

Técnica para la Generación Automática de Ecuaciones
Diferenciales No Autónomas para Representar el
Comportamiento Dinámico de Sistemas Eléctricos No-
Lineales Incorporando Herramientas Avanzadas de
Computo

TESIS

Que para obtener el Grado de

DOCTOR EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

Presenta

ANTONIO RAMOS PAZ

DR. J. AURELIO MEDINA RIOS

Director de Tesis

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

Enero del 2007

Agradecimientos

A mis Padres Antonio Ramos Yépez y Mirella Paz de Ramos quienes con su ejemplo y dedicación me han permitido lograr esta meta. Nunca podré pagar de ninguna manera todo lo que han hecho por mí. Mamá, por fin terminé. Papá te agradezco todos tus consejos.

A mi Asesor el Dr. J. Aurelio Medina Ríos, quien me permitió participar de su proyecto de investigación y con cuyas enseñanzas y consejos me ayudó a la culminación de esta Tesis.

Un agradecimiento especial Dr. Julio García Usaola, quien fungió como revisor externo de mi Tesis, a quien agradezco sus comentarios y sugerencias, los cuales enriquecieron este trabajo.

A mis compañeros M.C. Fernando Martínez y M.C. Juan Carlos Silva Chávez, con quienes compartieron conmigo su amistad. Ustedes hicieron que estos años de estudio fueran una experiencia inolvidable.

A la Coordinación de la Investigación Científica y Coordinación de Estudios de Posgrado de la U.M.S.N.H. quienes con su apoyo económico me permitieron la realización y difusión de esta Tesis.

A la Sra. Yolanda Pacheco, secretaria del Posgrado en Ingeniería Eléctrica, quien me apoyó en los trámites administrativos relacionados con este trabajo de Tesis, además de que siempre me animo a terminar este trabajo.

A mis Hermanos Celia María, Elsa Mireya, Beatriz Eugenia y Serafín, quienes me han apoyado en estos años de estudio y a mis cuñados Rafael, Juan Carlos y Rodolfo. Muy especialmente a Rafael por sus comentarios, observaciones y apoyo.

A los Profesores que participaron con revisores de mi Tesis, Dr. Claudio Rubén Fuerte Esquivel, Dr. J. Jesús Rico Melgoza, Dr. Norberto García Barriga, a quienes les agradezco sus consejos, observaciones y sugerencias en el desarrollo de esta Tesis.

Al Dr. Edmundo Barrera Cardiel quien siempre estuvo en los momentos en los cuales ocupaba un consejo. Gracias Dr. Barrera.

A mis compañeros del Instituto Vasco de Quiroga en especial al Mtro. Pedro Caballero Díaz, Mtro. Ernesto Magaña Lemus y muy especialmente a la Mtra. Magda González.

Al personal del Laboratorio de Sistemas Computacionales de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, en especial a los Maestros en Ciencias Eric Sadit y Mario Graff, quienes me permitieron tener en forma la red de cómputo que utilicé en este trabajo de Tesis.

Resumen

Esta Tesis presenta una metodología generalizada que permite la generación automática del conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias que describen la dinámica de redes eléctricas de gran escala tanto monofásicas como trifásicas en el dominio del tiempo, las cuales contienen elementos lineales, no lineales y variantes en el tiempo. Esta herramienta es aplicada al análisis del estado periódico estacionario de redes eléctricas monofásicas y trifásicas de gran escala así como al análisis de armónicos e redes eléctricas y al análisis de estabilidad transitoria. En el desarrollo de esta Tesis se aplican cuatro herramientas de alto impacto que permiten incrementar la eficiencia computacional así como la versatilidad de la metodología propuesta, las cuales son: Técnicas de aceleración de la convergencia de las variables de estado al Ciclo Límite, Técnicas de Procesamiento en Paralelo, Técnicas de Programación Orientada a Objetos y Técnicas de dispersidad.

Palabras clave: Metodología generalizada de Análisis en el Dominio del Tiempo, generación automática del conjunto de ecuaciones diferenciales, dominio del tiempo, Ciclo Límite, Programación Orientada a Objetos, Procesamiento en Paralelo, Técnicas de Dispersidad.

Abstract

This work introduces a novel methodology for the automatic generation of the set of Ordinary Differential Equations describing the dynamics behavior of single-phase and three-phase large power systems containing linear, non-linear and time-varying elements. This methodology is applied to the periodic steady state solution of single phase and three phase electric power systems, harmonic analysis and transient stability studies. For the development of this methodology, four high impact computational tools were applied to improve the computational efficiency of the proposed methodology, e.g. acceleration of the convergence of state variables to the Limit Cycle, parallel processing techniques, object oriented programming techniques and sparsity techniques.

Keywords: Generalized Methodology Time Domain Analysis, automatic generation of ordinary differential equation sets, Limit Cycle, Object Oriented Programming, Parallel Processing, Sparsity Techniques.

Contenido

Agradecimientos	iii
Resumen	iv
Abstract	v
Lista de Símbolos	x
Lista de Figuras	xi
Lista de Tablas	xiii
Lista de Publicaciones	xv
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Revisión del Estado del Arte	1
1.1.1 Simulación digital	1
1.1.2 Formación de las ecuaciones que describen la dinámica de una red eléctrica	2
1.1.3 Métodos de análisis	4
1.1.3.1 Métodos en el dominio del tiempo	4
1.1.3.2 Análisis en el dominio de la frecuencia	5
1.1.3.3 Análisis híbrido	5
1.1.4 Herramientas de alto impacto aplicadas en el análisis de sistemas eléctricos de potencia ..	5
1.1.4.1 Técnicas de Acercamiento Rápido al Estado Estacionario Periódico	5
1.1.4.1.1 Métodos de Fuerza Bruta	6
1.1.4.1.2 Métodos de Perturbación	6
1.1.4.1.3 Método de Balance Armónico	6
1.1.4.1.4 Métodos de Disparo	7
1.1.4.2 Programación Orientada a Objetos	8
1.1.4.3 Técnicas de dispersidad	9
1.1.4.4 Procesamiento en paralelo	10
1.2 Justificación	12
1.3 Objetivos	12
1.4 Aportaciones Originales	13
1.5 Descripción de los Capítulos	14
Capítulo 2. Herramientas Computacionales	16
2.1 Introducción	16
2.2 Técnicas de Manejo de Matrices Dispersas	16
2.2.1 Factorización	19
2.2.2 Esquemas de ordenamiento	21
2.3 Técnicas de Procesamiento en Paralelo	21
2.3.1 Eficiencia y velocidad	23
2.3.2 Aceleración relativa (<i>relative speed-up</i>)	23
2.3.3 Ley de Amdahl	23
2.3.4 Paralell Virtual Machine (PVM)	24
2.3.4.1 Características clave de PVM	26
2.3.4.2 Componentes del sistema	26
2.3.4.3 La consola PVM	27
2.3.4.4 Ejecución de un programa con PVM	27
2.3.5 Conceptos básicos sobre Multithreading (MT)	28

2.3.5.1 Concurrencia y paralelismo	29
2.3.5.2 Estructura de MT	30
2.3.5.3 Cancelación	30
2.3.5.4 Sincronización	30
2.4 Técnicas de Programación Orientada a Objetos	31
2.4.1 Principios y Filosofía de la Programación Orientada a Objetos	32
2.4.2 Clases y herencia de clases.....	32
2.4.3 Características de la Programación Orientada a Objetos	33
2.4.4 Ventajas de la POO respecto a la programación estructurada	34
2.5 Simulación en el dominio del tiempo.....	34
2.5.1 Métodos de solución de Ecuaciones Diferenciales Ordinarias	34
2.5.2 Proceso de determinación del estado estacionario periódico de redes eléctricas.....	37
2.5.3 Métodos Newton de Acercamiento Rápido al Estado Estacionario Periódico	37
2.5.3.1 Método Aproximación Directa (AD)	40
2.5.3.2 Método Diferenciación Numérica (DN)	40
2.6 Conclusiones.....	41
Capítulo 3. Técnica Para la Generación Automática de ODE's.....	43
3.1 Introducción.....	44
3.2 Representación monofásica de los elementos de un sistema eléctrico de potencia	46
3.2.1 Línea de transmisión	46
3.2.2 Banco de Capacitores	47
3.2.3 Rama magnetizante	48
3.2.3.1 Representación del efecto de saturación magnética en ramas magnetizantes	49
3.2.4 Generador	50
3.2.5 Transformador	51
3.2.6 Horno de arco eléctrico	52
3.2.7 Dispositivos FACTS.....	55
3.2.7.1 Reactor Controlado por Tiristores (RCT).....	55
3.2.7.2 Compensador serie controlado por tiristores (CSCT).....	57
3.2.7.3 Función de Conmutación en dispositivos FACTS	60
3.2.8 Modelado de cargas	61
3.2.8.1 Carga resistiva.....	61
3.2.8.2 Carga inductiva.....	62
3.2.8.3 Carga resistiva-inductiva-capacitiva	63
3.2.8.4 Modelo de cargas P Q	64
3.3 Representación trifásica de los elementos de un sistema eléctrico de potencia	65
3.3.1 Modelo del generador.....	65
3.3.2 Modelo de la línea de transmisión.....	71
3.3.2.1 Modelo de línea de longitud corta.....	71
3.3.2.2 Modelo de longitud media.....	72
3.3.3 Banco de capacitores trifásico.....	73
3.3.4 Modelo del transformador trifásico	75
3.3.5 Modelo de la Rama Magnetizante.....	77
3.3.6 Modelo del Horno de Arco Eléctrico	78
3.3.7 Modelos de Cargas trifásicas	79
3.3.7.1 Carga Resistiva en conexión estrella aterrizada	79

3.3.7.2 Carga inductiva conectada en estrella.....	80
3.3.7.3 Carga resistiva-inductiva-capacitiva	81
3.4 Técnica de Generación Automática de ODE's Propuesta	82
3.4.1 Lectura de archivo de datos	82
3.4.2 Validación de datos	86
3.4.3 Formación de las listas de objetos	87
3.4.4 Determinación de las corrientes incidentes en los nodos	90
3.4.5 Simulación eficiente.....	91
3.4.5.1 Aplicación de la técnica Newton de acercamiento rápido al Ciclo Límite de DN ...	95
3.4.5.2 Jacobiano Constante	99
3.4.5.3 Análisis eficiente de estabilidad transitoria.....	100
3.4.6 Generación de resultados	102
3.5 Análisis de la complejidad del método propuesto	103
3.6 Generalidades sobre el sistema computacional desarrollado.....	104
3.7 Conclusiones.....	105
Capítulo 4. Casos de Estudio.....	106
4.1 Introducción.....	106
4.2 Sistemas monofásicos	106
4.2.1 Caso de Estudio 4.1. Sistema de 3 nodos	106
4.2.2 Caso de Estudio 4.2: Sistema de 5 nodos con un RCT	108
4.2.3 Caso de Estudio 4.3: Sistema de prueba de IEEE de 14 nodos modificado	111
4.2.4 Caso de Estudio 4.4 Sistema de prueba de IEEE de 30 nodos modificado	112
4.2.5 Caso de Estudio 4.5: Sistema de prueba de IEEE de 57 nodos modificado	113
4.2.6 Caso de Estudio 4.6: Sistema de prueba de IEEE de 118 nodos modificado	113
4.3 Sistemas trifásicos	114
4.3.1 Caso de Estudio 4.7: Sistema trifásico de 3 nodos.....	114
4.3.2 Caso de Estudio 4.8: Sistema trifásico modificado de 14 nodos de IEEE	118
4.3.3 Caso de Estudio 4.9: Sistema trifásico modificado de 30 nodos de IEEE	120
4.3.4 Caso de Estudio 4.10: Sistema trifásico modificado de 118 nodos de IEEE	121
4.4 Análisis de estabilidad transitoria.....	124
4.4.1 Caso de Estudio 4.11. Sistema monofásico de 3 nodos. Falla en el nodo 2	124
4.4.2 Caso de Estudio 4.12. Sistema monofásico de 5 nodos. Falla en el nodo 5	126
4.4.3 Caso de Estudio 4.13: Sistema monofásico de 8 nodos con CSCT	129
4.4.4 Caso de Estudio 4.14: Máquina síncrona conectada a un bus infinito.....	132
4.4.5 Caso de Estudio 4.15: Sistema de IEEE de 14 nodos trifásico modificado	134
4.5 Validación de resultados	137
4.6 Conclusiones.....	141
Capítulo 5. Técnica de la Matriz de Diferencias Aplicada al Análisis de Redes Eléctricas	143
5.1 Introducción.....	143
5.2 Técnica de la Matriz de Diferencias (MD)	144
5.3 Aplicación de Técnicas de Dispersidad en el método MD	146
5.4 Casos de Estudio	148
5.4.1 Caso de Estudio 5.1. Generador alimentando a horno de arco eléctrico.....	148
5.4.2 Caso de Estudio 5.2. Sistema monofásico de tres nodos.....	151
5.4.3 Caso de Estudio 5.3. Máquina síncrona conectada a un bus infinito.....	155

5.5 Conclusiones	157
Capítulo 6. Aplicaciones de Procesamiento en Paralelo	159
6.1 Introducción.....	159
6.2 Modelado en el dominio de la frecuencia.....	160
6.3 Análisis de la respuesta a la frecuencia de redes eléctricas usando procesamiento en paralelo	161
6.3.1 Esquema para el cálculo de la respuesta a la frecuencia usando procesamiento en paralelo propuesto.....	162
6.3.2 Casos de estudio	165
6.3.2.1 Caso de Estudio 6.1. Sistema de 5 nodos.....	165
6.3.2.2 Caso de Estudio 6.2. Sistema modificado de IEEE de 14 nodos.....	169
6.4 Flujos de potencia monofásicos usando procesamiento en paralelo.....	170
6.4.1 Esquema paralelo propuesto de cálculo de los elementos de la matriz Jacobiana propuesto.....	173
6.4.2 Caso de Estudio 6.3: Sistema de prueba de IEEE de 14, 30, 57 y 118 nodos	174
6.6 Conclusiones	176
Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros	178
7.1 Conclusiones.....	178
7.2 Recomendaciones para trabajos futuros.....	180
 Referencias	 181
 Apéndices	 192

Lista de Símbolos y abreviaturas

Nulo	NULL
Sumatoria	$\sum$
Tiempo	t
Máquina Paralela Virtual	PVM
<i>Multithreading</i>	MT
Programación Orientada a Objetos	POO
Plano de Poincaré	ρ
Número de ciclos completos	NCC
Fuerza Bruta	FB
Aproximación Directa	AD
Diferenciación Numérica	DN
Ecuación Diferencial Ordinaria	EDO
Matriz de identificación	Φ
Angulo de fase	ϕ
Paso de integración	h
Variable de estado	x
Matriz identidad	I
Variación	Δ
Periodo	T
Derivada	D
Infinito	∞
Operador de integración	$\int$
Exponencial	exp
Lenguaje C más más	C++
Resistencia	R
Inductancia	L
Capacitancia	C
Corriente	i
Voltaje	v
Ley de Voltajes de Kirchhoff	LVK
Ley de Corrientes de Kirchhoff	LCK
Derivada con respecto al tiempo	$\frac{d}{dt}$
Flujo magnético	λ
Función de conmutación	S
Radio del horno de arco eléctrico	r
Frecuencia	f
Reactor controlado por tiristores	RCT
Ángulo de disparo de los tiristores	α
Compensador serie controlado por tiristores	CSCT
Velocidad angular	ω
Ángulo de desfaseamiento	ϕ
Matriz de Diferencias	MD
<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>	IEEE
Por unidad	<i>p.u.</i>
Eficiencia relativa	η_R

Lista de Figuras

Figura 2.1 Esquema de almacenamiento de matrices dispersas	17
Figura 2.2 Clase <i>elemento</i>	17
Figura 2.3 Proceso de inserción de un elemento, entre dos elementos, en una lista simplemente enlazada.....	18
Figura 2.4 Proceso de eliminación de un elemento en una lista simplemente enlazada.....	18
Figura 2.5 Esquema de solución del problema $AX = B$	20
Figura 2.6 Comportamiento del tiempo de ejecución de un programa usando múltiples elementos de proceso.....	24
Figura 2.7 Red heterogénea de computadoras utilizando PVM. Representación conceptual.....	25
Figura 2.8 Red heterogénea real de computadoras utilizando PVM	25
Figura 2.9 Ejecución concurrente de p hilos	29
Figura 2.10 Ejecución en paralelo de p hilos	29
Figura 2.11 Runge-Kutta de cuarto orden.....	35
Figura 2.12 Regla trapezoidal	36
Figura 2.13 Método de Fuerza Bruta	37
Figura 2.14 Órbita de un Vector de Estado X	38
Figura 2.15 Método Aproximación Directa.....	40
Figura 2.16 Método Diferenciación Numérica.....	41
Figura 3.1 Modelo de la línea de transmisión	46
Figura 3.2 Modelo del Banco de Capacitores	47
Figura 3.3 Modelo de la Rama Magnetizante	48
Figura 3.4 Modelo del Generador	50
Figura 3.5 Modelo del Transformador monofásico incluyendo el fenómeno de saturación.....	51
Figura 3.6 Modelo del Horno de Arco Eléctrico.....	52
Figura 3.7 Modelo del RCT	56
Figura 3.8 Modelo del CSCT.....	57
Figura 3.9 Mallas formadas en el modelo del CSCT para su análisis	58
Figura 3.10 Función de Conmutación.....	60
Figura 3.11 Diagrama de Flujo de la Función de Conmutación	61
Figura 3.12 Modelo de carga resistiva	61
Figura 3.13 Modelo de carga inductiva	62
Figura 3.14 Modelo de carga resistiva-inductiva-capacitiva	63
Figura 3.15 Máquina síncrona.....	65
Figura 3.16 Máquina síncrona conectada a un bus infinito.....	69
Figura 3.17 Variables mecánicas de la máquina síncrona conectada a un bus infinito.....	69
Figura 3.18 Flujo y corriente en la fase a de la máquina síncrona conectada a un bus infinito.....	70
Figura 3.19 Modelo de la línea de transmisión trifásica de longitud corta	71
Figura 3.20 Modelo de la línea de transmisión trifásica de longitud media	72
Figura 3.21 Modelo del Banco de Capacitores trifásico.....	74
Figura 3.22 Modelo del transformador trifásico.....	75
Figura 3.23 Modelo de la Rama Magnetizante	77
Figura 3.24 Modelo del horno de arco eléctrico trifásico	78
Figura 3.25 Modelo de una carga Resistiva trifásica conectada en estrella aterrizada	79
Figura 3.26 Modelo de una carga inductiva trifásica conectada en estrella aterrizada	80
Figura 3.27 Modelo de una carga Resistiva-inductiva-capacitiva trifásica conectada en estrella aterrizada	81
Figura 3.28 Sistema de 3 nodos utilizado para la explicación de la Técnica generalizada	88
Figura 3.29 Objetos formados a partir de las líneas de transmisión del sistema de prueba	88
Figura 3.30 Objetos formados a partir de los bancos de capacitores del sistema de prueba	89
Figura 3.31 Objetos formados a partir de las ramas magnetizantes del sistema de prueba	89
Figura 3.32 Objeto formado a partir del generador del sistema de prueba	89
Figura 3.33 Objeto formado a partir del horno de arco del sistema de prueba.....	90
Figura 3.34 Objeto formado a partir del horno de arco del sistema de prueba.....	90
Figura 3.35 Corrientes incidentes en cada uno de los nodos en el sistema de análisis.....	91
Figura 3.36 Proceso de evaluación de la función $f(x,t) = Ax + Bu$	92
Figura 3.37 Esquema paralelo propuesto para la evaluación de $Ax+Bu$	93
Figura 3.38 Aplicación de la técnica de Aceleración DN	96
Figura 3.39 Esquema de procesamiento en paralelo basado en PVM propuesto.....	97
Figura 3.40 Ciudad Universitaria de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo	99
Figura 3.41 Técnica de DN con Jacobiano constante	100
Figura 3.42 Técnica propuesta para análisis de estabilidad transitoria en sistemas eléctricos de potencia	100
Figura 3.43 Vectores auxiliares utilizadas en el proceso de estabilidad transitoria	102

Figura 4.1 Caso de Estudio 4.1.....	106
Figura 4.2 Formas de onda de algunas variables de estado y su espectro armónico. Caso de Estudio 4.1	107
Figura 4.3 Caso de Estudio 4.2.....	108
Figura 4.4 Formas de onda de algunas variables de estado y su espectro armónico. Caso de Estudio 4.2	110
Figura 4.5 Ciclo Límite. Caso de Estudio 4.2.....	110
Figura 4.6 Eficiencia relativa obtenida con el uso de 1-24 procesadores esclavos. Caso de Estudio 4.3	111
Figura 4.7 Eficiencia relativa obtenida con el uso de 1-24 procesadores esclavos. Caso de Estudio 4.4	112
Figura 4.8 Eficiencia relativa obtenida con el uso de 1-24 procesadores esclavos. Caso de Estudio 4.4	113
Figura 4.9 Eficiencia relativa obtenida con el uso de 1-24 procesadores esclavos. Caso de Estudio 4.6	114
Figura 4.10 Caso de Estudio 4.7.....	115
Figura 4.11 Eficiencia relativa obtenida con el uso de 1-24 procesadores esclavos. Caso de Estudio 4.7	116
Figura 4.12 Formas de onda representativas. Caso de Estudio 4.7.....	117
Figura 4.13 Eficiencia relativa obtenida con el uso de 1-24 procesadores esclavos. Caso de Estudio 4.8	120
Figura 4.14 Comportamiento del tiempo de ejecución en función al número de procesadores esclavos. Caso Estudio 4.8	120
Figura 4.15 Comportamiento del tiempo de ejecución en función al número de procesadores esclavos. Caso de Estudio 4.9	121
Figura 4.16 Eficiencia relativa obtenida con el uso de 1-24 procesadores esclavos. Caso de Estudio 4.10	122
Figura 4.17 Comportamiento del error durante el proceso de convergencia para el Caso de Estudio 4.4 con el uso del Jacobiano Constante	123
Figura 4.18 Caso de Estudio 4.11. Falla en el nodo 2	124
Figura 4.19 Voltaje en el nodo 2 y corriente en el generador. Caso de Estudio 4.11.....	126
Figura 4.20 Caso de Estudio 4.12. Falla en el nodo 2	126
Figura 4.21 Corriente en los generadores 1 y 2. Caso de Estudio 4.12	128
Figura 4.22 Voltaje en el nodo 2. Caso de Estudio 4.12.....	128
Figura 4.23 Caso de Estudio 4.13.....	129
Figura 4.24 Formas de onda representativas. Caso de Estudio 4.13.....	132
Figura 4.25 Máquina síncrona conectada a un bus infinito. Caso de Estudio 4.14	132
Figura 4.26 Flujo y corriente en la fase a. Caso de Estudio 4.14	133
Figura 4.27 Corriente en las fases a, b y c. Caso de Estudio 4.14	134
Figura 4.28 Velocidad y ángulo del rotor. Caso de Estudio 4.14	134
Figura 4.29 Caso de Estudio 4.15.....	135
Figura 4.30 Voltaje trifásico en el nodo en el nodo 13. Caso de Estudio 4.15.....	137
Figura 4.31 Corrientes en los generadores. Caso de Estudio 4.15	137
Figura 4.32 Caso de Estudio de validación.....	138
Figura 4.33 Diagrama esquemático en ATP-DRAW. Caso de Estudio de validación	139
Figura 4.34 Formas de onda representativas. Caso de Estudio de validación.....	140
Figura 5.1 Técnica de la Matriz de Diferencias.....	146
Figura 5.2 Estructura de la Matriz $f'(x_i)$	147
Figura 5.3 Caso de Estudio 5.1.....	149
Figura 5.4 Variables de estado representativas. Caso de Estudio 5.1	150
Figura 5.5 Estructura de la matriz $f'(x_i)$. Caso de Estudio 5.1.....	151
Figura 5.6 Caso de Estudio 5.2.....	152
Figura 5.7 Variables de estado vs. tiempo y su espectro armónico. Caso de Estudio 5.2	154
Figura 5.8 Flujos en las fases a, b y c (Aplicación de la técnica de aceleración). Caso de Estudio 5.3.....	156
Figura 5.9 Flujos en las fases a, b y c (Sin la aplicación de la técnica de aceleración). Caso de Estudio 5.3	156
Figura 5.10 Flujo y corriente en la fase a (Aplicación de la técnica de aceleración). Caso de Estudio 5.3	157
Figura 6.1 Representación de una línea de transmisión mediante el circuito equivalente π	160
Figura 6.2 Esquema paralelo para el cálculo de la respuesta a la frecuencia de redes eléctricas.....	163
Figura 6.3 Proceso de inversión de la matriz Y_f	164
Figura 6.4 Caso de Estudio 6.1.....	165
Figura 6.5 Respuesta a la frecuencia vista desde el nodo 2 del sistema. Caso de Estudio 6.1.....	166
Figura 6.6 Respuesta a la frecuencia vista desde el nodo 4 del sistema. Caso de Estudio 6.1.....	166
Figura 6.7 Efecto del paso de frecuencia en la evaluación de la respuesta a la frecuencia. Caso de Estudio 6.1.....	167
Figura 6.8 Eficiencia relativa obtenida con el uso de PVM y 1 a 20 procesadores esclavos. Caso de Estudio 6.1.....	169
Figura 6.9 Respuesta a la frecuencia. Caso de Estudio 6.2	169
Figura 6.10 Eficiencia relativa obtenida con el uso de PVM y 1 a 20 procesadores esclavos. Caso de Estudio 6.2.....	170
Figura 6.11 Diagrama de Flujo del Algoritmo de Flujos de Potencia	171
Figura 6.12 Esquema paralelo propuesto para el cálculo de los elementos de la matriz Jacobiana.....	174

Lista de Tablas

Tabla 2.1 Características de PVM	26
Tabla 2.2 Componentes principales del sistema PVM	26
Tabla 2.3 Terminología de PVM	26
Tabla 2.4 Propósito de las funciones básicas de PVM	27
Tabla 2.5 Propósito de las funciones básicas de PVM	27
Tabla 2.6 Beneficios obtenidos con un código MT	29
Tabla 2.7 Modelos de Sincronización	30
Tabla 2.8 Características de los objetos	32
Tabla 2.9 Componentes de la POO	33
Tabla 2.10 Características de la Programación Orientada a Objetos	33
Tabla 3.1 Clase <i>linea_transmision</i>	46
Tabla 3.2 Clase <i>banco_capacitores</i>	47
Tabla 3.3 Clase <i>rama_magnetizante</i>	48
Tabla 3.4 Clase <i>central_generadora</i>	50
Tabla 3.5 Clase <i>transformador_potencia</i>	52
Tabla 3.6 Clase <i>horno_de_arco</i>	55
Tabla 3.7 Clase <i>RCT</i>	57
Tabla 3.8 Clase <i>CSCT</i>	59
Tabla 3.9 Clase <i>rama_resistiva</i>	62
Tabla 3.10 Clase <i>rama_inductiva</i>	63
Tabla 3.11 Clase <i>rama_resistiva_inductiva_capacitiva</i>	64
Tabla 3.12 Proceso de convergencia de los métodos de FB y DN de la máquina síncrona conectada a un bus infinito	68
Tabla 3.13 Clase <i>generador_sincrono_3f</i>	70
Tabla 3.14 Clase <i>linea_transmision_3f_corta</i>	72
Tabla 3.15 Clase <i>banco_capacitores_3f</i>	75
Tabla 3.16 Clase <i>transformador_potencia_3f</i>	76
Tabla 3.17 Clase <i>rama_magnetizante_3f</i>	77
Tabla 3.18 Clase <i>horno_arco_3f</i>	78
Tabla 3.19 Clase <i>rama_resistiva</i>	80
Tabla 3.20 Estructura general del archivo de entrada de datos	83
Tabla 3.21 Identificadores de elementos monofásicos	84
Tabla 3.22 Identificadores de elementos trifásicos	84
Tabla 3.23 Archivo de entrada de datos para el sistema de prueba	91
Tabla 3.24 Vector de condiciones iniciales para el Caso de Estudio	92
Tabla 3.25 Proceso de evaluación de la función $AX + BU$	94
Tabla 3.26 Representación del conjunto de EDO's que describen la dinámica del sistema de la Figura 3.28	95
Tabla 3.27 Sección para análisis de estabilidad transitoria	101
Tabla 3.28 Ejemplo de 3 nodos fallados	101
Tabla 4.1 Proceso de convergencia de los métodos FB y DN. Caso de Estudio 4.1	107
Tabla 4.2 Archivo de entrada para la simulación del Caso de Estudio 4.2	108
Tabla 4.3 Proceso de convergencia de los métodos FB y DN. Caso de Estudio 4.2	109
Tabla 4.4 Tiempo de cómputo. Caso de Estudio 4.2	110
Tabla 4.5 Proceso de convergencia de los métodos FB y DN. Caso de Estudio 4.3	111
Tabla 4.6 Proceso de convergencia de los métodos FB y DN. Caso de Estudio 4.4	112
Tabla 4.7 Proceso de convergencia de los métodos FB y DN. Caso de Estudio 4.5	113
Tabla 4.8 Proceso de convergencia de los métodos FB y DN. Caso de Estudio 4.6	114
Tabla 4.9 Proceso de convergencia de los métodos FB y DN. Caso de Estudio 4.7	116
Tabla 4.10 Proceso de convergencia de los métodos FB y DN. Caso de Estudio 4.7, un cálculo del Jacobiano	118
Tabla 4.11 Proceso de convergencia de los métodos FB y DN. Caso de Estudio 4.7, cálculo de dos Jacobiano	118
Tabla 4.12 Proceso de convergencia de los métodos FB y DN. Caso de Estudio 4.8	119
Tabla 4.13 Tiempo de ejecución de la simulación. Caso de Estudio 4.8	119
Tabla 4.14 Proceso de convergencia de los métodos FB y DN. Caso de Estudio 4.9	121
Tabla 4.15 Tiempo de ejecución de la simulación. Caso de Estudio 4.9	121
Tabla 4.16 Proceso de convergencia de los métodos FB y DN. Caso de Estudio 4.10	122
Tabla 4.17 Proceso de convergencia. Caso de Estudio 4.10 con el uso del Jacobiano constante	123
Tabla 4.18 Proceso de convergencia de los métodos FB y DN. Caso de Estudio 4.11	125
Tabla 4.19 Proceso de convergencia de los métodos FB y DN. Caso de Estudio 4.12	127
Tabla 4.20 Proceso de convergencia de los métodos FB y DN. Caso de Estudio 4.13	130
Tabla 4.21 Proceso de convergencia de los métodos FB y DN. Caso de Estudio 4.14	133
Tabla 4.22 Proceso de convergencia de los métodos FB y DN. Caso de Estudio 4.15	136
Tabla 4.23 Proceso de convergencia método FB. Caso de Estudio de validación	138
Tabla 4.24 Parámetros de Simulación en ATP	139
Tabla 4.25 Parámetros Caso de Estudio de Validación	139
Tabla 4.26 Archivo de Simulación. Simulador desarrollado	140

