(4)
DIMENSION PRMT(5)
DOUBLE PRECISION PRMT,Y,DERY,AUX,A,B,C,X
DOUBLE PRECISION XEND,H,AJ,BJ,CJ,R1,R2,DELT
C-----
C DESARROLLO DE LA SUBROUTINA
C-----
DO 1 I = 1,NDIM
      AUX(8,I) = 0.066666666666666667D0*DERY(I)
      X = PRMT(1)
      XEND = PRMT(2)
      H = PRMT(3)
      PRMT(5) = 0.D0
      CALL FCT(Y,DERY)
C-----
C PRUEBA DE ERROR
C-----
IF (H*(XEND - X))38,37,2
C-----

```

```

C PREPARACIONES PARA EL METODO
C RUNGE-KUTTA
C-----
2      A(1) = 0.5D0
      A(2) = 0.29289321881345248D0
      A(3) = 1.7071067811865475D0
      A(4) = 0.166666666666666667D0
      B(1) = 2.D0
      B(2) = 1.D0
      B(3) = 1.D0
      B(4) = 2.D0
      C(1) = 0.5D0
      C(2) = 0.29289321881345248D0
      C(3) = 1.7071067811865475D0
      C(4) = 0.5D0
C-----
C PREPARACIONES DEL PRIMER PASO
C DEL RUNGE -KUTTA
C-----
DO 3 I = 1,NDIM
      AUX(1,I) = Y(I)
      AUX(2,I) = DERY(I)
      AUX(3,I) = 0.D0
3      AUX(6,I) = 0.D0
      IREC = 0
      H = H + H
      IHLF = - 1
      ISTEP = 0
      IEND = 0
C-----
C INICIO DE UN PASO DEL RUNGE - KUTTA
C-----
4      IF ((X + H - XEND)*H)7,6,5
5      H = XEND - X
6      IEND = 1
C-----
C RECORDANDO LOS VALORES INICIALES DE
C ESTE PASO
C-----
7      CALL OUTP(X,IREC,PRMT)
      IF (PRMT(5))40,8,40
8      ITEST = 0
9      ISTEP = ISTEP + 1
C-----
C INICIO DEL LAZO MAS INTERNO DEL
C RUNGE-KUTTA
C-----
J = 1
10     AJ = A(J)
      BJ = B(J)
      CJ = C(J)
      DO 11 I = 1,NDIM
      R1 = H*DERY(I)
      R2 = AJ*(R1 - BJ*AUX(6,I))
      Y(I) = Y(I)+R2
      R2 = R2 + R2 + R2
11     AUX(6,I) = AUX(6,I) + R2 - CJ*R1
      IF (J - 4)12,15,15
12     J = J + 1
      IF (J - 3)13,14,13
13     X = X + 0.5D0*H
14     CALL FCT(Y,DERY)
      GOTO 10
C-----
C FIN DEL LAZO MAS INTERNO DEL RUNGE-KUTTA
C PRUEBA DE EXACTITUD
C-----
15     IF (ITEST)16,16,20
C-----
C EN EL CASO ITEST=0 NO HAY POSIBILIDAD DE
C PRUEBA DE EXACTITUD
C-----
16     DO 17 I = 1,NDIM
17     AUX(4,I) = Y(I)
      ITEST = 1
      ISTEP = ISTEP + ISTEP - 2
18     IHLF = IHLF + 1
      X = X - H
      H = 0.5D0*H
      DO 19 I = 1,NDIM
      Y(I) = AUX(1,I)
      DERY(I) = AUX(2,I)
19     AUX(6,I) = AUX(3,I)
      GOTO 9
C-----
C EN EL CASO ITEST=1 LA PRUEBA DE EXACTITUD ES
C POSIBLE
C-----
20     IMOD = ISTEP/2
      IF (ISTEP - IMOD - IMOD)21,23,21
21     CALL FCT(Y,DERY)
      DO 22 I = 1,NDIM
      AUX(5,I) = Y(I)

```

```

22      AUX(7,I) = DERY(I)
      GOTO 9
C-----
C CÁLCULO DEL VALOR DE PRUEBA DELT
C-----
23      DELT = 0.00
      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) = 0.00
      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)=0.000
      U(2)=0.000
      U(3)=0.000
      U(4)=0.000
      U(5)=0.0500
      U(6)=0.000
      U(7)=0.000
      U(8)=0.000
      U(9)=0.000
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

```

PROGRAMA *“estabilidad.for”*
ADAPTADO DE *“frecuencia.for [11]”*
PARA UN MODELO LINEAL DE
QUINTO ORDEN

APÉNDICE E

VALORES PARA LOS MODOS DE OSCILACIÓN DE LOS AEROGENERADORES

En este apéndice se presenta el cálculo de los eigenvalores, amortiguamiento y frecuencia para los casos estable, inestable y punto crítico de los aerogeneradores Vestas modelo V-27 225kW/50kW – 480V- 60Hz.