Tabla 5.1 Proceso de convergencia de los métodos FB, DN y AD. Caso de Estudio 5.1.....	149
Tabla 5.2 Proceso de convergencia del método de MD. Caso de Estudio 5.1	149
Tabla 5.3 Proceso de convergencia de los métodos FB, DN y AD. Caso de Estudio 5.2.....	152
Tabla 5.4 Proceso de convergencia del método de MD. Caso de Estudio 5.2	152
Tabla 5.5 Proceso de convergencia de los métodos FB y DN. Caso de Estudio 5.3.....	155
Tabla 5.6 Proceso de convergencia del método de MD. Caso de Estudio 5.3	155
Tabla 6.1 Eficiencia relativa con $\Delta f=0.1fund.$ Caso de Estudio 6.1	167
Tabla 6.2. Eficiencia relativa con $\Delta f=0.01fund.$ Caso de Estudio 6.1	168
Tabla 6.3 Eficiencia relativa obtenida con PVM y 3 procesadores esclavos. Caso de Estudio 6.1	168
Tabla 6.4 Magnitudes y ángulos de los voltajes en el sistema de prueba de IEEE de 14 nodos	175
Tabla 6.5 Eficiencia relativa obtenida para los sistemas de prueba de IEEE de 14, 30, 57 y 118 nodos.....	176

Lista de Publicaciones

Revistas Indexadas

1. **Efficient computation of the periodic steady state solution of nonlinear electric systems applying parallel processing techniques.** Medina, A.; **Ramos-Paz, A.**; Fuerte-Esquivel, C.R. Artículo que sera publicado en Vol. 25, No. 4 de la revista The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical & Electronic Engineering. Indexada.
2. **Newton Techniques for the steady state solution of Nonlinear Electric Networks.** A. Medina, **A. Ramos-Paz**, WSEAS Transactions on Circuits and Systems. No. 8, Vol. 4, Agosto 2005. 842-849. Indexada.
3. **Periodic steady state solution of electric systems with nonlinear components using parallel processing.** Medina, A.; **Ramos-Paz, A.**; Fuerte-Esquivel, C.R.; Power Systems, IEEE Transactions on Volume 18, Issue 2, May 2003 Page(s):963 – 965. Indexada.
4. **Swift computation of the periodic steady state solution of power systems containing TCSCs.** A. Medina, **A. Ramos-Paz**, and C. R. Fuerte-Esquivel. Internacional Journal of Electrical Power and Energy Systems. 25 (2003) 689-694. © 2003 Elsevier Science Ltd. All rights reserved. Indexada.
5. **PVM and MT Parallel Processing Platforms Applied to the Computation of Driving Point Impedances in Power Systems.** A. Medina, **A. Ramos-Paz**, WSEAS Transactions on Circuits and Systems. No. 11, Vol. 4, Noviembre 2005. 1702-1709. Indexada.

Congresos Internacionales

1. **Driving Point Impedance Computation Applying Parallel Processing Techniques.** A. Medina, **A. Ramos-Paz**. 7th WSEAS Int. Conf. on MATHEMATICAL METHODS AND COMPUTATIONAL TECHNIQUES IN ELECTRICAL ENGINEERING (MMACTEE '05), Sofia, Bulgaria, October 27-29, 2005
2. **Object oriented programming techniques applied to conventional and fast time domain algorithms for the steady state solution of nonlinear electric networks.** Medina, A.; **Ramos-Paz, A.**; Mora-Juarez, R.; Fuerte-Esquivel, C.R.; Power Engineering Society General Meeting, 2004. IEEE 6-10 June 2004 Page(s):342 - 346 Vol.1
3. **Computer Platform Comparison on the Dynamic Operation Simulation of the Synchronous Machine.** A. Medina, **A. Ramos-Paz**, F. Martínez-Cárdenas, J.C. Silva-Chávez, 8th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI 2004) Orlando, USA, in July 18-21, 2004.
4. **Object Oriented Programming Applied to the Fast Steady State Solution of Nonlinear Electric Networks.** A. Medina, **A. Ramos-Paz**, and C. R. Fuerte-Esquivel. 7th WORLD MULTICONFERENCE ON SYSTEMICS, CYBERNETICS AND INFORMATICS (SCI 2003). July 27-30, 2003. Orlando, Florida, U.S.A.
5. **Application of Parallel Processing Based on Multithreading to Driving Point Impedances Calculation in Electric Networks.** A. Medina, **A. Ramos-Paz**, A. Ramos-Yépez, International Conference on Power and Energy Systems (PES 2004), November 28 to December 01, Clearwater Beach, Florida USA.
6. **Newton Methods for the Steady State Solution of Nonlinear Electric Networks.** A. Medina, **A. Ramos-Paz**, 5th WSEAS International Conference on SIMULATION, MODELLING and OPTIMIZATION (SMO '05). Corfu, Greece, August 17-19, 2005.

Congresos Nacionales y Regionales

1. **Application of Object Oriented Programming to the Fast Steady State Solution of Nonlinear Electric Networks.** A. Medina, **A. Ramos-Paz**, and C. R. Fuerte-Esquivel. Artículo aceptado para su presentación en la XV Reunión de Verano de Potencia, Aplicaciones Industriales y Exposición Industrial. 6-12 de Julio de 2003, Acapulco Guerrero.
2. **Aplicación de Técnicas de Procesamiento en Paralelo Basadas en Multithreads al Análisis de la Respuesta a la Frecuencia de Redes Eléctricas.** Aurelio Medina Ríos, **Antonio Ramos Paz**, Artículo presentado en el congreso de la investigación científica 2005 realizado del 12 al 14 de septiembre de 2005 en la ciudad de Morelia Michoacán.
3. **Driving Point Impedance Computation Using Multithreading Parallel Processing.** A. Medina, **A. Ramos-Paz**, A. Ramos-Yépez, Artículo presentado en la VI Reunión de Otoño de Potencia, Electrónica y Computación. 15, 16 y 17 de Noviembre de 2004. Morelia, Michoacán, México.
4. **Aplicación de Técnicas de Programación Orientada a Objetos a la solución de Redes Eléctricas en el Dominio del Tiempo.** A. Medina, **A. Ramos-Paz**, R. Mora-Juárez, C.R. Fuerte-Esquivel. Artículo presentado en la V Reunión de Otoño de Potencia, Electrónica y Computación. 5, 6 y 7 de Noviembre de 2003. Morelia, Michoacán, México.

Capítulo No. 1

1.1 Revisión del Estado del Arte

1.1.1 Simulación digital

La simulación de circuitos eléctricos ha sido una de las tareas primordiales en el diseño y planeación de los sistemas eléctricos de potencia. Su principal aplicación es la determinación del comportamiento en el tiempo de los circuitos sujetos a condiciones de variación en su entorno y bajo condiciones de variación de sus parámetros. Debido a la importancia que tiene la simulación de los sistemas eléctricos, ésta ha sido estudiada ampliamente y existe una gran cantidad de literatura en la cual se presentan de manera general dos tipos de técnicas de análisis: *técnicas aproximadas* y *técnicas exactas* [Martínez-Velasco 1997].

Una simulación eficiente de una red eléctrica, mediante la incorporación de modelos rigurosos de los diferentes elementos que forman parte de la misma, permite predecir sus condiciones de operación sujeta a diversos escenarios, tales como cambios en su topología por la incorporación de algún elemento o la remoción de alguna sección del sistema eléctrico de potencia (SEP) debido a alguna condición de falla en el mismo.

Históricamente la teoría de redes y la teoría de sistemas se desarrollaron de manera simultánea en los años cuarentas y cincuentas. Sin embargo en los años sesentas estos dos campos comenzaron a divergir; por un lado los teóricos de las redes se enfocaron en el análisis de grandes redes eléctricas interconectadas con componentes relativamente muy sencillos (resistivos-inductivos-capacitivos). Por otro lado los teóricos de los sistemas comenzaron a analizar configuraciones muy simples de componentes muy complejos [De Carlo y Saeks 1981].

Afortunadamente las dos teorías comenzaron a unir esfuerzos en los años ochentas, motivadas por el énfasis que se dio en el análisis de grandes redes, en donde se trató de explorar el desacoplamiento inherente en los sistemas [De Carlo y Saeks 1981].

Un primer enfoque que se dio en el análisis de los circuitos eléctricos fue basado en el concepto de ondas viajeras a inicios de los años sesentas mediante la aplicación de dos técnicas diferentes: Diagrama de Lattice de Bewley [Barthold *et al.* 1961] y Método de Bergeron [Frey *et al.* 1961]. Estas técnicas fueron aplicadas en la solución de pequeñas redes eléctricas con parámetros lineales y no lineales concentrados así como también con elementos con parámetros distribuidos.

La extensión a redes multinodos fue realizada por Dommel [Dommel 1969]. El esquema propuesto por Dommel combinó el método de Bergeron así como la regla trapezoidal en un algoritmo capaz de resolver transitorios en redes eléctricas monofásicas y multifásicas con parámetros concentrados y distribuidos. Este método de solución fue el origen del Programa de Transitorios Electro Magnéticos (*Electro Magnetic Transients Program* EMTP) [Zamora et al. 2005]. La regla trapezoidal es utilizada para convertir las ecuaciones diferenciales de los componentes de la red en ecuaciones algebraicas que involucran voltajes, corrientes y valores pasados. Estas ecuaciones algebraicas usan una aproximación nodal. La matriz de admitancias resultantes es simétrica y permanece sin cambios si la integración se realiza con un paso de integración constante. La solución del transitorio electromagnético se obtiene mediante el uso de una factorización triangular. Este procedimiento puede ser aplicado a redes de tamaños arbitrarios de un modo muy simple. El esquema propuesto por Dommel fue utilizado para resolver redes lineales, sin embargo, muchos componentes de los sistemas eléctricos presentan un comportamiento no lineal y variante en el tiempo. Distintas modificaciones han sido propuestas con el objeto de poder incorporar elementos no lineales y variantes en el tiempo [Zamora et al. 2005].

De manera general la solución de las ecuaciones asociadas al modelo de los circuitos eléctricos implica los siguientes pasos:

- a. Encontrar el punto inicial de operación
- b. Determinar el primer paso de integración
 - b.1. Discretizar las derivadas, formando modelos aproximados
 - b.1.1. Linealizar los elementos no lineales formando modelos aproximados
 - b.1.1.1. Formar las ecuaciones lineales asociadas con el circuito aproximado
 - b.1.1.2. Resolver las ecuaciones lineales
 - b.1.2. Iterar hasta obtener una solución o reducir el paso de integración e intentar nuevamente.
 - b.2. Analizar la convergencia
- c. Si la convergencia es adecuada seguir adelante en el tiempo, de lo contrario reducir el paso de integración e intentar nuevamente a partir de este paso.

1.1.2 Formación de las ecuaciones que describen la dinámica de una red eléctrica

El análisis de sistemas de gran escala generalmente está asociado con dificultades en el modelado, control y simulación; los cuales se incrementan dramáticamente con el tamaño del sistema a ser analizado. Diferentes técnicas de reducción de modelos han sido desarrolladas. La mayoría de ellas son aplicadas al modelo linealizado del sistema de gran escala.

Una de las formas más simples para escribir las ecuaciones asociadas con un circuito es mediante la aproximación de Tableau [Dorf 1993]. En esta técnica las leyes de voltajes y corrientes de Kirchhoff y las ecuaciones individuales rama/elemento son escritas en una matriz de grandes dimensiones. La formulación es simple y fácil de implementar. Sin embargo, el inconveniente de ésta técnica es que el conjunto de ecuaciones tiende a ser demasiado grande. Una característica de esta formulación es la gran dispersidad de las matrices, por lo que es necesaria la aplicación de técnicas eficientes de manejo de matrices dispersas, especialmente para redes de mayor tamaño.

Una alternativa ampliamente utilizada es el análisis nodal el cual es un procedimiento que consiste en la aplicación de la Ley de Corrientes de Kirchhoff (LCK) a los nodos de la red, una vez que las fuentes de voltaje han sido transformadas en fuentes de corriente equivalentes [Stagg y El-Abiad 1968]. Otra opción es la aproximación nodal modificada [Dorf 1993]. En esta aproximación se escriben las ecuaciones nodales, sin embargo, para elementos que son función de la corriente, tales como inductores y ciertas clases de fuentes controladas, se añaden variables extras y por tanto ecuaciones adicionales. Esta aproximación permite modelar un amplio rango de elementos y mantiene el tamaño de la matriz, asociada con la formulación, relativamente pequeño. Algunas otras técnicas también utilizadas para la construcción de las ecuaciones de un circuito eléctrico son: el método de mallas, método de los conjuntos de corte fundamentales, método de los circuitos fundamentales. Existe diversa literatura en dónde se describen a detalle estos métodos [Stevenson 1962] [Stagg y El-Abiad 1968] [Elgerd 1971] [Chua y Ushida 1981] [Dorf 1993] [Silva-Bijit 2006].

Otra alternativa para el análisis de sistema de gran escala consiste en el uso de técnicas diakópticas [Kron 1963]. A través de estas técnicas el sistema se divide en varios subsistemas, cada uno de los cuales es analizado individualmente y la solución global se obtiene analizando las conexiones entre los diferentes sub-sistemas que forman el sistema. Con estas técnicas los requerimientos de memoria y tiempo de cómputo para analizar una red eléctrica de gran escala se pueden reducir de una manera considerable, ya que en un momento dado sólo existe en memoria la información de un solo sub-sistema. Una ventaja adicional de esta técnica es la posibilidad de ser paralelizada. Una de sus limitantes es el uso de un conjunto de matrices y vectores utilizados en el proceso de generación de las sub-redes.

Una técnica para la construcción del conjunto de ecuaciones diferenciales-algebraicas que describen el comportamiento de redes eléctricas de gran escala es el modelo componente-conexión de un sistema dinámico lineal interconectado, definido por De Carlo y Saeks en [De Carlo y Saeks 1981], el cual un conjunto de ecuaciones que describen la dinámica de componentes independientes y un conjunto de ecuaciones que describen las propiedades de interconexión. La ventaja de descomponer un sistema de gran escala en un número de componentes independientes

es que la tarea de modelado se descompone en un número particular de modelos independientes pequeños.

1.1.3 Métodos de análisis

Una vez construido el conjunto de ecuaciones que describen la dinámica de una red eléctrica, existen tres tipos de métodos de análisis: métodos en el dominio del tiempo, métodos en el dominio de la frecuencia y métodos híbridos. A continuación se describen las principales características de cada uno de estos métodos de análisis.

1.1.3.1 Métodos en el dominio del tiempo

En estos métodos, el comportamiento periódico de la red se determina mediante la integración del conjunto de Ecuaciones Diferenciales Ordinarias (EDO's) que describen su dinámica. La representación de los diversos componentes no lineales, variantes en el tiempo, o cargas, se realiza en este dominio a través de una o varias EDO's. Una vez que se tiene el conjunto de EDO's éstas son integradas mediante algún tipo de método de integración, ya sea, explícito, implícito o predictor-corrector [Chua y Pen-Min 1975] [Hornbeck 1975]. La principal ventaja del análisis en el dominio del tiempo es que en la solución se encuentran implícitamente un número infinito de componentes armónicos asociados con las formas de onda de las diversas variables que representan el comportamiento de los diversos elementos del sistema. Las principales desventajas de estos métodos son: no existe una técnica generalizada que permita la construcción del conjunto de EDO's que modelen las redes eléctricas a ser estudiadas, en particular aquellas de gran cantidad de elementos; la existencia en la red de dispositivos con un pobre o nulo amortiguamiento, como es el caso de los transformadores de potencia, de la máquina síncrona o dispositivos que su funcionamiento se basa en procesos de conmutación entre elementos, puede resultar en un número excesivo de periodos completos de integración para llegar al estado periódico estacionario puede ser excesivo [Medina, Ramos-Paz y Fuerte-Esquivel 2003b][García y Acha 2004][Rodríguez y Medina 2004][Medina *et al.* 2004b]. Modelos detallados en el dominio del tiempo, de los diversos elementos que conforman el SEP ha sido presentado en diversos trabajos. Por ejemplo, en [Subramaniam 1971] se presenta un modelo detallado en el dominio de las fases de la máquina síncrona; en [Semlyen y Deri 1985] se presenta un modelo de la línea de transmisión incorporando el efecto de dependencia a la frecuencia; en [García *et al.* 2000] se presenta el modelo detallado del transformador de potencia en el dominio del tiempo; el modelo de los dispositivos FACTS [Hingorani 1993] en el dominio del tiempo ha sido presentado en [García y Medina 2003] para el caso del SVS, en [Hak-Guhn Han *et al.* 1997] para el TCSC.

1.1.3.2 Análisis en el dominio de la frecuencia

Es uno de los métodos más utilizados debido a la facilidad que se tiene en la construcción del conjunto de ecuaciones que describen la dinámica de las redes eléctricas a ser analizadas. Los elementos no lineales y variantes en el tiempo son incorporados por medio de sus equivalentes Norton [Arrillaga *et al.* 1995]. Una de las principales desventajas de estos métodos son los altos requerimientos de memoria asociados con la representación de los sistemas así como el gran esfuerzo computacional durante el proceso de solución, el cual involucra inversiones matriciales de matrices de gran tamaño y dispersas. Otra desventaja es que el número de armónicos a ser analizados influye directamente en la precisión del método así como en los requerimientos computacionales y el esfuerzo computacional.

1.1.3.3 Análisis híbrido

Son métodos que conjugan las ventajas de los métodos en el dominio del tiempo y el dominio de la frecuencia. En [Usaola 1990] se presenta un método de análisis híbrido en el cual la parte lineal de la red se analiza en el dominio de la frecuencia en tanto que la parte no lineal se trata en el dominio del tiempo. En este trabajo se incorpora una modificación de la técnica de acercamiento rápido al estado estacionario periódico (EEP) propuesta en [Aprille y Trick 1972] para el acercamiento rápido al EEP de la parte no lineal. En [Semlyen y Medina 1995] se propone una metodología de análisis en donde la red es analizada por separado, por un lado los elementos lineales dependientes de la frecuencia se analizan en el dominio de la frecuencia, por otro lado los elementos no lineales y variantes en el tiempo se analizan en el dominio del tiempo. Las técnicas de acercamiento rápido propuestas en este trabajo se basan en la aplicación del concepto del plano de Poincaré. En este trabajo son propuestos tres métodos Newton para alcanzar la rápida convergencia hacia el EEP de la parte no lineal del sistema. Las técnicas propuestas tanto en [Usaola 1990] como en [Semlyen y Medina 1995] son aplicadas en el análisis de sistemas eléctricos monofásicos con componentes no lineales.

1.1.4 Herramientas de alto impacto aplicadas en el análisis de sistemas eléctricos de potencia

1.1.4.1 Técnicas de Acercamiento Rápido al Estado Estacionario Periódico

Uno de los problemas más importantes en el análisis de redes eléctricas con componentes no lineales y variantes en el tiempo es la rápida determinación del EEP. Para resolver este problema se han propuesto diversos métodos, los cuales se denominan técnicas de acercamiento rápido al EEP. En [Chua y Ushida 1981] los métodos de acercamiento rápido al EEP son clasificados en

métodos de: Fuerza Bruta, Perturbación, Balance Armónico y Disparo. En el texto [Kunder *et al.* 1990] se clasifican los métodos de acercamiento rápido al EEP en: Métodos en el Dominio del Tiempo, Métodos de Balance Armónico y Métodos Híbridos Frecuencia-Tiempo. En el texto [Kunder *et al.* 1990] se hace un análisis a detalle de estos métodos además de que se hace una comparación de sus características. A continuación se describen las características principales de los métodos de acercamiento rápido al EEP clasificados en [Chua y Ushida 1981].

1.1.4.1.1 Métodos de Fuerza Bruta

Los métodos de Fuerza Bruta (FB) realizan la integración del conjunto de EDO's que modelan la dinámica del mismo hasta que se alcanza el EEP. Esta integración puede ser realizada a través de métodos implícitos, explícitos o predictores-correctores. En [Chua y Ushida 1981] y en [Hornbeck 1975] se hace un análisis a detalle de estos métodos. Aunque estos métodos son prácticos, tienen la desventaja de utilizar una gran cantidad de periodos de completos de integración en particular en sistemas pobremente amortiguados en los cuales la componente transitoria toma un tiempo grande en extinguirse [Chua y Ushida 1981].

1.1.4.1.2 Métodos de Perturbación

Los métodos de perturbación se basan en un proceso iterativo, el cual comienza con la determinación de una solución inicial. Esta solución inicial se obtiene mediante la linearización de la ecuación que describe la dinámica del sistema. Entre los métodos que pueden incluirse en esta categoría destacan el método de las series de Volterra y el método de la iteración de Picard [Chua y Ushida 1981].

1.1.4.1.3 Método de Balance Armónico

En estos métodos cada variable de estado se representa por medio de una serie de Fourier que satisface el requisito de periodicidad [Wylie 1951]. A continuación se aplica un algoritmo de optimización para ajustar los coeficientes de las series de Fourier de tal forma que las ecuaciones del sistema se satisfagan con el error mínimo [Sundaram 1996]. Aunque este algoritmo evita el uso de un proceso de integración numérica del conjunto de EDO's que modelan la dinámica del sistema, su principal desventaja es el gran número de variables a ser optimizadas por el algoritmo de optimización, lo cual se ve reflejado en un mayor esfuerzo computacional así como en el uso de recursos computacionales; por ejemplo, si un sistema contiene N variables y cada una de ellas requiere $2M+1$ coeficientes de Fourier, entonces habrá por tanto $N(2M+1)$ variables a ser ajustadas por el algoritmo de optimización. Esto hace que el algoritmo sea impráctico, en particular en redes eléctricas de gran tamaño. En [Nakhla y Vlach 1976] se propone una mejora a este algoritmo, la

cual aprovecha la ventaja del hecho de que una gran parte de la red es lineal, por lo que se reduce el número de variables a ser optimizadas.

1.1.4.1.4 Métodos de Disparo

Una de las principales técnicas utilizadas para la rápida determinación del EEP de circuitos eléctricos son los métodos de disparo tales como los propuestos por [Aprille y Trick 1972][Nakhla y Branin 1977][Skelboe 1980][Semlyen y Medina 1995]. El objetivo de estos métodos es encontrar una condición inicial del vector $x(0)$ tal que cuando se integre el sistema de ecuaciones $\dot{x} = f(x, t)$, sobre un periodo completo de tiempo T , a partir de la condición inicial $x(0)$ se obtenga $x(T) = x(0)$. Uno de los primeros trabajos tendientes a encontrar el vector $x(0)$ fue presentado en [Aprille y Trick 1972], en donde se resuelve este problema usando un método Newton-Raphson [Hornbeck 1975]. En la contribución posterior dada en [Nakhla y Branin 1977] se propone una técnica basada en un gradiente para encontrar la aproximación de $x(0)$. Skelboe en [Skelboe 1980] propone algoritmos de extrapolación para encontrar el EEP de redes eléctricas no-lineales. En [Semlyen y Medina 1995] se proponen tres Métodos Newton de extrapolación el Ciclo Límite basados en el concepto del Plano de Poincaré. Los métodos propuestos en este trabajos son: Diferenciación Numérica (DN), Aproximación Directa (AD) y Matriz Exponencial (ME). En particular las técnicas propuestas en [Semlyen y Medina 1995] han sido utilizadas en el análisis del EEP de redes eléctricas con componentes no-lineales y variantes en el tiempo. En [Rodriguez y Medina 2004] se propone su aplicación para el análisis de estabilidad transitoria de la máquina síncrona conectada a un bus infinito; en [Medina et al. 2004b] estas técnicas son aplicadas al análisis de la estabilidad de la máquina síncrona utilizando diferentes plataformas de programación. En [Medina, Ramos-Paz y Fuerte-Esquivel 2003b] se aplican estas técnicas en el análisis de redes eléctricas con TCSC (*Thyristor Controller Series Compensator*), en [García et al. 2000] se aplican en el análisis de redes eléctricas con modelos detallados del transformador de potencia, en tanto que en [García y Medina 2003] se presenta la aplicación de estas técnicas en redes eléctricas que contienen SVC's (*Static Var Compensator*). En trabajos más recientes se aplican las técnicas de acercamiento rápido de las variables de estado al Ciclo Límite en el análisis de redes eléctricas trifásicas y monofásicas de gran escala con componentes no lineales y variantes en el tiempo. Recientemente [García y Acha 2004] presenta la aplicación a redes eléctricas trifásicas para estudios de armónicos y calidad de la energía. En este trabajo se utiliza un modelo en el tiempo de una línea de transmisión con dependencia a la frecuencia; los transformadores de potencia se modelan mediante un banco de unidades monofásicas en donde el fenómeno de saturación magnética se representa mediante un polinomio de tres términos. En los resultados reportados, las técnicas Newton utilizadas, basadas en procesos de AD y DN

respectivamente, describen una característica de convergencia lineal, no cuadrática o cercana a esta (como se esperaría), siendo además el número de iteraciones (aplicaciones) de los métodos AD y DN diferente, (lo cual tampoco es de esperarse debido a que ambos son métodos Newton), que independientemente del proceso seguido para la identificación de la matriz Φ deben poseer la misma característica de convergencia. En esta contribución no se muestran los resultados obtenidos mediante la solución convencional basada en un método FB. Tampoco se indica si se contó con una técnica de construcción automática del conjunto de EDO's que describan la dinámica de las redes eléctricas analizadas. En una investigación presentada recientemente [Medina y Ramos-Paz 2005a] se hace un análisis de la aplicación de diversas metodologías Newton aplicadas al análisis del estado periódico estacionario de redes eléctricas con componentes no lineales y variantes en el tiempo. En este trabajo se comparan 3 técnicas Newton: DN, AD y Matriz de Diferencias (MD).

1.1.4.2 Programación Orientada a Objetos

La Programación Orientada a Objetos (POO) es una de las tendencias actuales en las ciencias computacionales. Las principales características de la POO que la han hecho tan popular y ampliamente utilizada son analizadas en [Neyer *et al.* 1990]. Dentro de las principales características de la POO pueden mencionarse las siguientes,

- Los objetos físicos e ideas son representados como *objetos* en un programa, por lo que los desarrolladores de software trabajan directamente con los conceptos de su campo y no tienen que preocuparse con problemas computacionales, tal como el manejo de recursos de memoria.
- El procesamiento se realiza por medio de la transmisión de mensajes entre los objetos. Los objetos son módulos altamente independientes del programa que se comunican solamente por medio de la transmisión de mensajes.
- Los objetos que realizan las mismas operaciones se agrupan dentro de *clases*. Por tanto las operaciones son especificadas una sola vez en la clase. Adicionalmente, las clases están organizadas dentro de jerarquías de clases. Los objetos de una clase *heredan* todas las operaciones de su superclase. Por lo tanto, los códigos orientados a objetos son fácilmente reutilizables.

Las aplicaciones de la POO en el análisis de SEP han sido muy variadas. En [Séller *et al.* 1990] se hace una descripción muy detallada de las características de la POO, además de que se hace una aplicación de la POO a la solución del problema de flujos de potencia. En este trabajo se muestra un perfil del tiempo de CPU requerido por el programa orientado a objetos desarrollado,

de estos resultados se muestra que aproximadamente se consume el 40% de tiempo de CPU en el paso de mensajes entre objetos. En [Neyer *et al.* 1990] se hace una descripción detallada de la aplicación de la POO al problema de flujos de potencia. Debido a que los problemas asociados con los SEP involucran el uso de matrices altamente dispersas, en [Hakavik *et al.* 1994] se propone e implementa una técnica para el uso de técnicas de dispersidad orientadas a objetos. En este trabajo se muestra la relación que existe entre la flexibilidad de la POO con respecto al tiempo de ejecución, en dónde se demuestra que conforme se incrementan las diferentes características de la POO, los programas tienden a tener un tiempo de ejecución mayor. En [Zhou 1996] se propone e implementa una plataforma orientada a objetos para el análisis del problema de flujos de potencia. En [Fuerte-Esquivel *et al.* 1997] se propone un diseño orientado a objetos para resolver el problema de flujos de potencia en redes eléctricas con dispositivos FACTS (*Flexible A.C. Transmission Systems*). En [Medina, Ramos-Paz y Fuerte-Esquivel 2003c] y [Medina, Ramos-Paz y Fuerte-Esquivel 2004a] se propone un diseño orientado a objetos aplicado al análisis de sistemas eléctricos de potencia con componentes lineales, no lineales y variantes en el tiempo, aplicando técnicas de acercamiento rápido de las variables de estado al Ciclo Límite, basado en las metodologías DN y AD.

1.1.4.3 Técnicas de dispersidad

Las formulaciones generalizadas de análisis de circuitos eléctricos tales como Tableau, el análisis nodal, etc., están relacionadas con representaciones matriciales. Las técnicas matriciales fueron aplicadas primeramente en el análisis de sistemas eléctricos de potencia debido a que ofrecen métodos sistemáticos de formulación y solución de sistemas de ecuaciones. Una de las ventajas de las formulaciones matriciales es que permite una representación concisa del modelo matemático de sistemas complejos. La principal aplicación del álgebra matricial en el análisis de sistemas eléctricos de potencia es la solución de sistemas de ecuaciones lineales de la forma $AX = B$. Existen dos métodos que se utilizan para resolver el problema anterior: métodos directos y métodos iterativos. Uno de los principales problemas relacionados con la solución de este problema es que tanto la matriz A como el vector B son altamente dispersos, esto significa que la relación entre el número de elementos diferentes de cero entre el total de elementos de la matriz es un número muy pequeño. El manejo eficiente de la información de una matriz dispersa se ve reflejado en la optimización de recursos tales como esfuerzo computacional y manejo de memoria, respectivamente.

En [Tinney y Walker 1967] se propone un esquema de solución al problema $AX = B$ mediante un esquema de factorización triangular; en este trabajo se obtienen ganancias en velocidad, requerimientos computacionales de memoria y reducción de errores por redondeo. En

[Zollenpof 1975] se propone un esquema de manejo de matrices dispersas en el cual se utilizan los siguientes elementos: almacenamiento eficiente, proceso de ordenamiento, proceso de bifactorización y un proceso de solución.

Las técnicas de manejo de matrices dispersas han evolucionado en función a los elementos computacionales que han sido desarrollados por las ciencias computacionales, tales como el manejo de memoria dinámica, el uso de estructuras de datos dinámicas y la POO. Las aplicaciones de las técnicas de matrices dispersas en el análisis de sistemas eléctricos de potencia han sido muy amplias, por ejemplo, en [Fuerte-Esquivel *et al.* 1997] se propone un esquema de manejo de matrices dispersas basado en el uso de estructuras dinámicas y POO. En [Medina y Ramos-Paz 2005a] se hace la aplicación de las técnicas de dispersidad a una técnica que permite una rápida convergencia de las variables de estado al ciclo límite basada en un proceso de discretización del conjunto de EDO's que describen la dinámica de la red eléctrica. En este trabajo los resultados presentados muestran como la aplicación de estas técnicas reducen de manera sustancial el tiempo de cómputo asociado con el proceso de solución. En [Medina y Ramos-Paz 2005c] se presenta la aplicación de las técnicas de dispersidad en el proceso de la determinación de la respuesta a la frecuencia de redes eléctricas.

1.1.4.4 Procesamiento en paralelo

El procesamiento en paralelo puede ser definido como una forma de procesamiento de información en la cual dos o más procesadores juntos o con algún tipo de esquema de comunicación entre ellos, pueden cooperar para obtener la solución de un problema [Alvarado *et al.* 1992]. El auge del procesamiento en paralelo ha sido motivado por dos grandes factores, el primero es la posibilidad de resolver problemas de mayor envergadura, en tanto que el segundo está asociado con los avances en las tecnologías VLSI (*Very Large Scaled of Integration*).

La motivación del uso de procesamiento en paralelo, existiendo en la actualidad computadoras con velocidades de procesamiento muy altas, se ha debido a dos desventajas básicas que tienen las computadoras basadas en tecnologías uni-procesadores: la frecuencia del reloj de una computadora está relacionada con la velocidad de la luz y la reducción del tamaño físico de los procesadores está en función del tamaño de las moléculas. El procesamiento en paralelo es la única forma de vencer estas limitaciones [Jin 1994].

En general se esperan dos grandes mejoras con la reducción de tiempo de cómputo mediante el uso de procesamiento en paralelo: tener la posibilidad de realizar estudios en tiempo real, así como incrementar el tamaño de los problemas a resolver y el nivel de detalle en los

modelos utilizados en la representación de los elementos que constituyen a los sistemas de potencia [Lemaitre y Thomas 1996].

Existen diferentes arquitecturas asociadas con el procesamiento en paralelo [Jin 1994]. Entre las principales se pueden mencionar los multi-procesadores y las multi-computadoras. Una computadora multi-procesadores consiste en múltiples procesadores interconectados compartiendo una memoria común. Una multi-computadora no comparte memoria, pero interconecta varias computadoras mediante el uso de una red de alta velocidad [Jin 1994]. Además de existir diferentes arquitecturas asociadas con el procesamiento en paralelo, existen diferentes plataformas para el desarrollo de programas paralelos. En [Ramos-Paz 2002] se hace un análisis detallado dos plataformas operativas *Multithreading* y PVM. El *Multithreading* separa un proceso en muchos hilos de ejecución, cada uno de los cuales se ejecuta por separado [Kleiman *et al.* 1992]. Estos hilos comparten un recurso muy importante de la computadora, la memoria. PVM [Geist y Sunderan 1993] en cambio es un software de dominio público que convierte a una red heterogénea de computadoras en una gran computadora multi-procesadores [Geist *et al.* 1994]. La programación *Multithreading* está asociada con las computadoras multi-procesadores, mientras que las multi-computadoras están asociadas con PVM.

La aplicación de técnicas de procesamiento en paralelo en el campo de los sistemas eléctricos de potencia no es algo nuevo, en [Stavrakakis *et al.* 1990] se presenta un algoritmo paralelo para la detección de fallas en manejadores de motores de corriente directa; el análisis de transitorios electromagnéticos mediante el uso de procesamiento en paralelo es presentado en [Werler y Glavitsch 1993], en el trabajo presentado por [Mariños *et al.* 1994] se hace una aplicación del procesamiento en paralelo al análisis de armónicos en sistemas eléctricos de potencia y [Lemaitre y Thomas 1996]; la aplicación de técnicas de procesamiento en paralelo a las técnicas Newton de acercamiento rápido al Ciclo Límite de las variables de estado es presentada en [García *et al.* 2001] utilizando la plataforma de *Multithreading* mientras que en [Medina *et al.* 2002] se presenta el uso de PVM.

Recientemente en [García *et al.* 2004] se mostró la aplicación de técnicas de acercamiento rápido al Ciclo Límite de las variables de estado [Semlyen y Medina 1995] al análisis del sistema modificado de prueba de IEEE de 118 nodos trifásico. En este trabajo se utilizaron adicionalmente técnicas de procesamiento en paralelo basadas en *Multithreading* con el objeto de incrementar la eficiencia computacional del proceso de solución. En [Medina, Ramos-Paz y Fuerte-Esquivel 2006] se hace el análisis de redes eléctricas monofásicas de hasta 118 nodos con componentes no lineales y variantes en el tiempo utilizando el análisis en el dominio del tiempo. En este trabajo se aplican acercamiento rápido de las variables de estado al Ciclo Límite [Semlyen y Medina 1995]. Adicionalmente se aplican técnicas de procesamiento en paralelo basadas en PVM y

Multithreading con el objeto de incrementar la eficiencia relativa. En [Medina y Ramos-Paz 2005c] se hace una aplicación de las técnicas de procesamiento en paralelo basadas en dos plataformas de procesamiento en paralelo: PVM [Geist *et al.* 1994] y *Multithreading* [Kleiman *et al.* 1992], al análisis de la respuesta a la frecuencia de redes eléctricas. En este trabajo se hace adicionalmente un análisis detallado de las características de estas dos plataformas de procesamiento en paralelo.

1.2 Justificación

En base a lo expuesto en la revisión del estado del arte, presentada en la sección anterior, se observa que existen diferentes trabajos de investigación en donde se ha modelado, en el dominio del tiempo, el comportamiento de diferentes elementos de los sistemas eléctricos de potencia, sin embargo, no existe algún trabajo en donde se muestre alguna técnica que permita la construcción automática del conjunto de EDO's que modelen el comportamiento de sistemas eléctricos con componentes lineales, no lineales y variantes en el tiempo. Una que haya sido establecida esta técnica de generación automática, se propone el diseño de un herramienta de análisis de redes eléctricas no lineales de gran escala, monofásicas y trifásicas, de gran escala con componentes no lineales, la cual incorpore la técnica desarrollada así como herramientas matemáticas y computacionales de alto impacto tales como técnicas de procesamiento en paralelo, POO, dispersidad y acercamiento rápido al EEP. Este simulador deberá tener herramientas que permitan la visualización de los resultados obtenidos, con el objeto de poder realizar análisis de ellos. Debido a la evolución natural que sufren los sistemas eléctricos de potencia por la incorporación de nuevos dispositivos, esta herramienta debe de tener la posibilidad de incorporar nuevos modelos de dispositivos así como aumentar el grado de complejidad y detalle en el modelo de los mismos. Se pretende que esta herramienta de análisis llegue a ser competitiva contra simuladores comerciales [Zamora *et al.* 2005]. En base a los trabajos que han sido presentados en el campo de análisis de redes eléctricas utilizando procesamiento en paralelo, se busca el uso de una plataforma de procesamiento en paralelo eficiente, así como de fácil acceso que permita la posibilidad de realizar el análisis de cualquier tipo de red eléctrica sin que se tenga que tener la dependencia a algún tipo de equipo de cómputo de acceso limitado. Finalmente se busca que esta herramienta pueda ser utilizada con fines educativos y de investigación.

1.3 Objetivos

Los objetivos principales de este trabajo de tesis doctoral son los siguientes:

- Formulación, desarrollo e implementación de una técnica generalizadas de análisis en el dominio del tiempo aplicada a estudios en EEP de redes eléctricas prácticas monofásicas y trifásicas.
- Generar un simulador computacional que aplique la técnica desarrollada y que pueda ser aplicado en el análisis y diseño de sistemas eléctricos de potencia, además de que pueda ser utilizado para fines académicos o de investigación.
- Incorporación de técnicas de procesamiento en paralelo, programación orientada a objetos, en el simulador computacional.
- Aplicación de las técnicas de procesamiento en paralelo basadas en PVM y *Multithreading* a la solución de distintos problemas de los Sistemas Eléctricos de Potencia tales como: cálculo de la respuesta a la frecuencia de redes eléctricas y solución al problema de flujos de potencia monofásico.
- Implementar una plataforma de procesamiento en paralelo basada en los recursos existentes en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, capaz de poder ser utilizada en el análisis de redes eléctricas de gran escala y que además sea competitiva con equipos de cómputo con arquitecturas multi-procesadores.

1.4 Aportaciones Originales

- Diseño, implementación y aplicación de un método para la generación automática de la representación en espacio de estado de un SEP, monofásico o trifásico, con componentes lineales, no lineales y variantes en el tiempo.
- Generación de un simulador que incorpora la técnica desarrollada de generación automática del conjunto de ODE's así como herramientas matemáticas y computacionales de alto impacto tales como técnicas de acercamiento rápido al EEP, Técnicas de POO y Técnicas de manejo de matrices dispersas.
- Representación orientada a objetos de los diversos elementos que forman parte de la red eléctrica.
- Aplicación de técnicas de programación en paralelo basadas en el uso de una computadora heterogénea distribuida dentro de las instalaciones de la ciudad universitaria.

- Aplicación al análisis de sistemas eléctricos de una técnica de aceleración de la convergencia de las variables de estado al Ciclo Límite, basada en un proceso de discretización del conjunto de EDO's que describen su dinámica.
- Técnica y herramienta digital que permite realizar estudios eficientes de estabilidad transitoria en sistemas multi-máquina.
- Aplicación de las técnicas de técnicas de procesamiento en paralelo basadas en Multithreading y PVM a la determinación de la respuesta a la frecuencia de redes eléctricas.
- Aplicación de técnicas de procesamiento en paralelo basadas en Multithreading a la solución del problema de flujos de potencia monofásico.

1.5 Descripción de los Capítulos

En el Capítulo 1 se hace una reseña de los antecedentes y avances asociados con las técnicas de análisis de los circuitos eléctricos, así como una descripción de las características de cada uno de ellos. Por otro lado se comentan los trabajos que se han realizado con el objeto de encontrar la representación matemática que gobierna el comportamiento dinámico de redes eléctricas. A continuación se hace una descripción de herramientas de alto impacto aplicadas al análisis de los sistemas eléctricos, tales como: técnicas de acercamiento rápido al EEP, técnicas de procesamiento en paralelo, técnicas de manejo de matrices dispersas y técnicas de programación orientada a objetos. Finalmente se describirán los objetivos principales a lograrse con esta tesis así como las aportaciones originales de la misma y se comentarán de manera concisa el contenido de los capítulos que la conforman.

En el Capítulo 2 de esta Tesis se hará un análisis a detalle de las herramientas matemáticas y computacionales de alto impacto utilizadas en el desarrollo de esta Tesis, las cuales son: Técnicas de Manejo de Matrices Dispersas, Técnicas de POO, Técnicas de Procesamiento en Paralelo y Técnicas de acercamiento rápido al EEP.

En el Capítulo 3 se desarrollará e implementará una técnica que permite la construcción automática, a partir de la topología de la red, del conjunto de EDO's que describen el comportamiento dinámico de redes eléctricas prácticas monofásicas y trifásicas de gran escala con componentes lineales, no lineales y variantes en el tiempo. En esta técnica se incorporan las

herramientas computacionales descritas en el Capítulo 2. Para el caso de los sistemas trifásicos, se incorporan modelos más rigurosos de los diversos componentes del SEP tales como el modelo trifásico de la máquina síncrona, el modelo trifásico del transformador incorporando el efecto de saturación, el modelo de línea de longitud media trifásico de la línea de transmisión, etc.

En el Capítulo 4 de esta Tesis se presenta la aplicación de la técnica desarrollada en el Capítulo No. 3 de esta Tesis en el análisis de una serie de Casos de Estudio relacionados a sistemas eléctricos tanto monofásicos como trifásicos.

En el Capítulo 5 se describe la aplicación de la técnica de acercamiento rápido al EEP en el análisis de redes eléctricas, la cual está basada en un proceso de discretización del conjunto de EDO's que describen su dinámica. Esta técnica se aplica a la solución de sistemas eléctricos no lineales. Con el objeto de aprovechar las características asociadas con la técnica presentada en este Capítulo, se aplican técnicas de manejo de matrices dispersas.

En el Capítulo 6 de esta Tesis se mostrará la aplicación de las técnicas de procesamiento en paralelo basadas en PVM y *Multithreading* al análisis de la respuesta a la frecuencia de redes eléctricas de pequeña y mediana escala y a la solución del problema de flujos de potencia monofásico.

En el Capítulo 7 se mostrarán conclusiones y aportaciones obtenidas de esta Tesis doctoral así como los trabajos de investigación futura que se pueden desarrollar a partir de esta investigación.

Capítulo No. 2

2.1 Introducción

La simulación de los sistemas eléctricos es una herramienta que permite poder conocer el comportamiento de las redes eléctricas sujetas a cambios en su configuración, adición o remoción de elementos, etc. El análisis y simulación digital de los sistemas eléctricos de potencia requiere del uso de poderosas herramientas de cómputo y matemáticas con el objeto de poder llevar a cabo de manera eficiente simulaciones precisas de las redes eléctricas sujetas a diversos escenarios de operación, a la utilización de diversos tipos de dispositivos, a un modelado riguroso de los elementos que la forman además de permitir el análisis de redes eléctricas con diversos tipos de topologías. Una simulación eficiente de las redes eléctricas permite tener una mayor confiabilidad de los resultados obtenidos durante el proceso de simulación. El uso de nuevos dispositivos en las redes eléctricas así como el modelado de fenómenos tales como la saturación magnética en las máquinas rotatorias, transformadores, etc., hace necesario contar con poderosas herramientas computacionales que permitan la incorporación de estos fenómenos en las simulaciones con el objeto de que los resultados obtenidos de los procesos de simulación sean cercanos al comportamiento real de las redes eléctricas. El presente Capítulo tiene como objetivo mostrar las herramientas matemáticas y computacionales avanzadas utilizadas en el desarrollo de esta Tesis. Las herramientas que se describirán a continuación son:

- Técnicas de manejo de matrices dispersas
- Técnicas de Programación Orientada a Objetos (POO)
- Técnicas de Programación en Paralelo.
- Métodos de solución de sistemas de Ecuaciones Diferenciales Ordinarias (ODE's)
- Técnicas Newton de Acercamiento Rápido al Estado Estacionario Periódico

Para cada una de estas herramientas se hace un análisis conciso de sus elementos principales, características relevantes, así como las contribuciones más importantes en dónde han sido aplicadas estas técnicas en el análisis de sistemas eléctricos.

2.2 Técnicas de Manejo de Matrices Dispersas

La mayoría de los problemas de simulación de sistemas eléctricos de potencia se reducen en algún momento a resolver el problema lineal

$$Ax = b \quad (2.1)$$

en donde A y b son matrices y vectores muy dispersos. Se dice que una matriz o vector es dispersa cuando un porcentaje significativo de sus elementos son ceros. El manejo de elementos

ceros dentro de una matriz es importante debido a que el resultado de una operación por cero se conoce de antemano, por lo que no es necesario realizar ciertas operaciones, lo cual se ve reflejado en un menor tiempo de proceso, así como en una menor cantidad de localidades de memoria reservadas para los elementos de la matriz.

Con el objeto de almacenar de una manera eficiente los elementos de una matriz dispersa se propone el esquema mostrado en la Figura 2.1, en el cual se almacena una matriz dispersa de orden $(n-1) \times (n-1)$, por medio de una representación de listas enlazadas de objetos [Wirth 1986][Heileman 1998]. De la figura se observa que existe un vector de apuntadores a listas simplemente enlazadas, en dónde cada una de estas listas representan una fila de la matriz A .

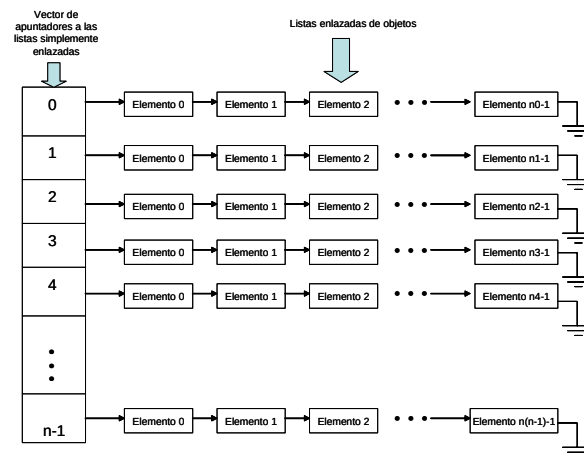


Figura 2.1 Esquema de almacenamiento de matrices dispersas

Los objetos con los cuales se forman estas listas enlazadas se generan a partir de la clase elemento, la cual se muestra en la Figura 2.2. La clase *elemento* contiene las variables miembro necesarias para el almacenamiento de un elemento a_{ij} . La variable *columna*, que es una variable entera; almacena la columna del elemento, es decir, el valor de j ; La variable miembro *valor*, que es una variable decimal, almacena el valor del elemento. Finalmente la clase contiene la variable miembro *sig* la cual es un apuntador hacia el siguiente elemento. En caso de no existir otro elemento, éste apuntador apunta hacia *nulo* (*NULL*).

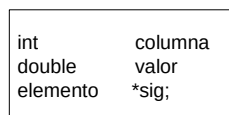


Figura 2.2 Clase *elemento*

El proceso de recuperación de información en este esquema consiste en colocar un apuntador en la posición del vector de direcciones que está asociado con la fila del elemento y a continuación hacer un recorrido a través de la lista enlazada hasta encontrar la columna que corresponda al elemento buscado. En caso de que se llegue al final de la lista y no se encuentre el elemento, la función de búsqueda deberá regresar un elemento cero, esto significa que no existe el elemento.

Una vez que han sido almacenados los elementos en las listas enlazadas se deben de tener funciones que permitan modificar, agregar y eliminar elementos de las listas enlazadas.

La modificación del elemento a_{ij} de la matriz almacenada se realiza colocándose en la posición i del vector de apuntadores a las listas enlazadas y a continuación localizando el elemento j . Una vez localizado se procede a reemplazar el valor actual por el valor deseado.

Para agregar el elemento a_{ij} se coloca en la posición i del vector de apuntadores, a continuación se hace un recorrido hasta el final de la lista y ahí se enlaza el último elemento con el elemento nuevo. El apuntador *siguiente* del último elemento se hace igual a nulo (NULL). En el caso de la inserción de un elemento entre dos elementos ya existentes, el proceso consiste en hacer que el apuntado hacia el elemento siguiente del objeto anterior apunte hacia el elemento a ser insertado, el cual apuntará al objeto siguiente. La Figura 2.3 muestra el proceso de inserción.

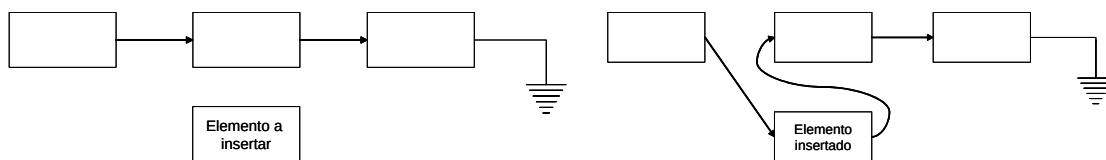


Figura 2.3 Proceso de inserción de un elemento, entre dos elementos, en una lista simplemente enlazada

Con el objeto de eliminar un objeto de la lista enlazada, se localiza el elemento mediante un recorrido por la lista correspondiente. Una vez localizado el elemento se enlaza el elemento previo con el elemento siguiente al elemento a eliminar. La Figura 2.4 muestra el proceso de eliminación.

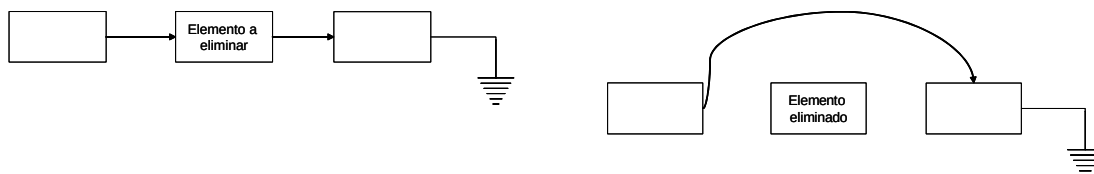


Figura 2.4 Proceso de eliminación de un elemento en una lista simplemente enlazada

2.2.1 Factorización

La solución del problema dado por (2.1) generalmente se lleva a cabo por medio de la factorización de la matriz $[A]$ en el producto de dos matrices,

$$A = LU \quad (2.2)$$

donde L es una matriz triangular inferior, en la cual sus elementos se calculan mediante las expresiones siguientes,

$$l_{ii} = 1 \quad (2.3)$$

$$l_{ik} = \frac{a_{ik}^{(k)}}{a_{kk}^{(k)}} \quad \forall i > k \quad (2.4)$$

$$a_{ij}^{(k+1)} = a_{ij}^{(k)} - l_{ik} a_{kj}^{(k)} \quad \forall i, j > k \quad (2.5)$$

con $k = 1, 2, \dots, n$ y $a_{ij}^{(1)} = a_{ij} \in A$.

La matriz U es una matriz triangular superior, en la cual sus elementos se calculan por medio de la expresión,

$$u_{ij} = a_{ij}^{(k)} \quad \forall j \geq i \geq k \quad (2.6)$$

Una vez que la matriz A se ha factorizado como el producto LU , la solución del sistema lineal dado por (2.1) puede obtenerse de la siguiente manera. Dado que la matriz A se puede expresar como el producto LU , entonces se puede obtener,

$$Ax = Ly = b \quad (2.7)$$

en donde:

$$y = Ux \quad (2.8)$$

por tanto se han generado dos sistemas de ecuaciones, el primero dado por,

$$Ly = b \quad (2.9)$$

donde la solución de (2.9) está dada por,

$$y = L^{-1}b \quad (2.10)$$

dado que L es una matriz triangular inferior, los valores de y pueden obtenerse mediante un proceso de sustitución hacia adelante dado por,

$$y_i = b_i - \sum_{j=1}^{i-1} l_{ij} y_j \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n \quad (2.11)$$

el segundo sistema de ecuaciones esta dado por,

$$Ux = y \quad (2.12)$$

donde su solución se obtiene como,

$$x = U^{-1}y \quad (2.13)$$

dado que U es una matriz triangular superior, los valores de x pueden obtenerse por medio de un proceso de sustitución hacia atrás dado por,

$$x_i = \frac{1}{u_{ii}} \left(y_i - \sum_{j=i+1}^n u_{ij} x_j \right) \quad \text{para } i = n, n-1, n-2, \dots, 1 \quad (2.14)$$

La Figura 2.5 muestra un diagrama de flujo en dónde se resume el proceso de solución del problema dado por la expresión (2.1) considerando la matriz A dispersa.

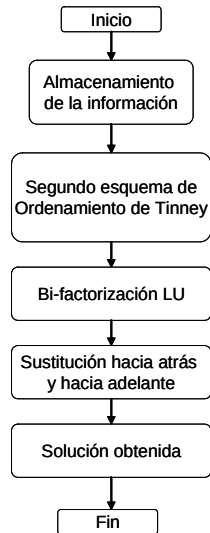


Figura 2.5 Esquema de solución del problema $AX = B$

2.2.2 Esquemas de ordenamiento

Durante el proceso de bifactorización LU se pueden generar nuevos elementos diferentes de cero, con el objeto de reducir el número de elementos diferentes de cero generados durante el proceso de factorización Tinney en [Tinney y Walker 1967] propuso tres esquemas de ordenamiento, los cuales reducen de manera significativa el número de nuevos elementos diferentes de cero generados. A continuación se describen los tres esquemas de ordenamiento.

Esquema 1: Las filas y las columnas de la matriz $A^{(k)}$ son preordenadas de manera ascendente a partir de las que tienen el menor número de elementos diferentes de cero hasta las que tienen el mayor número de elementos diferentes de cero.

Esquema 2: Las filas y las columnas de la matriz $A^{(k)}$ son ordenadas de manera ascendente, desde las que tienen el menor número de entradas hasta las que tienen el mayor número de entradas diferentes de cero, en cada etapa del proceso de factorización. Este proceso tiene un mayor costo computacional, sin embargo es el algoritmo más eficiente. En esta Tesis se utiliza este esquema de ordenamiento.

Esquema 3: Las filas y las columnas de la matriz $A^{(k)}$ se ordenan en cada etapa del proceso de factorización de tal forma que generen el mínimo número de entradas diferentes de cero. Computacionalmente, este es el algoritmo más costoso debido a que requiere realizar una simulación de la factorización en cada etapa del proceso de factorización.

2.3 Técnicas de Procesamiento en Paralelo

Las técnicas de procesamiento en paralelo, aplicadas a los sistemas eléctricos de potencia, están atrayendo cada vez más el interés de los investigadores de esta área. En [Oyama *et al.* 1990] se presenta un algoritmo paralelo para la solución de un conjunto de ecuaciones lineales; otra aplicación interesante es presentada por [Stavrakakis *et al.* 1990], en la cual el procesamiento en paralelo es aplicado en un algoritmo de detección de fallas en tiempo real para manejadores de motores de corriente directa; la aplicación del procesamiento en paralelo para el cálculo de transitorios electromagnéticos es presentado en [Werler y Glavitsch 1993]; la solución del problema de flujos de potencia mediante el uso de técnicas de procesamiento en paralelo es analizada en [Mariños *et al.* 1994]. En [García *et al.* 2001] [García y Acha 2004] y [Medina, Ramos-Paz y Fuerte-Esquivel 2003a] se aplican técnicas de procesamiento en paralelo basadas en *Multithreading* y PVM, respectivamente, a la solución en estado periódico estacionario de redes eléctricas. En [A. Medina, A. Ramos-Paz 2005a], [A. Medina, A. Ramos-Paz 2005b] y [A. Medina *et al.* 2004c] se

muestra la aplicación de técnicas de procesamiento en paralelo basadas en PVM y *Multithreading* al cálculo de la respuesta a la frecuencia de redes eléctricas.