E.1 MODOS DE OSCILACION DEL GENERADOR V-27 50kW – 480V- 60Hz.

Cálculo de los eigenvalores, amortiguamiento y frecuencia considerando un valor de deslizamiento $S=-0.005162$, donde el generador se encuentra trabajando en estado de condición normal (caso estable):

Para los modos 1 y 2 la frecuencia es:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\pm 375.7475}{2\pi} = \pm 59.80207198 \quad (\text{E.1})$$

La frecuencia para los modo 3 y 4 es de:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\pm 38.45736}{2\pi} = \pm 6.120678942 \quad (\text{E.2})$$

Para el modo 5 la frecuencia obtenida es:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{0}{2\pi} = 0 \quad (\text{E.3})$$

Para obtener los valores de amortiguamiento en los diferentes modos para el generador de 8 polos con un valor de deslizamiento de $S= -0.005162$, se toman los eigenvalores obtenidos mediante el programa *estabilidad.for* y sustituyendo estos valores mediante la ecuación 4.23:

Para los modos 1 y 2 el amortiguamiento es:

$$\xi = \frac{-(-57.23683)}{\sqrt{(-57.23683)^2 + (\pm 375.7475)^2}} = 0.154126562 \quad (\text{E.4})$$

Para los modos 3 y 4 el amortiguamiento es:

$$\xi = \frac{-(-4.852478)}{\sqrt{(-4.852478)^2 + (38.45736\pm)^2}} = 0.1251855366 \quad (\text{E.5})$$

Para el modo 5 el amortiguamiento es:

$$\xi = \frac{-(-9.801091)}{\sqrt{(-9.801091)^2 + (0)^2}} = -1 \quad (\text{E.6})$$

Cálculo de los eigenvalores, amortiguamiento y frecuencia considerando un valor de deslizamiento $S=-0.026692$, donde el generador presenta un comportamiento fuera de operación (caso inestable).

Para obtener los valores de frecuencia en los diferentes modos para el generador de 8 polos con un valor de deslizamiento de $S= -0.00516$, se toman los eigenvalores obtenidos mediante el programa *estabilidad.for* y sustituyendo estos valores mediante la ecuación 4.24:

Para los modos 1 y 2 la frecuencia es:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\pm 375.7475}{2\pi} = \pm 59.8020719 \text{ 8} \quad (\text{E.7})$$

Para los modos 3 y 4 la frecuencia es:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\pm 18.44575}{2\pi} = \pm 2.935732292 \quad (\text{E.8})$$

Para el modo 5 la frecuencia es obtenida con la ecuación es:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{0}{2\pi} = 0 \quad (\text{E.9})$$

Para obtener los valores de amortiguamiento en los diferentes modos para el generador de 8 polos con un valor de deslizamiento de $S = -0.00516$, se toman los eigenvalores obtenidos mediante el programa *estabilidad.for* y sustituyendo estos valores mediante la ecuación 4.23:

Para los modos 1 y 2 el amortiguamiento es:

$$\xi = \frac{-(-57.01706)}{\sqrt{(-57.01706)^2 + (\pm 375.7223)^2}} = 0.1535313323 \quad (\text{E.10})$$

Para los modos 3 y 4 el amortiguamiento es:

$$\xi = \frac{-(-9.973501)}{\sqrt{(-9.973501)^2 + (\pm 18.44575)^2}} = 0.6427498235 \quad (\text{E.11})$$

Para el modo 5 el amortiguamiento es:

$$\xi = \frac{-(0.00237175)}{\sqrt{(0.00237175)^2 + (0)^2}} = 1 \quad (\text{E.12})$$

El deslizamiento considerado para un estado de operación estable pero refiriéndose a un punto crítico es de $S = -0.026610$, obteniéndose:

Para los modos 1 y 2 la frecuencia es:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\pm 375.7203}{2\pi} = \pm 59.79774296 \quad (\text{E.13})$$

Para los modos 3 y 4 la frecuencia es:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\pm 18.45286}{2\pi} = \pm 2.936863883 \quad (\text{E.14})$$

Para el modo 5 la frecuencia es obtenida con la ecuación es:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{0}{2\pi} = 0 \quad (\text{E.15})$$

Para obtener los valores de amortiguamiento en los diferentes modos para el generador de 8 polos con un valor de deslizamiento de $S = -0.02661$, se toman los eigenvalores obtenidos mediante el programa *estabilidad.for* y sustituyendo estos valores mediante la ecuación 4.23:

Para los modos 1 y 2 el amortiguamiento es:

$$\xi = \frac{-(-57.01707)}{\sqrt{(-57.01707)^2 + (\pm 375.7203)^2}} = 0.1535321964 \quad (\text{E.16})$$

Para los modos 3 y 4 el amortiguamiento es:

$$\xi = \frac{-(-9.954452)}{\sqrt{(-9.954452)^2 + (\pm 18.45286)^2}} = 0.6406686861 \quad (\text{E.17})$$

Para el modo 5 el amortiguamiento es:

$$\xi = \frac{-(0.03536873)}{\sqrt{(0.03536873)^2 + (0)^2}} = 1 \quad (\text{E.18})$$

E.2 MODOS DE OSCILACION DEL GENERADOR V-27 225kW – 480V- 60Hz

A continuación se presentan los valores del comportamiento del generador de 6 polos en modelo de 5° orden.

Considerando un valor de deslizamiento $S=-0.002667$, donde el generador se encuentra trabajando en estado de condición normal (caso estable), se obtuvieron los eigenvalores, amortiguamiento y frecuencia:

Para obtener los valores de frecuencia en los diferentes modos para el generador de 6 polos con un valor de deslizamiento de $S= -0.002667$, se toman los eigenvalores obtenidos mediante el programa *estabilidad.for* y sustituyendo estos valores mediante la ecuación 4.24:

Para los modos 1 y 2 la frecuencia es:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\pm 376.6882}{2\pi} = \pm 59.95178903 \quad (\text{E.19})$$

Para los modos 3 y 4 la frecuencia es:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\pm 77.51788}{2\pi} = \pm 12.33735378 \quad (\text{E.20})$$

Para el modo 5 la frecuencia es obtenida con la ecuación es:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{0}{2\pi} = 0 \quad (\text{E.21})$$

Para obtener los valores de amortiguamiento en los diferentes modos para el generador de 8 polos con un valor de deslizamiento de $S= -0.002667$, se toman los eigenvalores obtenidos mediante el programa *estabilidad.for* y sustituyendo estos valores mediante la ecuación 4.23:

Para los modos 1 y 2 el amortiguamiento es:

$$\xi = \frac{-(-11.41481)}{\sqrt{(-11.41481)^2 + (\pm 376.6882)^2}} = 0.0331699582 \quad (\text{E.22})$$

Para los modos 3 y 4 el amortiguamiento es:

$$\xi = \frac{-(-5.537613)}{\sqrt{(-5.537613)^2 + (\pm 77.51788)^2}} = 0.0716195676 \quad (\text{E.23})$$

Para el modo 5 el amortiguamiento es:

$$\xi = \frac{-(-11.36841)}{\sqrt{(-11.36841)^2 + (0)^2}} = -1 \quad (\text{E.24})$$

Para un valor de deslizamiento $S=-0.030967$ donde el generador presenta un comportamiento fuera de operación (caso inestable), se obtuvieron los eigenvalores, amortiguamiento y frecuencia.