En general se esperan dos grandes ventajas con la reducción de tiempo con el uso procesamiento en paralelo: tener la posibilidad de realizar estudios en tiempo real y aumentar el tamaño de los problemas así como el nivel de detalle en los modelos utilizados en la representación de los elementos que constituyen a los sistemas de potencia.

El procesamiento en paralelo consiste en tener una gran cantidad de elementos solucionando, en forma simultánea, un gran problema. Un proceso computacional paralelo en forma general divide un gran problema en muchos sub-problemas, los cuales son resueltos mediante el uso muchos procesadores interconectados [Lemaitre y Thomas 1996].

El rápido desarrollo que se ha dado en el procesamiento en paralelo ha sido motivado por dos factores: la creciente necesidad de resolver problemas cada vez más complicados y los impresionantes avances en la tecnología computacional, en especial la tecnología VLSI (*Very Large Scaled of Integration*) [Jin 1994].

La mayoría de las computadoras de propósito general están diseñadas en base al uso de un solo procesador. Esta tecnología tiene una serie de limitaciones físicas, tecnológicas y económicas, por lo que las computadoras tradicionales uni-procesadores son incapaces de satisfacer las necesidades computacionales para aplicaciones cada vez más complejas [Jin 1994].

Una característica importante de la computación paralela es la estrecha relación entre los algoritmos y las arquitecturas computacionales paralelas. Dado un mismo problema, los algoritmos paralelos pueden ser desarrollados basados en diferentes modelos de arquitectura computacional paralela.

Existen dos arquitecturas computacionales paralelas ampliamente usadas: los multi-procesadores y las multi-computadoras. Los multi-procesadores consisten de múltiples procesadores interconectados, compartiendo una memoria común. Las multi-computadoras no comparten memoria, pero interconectan una gran cantidad de computadoras mediante redes de comunicación de alta velocidad. La comunicación interprocesos y la sincronización es el requerimiento mayor para el buen funcionamiento de un algoritmo paralelo. En las computadoras multi-procesadores, los procesos se comunican y sincronizan con los demás a través de variables compartidas; en tanto que en las multi-computadoras la comunicación y sincronización se realiza mediante el envío y recepción de mensajes. En base a esta distinción se pueden tener dos

esquemas de programación: *programación con variables compartidas y programación con paso de mensajes* [Jin 1994].

2.3.1 Eficiencia y velocidad

El tiempo de ejecución no es siempre la medida más conveniente por medio del cual se puede evaluar el funcionamiento y eficiencia de un algoritmo paralelo o secuencial. Tal como los tiempos de ejecución tienden a variar con el tamaño del problema, los tiempos de ejecución deben ser normalizados cuando se compara el funcionamiento de un algoritmo en problemas de diferentes tamaños. La eficiencia – medida en términos de la fracción de tiempo que los procesadores consumen haciendo un trabajo útil – es una relación métrica que puede algunas veces proveer de una cantidad más conveniente para medir el desempeño de un algoritmo paralelo. Esta medida caracteriza la efectividad con la cual un algoritmo utiliza los recursos computacionales de alguna computadora paralela de manera que sea independiente del tamaño del problema. La eficiencia se define relativa como [Foster 1994]:

$$E_{relativa} = \frac{t_1}{t_p} \quad (2.15)$$

Donde

t_1 es el tiempo de ejecución obtenida en un solo elemento de proceso

t_p es el tiempo de ejecución obtenida en p elementos de proceso

2.3.2 Aceleración relativa (*relative speed-up*)

Es el factor por el cual el tiempo de ejecución se reduce por p procesadores. Las cantidades definidas por (2.15) y (2.16) se llaman relativas debido a que están definidas con respecto a la ejecución del algoritmo paralelo en un solo procesador.

$$S_{relativa} = pE_{relativa} \quad (2.16)$$

2.3.3 Ley de Amdahl

Esta ley establece que si un programa tiene una sección paralelizable, y otra sección la cual debe de ser ejecutada de forma serial, entonces el tiempo de ejecución del programa tendrá una aproximación asintótica hacia el tiempo de ejecución serial por más elementos de proceso que

sean añadidos [Lewis y Berg 1998]. La Figura 2.6 muestra el comportamiento del tiempo total de ejecución utilizando procesamiento en paralelo. De esta figura puede apreciarse que el uso de un mayor número de elementos de proceso reduce el tiempo total de ejecución, sin embargo se observa que la curva tienda hacia el tiempo de ejecución serial, el cual no puede ser reducido debido a que no siempre todas las tareas pueden ser paralelizadas.

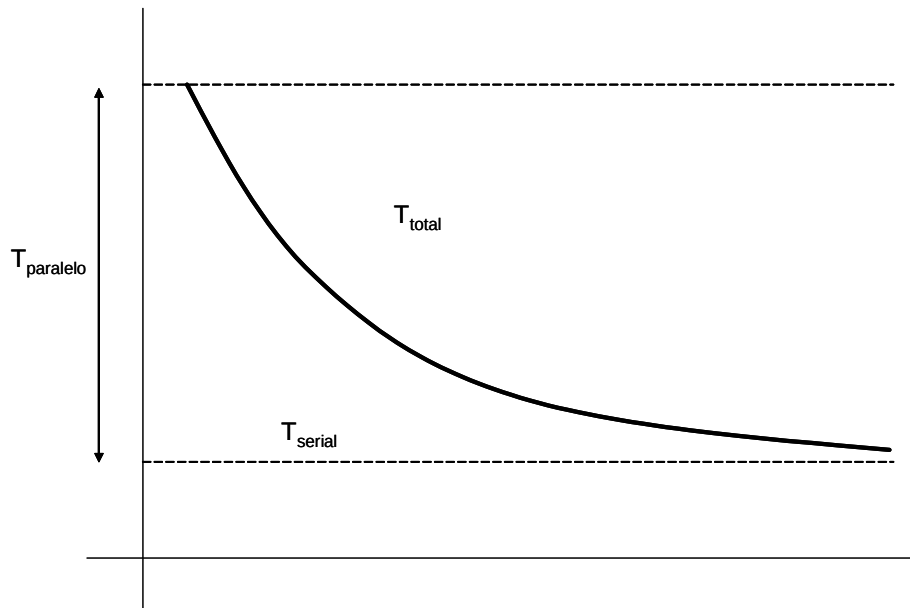


Figura 2.6 Comportamiento del tiempo de ejecución de un programa usando múltiples elementos de proceso

2.3.4 Paralell Virtual Machine (PVM)

PVM (Máquina Paralela Virtual) es un paquete computacional que permite a una colección heterogénea de computadoras conectada en red funcionar como si fuera una gran computadora [Geist *et al.* 1994].

PVM combina el poder del número de computadoras, por lo que puede ser utilizado para crear una computadora virtual de múltiples supercomputadoras, permite la solución de “grandes retos computacionales”, además puede ser utilizado como una herramienta computacional para crear una computadora paralela de estaciones de trabajo de bajo costo.

La Figura 2.7 muestra una representación conceptual de PVM. En esta figura se pueden apreciar computadoras de diferentes características, las cuales están unidas a través de una red de cómputo. Una vez que las computadoras se han unido a través de una red de cómputo, éstas trabajan como en base a las órdenes dadas por la computadora maestra.

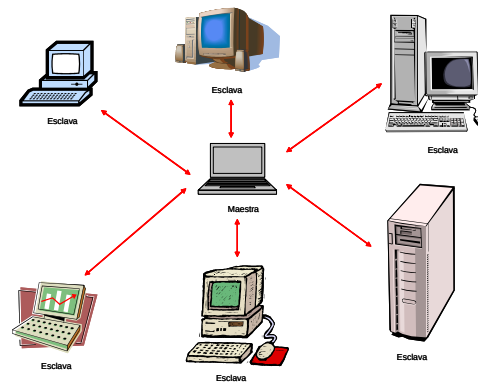


Figura 2.7 Red heterogénea de computadoras utilizando PVM. Representación conceptual

La Figura 2.8 muestra parte de la red heterogénea de computadoras utilizada en esta Tesis. De esta figura puede apreciarse que la máquina paralela virtual utilizada se formó con una colección heterogénea de computadoras. En el Apéndice B se muestran las características de todos los equipos de cómputo que forman esta máquina paralela virtual. En la misma figura se muestra un mapa de la Ciudad Universitaria de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. En este mapa se observa la ubicación de los dos edificios en dónde se encuentran los equipos de cómputo utilizados en la conformación de la máquina paralela virtual utilizada en este trabajo. En particular las computadoras se encuentran colocadas en los edificios A en el centro de laboratorio de computación de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y en el edificio del Posgrado de Ingeniería Eléctrica en el Laboratorio de Sistemas Computacionales. En las fotografías colocadas dentro de la Figura 2.8 se puede observar que los centros de cómputo de dónde se utilizaron sus computadoras cuentan con equipos de diversas características y capacidades.



Figura 2.8 Red heterogénea real de computadoras utilizando PVM

2.3.4.1 Características clave de PVM

Las principales características de PVM [Geist *et al.* 1994] son resumidas en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Características de PVM

• Es un paquete que se puede conseguir fácilmente debido a que es de dominio público [PVM]. • Se instala fácilmente. • Su configuración es sencilla. • Muchas computadoras virtuales pueden co-existir en un mismo hardware. • El desarrollo de los programas se basa en una librería de paso de mensajes. • Soporta C y Fortran. • La instalación de este paquete solamente requiere unos cuantos Mbytes de espacio en disco. • Se puede pasar fácilmente a la plataforma de procesamiento en paralelo <i>Message Passing Interface</i> (MPI)

2.3.4.2 Componentes del sistema

Los componentes principales del sistema PVM son el *pvm3 daemon*, la librería de programación *libpvm* y los componentes de aplicación. En la Tabla 2.2 se muestran las características de cada uno de estos elementos.

Tabla 2.2 Componentes principales del sistema PVM

Componente	Función
<i>pvm3 daemon</i>	• Corre en cada Host • Provee puntos de contacto inter-host • Provee autenticación de tareas. • Ejecuta procesos sobre un host. • Provee tolerancia a fallas • Dirige mensajes y es fuente y depósito de mensajes.
Librería de programación <i>libpvm</i>	Contiene las rutinas de paso de mensajes y está enlazada a cada componente de la aplicación.
Componentes de aplicación	Los programas de los usuarios, contienen llamadas de paso de mensajes, las cuales son ejecutadas como las tareas PVM.

La Tabla 2.3 se describe la terminología usada por PVM.

Tabla 2.3 Terminología de PVM

• <i>Host</i>: Una máquina física identificada como anfitrión, tal como una estación de trabajo. • <i>Virtual Machine</i>: Una combinación de anfitriones, ejecutándose como un simple recurso concurrente. • <i>Process</i>: Un programa, dato, pila, etc., tal como un proceso Unix o programa nodo. • <i>Task</i>: Un proceso PVM – la unidad más pequeña de computación • <i>TID</i>: Un identificador único, dentro de la máquina virtual, el cual está asociado como cada tarea. • <i>Message</i>: Una lista ordenada de datos la cual es enviada entre tareas. • Registro de mensajes (<i>Message Buffers</i>)

PVM permite al usuario manejar múltiples *buffers* sin embargo se tiene que: hay solamente un buffer activo para mandar y otro para recibir por proceso en cualquier momento; las rutinas de empaquetado, envío, recepción y desempaquetado únicamente afectan a los 9 *buffers*- activos; el desarrollador puede conmutar entre múltiples *buffers* para el paso de mensajes.

2.3.4.3 La consola PVM

La consola de PVM es análoga a una consola de una computadora multi-tareas. En la Tabla 2.4 se muestran los usos de la consola PVM

Tabla 2.4 Propósito de las funciones básicas de PVM

• Configurar la máquina virtual • Iniciar las tareas PVM (Incluyendo el <i>daemon</i>) • Detener las tareas PVM • Inicialización de la consola • La consola puede ser inicializada y detenida en múltiples ocasiones en cualquiera de los anfitriones en los cuales PVM está corriendo • La consola responde con el <i>prompt</i>: o <i>pvm ></i> • La consola acepta cualquier comando desde la entrada estándar
--

2.3.4.4 Ejecución de un programa con PVM

El comando *spawn* puede ser utilizando para ejecutar un programa desde la consola PVM mediante la declaración

pvm> spawn -> nombre-programa

En la Tabla 2.5 se muestran instrucciones básicas que utiliza PVM, además de su propósito.

Tabla 2.5 Propósito de las funciones básicas de PVM

Tipo de Instrucción	Propósito
<i>Control de Proceso</i>	Esta serie de funciones de C tienen como objetivo tener un control sobre la adición o eliminación de <i>host</i> en la máquina virtual, además de poder iniciar procesos PVM o terminarlos.
<i>Información</i>	Estas funciones tienen como objetivo tener un control sobre las tareas que se ejecutan en el momento, además poder identificar el padre de una tarea cualquiera.
<i>Señalamiento</i>	Esta serie de funciones tiene como objetivo tener un control sobre los eventos y poder realizar esquemas de señalamiento, los cuales evitan colisiones de datos.
<i>Buffers de Mensaje</i>	Las funciones de Buffers de Mensaje controlan el envío y recepción de información desde la computadora maestra hacia sus esclavos y desde los esclavos hacia la computadora maestra. Estas funciones permiten acciones tales como limpiar el buffer de mensajes o establecer algún tipo de buffer de mensajes en particular.
<i>Envío</i>	Debido a que la información que sale desde una computadora maestra o esclava debe de estar empaquetada, estas funciones permiten empaquetar cualquier tipo de dato manejado por el lenguaje C.
<i>Recepción</i>	Debido a que la información que entra hacia una computadora maestra o esclava debe desempaquetarse para poder ser manipulada, estas funciones permiten desempaquetar cualquier tipo de dato manejado por el lenguaje C.
<i>Operaciones de Grupo</i>	Estas funciones permiten la utilización de grupos de esclavos.

2.3.5 Conceptos básicos sobre Multithreading (MT)

La palabra *Multithreading* (MT) puede ser traducida como múltiples hilos de control o múltiples flujos de control. Mientras que un proceso tradicional UNIX siempre contiene un simple hilo de control, *Multithreading* separa un proceso en muchos hilos de ejecución, cada uno de los cuales se ejecuta por separado [Kleiman *et al.* 1992]. Un hilo es un flujo de instrucciones independientes. En el ambiente de UNIX, un hilo existe dentro de un proceso y utiliza los recursos del proceso. Sin embargo, un hilo tiene su flujo de control propio e independiente. Pueden existir múltiples hilos dentro de un proceso. El concepto de un “procedimiento” el cual se ejecuta independientemente dentro de un proceso, puede describir de mejor manera el concepto de hilo.

Para entender mejor de que consta un hilo, es útil entender la relación entre un proceso y un hilo. Un proceso se crea por medio del sistema operativo. Los procesos contienen información acerca los recursos del programa y el estado de ejecución del programa, incluyendo:

- Identificador del proceso (ID), grupo del proceso.
- Ambiente
- Directorio de trabajo
- Instrucciones del programa
- Registros
- *Stock*
- Espacio de direcciones comunes, pila de memoria y datos
- Descriptores de archivos
- Acciones de señal
- Librerías compartidas
- Herramientas de comunicación inter-procesos

Los hilos usan y existen dentro de los recursos del proceso; más aún, ellos son capaces de ser considerados por el sistema operativo y ejecutarse como una entidad independiente dentro de un proceso. Un hilo puede poseer un flujo independiente de control y ser registrado debido a que mantiene: su propio *stock*, propiedades de registro, datos específicos del hilo y un conjunto de señales de pendiente y bloqueo.

Las funciones utilizadas con hilos pueden ser clasificadas en los siguientes grupos:

- Creación y terminación de hilos
- Identificadores de hilos

La Tabla 2.6 muestra las mejoras que se puedan obtener con un código MT.

Tabla 2.6 Beneficios obtenidos con un código MT

Beneficio	Razón
Mejorar el grado de acción de las aplicaciones	Cualquier programa en el cual muchas actividades no son dependientes, unas con respecto a las otras puede ser rediseñado de tal forma que cada actividad se defina como un hilo.
Utilizar los multiprocesadores más eficientemente	Típicamente, las aplicaciones que expresan requerimientos de concurrencia con hilos no toman en cuenta el número de procesadores disponibles. El funcionamiento de la aplicación mejora con procesadores adicionales. Los algoritmos numéricos y las aplicaciones con un alto grado de paralelismo, tales como las multiplicaciones de matrices, pueden ejecutarse mucho más rápidamente cuando son implementadas con hilos sobre un multi-procesador.
Mejorar la estructura del programa	Muchos programas son más eficientemente estructurados como unidades de ejecución múltiples independientes o semi-independientes, en lugar de un simple hilo. Los programas MT pueden ser más adaptivos a variaciones en las demandas del usuario que los programas con hilos simples.
Utilizar menos recursos del sistema	Los programas que usan dos o más procesadores que acceden datos comunes a través de memoria compartida están aplicando más de un hilo de control. Sin embargo, cada proceso tiene un espacio completo de direcciones y un estado del sistema operativo. El costo de crear y mantener esta gran cantidad de información de estado hace a cada proceso más caro que un hilo tanto en tiempo como espacio. Adicionalmente, la separación inherente entre procesos puede requerir un esfuerzo mayor para el programador para comunicar los hilos entre procesos diferentes, o sincronizar sus acciones.

2.3.5.1 Concurrencia y paralelismo

En un proceso MT en un solo procesador, el procesador puede conmutar los recursos de ejecución entre los hilos, resultando en una ejecución concurrente. La Figura 2.9 muestra la forma en la que un solo procesador ejecuta p hilos.

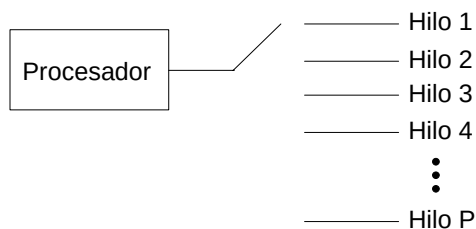


Figura 2.9 Ejecución concurrente de p hilos

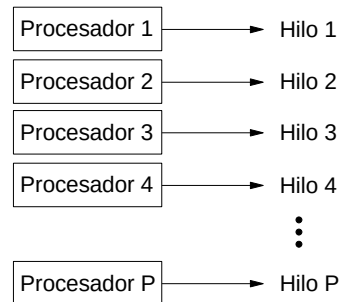


Figura 2.10 Ejecución en paralelo de p hilos

En el mismo proceso MT en un ambiente de multi-procesadores de memoria compartida, cada hilo en el proceso puede ejecutarse en un procesador por separado al mismo tiempo, resultando en una ejecución en paralelo. La Figura 2.10 muestra p procesadores ejecutando de manera paralela p hilos.

2.3.5.2 Estructura de MT

El UNIX tradicional ya soporta el concepto de hilos – cada proceso contiene un hilo, así que programar con múltiples procesos es programar con múltiples hilos. Pero un proceso es también un espacio de dirección, y crear un proceso involucra la creación de un espacio de dirección nuevo.

La creación de un hilo es mucho menos costosa comparada con la creación de un proceso nuevo, debido a que los hilos de reciente creación utilizan el espacio de dirección del proceso actual. El tiempo que se ocupa para la conmutación entre hilos es mucho menor que el tiempo que se toma en la conmutación entre procesos, en parte debido a que la conmutación entre hilos no involucra la conmutación entre espacio de direcciones. La comunicación entre hilos de un proceso es simple debido a que los hilos comparten todo, en particular el espacio de direcciones. De tal forma que los datos producidos por un hilo están disponibles inmediatamente para todos los otros hilos.

2.3.5.3 Cancelación

La cancelación de los hilos permite a un hilo terminar la ejecución de cualquier otro hilo en el proceso. La característica de cancelación de hilos permite la terminación de un hilo tanto asíncrono como diferido. La cancelación asíncrona puede ocurrir en cualquier momento, mientras que la cancelación diferida únicamente puede ocurrir en puntos definidos. La cancelación diferida es el tipo por defecto.

2.3.5.4 Sincronización

La sincronización permite controlar el flujo del programa y acceden a datos compartidos en hilos de ejecución concurrente. Los tres modelos de sincronización son: *mutex locks*, *variables de condición* y *semáforos*. En la Tabla 2.7 se resumen las principales características de estos tres modelos.

Tabla 2.7 Modelos de Sincronización

Modelo	Características
<i>Mutex locks</i>	Permiten solo a un hilo en un tiempo ejecutar una sección de código o acceder a un dato en específico.
<i>Variables de condición</i>	Bloquean a los hilos hasta que una condición en particular es verdadera.
Los <i>semáforos</i> <i>contadores</i>	Típicamente coordinan el acceso a los recursos. El contador es el límite de cuantos hilos pueden tener acceso a un recurso controlado por un semáforo. Cuando el contador se alcanza, el semáforo se bloquea.

2.4 Técnicas de Programación Orientada a Objetos

Hasta los años sesenta, muy poca o nula metodología de estructura se había impuesto a la forma en que los programadores escribían código para la solución digital de distinto tipo de problemas en campos diversos del conocimiento y variadas aplicaciones prácticas y científicas. No había estructuras bien definidas y en consecuencia, el control de flujo a través de cientos o miles de líneas resultaba casi imposible. Un ejemplo de esto es el uso frecuente de instrucciones *goto* para lograr saltos a otras partes de un programa.

La *programación estructurada* evolucionó en los años sesentas y setentas. El nombre se refiere a la práctica de construir programas usando un conjunto de estructuras bien definidas. Una meta de la programación estructurada es la eliminación de las instrucciones *goto*.

Los desarrolladores de software descubrieron que al utilizar la programación estructurada se obtiene una eficiencia mejorada, pero se tienen inconvenientes en el proceso de construir software rápida y correctamente.

La reutilización es reconocida como la clave de la solución. Reutilizar código permite que los programas se construyan rápida y correctamente. Las funciones, que son los bloques constructores de la programación estructurada, son un paso a lo largo de este camino. En los años ochentas, la computación dio otro paso hacia delante con la Programación Orientada a Objetos (POO) [Sigfried 1995]. Los bloques constructores de la POO, llamados *objetos*, son reutilizables y son componentes modulares. Los expertos afirman que la POO será el enfoque dominante en la programación durante un buen tiempo [Joyanes 1994] [Rumbaugh *et al.* 1991] [Sigfried 1995].

La POO construye y mejora la programación estructurada. Cuando se trabaja con un lenguaje orientado a objetos no se deja atrás a la programación estructurada, de hecho, los objetos están compuestos de piezas de programas estructurados, y la lógica de manipular objetos también está estructurada.

Los conceptos de programación orientada a objetos, tales como *objetos* y *clases*, pueden parecer abstractos, sin embargo, una orientación a objetos es una manera natural de pensar acerca del mundo. La POO proporciona una manera intuitiva para moldear el mundo, los programas se vuelven más simples, la programación más rápida, y el problema de mantenimiento al programa disminuye.

La cada vez más amplia aplicación de la filosofía de la programación orientada a objetos [Foley y Bose 1995], [Fuerte-Esquivel *et al.* 1997], [Medina, Ramos-Paz y Fuerte-Esquivel 2003c],

[Medina, Ramos-Paz y Fuerte-Esquivel 2004a], nos presenta una poderosa herramienta adicional para el desarrollo de software especializado.

2.4.1 Principios y Filosofía de la Programación Orientada a Objetos

Un objeto es una abstracción de cosas (entidades) del mundo real, tales que, tienen las mismas características y siguen las mismas reglas. Cada objeto consta de Estado (Atributos) y Operaciones o comportamiento (métodos invocados por medio de mensajes). Desde el punto de vista informático, los objetos son tipos abstractos de datos (tipos que encapsulan datos y funciones que operan sobre esos datos).

2.4.2 Clases y herencia de clases

Una *clase* consiste en atributos y funciones compartidas por más de un *objeto*. Los atributos de una clase se llaman *miembros de datos* y las funciones de la clase se representan como funciones miembro o métodos.

Las sub-clases normalmente poseen todos los atributos y métodos de las clases predecesoras. Esto es conocido como *herencia*. Sin embargo, agregadas a las características heredadas, las sub-clases tienen características únicas propias.

Todos los *objetos* pertenecen a *clases*. Cuando un objeto es creado, automáticamente adquiere todos los atributos y métodos asociados con esa clase. En el lenguaje de POO los objetos son instanciados (creados).

Los *objetos* normalmente no tienen conductas espontáneas. En la POO los mensajes se envían a los objetos, pidiéndoles que realicen una función en específico. Una sección de diseño de un programa consiste en identificar el flujo de enviar y recibir mensajes entre los *objetos*. Las características principales de los objetos se resumen en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8 Características de los objetos

- Se agrupan en tipos llamados *clases*.
- Tienen datos internos que definen su estado actual.
- Soportan ocultación de datos.
- Pueden heredar propiedades de otros objetos.
- Pueden comunicarse con otros objetos pasando mensajes.
- Tienen un método que define su comportamiento.

En la Tabla 2.9 se muestra seis elementos importantes incorporados por la programación orientada a objetos, así como la descripción de cada uno de ellos.

Tabla 2.9 Componentes de la POO

Componente	Objetivo
<i>Objeto</i>	Se componen de datos y funciones que operan sobre esos <i>objetos</i> . La técnica de situar datos dentro de <i>objetos</i> de modo que no se puede acceder directamente a los datos se llama <i>encapsulación</i> de la información.
<i>Clase</i>	Es una descripción de un conjunto de <i>objetos</i> . Una <i>instancia</i> es una variable de tipo <i>objeto</i> y un <i>objeto</i> es una instancia de una <i>clase</i> .
<i>Método</i>	Describen el comportamiento asociado a un <i>objeto</i> . Representan las acciones que pueden realizarse por un <i>objeto</i> o sobre un <i>objeto</i> .
<i>Mensaje</i>	Es el mecanismo por medio del cual los <i>objetos</i> se comunican entre si.
<i>Herencia</i>	Es la propiedad que permite a un <i>objeto</i> pasar sus propiedades a otro <i>objeto</i>
<i>Polimorfismo</i>	Es la propiedad por la cual un mismo <i>mensaje</i> puede actuar de diferente modo cuando actúa sobre diferentes <i>objetos</i> ligados por la propiedad de la <i>herencia</i> .

2.4.3 Características de la Programación Orientada a Objetos

La Tabla 2.10 muestra las principales características que tienen la programación orientada a objetos [Joyanes 1994].

Tabla 2.10 Características de la Programación Orientada a Objetos

Característica	Objetivo
<i>Eficiencia</i>	Es la capacidad para hacer un buen uso de los recursos que manipula.
<i>Transportabilidad (portabilidad)</i>	Es la facilidad con la que un software puede ser transportado sobre diferentes sistemas físicos o lógicos.
<i>Verificabilidad</i>	Es la facilidad de verificación de un software; está es la capacidad para soportar los procedimientos de validación y aceptar los juegos de test o ensayo de programas.
<i>Integridad</i>	Se define como la capacidad de un software para proteger sus propios componentes contra los procesos que no tengan derecho de acceso.
Facilidad de uso	Un software es fácil de usar si se puede comunicar con él de manera cómoda.
<i>Corrección</i>	Es la capacidad de los recursos de software de realizar exactamente las tareas definidas por su especificación.
<i>Robustez</i>	Es la capacidad de los productos de software de funcionar incluso en situaciones anormales.
<i>Extensibilidad</i>	Es la facilidad que tienen los productos de adaptarse a cambios en su especificación. Existen dos principios fundamentales para conseguir esto, los cuales son el diseño simple y la descentralización.
<i>Re-utilización</i>	Es la capacidad de los productos para ser re-utilizados, en su totalidad o en parte, en nuevas aplicaciones.
<i>Compartibilidad</i>	Es la facilidad de los productos para ser combinados con otros.

2.4.4 Ventajas de la Programación Orientada a Objetos respecto a la programación estructurada

Entre las principales ventajas que se pueden mencionar de la POO con respecto a la programación estructurada se tienen,

- La programación orientada a objetos permite enfocarse más a la solución y análisis del problema que a la programación, esto quiere decir que cuando se han diseñado clases junto con sus operaciones, éstas permiten la rápida programación.
- La programación orientada a objetos permite la utilización de las *clases* en otros programas, lo cual permite que no se vuelvan a implementar rutinas ya programadas.
- La programación orientada a objetos permite diseñar programas más eficientes, tratando de maximizar los recursos.

2.5 Simulación en el dominio del tiempo

2.5.1 Métodos de solución de Ecuaciones Diferenciales Ordinarias

El comportamiento periódico de una red eléctrica puede ser determinado en el dominio del tiempo, mediante la integración del conjunto de EDO's que describen su dinámica. Su descripción general es en términos de una ecuación diferencial:

$$\dot{x} = f(x, t) \quad (2.17)$$

Los métodos numéricos para la solución de (2.17) pueden ser clasificados en [Hornbeck 1975],

- Métodos explícitos

La solución en estos métodos depende exclusivamente de paso previo. Entre los principales métodos explícitos pueden mencionarse: El método de Euler cuya expresión es,

$$x_{n+1} = x_n + hf(t_n, x_n) \quad (2.18)$$

en dónde

x_n representa el vector de variables de estado en el paso n

t_n representa el tiempo en el paso n

h es el paso de integración

y los métodos de Runge-Kutta. La expresión del método de Runge-Kutta de cuarto orden es,

$$x_{n+1} = x_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (2.19)$$

en donde:

$$k_1 = hf(t_n, x_n) \quad (2.19a)$$

$$k_2 = hf\left(t_n + \frac{1}{2}h, x_n + \frac{1}{2}k_1\right) \quad (2.19b)$$

$$k_3 = hf\left(t_n + \frac{1}{2}h, x_n + \frac{1}{2}k_2\right) \quad (2.19c)$$

$$k_4 = hf(t_n + h, x_n + k_3) \quad (2.19d)$$

El diagrama de flujo mostrado en la Figura 2.11 resume el método de Runge-Kutta de cuarto orden.

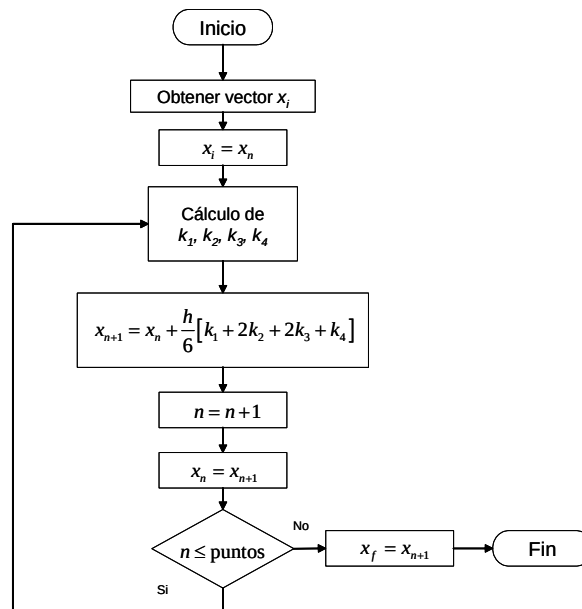


Figura 2.11 Runge-Kutta de cuarto orden

- Métodos implícitos

Estos métodos se denominan A-estables (Absolutamente estables) debido a que la convergencia no depende directamente de la elección de h ; por tanto, estos métodos son muy utilizados en el análisis de sistemas rígidos (*stiff systems*). El método de Euler modificado (Regla trapezoidal) es una técnica implícita, cuya expresión es:

$$x_{n+1} = x_n + \frac{h}{2} \left[f(t_{n+1}, x_{n+1}) + f(t_n, x_n) \right] \quad (2.20)$$

De la expresión (2.20) se aprecia que es necesario utilizar un método de solución para encontrar una aproximación a $f(t_{n+1}, x_{n+1})$, esta es una característica de todos los métodos implícitos. Una buena aproximación a $f(t_{n+1}, x_{n+1})$ puede obtenerse por medio del método de Euler. En el diagrama de flujo mostrado en la Figura 2.12 muestra el proceso de solución de un conjunto de EDO's por medio del método de la Regla Trapezoidal.

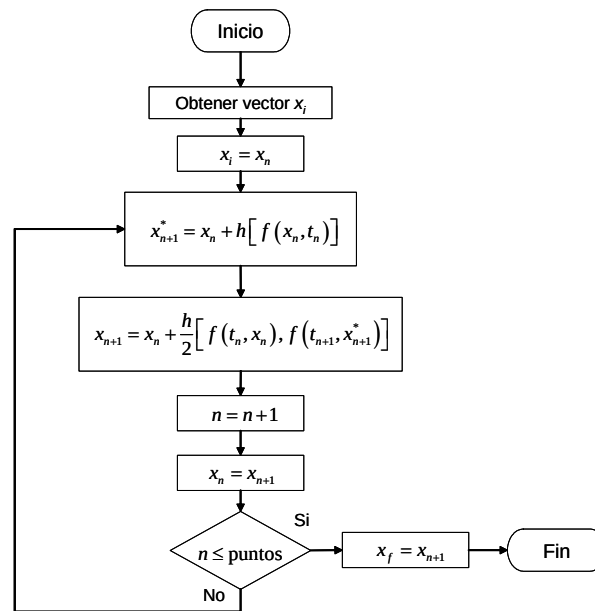


Figura 2.12 Regla trapezoidal

- Métodos predictor-corrector

Los también llamados métodos semi-implícitos se basan en dos procesos:

- Predictor: en dónde se determina un valor inicial x_{n+1}^P (valor predicho) por medio de la utilización de un método explícito.
- Corrector: en este paso se obtiene x_{n+1} por medio de la aplicación de un método implícito, el cual utiliza el valor predicho por el predictor para evaluar $f(t_{n+1}, x_{n+1})$, de tal forma que no es necesario resolver de manera numérica para determinar x_{n+1} .

Estos métodos requieren un mayor esfuerzo computacional ya que cada paso de integración se convierte en un proceso iterativo.

2.5.2 Proceso de determinación del estado estacionario periódico de redes eléctricas

De manera tradicional el proceso para determinar el estado estacionario periódico de una red eléctrica se obtiene por medio de la integración del conjunto de EDO's que representan su dinámica sobre un periodo de tiempo, a partir de un vector de condiciones iniciales. Una vez integrado este periodo de tiempo, se procede a determinar el error máximo obtenido entre el vector de condiciones iniciales de las variables de estado y el vector de variables de estado obtenidas al final del proceso de integración. Si el máximo error es mayor a un criterio de convergencia (generalmente 1×10^{-10} en p.u.) se procede a realizar la sustitución del vector solución como el vector de condiciones iniciales y el proceso se repite hasta alcanzar el estado estacionario periódico de operación de la red eléctrica. Este proceso recibe el nombre de método de Fuerza Bruta (FB). La Figura 2.13 muestra el diagrama del flujo del método FB.

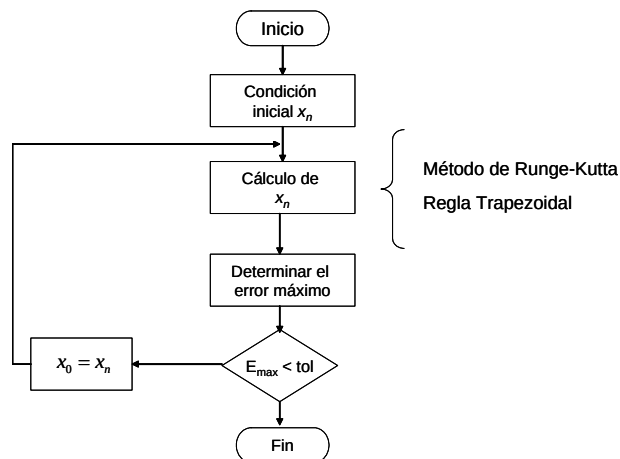


Figura 2.13 Método de Fuerza Bruta

2.5.3 Métodos Newton de Acercamiento Rápido al Estado Estacionario Periódico

Como se mencionó en el estado del arte existen diversos métodos que permiten alcanzar más rápidamente el estado estacionario periódico de conjuntos de EDO's que modelan el comportamiento dinámico de sistemas físicos, en particular sistemas eléctricos. En esta Tesis se utiliza como método de acercamiento rápido al estado estacionario periódico estacionario la técnica Newton de Diferenciación Numérica. Esta técnica está clasificada como un método de disparo. El objetivo de estos métodos, como ya se mencionó con anterioridad, es encontrar una condición

inicial del vector $x(0)$ tal que cuando se integre el sistema de ecuaciones $\dot{x} = f(x, t)$, sobre un periodo completo de tiempo T , a partir de la condición inicial $x(0)$ se obtenga $x(T) = x(0)$.

A continuación se describen dos métodos Newton de acercamiento rápido: el método DN y el método de Aproximación Directa (AD).

Si la fuerza impulsora es para el conjunto de EDO's que describen la dinámica de un sistema es periódica, entonces $f(., t)$ es un vector T -periódico. La solución en estado estable $x(t)$ es también periódica y puede ser representada como el Ciclo Límite para x_k en términos de otro elemento periódico de x o en términos de una función T -periódica, por ejemplo $\sin(\omega t)$, tal y como se muestra en la Figura 2.14. Otras variables tales como $i(t)$ se obtienen de ecuaciones de salida algebraicas.

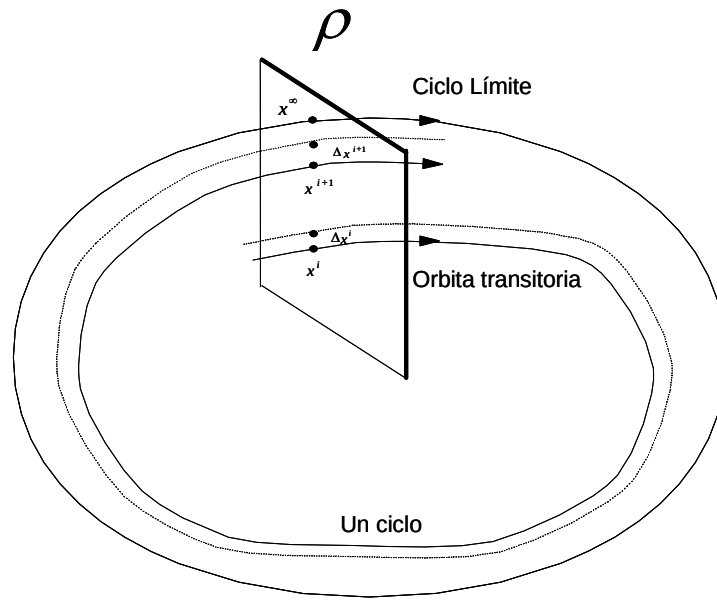


Figura 2.14 Órbita de un Vector de Estado X

Antes de alcanzar el Ciclo Límite, los ciclos de una órbita transitoria están cercanos a éste. Su posición está apropiadamente descrita por su representación sobre el plano de Poincaré ρ . Un ciclo sencillo mapea su punto de inicio x^i a su punto final x^{i+1} y mapea un segmento de perturbación Δx^i (desde este Ciclo Base [Semlyen y Medina 1995]) a Δx^{i+1} , tal y como se aprecia en la Figura 2.14. Todos los mapeos cerca de un Ciclo Límite son Quasi-lineales así que el método de Newton o su aproximación pueden ser usados para obtener el punto para el Ciclo Límite x^∞ . Esto es independiente de su estabilidad [Semlyen y Medina 1995].

Con el propósito de tomar ventaja de la linealidad en la vecindad de un Ciclo Base, se puede linealizar (2.17) alrededor de una solución de $x(t)$ desde t_i hasta t_{i+T} . Esto resulta en el problema variacional:

$$\Delta \dot{x} = \Delta f(x(t), t) = D_x f(x_t, t) \Delta x = J(t) \Delta x \quad (2.21)$$

donde $J(t)$ es la matriz Jacobiana (T -Periódica). La condición inicial es:

$$\Delta x(t_i) = \Delta x^i \quad (2.22)$$

La Ecuación (2.22) es una ODE, lineal variante en el tiempo, con una solución de la forma cerrada:

$$\Delta x(t) = \exp\left(\int_{t_i}^t J(t) dt\right) \Delta x^i \quad (2.23)$$

Esta ecuación claramente satisface (2.17). Para $t = t_i + T$, (2.22) se tiene:

$$\Delta x^{i+1} = \Phi \Delta x^i \quad (2.24)$$

con

$$\Phi = \exp\left(\int_{t_i}^{t_{i+T}} J(t) dt\right) \quad (2.25)$$

Se puede ver que Φ resulta casi la misma para cualquier t_i tal que el mapeo cerca del ciclo límite está cerca de la linealidad.

La Ecuación (2.23) muestra que los segmentos de entrada son mapeados para corresponder a los segmentos de salida por medio de la matriz Φ . Por el conjunto de relaciones en el plano de Poincaré ilustrados por la Figura 2.14, se pretende identificar también la matriz C definida por medio de [Semlyen y Medina 1995] de la manera siguiente: de la Figura 2.14 se tiene que $\Delta x^i = x^\infty - x^i$, con lo que $\Delta x^{i+1} = x^\infty - x^{i+1}$. La sustitución de la expresión anterior en (2.24) y la solución para x^∞ resulta en,

$$x^\infty = x^i + C(x^{i+1} - x^i) \quad (2.26)$$

La cual es una estimación de la localización del Ciclo Límite con

$$C = (I - \Phi)^{-1} \quad (2.27)$$

La Ecuación (2.26) conduce a un proceso Newton si Φ y C son actualizadas en cada iteración usando (2.25) y (2.27). Esto se convierte en un proceso linealmente convergente si C es mantenida constante o se actualiza en alguna etapa del proceso iterativo después de su primera evaluación empleando (2.20).

El principal problema para encontrar de forma eficiente el Ciclo Límite es la identificación de la matriz Φ . A continuación se describen tres métodos reportados de identificación de Φ . Todos requieren tener inicialmente calculado el Ciclo Base $x(t)$ sobre un periodo T , comenzando desde x^j , según se muestra en la Figura 2.14.

2.5.3.1 Método Aproximación Directa (AD)

Considérese que el vector inicial Δx^i es una columna de la matriz identidad I . Entonces, si todas las columnas son consideradas, (2.21) da

$$\Delta X^{i+1} = \Phi \quad (2.28)$$

Entonces, la integración de

$$\dot{\Delta x} = J(t)\Delta x \quad (2.29)$$

con vectores iniciales Δx^i siendo secuencialmente las columnas de la matriz identidad I , produce directamente las columnas de Φ .

La Figura 2.15 muestra el diagrama de flujo del método AD, en donde se puede apreciar en detalle del cálculo de la matriz de identificación Φ .

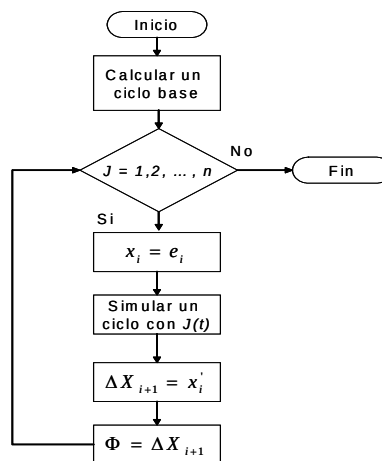


Figura 2.15 Método Aproximación Directa

2.5.3.2 Método Diferenciación Numérica (DN)

El método AD descrito anteriormente requiere el conocimiento de la matriz Jacobiana $J(t)$. A menudo J puede calcularse analíticamente pero no siempre es el caso. En particular, en el caso de dispositivos conmutados es más fácil utilizar en (2.21) el incremento Δf en lugar que $J(t)\Delta x$. Esto implica que además de integrar (2.17) con condiciones iniciales x^i para obtener el Ciclo Base $x(t)$, también se debe integrar con el valor de perturbación inicial $x^i + \varepsilon e^i$, donde e^i es columna de i de la matriz identidad I , y ε es un número pequeño, por ejemplo de 1.0^{-6} p.u. Al calcular las diferencias de los dos valores de x al final del ciclo, se obtienen las columnas de ΔX^{i+1} de (2.29), por ejemplo de $\varepsilon \Phi$. En el caso de entrada escalada hacia abajo, el cálculo de Φ requiere m cálculos, justo como en el caso de la matriz Jacobiana.

La Figura 2.16 muestra el diagrama de flujo del método DN, en donde se puede apreciar la forma en la que se realiza el cálculo de las columnas de la matriz de identificación Φ .

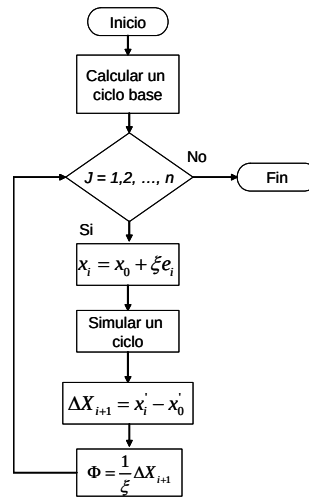


Figura 2.16 Método Diferenciación Numérica

2.6 Conclusiones

Este Capítulo ha presentado de una manera concisa las herramientas computacionales y matemáticas Avanzadas que son utilizadas en el desarrollo de esta Tesis Doctoral. Se han analizado los principales elementos asociados con el manejo de matrices dispersas. Se hizo una descripción de los elementos básicos de la POO. Finalmente se hizo una descripción concisa de las técnicas de acercamiento rápido al estado estacionario periódico. En particular se analizaron las técnicas Newton propuestas en [Semlyen y Medina 1995] de las cuales la técnica de DN será

utilizada como método de acercamiento rápido en el desarrollo de esta Tesis. La selección de esta técnica se hizo debido a que ha mostrado tener ventajas sobre otras técnicas en particular en debido a que el proceso implica exclusivamente procesos de integración numérica además de un proceso de inversión matricial.

Capítulo No. 3

Técnica Para la Generación Automática de ODE's

El presente Capítulo tiene como objetivo presentar una técnica que permite la construcción automática del conjunto de EDO's No Autónomas que representan el comportamiento de Sistemas Eléctricos No-Lineales. La generación de conjunto de EDO's se realiza a partir de un archivo que contiene la topología de la red así como los parámetros de los diversos dispositivos que forman la red. Una vez que ha sido construido el conjunto de EDO's se analiza el comportamiento del EEP de la red eléctrica. Con el objeto de encontrar rápidamente el EEP de la red eléctrica se aplica una técnica Newton de acercamiento rápido al EEP llamada Técnica de DN [Semlyen y Medina 1995]. Esta técnica se basa en modelar mediante objetos todos los dispositivos que conforman el sistema eléctrico. Cada uno de estos objetos contiene variables y funciones miembros. Las variables miembro permiten almacenar los parámetros del dispositivo en tanto que las funciones miembro contienen la descripción mediante EDO's del comportamiento del dispositivo. A través de un archivo de datos se almacena la topología y parámetros el sistema. En base a este archivo de datos se generan listas enlazadas de los diferentes objetos asociados con los diversos tipos de dispositivos. En base a un análisis nodal se asocian las variables de estado de los diferentes modelos de los elementos. Una vez terminado este proceso el sistema eléctrico de potencia es visto desde el punto de vista computacional como una serie de listas simplemente enlazadas de objetos, en donde cada objeto tienen como función miembro la ecuación diferencial que modela su comportamiento; y como variables miembro los parámetros del elemento. Una vez que se tiene una representación en espacio de estado del sistema eléctrico de potencia, se obtiene la solución en EEP de la red eléctrica; el proceso de convergencia de las variables de estado hacia el EEP es acelerado mediante el uso de la técnica de aceleración de la convergencia de las variables de estado al Ciclo Límite de DN [Semlyen y Medina 1995]. Adicionalmente, con el propósito de incrementar la eficiencia computacional en la obtención de la solución en EEP de la red eléctrica, son utilizadas técnicas de procesamiento en paralelo [García *et al.* 2001] basadas en PVM [Medina, Ramos-Paz y Fuerte-Esquivel 2003a]. Cuando se ha obtenido el EEP se procede a realizar un estudio de la distorsión armónica en las formas de onda de las diferentes variables de estado asociadas con el modelado del sistema eléctrico. Para fines didácticos y de análisis el sistema desarrollado genera archivos de salida en los cuales se almacenan el comportamiento en el tiempo de las diferentes variables de estado, el modelo en espacio del estado del sistema y el análisis armónico de todas las formas de onda.

3.1 Introducción

Existen diferentes marcos de referencia por medio de los cuales se puede realizar el análisis del comportamiento de una red eléctrica. Una de estas alternativas es el marco de referencia del dominio del tiempo [Dommel 1986]. En este marco de referencia una red eléctrica es modelada mediante un conjunto de EDO's. Una vez que la red es representada por medio de un conjunto de EDO's se aplica algún método numérico de solución con el objeto de conocer el comportamiento transitorio y en estado periódico estacionario de la red. Un ejemplo de solución de un conjunto de EDO's que representan un sistema eléctrico con pobre amortiguamiento es el asociado con la incorporación del modelo detallado de la máquina síncrona [Rodríguez y Medina 2004] [Medina *et al.* 2004b]. En este caso el proceso de obtención del EEP puede requerir de un excesivo esfuerzo computacional. En [Semlyen y Medina 1995] se presentan tres técnicas Newton que permiten la aceleración de la convergencia de las variables de estado al Ciclo Límite. La eficiencia computacional en la aplicación de estas técnicas ha sido mejorado con la aplicación de técnicas de procesamiento en paralelo [García *et al.* 2001] [Medina, Ramos-Paz y Fuerte-Esquivel 2003a]. En [García *et al.* 2001] se aplican técnicas de procesamiento en paralelo basadas en *Multithreading* [Kleiman *et al.* 1992] en tanto que en [Medina, Ramos-Paz y Fuerte-Esquivel 2003a] se aplican técnicas de procesamiento en paralelo basadas en PVM [Geist *et al.* 1994].

En los sistemas eléctricos prácticos en donde el número de nodos y elementos que los conforman puede ser muy elevado, una tarea ardua es la formulación del conjunto de EDO's que describan su comportamiento dinámico. En las siguientes secciones se describe una Técnica que permite la generación del conjunto de EDO's que modelen una red cualquiera en base a la topología de la misma. Se utiliza la programación orientada a objetos debido a que posee ventajas y características computacionales favorables, tales como la *herencia*, los *métodos* y la *transportabilidad*, que han sido aprovechadas en el desarrollo de esta Tesis. En contribuciones recientes se ha mostrado la aplicación práctica de la programación orientada a objetos en la solución en EEP de redes eléctricas con componentes no lineales reportándose entre ellos resultados satisfactorios [Medina, Ramos-Paz y Fuerte-Esquivel 2003c].

En una contribución reciente [García y Acha 2004] se reporta la solución en estado periódico estacionario de redes eléctricas con componentes no lineales aplicando las técnicas Newton propuestas por Semlyen y Medina (1995) y procesamiento en paralelo basado en *Multithreading*. En los resultados reportados, las técnicas Newton utilizadas, basadas en procesos de AD y DN respectivamente, describen una característica de convergencia lineal, no cuadrática o cercana a esta como se esperaría, siendo además el número de iteraciones (aplicaciones) de los métodos AD y DN diferente, lo cual tampoco es de esperarse debido a que ambos son métodos

Newton, que independientemente del proceso seguido para la identificación de la matriz Φ deben poseer la misma característica de convergencia. En esta contribución no se muestran los resultados obtenidos mediante la solución convencional basada en un método FB, tampoco se indica si se contó con una Técnica que permita el cálculo automático del conjunto de EDO's que describan la dinámica de las redes eléctricas analizadas.

3.2 Representación monofásica de los elementos de un sistema eléctrico de potencia

3.2.1 Línea de transmisión

El modelo monofásico de la línea de transmisión, utilizado en este trabajo, está formado por una resistencia (R) conectada en serie con un inductor (L), tal y como se muestra en la Figura 3.1.

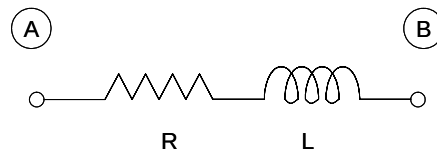


Figura 3.1 Modelo de la línea de transmisión

La aplicación de una LVK en el circuito mostrado en la Figura 3.1, genera,

$$\frac{di}{dt} = \frac{v_A - v_B}{L} - \frac{iR}{L} \quad (3.1)$$

La Tabla 3.1 muestra la implementación de la clase *linea_transmision*, la cual contiene las funciones miembro *evaluacion* e *inyeccion*. La primera función regresa el valor de la evaluación de la expresión dada en (3.1) mientras que la función *inyeccion* regresa el valor de la corriente que sale del nodo de envío o que entra al nodo destino. En las variables miembro *vx* y *vy* se almacenan los de envío y recepción de la línea de transmisión. La variable *ve* almacena el número de la variable de estado de la corriente que fluye en la línea de transmisión.

Tabla 3.1 Clase *linea_transmision*

Variable de estado generada	$\frac{di}{dt}$	Parámetros utilizados	<i>L</i> , <i>R</i>
Variables asociadas	<i>v_A</i> Voltaje en el nodo A <i>v_B</i> Voltaje en el nodo B	Método	$\frac{di}{dt} = \frac{v_A - v_B}{L} - \frac{iR}{L}$
Implementación en lenguaje C++			
<pre>class linea_transmision { public: double r,l; int ve,vx,vy; double evaluacion(double,double,double*); double inyeccion(double*); linea_transmision *sig ; };</pre>		<pre>double linea_transmision::evaluacion(double v1,double v2,double *vector) { return (v1-v2-vector[ve]*r)/l; } double linea_transmision::inyeccion(double *vector) { return vector[ve]; }</pre>	

3.2.2 Banco de Capacitores

La Figura 3.2 muestra un banco de capacitores monofásico conectado a un nodo del sistema. La expresión $\sum i_{ent}$ representa la suma de las corrientes que inciden en el nodo en tanto que la expresión $\sum i_{sal}$ representa la suma de las corrientes que salen del nodo, a excepción de la corriente en el capacitor, la cual se considera que sale del nodo y está representada por i_C .

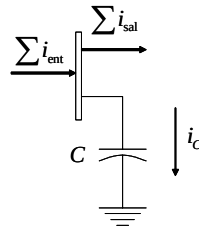


Figura 3.2 Modelo del Banco de Capacitores

Por medio de la aplicación de una LCK en el nodo se tiene,

$$\sum i_{ent} = \sum i_{sal} + i_C \quad (3.2)$$

por tanto, el voltaje en el nodo se obtiene como,

$$\frac{dv_C}{dt} = \frac{\sum i_{ent} - \sum i_{sal}}{C} \quad (3.3)$$

En la Tabla 3.2 se muestra la implementación en lenguaje C++ de la clase *banco_capacitores*. Se observa que en las variables miembro de la clase se almacenan el valor de la capacitancia, el nodo en el cual está conectado el banco de capacitores así como el número de la variable de estado asociada con el voltaje en el banco de capacitores.

Tabla 3.2 Clase *banco_capacitores*

Variables de estado generadas	$\frac{dv_C}{dt}$	Parámetros utilizados	C
Variables asociadas	$\sum i_{ent}, \sum i_{sal}$	Método	$\frac{dv_C}{dt} = \frac{\sum i_{ent} - \sum i_{sal}}{C}$
Implementación en lenguaje C++			
<pre>class banco_capacitores { public: double c; int ve; int nodo; banco_capacitores *sig; };</pre>			

3.2.3 Rama magnetizante

La Figura 3.3 muestra la conexión en el nodo A de una rama magnetizante.

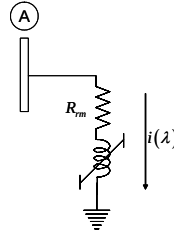


Figura 3.3 Modelo de la Rama Magnetizante

Por medio de la aplicación de una LVK alrededor de la malla se tiene que:

$$v_A = v_R + v_L \quad (3.4)$$

donde:

$$v_R = R_{rm} i(\lambda) \quad (3.5)$$

$$v_L = \frac{d\lambda}{dt} \quad (3.6)$$

Sustituyendo (3.7) y (3.8) en (3.6) y despejando $\frac{d\lambda}{dt}$ se tiene que:

$$\frac{d\lambda}{dt} = v_A - R_{rm} i(\lambda) \quad (3.7)$$

En la Tabla 3.3 se muestra la implementación de la clase *rama_magnetizante*. Se aprecia que en las variables miembro de esta clase se almacena el nodo en el cual está conectada la rama magnetizante, así como la variable de estado asociada con el capacitor conectado a este mismo nodo.

Tabla 3.3 Clase *rama_magnetizante*

Variables de estado generadas	$\frac{d\lambda}{dt}$	Parámetros utilizados	Rr_m, n
Variables asociadas	v_A Voltaje en el nodo A	Método	$\frac{d\lambda}{dt} = v_A - R_{rm} i(\lambda)$
Implementación en lenguaje C++			
<pre>class rama_magnetizante { public: double r,pot; double signo; int ve; int nodo; double evaluacion(double, double*); double inyeccion(double *); rama_magnetizante *sig ;</pre>		<pre>double rama_magnetizante::evaluacion(double v1, double *vector) { return (-r*pow(vector[ve],pot)+v1); } double rama_magnetizante::inyeccion(double *vector) { return signo*pow(vector[ve],pot); }</pre>	

};

3.2.3.1 Representación del efecto de saturación magnética en ramas magnetizantes

El efecto de saturación en transformadores de potencia es representado en esta Tesis mediante dos aproximaciones basadas en un polinomio de grado n ; en la primera, el comportamiento no lineal de la rama magnetizante es representado por medio de la relación no lineal:

$$i(\lambda) = \lambda^n \quad (3.8)$$

donde

n es un número impar, debido a que (3.36) tiene simetría impar.