Para obtener los valores de frecuencia en los diferentes modos para el generador de 6 polos con un valor de deslizamiento de $S= -0.030967$, se toman los eigenvalores obtenidos mediante el programa *estabilidad.for* y sustituyendo estos valores mediante la ecuación 4.24:

Para los modos 1 y 2 la frecuencia es:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\pm 376.6972}{2\pi} = \pm 59.95322143 \quad (\text{E.25})$$

Para los modos 3 y 4 la frecuencia es:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\pm 2.31860}{2\pi} = \pm 4.188735285 \quad (\text{E.26})$$

Para el modo 5 la frecuencia es obtenida con la ecuación es:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{0}{2\pi} = 0 \quad (\text{E.27})$$

Para obtener los valores de amortiguamiento en los diferentes modos para el generador de 8 polos con un valor de deslizamiento de $S = -0.002667$, se toman los eigenvalores obtenidos mediante el programa *estabilidad.for* y sustituyendo estos valores mediante la ecuación 4.23:

Para los modos 1 y 2 el amortiguamiento es:

$$\xi = \frac{-(-11.20754)}{\sqrt{(-11.20754)^2 + (\pm 376.6972)^2}} = 0.02976529608 \quad (\text{E.28})$$

Para los modos 3 y 4 el amortiguamiento es:

$$\xi = \frac{-(-11.587)}{\sqrt{(-11.587)^2 + (\pm 26.31860)^2}} = 0.4903450540 \quad (\text{E.29})$$

Para el modo 5 el amortiguamiento es:

$$\xi = \frac{-(0.3180242)}{\sqrt{(0.3180242)^2 + (0)^2}} = 1 \quad (\text{E.30})$$

Para obtener los valores de frecuencia en los diferentes modos para el generador de 6 polos con un valor de deslizamiento de $S = -0.030320$, se toman los eigenvalores obtenidos mediante el programa *estabilidad.for* y sustituyendo estos valores mediante la ecuación 4.24:

Para los modos 1 y 2 la frecuencia es:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\pm 376.6974}{2\pi} = \pm 59.95325326 \quad (\text{E.31})$$

Para los modos 3 y 4 la frecuencia es:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\pm 26.48170}{2\pi} = \pm 4.214693456 \quad (\text{E.32})$$

Para el modo 5 la frecuencia es obtenida con la ecuación es:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{0}{2\pi} = 0 \quad (\text{E.33})$$

Para obtener los valores de amortiguamiento en los diferentes modos para el generador de 8 polos con un valor de deslizamiento de $S = -0.030320$, se toman los eigenvalores obtenidos mediante el programa *estabilidad.for* y sustituyendo estos valores mediante la ecuación 4.23:

Para los modos 1 y 2 el amortiguamiento es:

$$\xi = \frac{-(-11.20975)}{\sqrt{(-11.20975)^2 + (\pm 376.6974)^2}} = 0.02977115484 \quad (\text{E.34})$$

Para los modos 3 y 4 el amortiguamiento es:

$$\xi = \frac{-(-11.41958)}{\sqrt{(-11.41958)^2 + (\pm 26.48170)^2}} = 0.4779474414 \quad (\text{E.35})$$

Para el modo 5 el amortiguamiento es:

$$\xi = \frac{-(0.01371023)}{\sqrt{(-0.01371023)^2 + (0)^2}} = -1 \quad (\text{E.36})$$

APÉNDICE F

COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS LENGUAJE FORTRAN Y EN MATLAB

Dentro de este apéndice se plasmó parte de los resultados que se obtuvieron durante los análisis de estabilidad con la finalidad de obtener las diferencias que se pueden llegar a presentar al usar dos tipos de programas.

Los valores utilizados fueron:

0.02655, 0.00521
1.30930, 0.16131, 0.03255
-0.003162, 0.464811, 67.0000, 1.00000
1.00000,0
3.14159, 60.00000, 1.0

Los valores que se muestran a continuación pertenecen a los resultados del programa utilizado en FORTRAN, en el cual se pueden observar los valores de la matriz característica, la matriz característica transpuesta, los eigenvalores de ambas matrices y los eigenvectores derechos de ambas matrices.