En la segunda, el efecto de saturación en transformadores de potencia y ramas magnetizantes, puede ser modelado mediante la propuesta realizada en [Dick y Watson 1981], en donde el efecto de saturación se representa mediante un polinomio de la forma,

$$i(\lambda) = a\phi + b\lambda^n \quad (3.9)$$

en donde,

a : Es un coeficiente que corresponde a la pendiente en la región lineal de la curva de saturación.

n : es la medida de la agudeza de la rodilla del transformador de potencia. El valor de n es impar debido a que la Ecuación (3.9) tiene simetría impar.

Los coeficientes a , b y n se obtienen a partir de los datos experimentales tales como, λ_{nom} , λ_j , i_{nom} , i_j estos valores en el punto de operación j , que corresponde a la región lineal, son sustituidos en la expresión (3.7). Una vez que se sustituyen se determinan valores de b a partir de diversos valores impares para n . Finalmente se selecciona el valor de b y n que mejor aproximen al punto de operación nominal.

3.2.4 Generador

La Figura 3.4 muestra el modelo del generador monofásico utilizado en este trabajo. El generador se modela por medio de una fuente sinusoidal de voltaje constante conectada a un inductor.

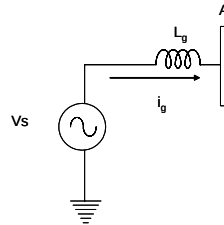


Figura 3.4 Modelo del Generador

Por medio de la aplicación de una LVK y despejando $\frac{di_g}{dt}$ se tiene que,

$$\frac{di_g}{dt} = \frac{V_g - V_A}{L_g} \quad (3.10)$$

El voltaje en terminales del generador está dada por,

$$V_g = M \sin(\omega t + \phi) \quad (3.11)$$

donde:

M es el valor pico del voltaje.

ϕ es el ángulo de fase del voltaje expresado en radianes.

ω es la velocidad angular

La Tabla 3.4 muestra la implementación de la clase *central_generadora*.

Tabla 3.4 Clase *central_generadora*

Variables de estado generadas	$\frac{di_g}{dt}$	Parámetros utilizados	M, ϕ, L_g
Variables asociadas	v_A Voltaje en el nodo A	Método	$\frac{di_g}{dt} = \frac{V_g - V_A}{L_g}$
Implementación en lenguaje C++			
<pre>class central_generadora { public: double vm,teta; int nodo; int ve; double signo; double lg; double evaluacion(double,double,double*); double inyeccion(double*); central_generadora *sig; };</pre>		<pre>double central_generadora::evaluacion(double v1,double t,double *vector) { return (sin(w*t-teta)-v1)/lg; } double central_generadora::inyeccion(double *vector) { return vector[ve]; }</pre>	

3.2.5 Transformador

En la Figura 3.5 se muestra el modelo monofásico del transformador saturable considerado en esta Tesis.

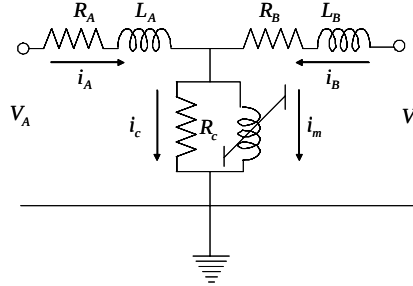


Figura 3.5 Modelo del Transformador monofásico incluyendo el fenómeno de saturación

Donde:

V_A es el voltaje terminal primario

V_B es el voltaje terminal secundario

R_A es la resistencia del devanado primario

R_B es la resistencia del devanado secundario

R_c es la resistencia del núcleo

L_A es la inductancia de dispersión del primario

L_B es la inductancia de dispersión del secundario

Por medio de la aplicación de la LVK, en la malla I mostrada en el circuito de la Figura 3.5, se obtiene,

$$\frac{di_A}{dt} = \frac{V_A - i_A R_A - v_{Rc}}{L_A} \quad (3.12)$$

Aplicando ahora una LVK en la malla II, mostrada en el circuito de la Figura 3,6, se tiene que:

$$\frac{di_B}{dt} = \frac{v_{Rc} - i_B R_B - V_B}{L_B} \quad (3.13)$$

donde,

$$\frac{d\lambda_m}{dt} = v_{Rc} = R_c (i_A - i_B - i_m(\lambda)) \quad (3.14)$$

por lo que,

$$\frac{d\lambda_m}{dt} = R_c (i_A - i_B - i_m(\lambda)) \quad (3.15)$$

El efecto de saturación es representado ya sea por la expresión (3.8) o por medio de (3.9),

La Tabla 3.5 muestra la implementación de la clase *transformador_potencia*. Se observa de esta Tabla, las variables miembro asociadas con los parámetros del transformador de potencia, así como los parámetros requeridos en el modelo matemático del transformador de potencia, tales como las variables de estado asociadas con el voltaje en el nodo A y en el nodo B. Además se observa que la clase almacena el tipo de representación del efecto de saturación magnética del núcleo del transformador de potencia. El efecto de saturación es modelado por medio de la expresión (3.7)

Tabla 3.5 Clase *transformador_potencia*

Variables de estado generadas	$\frac{d\lambda_m}{dt}, \frac{di_A}{dt}, \frac{di_B}{dt}$	Parámetros utilizados	R_A, R_B, L_A, L_B, R_C
Variables asociadas	V_A Voltaje en el nodo A V_B Voltaje en el nodo B	Métodos	
Implementación computacional en Lenguaje C++			
<pre> class trans_potencia { public: double ra,la,rb,lb; double rc; double n; int ve[3]; int vx,vy; double signo; double evaluacion(double,double,double*); double inyeccion(double*); trans_potencia *sig ; }; </pre>			

3.2.6 Horno de arco eléctrico

Considérese la conexión de un horno de arco en el nodo A del sistema, tal y como se ilustra en la Figura 3.6. En [Acha *et al.* 1990] se presenta el modelo del horno de arco eléctrico de corriente alterna ha ser utilizado en esta Tesis.

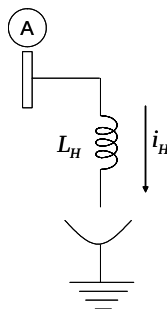


Figura 3.6 Modelo del Horno de Arco Eléctrico

El modelo que se usará en este trabajo es un modelo basado en el principio de conservación de la energía, representado por la ecuación:

$$p_1 + p_2 = p_3 \quad (3.16)$$

donde:

- p_1 representa la potencia transmitida en forma de calor al ambiente externo.
- p_2 representa la potencia que se incrementa la energía interna en el arco y la cual por tanto afecta su radio
- p_3 representa la potencia total desarrollada en el arco y convertida en calor.

En la Ecuación (3.13) se considera que el efecto de enfriamiento es una función del radio r del arco únicamente. Entonces

$$p_1 = k_1 r^n \quad (3.17)$$

De hecho, también es función de la temperatura del arco, esta dependencia se considera que es menos significativa y por lo tanto se ignora, con el objeto de mantener un modelo simplificado. Entonces únicamente el radio r del arco aparece como variable de estado. Si el ambiente alrededor del arco es caliente el enfriamiento del arco no depende de su radio por completo, así que en este caso $n = 0$. Si este no es el caso y el arco es grande, entonces el área de enfriamiento es principalmente su superficie lateral, así que $n = 1$. Si el arco es pequeño, entonces el área de enfriamiento es proporcional a el área de sección transversal en los electrodos, así que $n = 2$ [Acha *et al.* 1990].

El término p_2 es proporcional a la derivada de la energía dentro del arco, la cual es proporcional a r^2 ,

$$p_2 = k_2 r \frac{dr}{dt} \quad (3.18)$$

Finalmente

$$p_3 = vi = \frac{k_3}{r^2} i^2 \quad (3.19)$$

En esta expresión la resistividad de la columna del arco se considera que es inversamente proporcional a r^m , donde $m = 0..2$, para reflejar el hecho de que el arco puede ser más caliente en su interior si tiene un radio grande.

Sustituyendo las Ecuaciones (3.17), (3.18) y (3.19) en (3.16), se encuentra la ecuación diferencial del arco:

$$k_1 r^n + k_2 r \frac{dr}{dt} = k_3 r^{-(m+2)} i^2 \quad (3.20)$$

El voltaje del arco está dado por:

$$v = k_3 r^{-(m+2)} i \quad (3.21)$$

Consideremos ahora el circuito mostrado en la Figura 3.7. Por medio de la aplicación de una LVK alrededor de la malla formada se tiene que:

$$v_A = V_{LH} + V_{RH} \quad (3.22)$$

donde:

$$V_{LH} = L_H \frac{di_H}{dt} \quad (3.23)$$

$$V_{RH} = k_3 r^{-(m+2)} i_H \quad (3.24)$$

sustituyendo y despejando el término $\frac{di_H}{dt}$ se tiene que:

$$\frac{di_H}{dt} = \frac{-k_3 r^{-(m+2)} i_H + v_A}{L_H} \quad (3.25)$$

la derivada del radio del arco está dada por:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{k_3}{k_2} r^{-(m+3)} i_H^2 - \frac{k_1}{k_2} r^{n-1} \quad (3.26)$$

En la Tabla 3.6 se muestra la implementación de la clase *horno_de_arco*. Se observa de esta Tabla los parámetros requeridos para la evaluación de las ecuaciones diferenciales que modelan el comportamiento de la corriente a través del horno de arco así como el radio del horno de arco eléctrico.

Tabla 3.6 Clase *horno_de_arco*

Variables de estado generadas	$\frac{di_H}{dt}, \frac{dr}{dt}$	Parámetros utilizados	k_1, k_2, K_3, m, n, L_H
Variables asociadas	V_A Voltaje en el nodo A	Métodos	$\frac{di_H}{dt} = \frac{-k_3 r^{-(m+2)} i_H + v_A}{L_H}$ $\frac{dr}{dt} = \frac{k_3}{k_2} r^{-(m+2)} i_H^2 - \frac{k_1}{k_2} r^{n-1}$
Implementación en lenguaje C++			
<pre>class horno_de_arco { public: double k1,k2,k3,m,n,lh; int nodo,ve,ve_r; double signo,ci; double evaluacion1(double, double*); double evaluacion2(double, double*); double inyeccion(double *); horno_de_arco *sig ; };</pre>		<pre>double horno_de_arco::evaluacion1(double v1, double *vector) { return (-k3*pow(vector[ve_r],-m-2.0)*vector[ve]+v1)/lh; } double horno_de_arco::evaluacion2(double v1, double *vector) { return ((k3/k2)*pow(vector[ve_r],-m-2.0)*pow(vector[ve],2.0) - (k1/k2)*pow(vector[ve_r],n-1.0)); } double horno_de_arco::inyeccion(double *vector) { return signo*vector[ve]; }</pre>	

3.2.7 Dispositivos FACTS

En general los controladores FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) pueden ser divididos en 4 categorías [Hingorani y Gyugyi 2000]

- Controladores serie
- Controladores en derivación
- Controladores combinados serie-serie
- Controladores combinados serie-derivación

A continuación se presenta la deducción de la formulación en variables de estado de algunos dispositivos FACTS tales como el Reactor Controlado por Tiristores (RCT) y el Compensador Serie Controlado por Tiristores (CSCT).

3.2.7.1 Reactor Controlado por Tiristores (RCT)

Considérese el modelo del RCT mostrado en la Figura 3.7, el cual está compuesto por un arreglo de tiristores conectados en anti-paralelo, que a su vez están conectados en serie a una rama resistiva inductiva [Miller 1982].

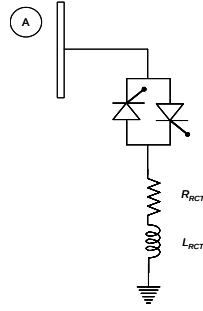


Figura 3.7 Modelo del RCT

Considérese la aplicación de una LVK alrededor de la malla formada:

$$v_A = V_{R_{RCT}} + V_{L_{RCT}} \quad (3.27)$$

donde:

$$V_{R_{RCT}} = i_{RCT} R_{RCT} \quad (3.28)$$

$$V_{L_{RCT}} = L_{RCT} \frac{di_{RCT}}{dt} \quad (3.29)$$

sustituyendo valores:

$$v_A = i_{RCT} R_{RCT} + L_{RCT} \frac{di_{RCT}}{dt} \quad (3.30)$$

despejando para $\frac{di_{RCT}}{dt}$,

$$\frac{di_{RCT}}{dt} = \frac{v_A - i_{RCT} R_{RCT}}{L_{RCT}} \quad (3.31)$$

Dado que la corriente en el RCT está en función de la conmutación de los tiristores, se tiene que:

$$\frac{di_{RCT}}{dt} = S \left(\frac{v_A - i_{RCT} R_{RCT}}{L_{RCT}} \right) \quad (3.32)$$

donde

S es una función de conmutación que depende del ángulo de disparo de los tiristores.

La Tabla 3.7 muestra la clase *RCT* implementada. Se observa que las variables miembro de esta clase almacenan información del valor del ángulo de disparo de los tiristores y del nodo en el cual está conectado el RCT. Adicionalmente, en esta clase se almacena la variable de estado asociada con el capacitor conectado en el nodo, en el cual se conecta el RCT. La clase *RCT* al igual que la clase *CSCT* que se menciona en la Sección 3.2.7.2 heredan la función *fs* de la clase

funcion_conmutacion. Esta función es la implementación computacional del algoritmo mostrado en la Figura 3.8.

Tabla 3.7 Clase *RCT*

Variables de estado generadas	$\frac{di_{RCT}}{dt}$	Parámetros utilizados	L_{RCT}, R_{RCT}, α
Variables asociadas	V_A Voltaje en el nodo A	Método	$\frac{di_{RCT}}{dt} = S \left(\frac{v_A - i_{RCT} R_{RCT}}{L_{RCT}} \right)$
Implementación en Lenguaje C++			
<pre>class tcr_elem { public: double r,l,alfa; int nodo,ve; double signo; double evaluacion(double, double*,double); double inyeccion(double *); double fs(double, double, double, double); tcr_elem *sig ; };</pre>		<pre>double tcr_elem::evaluacion(double v1, double *vector,double t) { double s; s = fs(t,alfa,vector[ve],v1); return (v1 -s*vector[ve]*r)/l; } double tcr_elem::inyeccion(double *vector) { return signo*vector[ve]; }</pre>	

3.2.7.2 Compensador serie controlado por tiristores (CSCT)

El modelo en el dominio del tiempo del compensador Serie controlado por tiristores CSCT utilizado en esta Tesis está reportado en [Hak-Guhn Han *et al.* 1997] y [Medina, Ramos-Paz y Fuerte-Esquivel 2003b].

Considérese al arreglo propuesto para el CSCT, tal y como se muestra en la Figura 3.8. El modelo está formado por una resistencia conectada en serie con una inductancia, que representan la línea de transmisión; en serie a este elemento se tiene un arreglo en paralelo formado por una rama con un capacitor y una segunda rama constituida por un arreglo serie de una resistencia, una inductancia y dos tiristores conectados en antiparalelo.

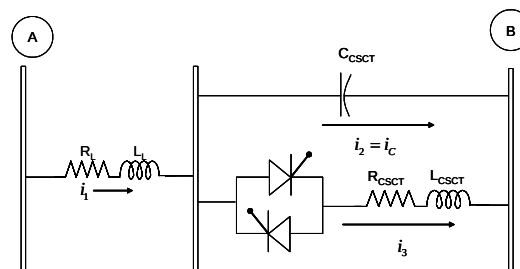


Figura 3.8 Modelo del CSCT

Considérese las mallas mostradas en la Figura 3.9,

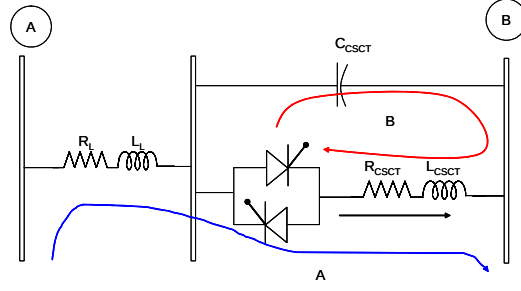


Figura 3.9 Mallas formadas en el modelo del CSCT para su análisis

Por medio de la aplicación de la LVK se tiene que:

$$v_A - v_R - v_L - v_C - v_B = 0 \quad (3.33)$$

donde:

$$v_R = i_1 R_L \quad (3.34)$$

$$v_L = L_L \frac{di_1}{dt} \quad (3.35)$$

$$v_C \quad \text{Voltaje en el capacitor } C$$

Sustituyendo (3.33) y (3.34) en (3.32) se obtiene:

$$v_A - v_B - i_1 R_L - L_L \frac{di_1}{dt} - v_C = 0 \quad (3.36)$$

despejando $\frac{di_1}{dt}$

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{v_A - v_B - i_1 R_L - v_C}{L_L} \quad (3.37)$$

Por medio de la aplicación de la LVK alrededor de la malla B, se tiene que:

$$Sv_C = i_2 R_T + L_T \frac{di_2}{dt} \quad (3.38)$$

despejando $\frac{di_2}{dt}$ se tiene que:

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{-i_2 R_T + Sv_C}{L_T} \quad (3.39)$$

Finalmente,

$$\frac{dv_C}{dt} = \frac{i_C}{C} \quad (3.40)$$

donde:

$$i_C = i_1 - i_2 \quad (3.41)$$

por lo que:

$$\frac{dv_C}{dt} = \frac{i_1 - si_2}{C} \quad (3.42)$$

La Tabla 3.8 muestra la implementación de la clase *CSCT*. Se observa que en las variables miembro de esta clase se almacena información del número de las variables de estado asociadas con los voltajes en los nodos A y B en dónde se conecta el CSCT. Adicionalmente a esta información se almacenan los parámetros del CSCT tales como su resistencia, inductancia y capacitancia así como el ángulo de disparo de los tiristores. Este modelo genera 3 variables de estado.

Tabla 3.8 Clase *CSCT*

Variables de estado generadas	$\frac{di_1}{dt}, \frac{di_2}{dt}, \frac{dv_C}{dt}$	Parámetros utilizados	$L_{TCSC}, R_{TCSC}, L_L, R_L, \alpha$
Variables asociadas	V_A Voltaje en el nodo A V_B Voltaje en el nodo B		
Métodos	$\frac{di_1}{dt} = \frac{v_A - v_B - i_1 R_L - v_C}{L_L}$	$\frac{di_2}{dt} = \frac{-i_2 R_T + S v_C}{L_T}$	$\frac{dv_C}{dt} = \frac{i_1 - i_2}{C}$
Implementación en lenguaje C++			
<pre> class tcsc_elem { public: double rtsc, ltsc, ll, rl, alfa, c; int ve[3]; int vx, vy; double signo; double evaluacion1(double, double, double*); double evaluacion2(double, double, double*, double); double evaluacion3(double, double, double*, double); double inyeccion1(double*); double inyeccion2(double*); double inyeccion3(double*); double fs(double, double, double, double); }; double tcsc_elem::evaluacion1(double v1, double v2, double *vector) { return (v1-v2-vector[ve[0]]*rl-vector[ve[2]])/ll; } double tcsc_elem::evaluacion2(double v1, double v2, double *vector, double t) { double s; s = fs(t, alfa, vector[ve[0]], vector[ve[2]]); return (-vector[ve[1]]*rtsc+s*vector[ve[2]])/ltsc; } double tcsc_elem::evaluacion3(double v1, double v2, double *vector, double t) { double s; s = fs(t, alfa, vector[ve[0]], vector[ve[2]]); return (vector[ve[0]]-s*vector[ve[1]])/c; } double tcsc_elem::inyeccion1(double *vector) { return vector[ve[0]]; } double tcsc_elem::inyeccion2(double *vector) { return vector[ve[1]]; } double tcsc_elem::inyeccion3(double *vector) { return vector[ve[2]]; } </pre>			

3.2.7.3 Función de Conmutación en dispositivos FACTS

El Funcionamiento de los dispositivos FACTS se basa en los periodos de conducción y no conducción de un par de Tiristores conectados en antiparalelo, los cuales a su vez son conectados a elementos lineales tales como resistencias, inductores y capacitores, con el objeto de modificar sus características de operación. Estos periodos de conducción se representan en esta tesis mediante el uso de una función de conmutación $S(t)$. Esta función puede tomar los valores de:

$S(t) = 1$ cuando los tiristores están en conducción.

$S(t) = 0$ cuando los tiristores no conducen.

La Figura 3.10 muestra la función de conmutación. En inicio del periodo t_0 es el cruce por cero de la corriente. El instante t_1 y t_3 son los inicios de conducción de la corriente del tiristor determinados por medio de los ángulos de disparo α_1 y α_2 , respectivamente.

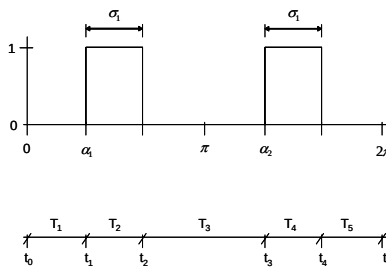


Figura 3.10 Función de Conmutación

Los instantes t_2 y t_4 son los finales de conducción de la corriente del tiristor, conmutados naturalmente para cada medio periodo. El final del periodo t_5 es el próximo cruce por cero de la corriente de línea. De la Figura 3.10 se aprecia que la salida de esta función es un número discreto 0 o 1, el cual se multiplica por la o las variables que dependan del estado de encendido o apagado de los tiristores. Esta función básicamente lo que hace es monitorear la corriente en los tiristores además del voltaje en las terminales del dispositivo FACTS, para establecer el valor de salida de dicha corriente. Dos datos adicionales que requiere esta función son el valor del ángulo de disparo de los tiristores y el tiempo. La Figura 3.11 ilustra el diagrama de flujo utilizado en la programación de la función de conmutación.

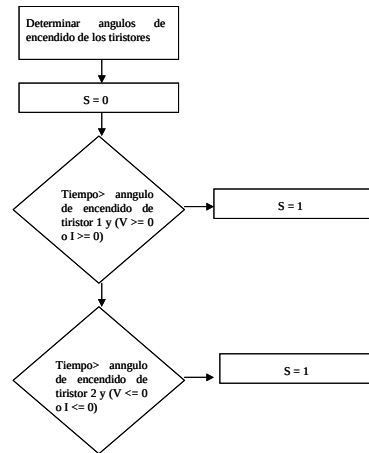


Figura 3.11 Diagrama de Flujo de la Función de Conmutación

3.2.8 Modelado de cargas

A continuación se muestra el modelo de diferentes tipos de cargas que pueden ser conectadas en los diversos nodos del sistema eléctrico de potencia. En particular se modelan las cargas: resistivas, inductivas, resistiva-inductiva-capacitiva.

3.2.8.1 Carga resistiva

En la Figura 3.12 se muestra la conexión a tierra de una carga completamente resistiva de valor R en un nodo A de un sistema eléctrico.

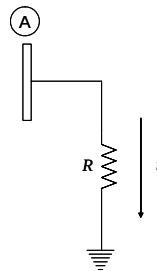


Figura 3.12 Modelo de carga resistiva

Por medio de la aplicación de una LVK se obtiene la corriente que está siendo absorbida por la resistencia.

$$i = \frac{V_A}{R} \quad (3.43)$$

La carga resistiva no genera una variable de estado, sin embargo este elemento genera una extracción de corriente i en el nodo en el que se le conecta. La Tabla 3.9 muestra la implementación en lenguaje C de la clase *rama_resistiva*.

Tabla 3.9 Clase *rama_resistiva*

Variables de estado generadas	Ninguna	Parámetros utilizados	R
Variables asociadas	V_A Voltaje en el nodo A	Método	$i = \frac{V_A}{R}$
Implementación en lenguaje C++			
<pre>class rama_resistiva { public: double r; double signo; int iny; double inyeccion(double*); int nodo; rama_resistiva *sig; };</pre>			

3.2.8.2 Carga inductiva

La Figura 3.13 muestra la conexión a tierra de una carga completamente inductiva, de valor L , en un nodo A de un sistema eléctrico.

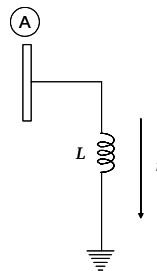


Figura 3.13 Modelo de carga inductiva

Por medio de la aplicación de una LVK y en base al despeje de $\frac{di}{dt}$, se tiene que:

$$\frac{di}{dt} = \frac{V_A}{L} \quad (3.44)$$

En la Tabla 3.10 se muestra la implementación en lenguaje C++ de la clase *rama_inductiva*, así como la corriente asociada con la corriente que circula en la rama inductiva.

Tabla 3.10 Clase *rama_inductiva*

Variables de estado generadas	$\frac{di}{dt}$	Parámetros utilizados	L
Variables asociadas	v_A Voltaje en el nodo A	Método	$\frac{di}{dt} = \frac{v_A}{L}$
Implementación en lenguaje C++			
<pre> class rama_inductiva { public: double I; double signo; int iny; int ve; double inyeccion(double*); int nodo; rama_inductiva *sig; }; </pre>			

3.2.8.3 Carga resistiva-inductiva-capacitiva

En la Figura 3.14 se muestra la conexión a tierra de una rama resistiva-inductiva-capacitiva en el nodo A de un sistema eléctrico de potencia.

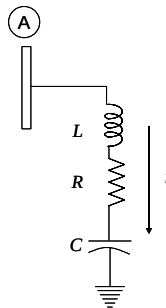


Figura 3.14 Modelo de carga resistiva-inductiva-capacitiva

Por medio de la aplicación de una LVK se llega a,

$$\frac{di}{dt} = \frac{-iR - v_C + v_A}{L} \quad (3.45)$$

se tiene además que:

$$\frac{dv_C}{dt} = \frac{i}{C} \quad (3.46)$$

En la Tabla 3.11 se encuentra la implementación en lenguaje C++ de la clase *rama_resistiva_inductiva_capacitiva*. Puede ser apreciado que esta clase genera dos variables de estado, la corriente en la rama y el voltaje en el capacitor.

Tabla 3.11 Clase *rama_resistiva_inductiva_capacitiva*

Variables de estado generadas	$\frac{di}{dt}, \frac{dv_C}{dt}$	Parámetros utilizados	L, R, C
Variables asociadas	V_A Voltaje en el nodo A	Métodos	$\frac{di}{dt} = \frac{v_A}{L}, \frac{dv_C}{dt} = \frac{i}{C}$
Implementación en lenguaje C++			
<pre> class rama_resistiva_inductiva_capacitiva { public: double l,r,c; double signo; int iny; int ve[2]; double inyeccion(double*); int nodo; rama_resistiva_inductiva_capacitiva *sig; }; </pre>			

3.2.8.4 Modelo de cargas P Q

Con el objeto de poder representar la conexión de cargas en los nodos, se estableció el modelo de carga PQ en dónde la potencia real y potencia reactiva se transforman en una impedancia en derivación conectada en el nodo. Las expresiones siguientes se utilizan para determinar el valor de la parte real y parte imaginaria de la impedancia,

$$R = \frac{V^2}{P} \quad (3.47)$$

$$L = \frac{V^2}{Q\omega} \quad (3.48)$$

para el caso de una extracción de potencia reactiva

$$C = \frac{-Q}{V^2\omega} \quad (3.49)$$

para el caso de una inyección de potencia reactiva

donde:

V es la magnitud del voltaje en el nodo.

R es la resistencia de la impedancia

L es inductancia

P es la potencia real extraída en el nodo

Q es la potencia reactiva extraída o inyectada en el nodo

Cuando se especifica una carga completamente real se utiliza el modelo mostrado en la Figura 3.12, en el cual el valor de R es calculado por medio de la expresión 3.47. En el caso de extracciones o inyecciones de potencia reactiva se utilizan los modelos mostrados en las Figuras 3.13 y 3.2 respectivamente.

3.3 Representación trifásica de los elementos de un sistema eléctrico de potencia

3.3.1 Modelo del generador

El modelo utilizado para representar el comportamiento de la máquina síncrona es el modelo en coordenadas de fase. El comportamiento en el tiempo de la máquina es representado por un conjunto de 8 EDO's generadas a partir de las Ecuaciones (3.50), (3.57) y (3.58), las cuales permiten determinar los flujos en los devanados del estator, campo y amortiguadores, así como la velocidad y ángulo del rotor. Una vez que han sido determinados estos flujos, se procede a determinar las corrientes por medio de la Ecuación algebraica (3.51) [Elgerd 1971]. El modelo utilizado en este Tesis ha sido presentado en [Rodríguez y Medina 2004] en dónde se hace un análisis del comportamiento transitorio y en EEP de la máquina síncrona en coordenadas de fase. En este mismo trabajo se incluye la aplicación de la técnica DN con el objeto de determinar de manera rápida el estado estacionario de operación de la máquina síncrona, logrando resultados favorables. En [Medina *et al.* 2004b] se presenta un análisis de la operación de la máquina síncrona en modelada en coordenadas de fase utilizando diversas plataformas de programación, tales como: lenguaje C++ y Matlab®. En este trabajo se aplica también la técnica de DN.

La Figura 3.15 muestra el circuito equivalente de la máquina síncrona por medio del cual se realizará el análisis de su comportamiento en el tiempo.

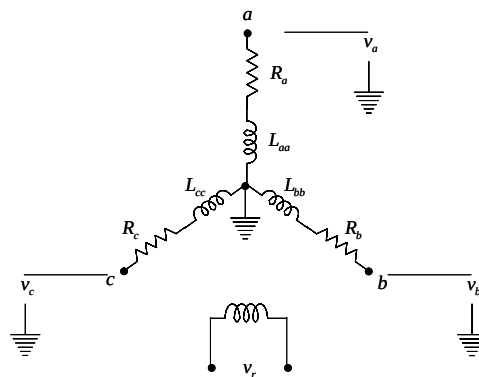


Figura 3.15 Máquina síncrona

La aplicación de una LVK permite determinar los flujos en la máquina síncrona por medio de la Ecuación,

$$\frac{d\phi}{dt} = \mathbf{v}_{\text{est}} - \mathbf{R}\mathbf{L}^{-1}\phi - \mathbf{v}_{\text{nodo}} \quad (3.50)$$

donde la corriente puede calcularse como,

$$\mathbf{i} = \mathbf{L}^{-1}\phi \quad (3.51)$$

donde:

$\mathbf{i}$ es el vector de corrientes de la máquina ϕ es el vector de flujos de la máquina

$\mathbf{v}_{\text{est}}$ es el vector de voltajes en las terminales del estator $\mathbf{R}$ es la matriz de resistencias

$\mathbf{L}$ es la matriz de inductancias

$\mathbf{v}_{\text{nodo}}$ es el vector de voltajes en el nodo de conexión de la máquina

Las matrices $\mathbf{i}$, $\mathbf{v}$, $\mathbf{R}$ y $\mathbf{L}$ tienen la forma general,

$$\mathbf{i} = [i_a \ i_b \ i_c \ i_f \ i_{kq} \ i_{kd} \ i_{kQ} \ i_{kD}]' \quad (3.52)$$

$$\mathbf{v} = [v_a \ v_b \ v_c \ v_f \ v_{kd} \ v_{kq} \ v_{kD} \ v_{kQ}]' \quad (3.53)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_a & & & & & & & \\ & R_b & & & & & & \\ & & R_c & & & & & \\ & & & R_f & & & & \\ & & & & R_{kd} & & & \\ & & & & & R_{kq} & & \\ & & & & & & R_{kD} & \\ & & & & & & & R_{kQ} \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{SS} & \mathbf{L}_{SR} \\ \mathbf{L}_{RS} & \mathbf{L}_{RR} \end{bmatrix} \quad (3.55)$$

de la matriz de inductancias se tiene que:

$\mathbf{L}_{SS}$ Es la matriz de inductancias del estator, la cual está formada por las inductancias propias y mutuas de las fases a , b y c .

$$\mathbf{L}_{SS} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{L}_{SS} = \begin{bmatrix} L_{aa0} + L_{aa2} \cos 2\theta & -L_{ab0} + L_{ab2} \cos \left(2\left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \right) & -L_{ac0} + L_{ac2} \cos \left(2\left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \right) \\ -L_{ba0} + L_{ba2} \cos \left(2\left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \right) & L_{bb0} + L_{bb2} \cos \left(2\left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \right) & -L_{bc0} + L_{bc2} \cos 2\theta \\ -L_{ca0} + L_{ca2} \cos \left(2\left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \right) & -L_{cb0} + L_{cb2} \cos 2\theta & L_{cc0} + L_{cc2} \cos \left(2\left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \right) \end{bmatrix}$$

$\mathbf{L}_{SR}$ Es la matriz de inductancias entre el estator y el rotor, formada por las inductancias mutuas entre las tres fases del estator y el campo y los devanados de amortiguamiento de los ejes d y q . Se tiene además que, $\mathbf{L}_{RS} = [\mathbf{L}_{SR}]^T$

$$\mathbf{L}_{SR} = \begin{bmatrix} L_{af} & L_{akd} & L_{akq} \\ L_{bf} & L_{bkd} & L_{bkq} \\ L_{cf} & L_{ckd} & L_{ckq} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{L}_{SR} = \begin{bmatrix} M_{f2} \cos \theta & M_{kd2} \cos \theta & M_{kq2} \cos \theta \\ M_{f2} \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & M_{kd2} \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & M_{kq2} \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ M_{f2} \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & M_{kd2} \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & M_{kq2} \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix}$$

$\mathbf{L}_{RS}$ Es la matriz de inductancias propias y mutuas entre los devanados de campo y amortiguadores.

$$\mathbf{L}_{RS} = \mathbf{L}_{SR}^T$$

$\mathbf{L}_{RR}$ Es la matriz de inductancias del rotor.

$$\mathbf{L}_{RR} = \begin{bmatrix} L_{ff} & L_{fkd} & 0 \\ L_{fkd} & L_{kkd} & 0 \\ 0 & 0 & L_{kkq} \end{bmatrix}$$

el par eléctrico es determinado mediante la expresión,

$$T_e = p \frac{2}{3\sqrt{3}} [\phi_a (i_b - i_c) + \phi_b (i_c - i_a) + \phi_c (i_a - i_b)] \quad (3.56)$$

donde

p representa el número de polos

La ecuación de oscilación de segundo orden de la máquina síncrona puede ser descompuesta en dos ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden, una para la velocidad y otra para el ángulo respectivamente,

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{\omega_B}{2H} (T_m - T_e - K_D (\omega_r - \omega_B)) \quad (3.57)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_r - \omega_B \quad (3.58)$$

donde:

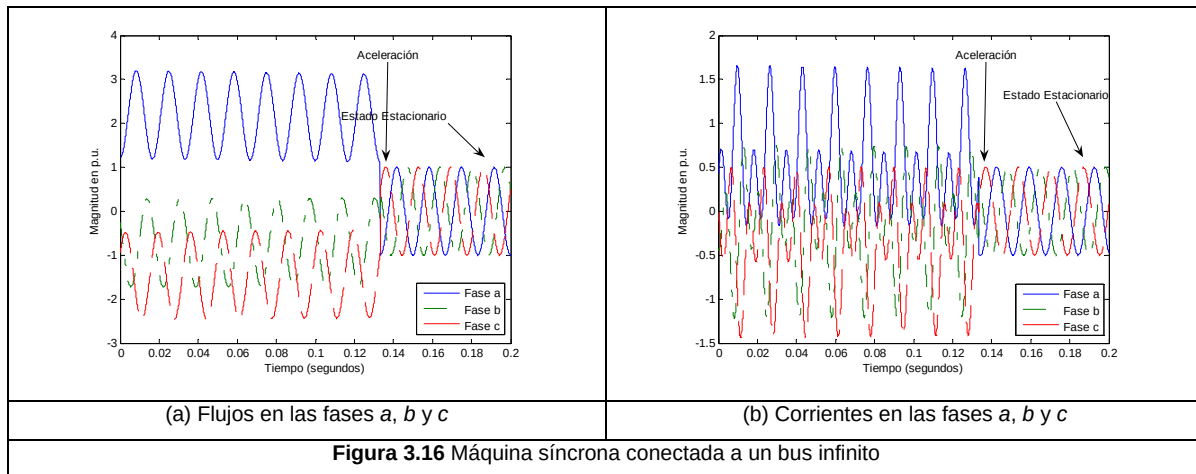
ω_B	Velocidad base	ω_r	Velocidad del rotor de la máquina síncrona
T_m	Par mecánico de la máquina síncrona	T_e	Par eléctrico de la máquina síncrona
K_D	Constante de inercia de la máquina síncrona		

En la Tabla 3.12 se muestra el proceso de convergencia al EEP del sistema formada por la máquina síncrona conectada a un bus infinito. De los resultados mostrados en esta tabla puede apreciarse que el método FB requiere de 8345 periodos completos de integración para alcanzar el EEP estacionario, en tanto que el método DN ocupa solamente 44 periodos completos de integración, lo cual representa el 0.52 % del total de periodos completos requeridos por el método FB.

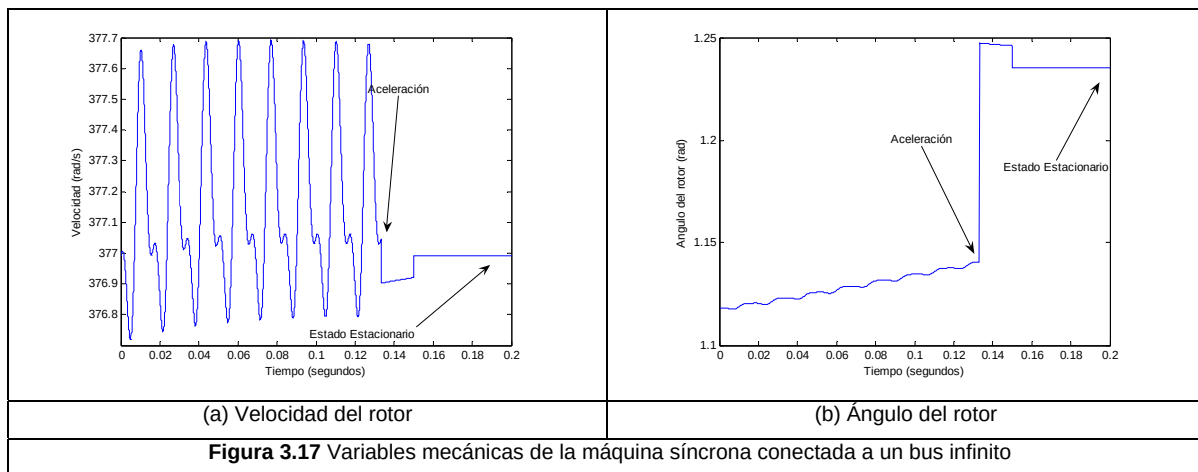
Tabla 3.12 Proceso de convergencia de los métodos de FB y DN de la máquina síncrona conectada a un bus infinito

NCC	FB	DN
1	2.519309E-02	2.519309E-02
2	1.658196E-02	1.658196E-02
3	1.031189E-02	1.031189E-02
⋮	⋮	⋮
8	1.007072E-02	1.007072E-02
17	9.650733E-03	1.794614E-02
26	9.248264E-03	6.824086E-05
35	8.862580E-03	5.994480E-09
44	8.492979E-03	5.684342E-14
⋮	⋮	
8345	9.96695E-11	

En la Figura 3.16(a) se muestra el comportamiento de los flujos en las fases *a*, *b* y *c* de la máquina síncrona conectada a un bus infinito, en tanto que en la Figura 3.16(b) se muestra el comportamiento de las corrientes. En ambas figuras puede observarse la forma en la cual se obtiene el EEP con la aplicación de la técnica de aceleración DN.



En la Figura 3.17(a) se aprecia la forma de onda de la velocidad del rotor, en tanto que en la Figura 3.17(b) se muestra el comportamiento en el tiempo del ángulo del rotor de la máquina síncrona. Se observa que una vez que se aplica la técnica DN se obtiene rápidamente el EEP de las formas de onda. Se hace notar que estas dos variables de estado no son periódicas, sin embargo puede apreciarse que el método DN obtiene una muy buena aproximación en el EEP de estas variables de estado.



Finalmente en la Figura 3.18 se muestran las formas de onda del flujo y la corriente en la fase a de la máquina síncrona. Puede observarse que durante los primeros periodos de simulación la corriente muestra una doble frecuencia con respecto al flujo. Una vez en el EEP desaparece la doble frecuencia de la corriente.

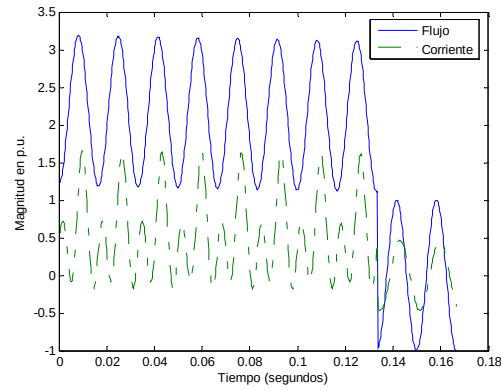


Figura 3.18 Flujo y corriente en la fase a de la máquina síncrona conectada a un bus infinito

Las condiciones iniciales para las variables de estado de la máquina síncrona son calculadas mediante el procedimiento descrito en [Kundur 1994].

La Tabla 3.13 muestra la implementación de la clase *generador_sincrono_3f* así como los elementos más relevantes asociados con su formulación.

Tabla 3.13 Clase *generador_sincrono_3f*

Variables de estado generadas: 8	$\frac{d\phi}{dt}, \frac{d\delta}{dt}, \frac{d\omega_r}{dt}$	Parámetros utilizados	$\mathbf{L}, \mathbf{R}$
Variables asociadas	v_A Voltaje en el nodo A	Métodos	$\frac{d\delta}{dt} = \omega_r - \omega_B$ $\frac{di}{dt} = \mathbf{L}^{-1}(\mathbf{v}_{int} - \mathbf{R}\mathbf{i} - \mathbf{v})$ $\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{\omega_B}{2H}(T_m - T_e - K_D(\omega_r - \omega_B))$
Implementación en lenguaje C++			
<pre> class gen_sincrono { public: double signo; int ve[6]; int nodo; double L[6][6], C[6][6]; double Lffd, Lfkd, LkqkQ, Laa0, Laa2, Lab0, Lab2, Mf1, Mkd1, Mkq1, Lkqd; double Lkkq, Ra, Rf, Rkd, Rkq, R[6][6], Li, H, kd, fpp, b[6], Vma, Vmb, Vmc; double Et, It, Lq, Ld, Lad, Laq, polos, frecuencia; double fi, Ed, Eq, Id, Iq, fid, fiq, delta, ffd, lfd, teta, wr, Tm; void inicializa_valores(void); void calcula_r(void); void calcula_l(double); double *calcula_ci(void); void invierte_l(void); double *multiplica(double*); double *evalua(double, double*); double *inyeccion(double *); gen_sincrono *sig; }; </pre>			

3.3.2 Modelo de la línea de transmisión

A continuación se presentan dos modelos de la línea de transmisión: el modelo de línea de longitud corta y el modelo de longitud media.

3.3.2.1 Modelo de línea de longitud corta

Se considera que una línea de transmisión es de longitud corta cuando tienen menos de 80 kms de longitud. En este caso la capacitancia en derivación es tan pequeña que se puede omitir por completo [Stevenson 1962]. El modelo de la línea trifásica de longitud media mostrado en la Figura 3.19.

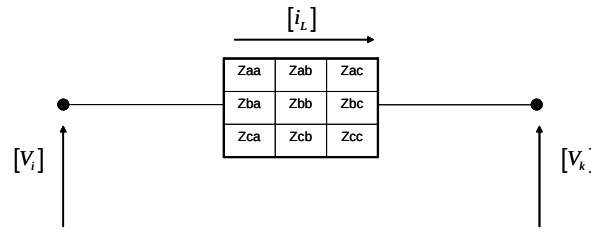


Figura 3.19 Modelo de la línea de transmisión trifásica de longitud corta

Por medio de la aplicación de una LVK se tiene que,

$$\mathbf{V}_i = \mathbf{Z}_{ik} \mathbf{i}_{ik} + \mathbf{V}_k \quad (3.59)$$

desarrollando y resolviendo para $\frac{d\mathbf{i}_{ik}}{dt}$ se tiene que,

$$\frac{d\mathbf{i}_{ik}}{dt} = \mathbf{L}_{ik}^{-1} (\mathbf{V}_i - \mathbf{V}_k - \mathbf{R}_{ik} \mathbf{i}_{ik}) \quad (3.60)$$

donde:

$\mathbf{V}_i$ es el vector de voltajes trifásicos en el nodo i .

$\mathbf{V}_k$ es el vector de voltajes trifásicos en el nodo k .

$$\mathbf{L}_{ik} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \quad \text{es la matriz de inductancias de la línea de transmisión}$$

$$\mathbf{R}_{ik} = \begin{bmatrix} R_{aa} & R_{ab} & R_{ac} \\ R_{ba} & R_{bb} & R_{bc} \\ R_{ca} & R_{cb} & R_{cc} \end{bmatrix} \quad \text{es la matriz de resistencias de la línea de transmisión.}$$

La Tabla 3.14 muestra la implementación en lenguaje C++ de la clase *linea_transmission_3f_corta*.

Tabla 3.14 Clase *linea_transmision_3f_corta*

Variables de estado generadas: 3	$\frac{di}{dt}$	Parámetros utilizados	L , R
Variables asociadas	V_i Voltaje en el nodo i V_k Voltaje en el nodo k	Método	$\frac{di_{ik}}{dt} = L_{ik}^{-1} (V_i - V_k - R_{ik} i_{ik})$
Implementación en lenguaje C++			
<pre> class linea_transmision_3f_corta { public: double r[3][3], l[3][3]; int ve[3]; int vx, vy; double *evaluacion(double*, double*, double*); double *inyeccion(double*); linea_transmision *sig; }; double *linea_transmision_3f_corta::inyeccion(double *vector) { marg[0] = vector[ve[0]]; marg[1] = vector[ve[1]]; marg[2] = vector[ve[2]]; return marg; } </pre>		<pre> double *linea_transmision_3f_corta::evaluacion(double *v1, double *v2, double *vector) { int i, j; double suma, aux[3]; for (i=0; i<3; i++) { suma = 0.0; for (j=0; j<3; j++) suma = suma + r[i][j]*vector[ve[j]]; aux[i] = v1[i]-v2[i]-suma; } for (i=0; i<3; i++) { suma = 0.0; for (j=0; j<3; j++) suma = suma + l[i][j]*aux[j]; marg[i] = suma; } return marg; } </pre>	

3.3.2.2 Modelo de longitud media

Se dice que una línea de transmisión es de longitud media cuando su longitud se encuentra entre los 80 y 240 kms. En los cálculos de una línea de longitud media se incluye la admitancia paralelo (generalmente capacitancia pura) [Stevenson 1962]. Considérese una línea larga de transmisión, la cual considera el efecto capacitivo en sus extremos, tal y como se muestra en la Figura 3.20.

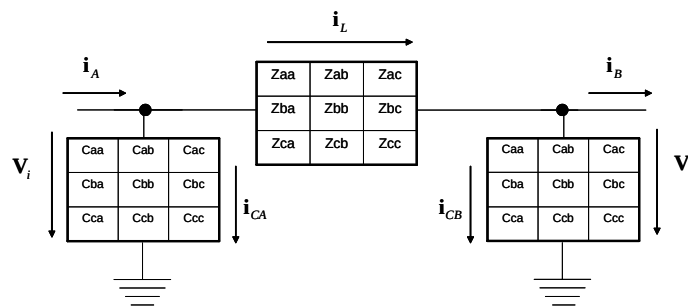


Figura 3.20 Modelo de la línea de transmisión trifásica de longitud media

Por medio de la aplicación de una LVK se tiene que,

$$V_A - V_L - V_B = 0 \quad (3.61)$$

o bien,

$$\frac{d\mathbf{i}_L}{dt} = \mathbf{L}^{-1}(\mathbf{V}_A - \mathbf{V}_B - \mathbf{i}_L \mathbf{R}) \quad (3.62)$$

Aplicando una LCK en el nodo A se tiene que:

$$\mathbf{i}_{CA} = \mathbf{i}_A - \mathbf{i}_L \quad (3.63)$$

se sabe que,

$$\frac{d\mathbf{V}_A}{dt} = \mathbf{i}_{CA} \quad (3.64)$$

por lo que,

$$\frac{d\mathbf{V}_A}{dt} = \mathbf{C}^{-1}(\mathbf{i}_A - \mathbf{i}_L) \quad (3.65)$$

Aplicando ahora una LCK en el nodo B se llega a:

$$\mathbf{i}_{CB} = \mathbf{i}_L - \mathbf{i}_B \quad (3.66)$$

se sabe que,

$$\frac{d\mathbf{V}_B}{dt} = \mathbf{i}_{CB} \quad (3.67)$$

por lo que,

$$\frac{d\mathbf{V}_B}{dt} = \mathbf{C}^{-1}(\mathbf{i}_L - \mathbf{i}_B) \quad (3.68)$$

3.3.3 Banco de capacitores trifásico

Consideremos el modelo de un banco de capacitores trifásico, tal y como se muestra en la Figura 3.21. De esta figura puede observarse que en el nodo en el cual se conecta el banco de capacitores existen una serie de corrientes que entran al nodo y otras que salen del nodo. Estas corrientes están representadas como dos sumatorias: $\sum \mathbf{i}_{ent}$, $\sum \mathbf{i}_{sal}$ que representan las corrientes que inciden en el nodo y las corrientes que salen del nodo respectivamente.

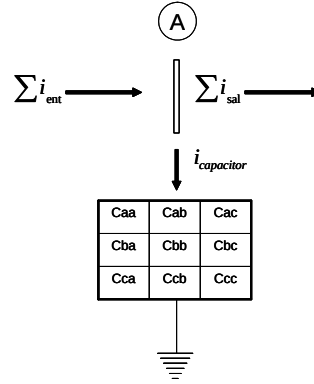


Figura 3.21 Modelo del Banco de Capacitores trifásico

Aplicando la LCK en el nodo se tiene que:

$$\sum \mathbf{i}_{ent} = \sum \mathbf{i}_{sal} + \mathbf{i}_{capacitor} \quad (3.69)$$

Se sabe que:

$$\frac{d\mathbf{V}_C}{dt} = \mathbf{C}^{-1} \mathbf{i}_{capacitor} \quad (3.70)$$

por lo que:

$$\frac{d\mathbf{V}_C}{dt} = \mathbf{C}^{-1} (\sum \mathbf{i}_{ent} - \sum \mathbf{i}_{sal}) \quad (3.71)$$

donde:

$\mathbf{V}_C$ es el vector de voltaje trifásico en el nodo de conexión del banco de capacitares trifásico.

La Tabla 3.15 muestra la información acerca del modelo del banco de capacitores trifásico. De esta Tabla puede observarse que en la clase *banco_de_capacitores_3f* se almacena como variable miembro una matriz de 3x3 que almacena los valores de la capacitancia. Adicionalmente se almacena el número de las tres variables de estado generadas por este modelo, las cuales son los voltajes trifásicos en las terminales del banco de capacitores. Las variables de estado asociada con este modelo son todas aquellas corrientes que inciden en el nodo en el cual se conecta el banco de capacitores.

Tabla 3.15 Clase *banco_capacitores_3f*

Variables de estado generadas 3	$\frac{dV_C}{dt}$	Parámetros utilizados	C
Variables asociadas	$\sum \mathbf{i}_{ent}$ Corrientes que entran al nodo A $\sum \mathbf{i}_{sal}$ Corrientes que salen del nodo A	Método	$\frac{dV_C}{dt} = C^{-1} \left(\sum \mathbf{i}_{ent} - \sum \mathbf{i}_{sal} \right)$
Implementación en lenguaje C++			
<pre> class banco_capacitores { public: double c[3][3]; int ve[3]; int nodo; banco_capacitores *sig; }; </pre>			

3.3.4 Modelo del transformador trifásico

El transformador trifásico es modelado por medio de una conexión de bancos de transformadores monofásicos, tal y como se ilustra en la Figura 3.22. La conexión del banco de transformadores se considera en estrella aterrizada-estrella aterrizada. El modelo del transformador monofásico corresponde al modelo monofásico presentado en la Sección 3.2.6.

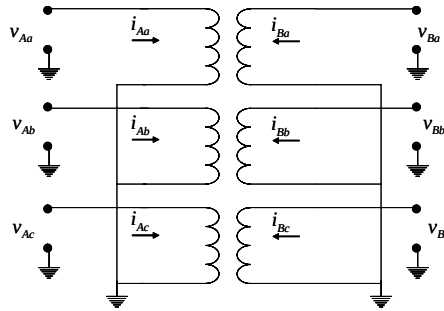


Figura 3.22 Modelo del transformador trifásico

Para la fase a se tiene que,

$$\frac{di_{Aa}}{dt} = \frac{V_{Aa}}{L_{Aa}} - \frac{i_{Aa}R_{Aa}}{L_{Aa}} - \frac{V_{Ca}}{L_{Aa}} \quad (3.72a)$$

$$\frac{di_{Ba}}{dt} = \frac{V_{Ca}}{L_{Ba}} - \frac{i_{Ba}R_{Ba}}{L_{Ba}} - \frac{V_{Ba}}{L_{Ba}} \quad (3.72b)$$

$$\frac{d\lambda_{ma}}{dt} = R_{Ca} (i_{Aa} - i_{Ba} - i_{ma}(\lambda_{ma})) \quad (3.72c)$$

Para la fase *b* se tiene que,

$$\frac{di_{Ab}}{dt} = \frac{V_{Ab}}{L_{Ab}} - \frac{i_{Ab}R_{Ab}}{L_{Ab}} - \frac{V_{Cb}}{L_{Ab}} \quad (3.73a)$$

$$\frac{di_{Bb}}{dt} = \frac{V_{Cb}}{L_{Bb}} - \frac{i_{Bb}R_{Bb}}{L_{Bb}} - \frac{V_{Bb}}{L_{Bb}} \quad (3.73b)$$

$$\frac{d\lambda_{mb}}{dt} = R_{Cb} (i_{Ab} - i_{Bb} - i_{mb} (\lambda_{mb})) \quad (3.73c)$$

Para la fase *c* se tiene que,

$$\frac{di_{Ac}}{dt} = \frac{V_{Ac}}{L_{Ac}} - \frac{i_{Ac}R_{Ac}}{L_{Ac}} - \frac{V_{Cc}}{L_{Ac}} \quad (3.74a)$$

$$\frac{di_{Bc}}{dt} = \frac{V_{Cc}}{L_{Bc}} - \frac{i_{Bc}R_{Bc}}{L_{Bc}} - \frac{V_{Bc}}{L_{Bc}} \quad (3.74b)$$

$$\frac{d\lambda_{mc}}{dt} = R_{Cc} (i_{Ac} - i_{Bc} - i_{mc} (\lambda_{mc})) \quad (3.74c)$$

La representación de otras conexiones de transformadores puede ser realizada por medio de una matriz de conectividad [Arrillaga y Arnold 1990]. En este trabajo se muestra exclusivamente la conexión estrella aterrizada-estrella aterrizada.

La Tabla 3.16 muestra la implementación en lenguaje C++ y los detalles más relevantes de la clase *transformador_potencia_3f*.

Tabla 3.16 Clase *transformador_potencia_3f*

Variables de estado generadas: 9	$\frac{di_1}{dt}, \frac{di_2}{dt}, \frac{d\lambda_m}{dt}$	Parámetros utilizados	R , L
Variables asociadas	v_A Voltaje en el nodo A v_B Voltaje en el nodo B	Método	Especificado en la Ecuación 4.47
Implementación en lenguaje C++			
<pre>class transformador_potencia_3f { public: double c[3][3]; int iny[3]; double signo[3]; double *evaluacion(double*,double*,double*); int ve[9]; int nodo; };</pre>			

3.3.5 Modelo de la Rama Magnetizante

Las ramas magnetizantes en esta Tesis son modeladas como bancos de ramas magnetizantes monofásicas conectadas a un nodo, tal y como se ilustra en la Figura 3.23.

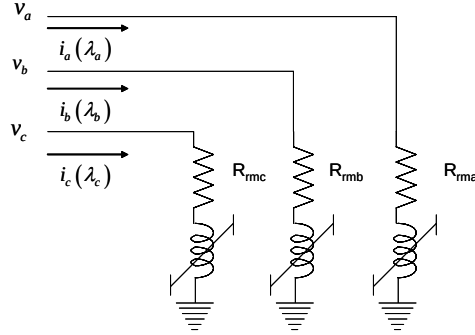


Figura 3.23 Modelo de la Rama Magnetizante

El efecto de saturación es modelado mediante por medio de la Técnica dada por la Ecuación (3.8)

$$\frac{d\lambda_a}{dt} = v_a - R_{rma} i_a(\lambda_a) \quad (3.75a)$$

$$\frac{d\lambda_b}{dt} = v_b - R_{rmb} i_b(\lambda_b) \quad (3.75b)$$

$$\frac{d\lambda_c}{dt} = v_c - R_{rmc} i_c(\lambda_c) \quad (3.75c)$$

En la Tabla 3.17 se muestran los detalles más importantes además de la implementación en lenguaje C++ de la clase *rama_magnetizante_3f*.