MATRIZ CARACTERISTICA "A"

$$\begin{bmatrix} -56.8163 & 9.9263 & -2879.4130 & -2810.7290 & 258.8223 \\ 50.5842 & -10.1731 & 2564.6340 & 2503.6140 & -265.2568 \\ 2879.4130 & 2810.7290 & -56.8163 & 9.9263 & 1856.3600 \\ -2564.6340 & -2503.6140 & 50.5842 & -10.1731 & -1902.5100 \\ -.8270 & -.7838 & .1153 & 1.1702 & .0000 \end{bmatrix}$$

MATRIZ CARACTERISTICA "A TRANSPUESTA"

$$\begin{bmatrix} -56.8163 & 50.5842 & 2879.4130 & -2564.6340 & -.8270 \\ 9.9263 & -10.1731 & 2810.7290 & -2503.6140 & -.7838 \\ -2879.4130 & 2564.6340 & -56.8163 & 50.5842 & .1153 \\ -2810.7290 & 2503.6140 & 9.9263 & -10.1731 & 1.1702 \\ 258.8223 & -265.2568 & 1856.3600 & -1902.5100 & .0000 \end{bmatrix}$$

EIGENVALORES

MATRIZ "A"

MATRIZ "A TRANSPUESTA"

-.57322470000E+02	-.37576950000E+03	-.57321720000E+02	-.37576930000E+03
-.57322470000E+02	-.37576950000E+03	-.57321720000E+02	-.37576930000E+03
-.46482000000E+01	-.44301280000E+02	-.46486240000E+01	-.44301200000E+02
-.46482000000E+01	-.44301280000E+02	-.46486240000E+01	-.44301200000E+02
-.10036350000E+02	-.00000000000E+00	-.10036870000E+02	-.00000000000E+00

EIGENVECTORES DERECHOS

MATRIZ A

MATRIZ A TRANSPUESTA

.50279200000E-03	.52453050000E+00	.50548010000E+00	.00000000000E+00
.10523830000E-02	-.46721500000E+00	.49327840000E+00	-.97602410000E-02
.53104040000E+00	.00000000000E+00	.45539740000E-03	.50531780000E+00
-.47388680000E+00	-.15017380000E-02	.10335680000E-01	.49306900000E+00
.15859950000E-04	.13136980000E-02	.14160950000E-01	.47961860000E-01

.50279200000E-03	-.52453050000E+00	.50548010000E+00	.00000000000E+00
.10523830000E-02	.46721500000E+00	.49327840000E+00	.97602410000E-02
.53104040000E+00	.00000000000E+00	.45539740000E-03	-.50531780000E+00
-.47388680000E+00	.15017380000E-02	.10335680000E-01	-.49306900000E+00
.15859950000E-04	-.13136980000E-02	.14160950000E-01	-.47961860000E-01

-.20034810000E+00	-.73851650000E-04	-.20348860000E-01	.13134690000E-01
.19152410000E+00	.55187700000E-03	-.20177900000E-01	.15317520000E-01
-.66893240000E+00	.15898950000E-02	.16909860000E-01	-.15869500000E+00
.68951140000E+00	00000000000E+00	.18915330000E-01	-.17778650000E+00
-.17501820000E-02	-.16640170000E-01	97022460000E+00	.00000000000E+00

-.20034810000E+00	.73851650000E-04	-.20348860000E-01	-.13134690000E-01
.19152410000E+00	-.55187700000E-03	-.20177900000E-01	-.15317520000E-01
-.66893240000E+00	-.15898950000E-02	.16909860000E-01	.15869500000E+00
.68951140000E+00	00000000000E+00	.18915330000E-01	.17778650000E+00
-.17501820000E-02	.16640170000E-01	97022460000E+00	.00000000000E+00

-.69781140000E+00	.00000000000E+00	.65611830000E+00	.00000000000E+00
.71540750000E+00	.00000000000E+00	.73702340000E+00	.00000000000E+00
.30796530000E-01	.00000000000E+00	-.10889050000E+00	.00000000000E+00
-.17404570000E-01	.00000000000E+00	-.11969000000E+00	.00000000000E+00
.45163810000E-04	.00000000000E+00	.11073280000E-01	.00000000000E+00

A continuación se observan los resultados obtenidos en el programa de MATLAB donde se colocan los mismos valores que se utilizaron en fortran para así poder observar la diferencia que puede existir entre ambos programas.

VALORES DE MATLAB

MATRIZ CARACTERISTICA "A"

$$1.0e+003 * \begin{bmatrix} -0.0568 & 0.0099 & -2.8794 & -2.8107 & 0.2588 \\ 0.0506 & -0.0102 & 2.5646 & 2.5036 & -0.2653 \\ 2.8794 & 2.8107 & -0.0568 & 0.0099 & 1.8564 \\ -2.5646 & -2.5036 & 0.0506 & -0.0102 & -1.9025 \\ -0.0008 & -0.0008 & 0.0001 & 0.0012 & 0 \end{bmatrix}$$

MATRIZ CARACTERISTICA "A" TRANSPUESTA

$$1.0e+003 * \begin{bmatrix} -0.0568 & 0.0506 & 2.8794 & -2.5646 & -0.0008 \\ 0.0099 & -0.0102 & 2.8107 & -2.5036 & -0.0008 \\ -2.8794 & 2.5646 & -0.0568 & 0.0506 & 0.0001 \\ -2.8107 & 2.5036 & 0.0099 & -0.0102 & 0.0012 \\ 0.2588 & -0.2653 & 1.8564 & -1.9025 & 0 \end{bmatrix}$$

EIGENVALORES

MATRIZ A

1.0e+002 *

$$\begin{bmatrix} -0.5732 + 3.7576i \\ -0.5732 - 3.7576i \\ -0.1004 \\ -0.0465 + 0.4430i \\ -0.0465 - 0.4430i \end{bmatrix}$$

MATRIZ A TRANSPUESTA

1.0e+002 *

$$\begin{bmatrix} -0.5732 + 3.7576i \\ -0.5732 - 3.7576i \\ -0.1004 \\ -0.0465 + 0.4430i \\ -0.0465 - 0.4430i \end{bmatrix}$$

EIGENVECTORES DERECHOS DE LA MATRIZ A

$$\begin{bmatrix} -0.0005 - 0.5245i & -0.0005 + 0.5245i & 0.6978 & -0.2003 - 0.0002i & -0.2003 + 0.0002i \\ -0.0011 + 0.4672i & -0.0011 - 0.4672i & -0.7154 & 0.1915 + 0.0007i & 0.1915 - 0.0007i \\ -0.5310 & -0.5310 & -0.0308 & -0.6689 + 0.0016i & -0.6689 - 0.0016i \\ 0.4739 + 0.0015i & 0.4739 - 0.0015i & 0.0174 & 0.6895 & 0.6895 \\ -0.0000 - 0.0013i & -0.0000 + 0.0013i & -0.0000 & -0.0017 - 0.0166i & -0.0017 + 0.0166i \end{bmatrix}$$

EIGENVECTORES DERECHOS DE LA MATRIZ A TRANSPUESTA

$$\begin{bmatrix} 0.5055 & 0.5055 & -0.6561 & -0.0204 + 0.0131i & -0.0204 - 0.0131i \\ 0.4933 - 0.0098i & 0.4933 + 0.0098i & -0.7370 & -0.0202 + 0.0153i & -0.0202 - 0.0153i \\ 0.0005 + 0.5053i & 0.0005 - 0.5053i & 0.1089 & 0.0169 - 0.1587i & 0.0169 + 0.1587i \\ 0.0103 + 0.4931i & 0.0103 - 0.4931i & 0.1197 & 0.0189 - 0.1778i & 0.0189 + 0.1778i \\ 0.0142 + 0.0480i & 0.0142 - 0.0480i & -0.0118 & 0.9702 & 0.9702 \end{bmatrix}$$