Tabla 3.17 Clase *rama_magnetizante_3f*

Variables de estado generadas: 3	$\frac{d\lambda_A}{dt}$	Parámetros utilizados	$\mathbf{R}_m$
Variables asociadas	$\mathbf{v}_A$ Voltaje en el nodo A	Método	$\frac{d\lambda_A}{dt} = \mathbf{v}_A - \mathbf{R}_m \mathbf{i}_A(\lambda_A)$
Implementación en lenguaje C++			
<pre>class rama_magnetizante { public: double r,l; double signo; int ve[3]; int nodo; double pot; double *evaluacion(double*, double*); double *inyeccion(double *); rama_magnetizante *sig; };</pre>		<pre>double *rama_magnetizante::evaluacion(double *v1, double *vector) { marg[0] = (-r*pow(vector[ve[0]],pot)+v1[0]); marg[1] = (-r*pow(vector[ve[1]],pot)+v1[1]); marg[2] = (-r*pow(vector[ve[2]],pot)+v1[2]); return marg; } double *rama_magnetizante::inyeccion(double *vector) { marg[0] = signo*pow(vector[ve[0]],pot); marg[1] = signo*pow(vector[ve[1]],pot); marg[2] = signo*pow(vector[ve[2]],pot); return marg; }</pre>	

3.3.6 Modelo del Horno de Arco Eléctrico

El modelo utilizado para representar el horno de arco trifásico consiste en considerar una conexión de tres hornos de arco eléctrico monofásicos. El modelo monofásico del horno de arco eléctrico es el mismo que ha sido mostrado en la Sección 3.2.6 de esta Tesis [Acha *et al.* 1990]. La Figura 3.24 muestra la representación del horno de arco trifásico.

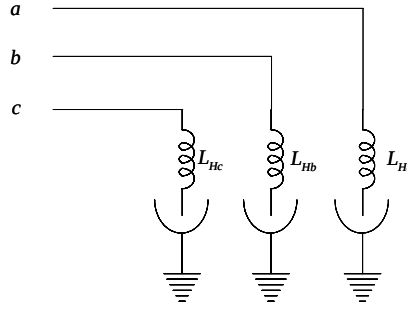


Figura 3.24 Modelo del horno de arco eléctrico trifásico

En la Tabla 3.18 se muestran los detalles relevantes de la clase *horno_arco_3f* además de su implementación en lenguaje C++.

Tabla 3.18 Clase *horno_arco_3f*

Variables de estado generadas: 6	$\frac{di_{Ha}}{dt}, \frac{di_{Hb}}{dt}, \frac{di_{Hc}}{dt}, \frac{dr_a}{dt}, \frac{dr_b}{dt}, \frac{dr_c}{dt}$		
Parámetros utilizados	$K_1, k_2, k_3, m, n, [L_H]$	Variables asociadas	v_A Voltaje en el nodo A
Métodos	$\frac{di_H}{dt} = [L_H]^{-1} \left(-k_3 r^{-(m+2)} i_H + v_A \right)$ $\frac{dr}{dt} = \frac{k_3}{k_2} r^{-(m+2)} i_H^2 - \frac{k_1}{k_2} r^{n-1}$		
Implementación en lenguaje C++			
<pre>class horno_de_arco { public: double k1,k2,k3,m,n,lh; int nodo; int ve[3]; int ve_r[3]; double ci[3]; int iny; double signo; double *evaluacion1(double*, double*); double *evaluacion2(double*, double*); double *inyeccion(double *); horno_de_arco *sig; }; double *horno_de_arco::inyeccion(double *vector) { marg[0] = signo*vector[ve[0]]; marg[1] = signo*vector[ve[1]]; marg[2] = signo*vector[ve[2]]; return marg; }</pre>		<pre>double *horno_de_arco::evaluacion1(double *v1, double *vector) { marg[0] = (-k3*pow(vector[ve_r[0]],-m-2.0)*vector[ve[0]]+v1[0])/lh; marg[1] = (-k3*pow(vector[ve_r[1]],-m-2.0)*vector[ve[1]]+v1[1])/lh; marg[2] = (-k3*pow(vector[ve_r[2]],-m-2.0)*vector[ve[2]]+v1[2])/lh; return marg; } double *horno_de_arco::evaluacion2(double *v1, double *vector) { marg[0] = ((k3/k2)*pow(vector[ve_r[0]],-m-3.0)*pow(vector[ve[0]],2.0) - (k1/k2)*pow(vector[ve_r[0]],n-1.0)); marg[1] = ((k3/k2)*pow(vector[ve_r[1]],-m-3.0)*pow(vector[ve[1]],2.0) - (k1/k2)*pow(vector[ve_r[1]],n-1.0)); marg[2] = ((k3/k2)*pow(vector[ve_r[2]],-m-3.0)*pow(vector[ve[2]],2.0) - (k1/k2)*pow(vector[ve_r[2]],n-1.0)); return marg; }</pre>	

3.3.7 Modelos de Cargas trifásicas

A continuación se presenta el modelo de tres diferentes tipos de cargas conectadas en estrella aterrizada, las cuales son: carga trifásica completamente resistiva, carga trifásica completamente inductiva y carga trifásica resistiva-inductiva-capacitiva.

3.3.7.1 Carga Resistiva en conexión estrella aterrizada

Considérese la conexión de una carga completamente resistiva conectada en estrella aterrizada, tal y como se muestra en la Figura 3.25.

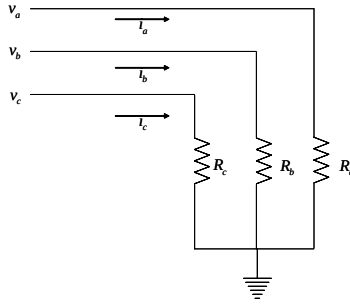


Figura 3.25 Modelo de una carga Resistiva trifásica conectada en estrella aterrizada

Consideremos la siguiente ecuación matricial

$$\mathbf{V} = \mathbf{R}\mathbf{i} \quad (3.76)$$

despejando $\mathbf{i}$ se tiene que:

$$\mathbf{i} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{V} \quad (3.77)$$

donde:

$\mathbf{V}$ vector de voltajes trifásicos en el nodo de conexión de la carga

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & 0 & 0 \\ 0 & r_{22} & 0 \\ 0 & 0 & r_{33} \end{bmatrix} \quad \text{matriz de resistencias}$$

$\mathbf{i}$ vector de corriente trifásica que entra a la carga.

El modelo de la carga resistiva conectada en estrella no genera variables de estado, lo único que genera es una expresión algebraica que representa la corriente que el nodo absorbe del sistema. El vector $\mathbf{i}$ representa la corriente que está siendo demandada por la carga resistiva

conectada en conexión estrella. La Tabla 3.19 muestra la clase *rama_resistiva* así como su implementación computacional en lenguaje C++.

Tabla 3.19 Clase *rama_resistiva*

Variables de estado generadas: 0		Parámetros utilizados	R
Variables asociadas	v_A Voltaje en el nodo A	Método	$i = [R]^{-1} v$
Implementación en lenguaje C++			
<pre>class rama_resistiva { public: double r[3][3]; int nodo; double signo; double *inyeccion(double *v1, double *vector); rama_resistiva *sig; };</pre>		<pre>double *rama_resistiva::inyeccion(double *v1, double *vector) { int i,j; double suma; for (i=0; i<3; i++) { suma = 0.0; for (j=0; j<3; j++) suma = suma + r[i][j]*v1[j]; marg[i] = suma; } return marg; }</pre>	

3.3.7.2 Carga inductiva conectada en estrella

Consideremos ahora la conexión de una carga completamente inductiva conectada en estrella, tal y como se ilustra en la Figura 3.26.

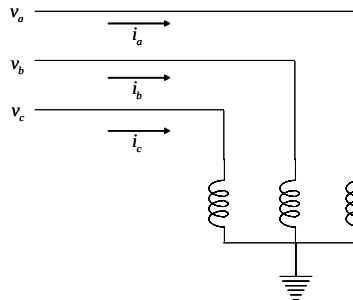


Figura 3.26 Modelo de una carga inductiva trifásica conectada en estrella aterrizada

Consideremos:

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_L \quad (3.78)$$

donde

$\mathbf{V}$ es el vector de voltajes trifásicos en el cual se conecta la carga inductiva.

desarrollando:

$$\mathbf{V} = \mathbf{L} \frac{d\mathbf{i}}{dt} \quad (3.79)$$

despejando:

$$\frac{d\mathbf{i}}{dt} = \mathbf{L}^{-1}\mathbf{V} \quad (3.80)$$

de manera matricial se tiene que:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{aa} & l_{ab} & l_{ac} \\ l_{ba} & l_{bb} & l_{bc} \\ l_{ca} & l_{cb} & l_{cc} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (3.81)$$

3.3.7.3 Carga resistiva-inductiva-capacitiva

Considere la conexión de una carga resistiva-inductiva-capacitiva conectada en estrella aterrizada, tal y como se muestra en la Figura 3.27.

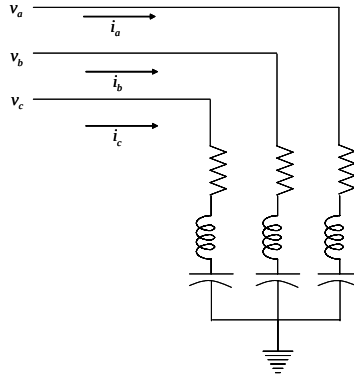


Figura 3.27 Modelo de una carga Resistiva-inductiva-capacitiva trifásica conectada en estrella aterrizada

El vector de corrientes trifásicas que están entrando a la carga está dado por,

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{aa} & l_{ab} & l_{ac} \\ l_{ba} & l_{bb} & l_{bc} \\ l_{ca} & l_{cb} & l_{cc} \end{bmatrix}^{-1} \left[\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r_{aa} & 0 & 0 \\ 0 & r_{bb} & 0 \\ 0 & 0 & r_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{cap_a} \\ v_{cap_b} \\ v_{cap_c} \end{bmatrix} \right] \quad (3.82)$$

donde

$$\begin{bmatrix} l_{aa} & l_{ab} & l_{ac} \\ l_{ba} & l_{bb} & l_{bc} \\ l_{ca} & l_{cb} & l_{cc} \end{bmatrix} \text{ es la matriz de inductancias} \quad \begin{bmatrix} r_{aa} & 0 & 0 \\ 0 & r_{bb} & 0 \\ 0 & 0 & r_{cc} \end{bmatrix} \text{ es la matriz de resistencias}$$

el voltaje trifásico en los capacitores es,

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_{cap_a} \\ v_{cap_b} \\ v_{cap_c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{aa} & C_{ab} & C_{ac} \\ C_{ba} & C_{bb} & C_{bc} \\ C_{ca} & C_{cb} & C_{cc} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.83)$$

3.4 Técnica de Generación Automática de ODE's Propuesta

La técnica propuesta para la generación automática del conjunto de EDO's que describen la dinámica de un sistema eléctrico no lineal puede ser resumida de la siguiente manera,

1. Lectura de archivo de datos
2. Validación de datos
3. Formación de las listas de objetos
4. Determinación de las corrientes incidentes en los nodos
5. Simulación eficiente
6. Generación de resultados

Se adicionan las etapas de simulación eficiente y la de generación de resultados, las cuales no forman parte de la técnica de generación automática del conjunto de EDO's, sin embargo están asociadas con al aplicación de esta técnica para el análisis del EEP de redes eléctricas. A continuación se describirá de manera detallada cada una de las seis etapas en que está dividida la técnica propuesta en esta Tesis.

3.4.1 Lectura de archivo de datos

La información relacionada con la topología de la red a ser analizada así como los valores de los parámetros de los diversos dispositivos que forman parte de ella se introducen a través de un archivo de datos con formato ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*), el cual debe tener la estructura mostrada en la Tabla 3.20. Este archivo puede ser generado por cualquier editor de texto. En particular en el desarrollo de los casos de estudio presentados en esta Tesis, además de la codificación de todos los programas desarrollados en esta Tesis, se utilizó el editor de texto VIM [VIM]. La estructura muestra un primer renglón en dónde se especifican los parámetros generales del sistema, tales como número de nodos y número de elementos. El segundo renglón especifica los parámetros generales de la simulación, tales como periodo de integración, criterio de convergencia, método de integración y número de armónicos a ser considerados durante el análisis armónico. Los dos últimos parámetros de este renglón especifican

si se desea obtener archivos de salida con la forma de onda de las variables analizadas por el simulador así como un listado del conjunto del EDO's que describen la dinámica de la red eléctrica generadas por el simulador. Del tercer renglón en adelante se especifican los elementos de la red, los cuales pueden ir en desorden, siempre y cuando se atiendan los respectivos formatos de los elementos, los cuales se describen a continuación.

Tabla 3.20 Estructura general del archivo de entrada de datos

1.	Renglón de parámetros generales del sistema
2.	Renglón de parámetros del método de solución
3.	Líneas de transmisión
4.	Bancos de capacitores
5.	Ramas magnetizantes
6.	Generadores
7.	Transformadores
8.	Hornos de Arco
9.	RCT
10.	CSCT
11.	Rama Resistiva
12.	Rama Inductiva
13.	Rama Resistiva-Inductiva-Capacitiva

Parámetros generales del sistema

El primer renglón del archivo de datos debe de contener una lista con 2 parámetros enteros.

A	B
---	---

en donde

A: Representa el número de nodos del sistema B: número de elementos en el sistema

El segundo renglón, contiene una lista de 5 parámetros, los cuales son

A	B	C	D	E	F
---	---	---	---	---	---

en donde

A: Representa el periodo de integración
 B: Indica el criterio de convergencia utilizado para obtener el EEP.
 C: Indica el método de integración a ser utilizado:
 0: Método de Runge-Kutta de cuarto orden
 1: Regla Trapezoidal
 D: Indica el número máximo de armónicos a ser analizados en el análisis armónico. Un valor de 0 indica que no se realice el análisis armónico.
 E: Graficación. Un valor de 0 no realiza la graficación de las formas de onda de las variables de estado, un valor de 1 realiza la graficación de estas formas de onda.
 F: Genera un archivo de texto con el conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias que modelan la red eléctrica analizada. El archivo generado tiene el mismo nombre que el archivo de entrada de datos pero con la extensión "out".

Los renglones subsecuentes están relacionados con la información de cada uno de los elementos que forman en sistema eléctrico de potencia. Las Tabla 3.21 y 3.22 muestran los identificadores de todos los elementos modelados en este trabajo de Tesis, tanto para el simulador de redes monofásicas como para el simulador de redes trifásicas. A continuación de la letra del identificador puede colocarse cualquier secuencia de caracteres, p.e. L_385, C_Nodo_2, etc.

Tabla 3.21 Identificadores de elementos monofásicos

Elemento	Identificador
Líneas de transmisión	L
Bancos de capacitores	C
Ramas magnetizantes	RM
Generadores	G
Transformadores	T
Hornos de arco	H
Reactores controlados por tiristores	RCT
Tiristores controlando capacitancia serie	CSCT
Rama resistiva	RR
Rama inductiva	RL
Rama resistiva-capacitiva-inductiva	RRLC

Tabla 3.22 Identificadores de elementos trifásicos

Elemento	Identificador
Máquina síncrona	MS
Líneas de transmisión de longitud corta	LTC
Líneas de transmisión de longitud media	LTL
Bancos de capacitores 3Φ	BC
Transformador 3Φ	T
Ramas magnetizantes 3Φ	RM
Hornos de arco 3Φ	HA
Rama resistiva	RR
Rama inductiva	RL
Rama resistiva-inductiva	RRL
Rama resistiva-capacitiva-inductiva	RRLC

A continuación se describe el formato en que se debe de introducir la información de cada uno de los diversos elementos monofásicos contenidos en la Tabla 3.21. El formato de cada elemento está formado por un identificador, contenido en la Tabla 3.21 o 3.22 y una secuencia de parámetros, los cuales se describen en seguida,

Línea de transmisión monofásica

A	B	C	D	E
---	---	---	---	---

En donde

A:	Identificador de Línea de transmisión	B:	Nodo de envío	C:	Nodo de recepción
D:	Resistencia	E:	Inductancia		

Banco de capacitores monofásico

A	B	C	D
---	---	---	---

en donde

A:	Identificador de banco de capacitores	B:	Nodo en el cual se conecta el banco de capacitores
C:	Nodo de referencia	D:	Capacitancia

Rama magnetizante monofásica

A	B	C	D	E
---	---	---	---	---

En donde

A: Identificador de rama magnetizante B: Nodo en el cual se conecta la rama magnetizante
 C: Nodo de referencia D: Resistencia E: Exponente

Generador monofásico

A	B	C	D	E
---	---	---	---	---

En donde

A: Identificador de generador B: Nodo en el cual está conectado el generador
 C: Nodo de referencia D: Amplitud máxima E: Ángulo de fase

Transformador saturable monofásico

A	B	C	D	E	F	G	H	I
---	---	---	---	---	---	---	---	---

En donde

A: Identificador de Transformador de potencia B: Nodo de envío C: Nodo de recepción
 D: R_a E: L_a F: R_b
 G: L_b H: R_c I: n

Hornos de Arco monofásico

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

En donde

A: Identificador de Horno de arco eléctrico B: Nodo en el cual está conectado el horno de arco eléctrico
 C: Nodo de referencia D: Inductancia del horno de arco eléctrico
 E: k_1 F: k_2 G: k_3 H: n
 I: m J: condición inicial para el radio del horno de arco eléctrico

RCT

A	B	C	D	E	F
---	---	---	---	---	---

En donde

A: Identificador de RCT B: Nodo en el cual está conectado el RCT
 C: Nodo de referencia D: Resistencia del RCT
 E: Inductancia del RCT F: Ángulo de disparo del RCT (90°-180°)

CSCT

A	B	C	D	E	F	G	H
---	---	---	---	---	---	---	---

En donde

A: Identificador de CSCT B: Nodo de envío
 C: Nodo de recepción D: Resistencia de la línea de transmisión
 E: Inductancia de la línea de transmisión F: Capacitancia del CSCT
 G: Resistencia del CSCT H: Inductancia del CSCT

Rama resistiva

A	B	C	D
---	---	---	---

En donde

A:	Identificador de la rama resistiva	B:	Nodo en el cual se conecta la rama resistiva
C:	Nodo de referencia	D:	Valor de R

Rama inductiva

A	B	C	D
---	---	---	---

En donde

A:	Identificador de la rama inductiva	B:	Nodo en el cual se conecta la rama inductiva
C:	Nodo de referencia	D:	Valor de L

Rama resistiva-inductiva-capacitiva

A	B	C	D	E	F
---	---	---	---	---	---

En donde

A:	Identificador de la rama resistiva	B:	Nodo en el cual es conectada la rama r-l-c
C:	Nodo de referencia	D:	Valor de R
E:	Valor de L	F:	Valor de C

3.4.2 Validación de datos

Dado que es de suma importancia que los datos contenidos en el archivo de simulación contengan el formato adecuado, el simulador desarrollado cuenta con una etapa de validación de datos. En particular el simulador es capaz de detectar los siguientes errores:

- Dispositivo no conocido
- Falta de parámetros
- Archivo de simulación inexistente
- Tipo de dato incorrecto

Dispositivo no conocido: este error se genera cuando se intenta ingresar el identificador de un dispositivo que no está contenido dentro de la Tabla 3.13. A continuación se muestra un ejemplo de un dispositivo desconocido "Z". A continuación se muestra el mensaje de error generado, así como la línea en la cual se encontró el error.

3	10	0			
0.01666	1e-10	0	40	0	0
Z 1 2	1	2	0.01	0.1	
Error No. 1: Dispositivo (Z) no reconocido en la línea 3					

Falta de parámetros: este error se genera cuando hace falta alguno de los parámetros requeridos por algún tipo de dispositivo. Ahora se muestra un ejemplo en el cual se omite el cuarto parámetro requerido en el formato de la línea de transmisión. Posteriormente se muestra el mensaje de error generado.

3	10	0			
0.01666	1e-10	0	40	0	0
L_1_2	1	2	0.01		
Error No. 2: En el Dispositivo (L) hace falta un parámetro					

Archivo de simulación inexistente: se genera este error cuando se ingresa el nombre de un archivo de simulación que no existe. En el ejemplo siguiente se muestra el mensaje de error generado cuando se introduce un archivo de simulación inexistente.

Error No. 3: No existe el archivo de simulación					
---	--	--	--	--	--

Tipo de dato incorrecto: este error se genera cuando se ingresa un carácter en lugar de un dígito. Finalmente se muestra un ejemplo en el cual se introduce un carácter (A) en lugar de un dato numérico. El error generado se muestra a continuación.

3	10	0			
0.01666	1e-10	0	40	0	0
L_1_2	1	2	0.01	A	
Error No. 4: Tipo de dato incorrecto en la línea 3					

Cualquiera de estos errores genera un mensaje en pantalla en dónde se indica en que renglón se encuentra el error. Cabe hacer mención que este sistema de validación, localiza solamente el primer error encontrado, por lo que los errores subsecuentes no son detectados.

3.4.3 Formación de las listas de objetos

Una vez que se ha verificado la validez de los datos contenidos en el archivo de simulación, se procede a formar las diferentes listas enlazadas asociadas con cada uno de los diversos elementos que forman parte de la red eléctrica a ser analizada. Con el objeto de explicar de una forma más a detalle este proceso, considérese la red eléctrica mostrada en la Figura 3.28, la cual está formada por 3 nodos, un generador, tres líneas de transmisión, tres bancos de capacitores, un horno de arco eléctrico, una rama magnetizante y un RCT.

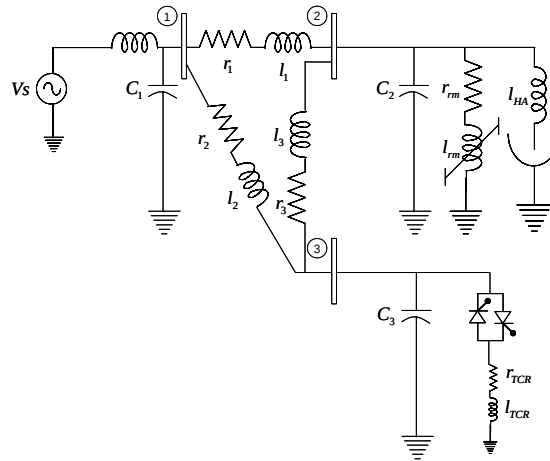


Figura 3.28 Sistema de 3 nodos utilizado para la explicación de la Técnica generalizada

Consideremos los objetos formados a partir de la lectura del archivo que contiene la topología de la red así como sus parámetros:

Líneas de transmisión

A partir de la información recopilada a partir del archivo de datos se forma una lista simplemente enlazada de objetos [Parker 1993][Wirth 1986] *linea_transmision*, tal y como se muestra en la Figura 3.29.

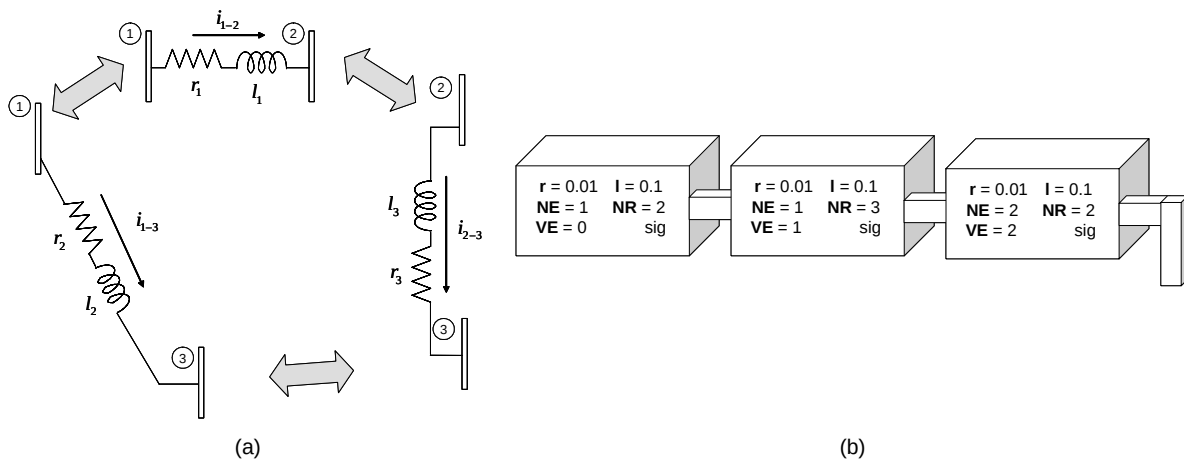


Figura 3.29 Objetos formados a partir de las líneas de transmisión del sistema de prueba

Bancos de capacitores

Los dos capacitores con que cuenta el sistema, mostrados en la Figura 3.30(a), se representan por medio de una lista enlazada de dos elementos, mostrada en la Figura 3.30(b).

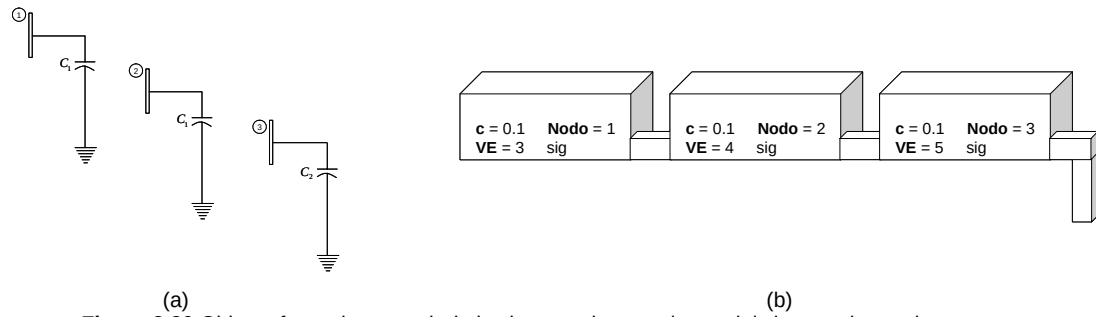


Figura 3.30 Objetos formados a partir de los bancos de capacitores del sistema de prueba

Ramas Magnetizantes

Las dos ramas magnetizantes del sistema, conectadas en los nodos 2 y 3 del sistema eléctrico, Figura 3.31(a), están representadas por medio de una lista enlazada de dos elementos, según se muestra en la Figura 3.31(b).



Figura 3.31 Objetos formados a partir de las ramas magnetizantes del sistema de prueba

Generadores

La excitación del sistema es el generador conectado en el nodo 1, de la Figura 3.32(a). Este elemento generador es representado por medio de una lista de un solo objeto generador, mostrado en la Figura 3.32(b).

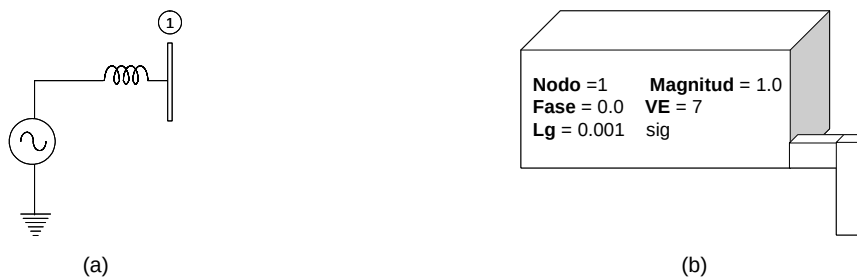


Figura 3.32 Objeto formado a partir del generador del sistema de prueba

Hornos de Arco Eléctrico

El horno de arco eléctrico conectado en el nodo 2 del sistema, de la Figura 3.33(a), es representado por medio de una lista de un solo objeto *horno_de_arco_electrico*, según se muestra en la Figura 3.33(b).

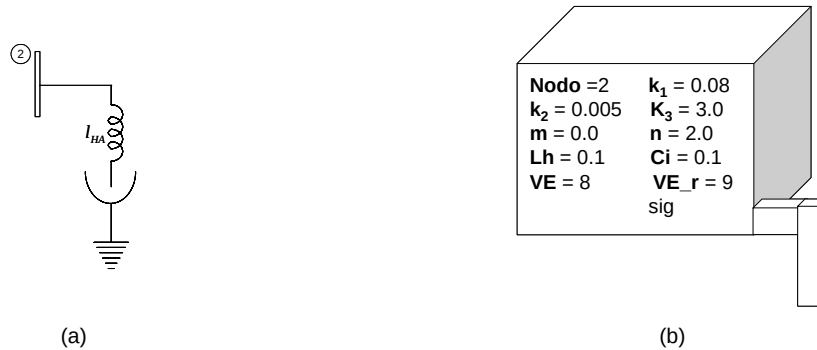


Figura 3.33 Objeto formado a partir del horno de arco del sistema de prueba

RCT

El RCT conectado en el nodo 3 del sistema es representado mediante la lista enlazada que se muestra a en las Figuras 3.34(a) y 3.34(b).



Figura 3.34 Objeto formado a partir del horno de arco del sistema de prueba

3.4.4 Determinación de las corrientes incidentes en los nodos

Una vez que se han construido las listas enlazadas de objetos que representan los diversos dispositivos que conforman el sistema eléctrico de potencia, se procede a definir la dirección de las corrientes en los diversos elementos que conforman el sistema eléctrico de potencia. Las direcciones de las corrientes se consideran siguiendo la siguiente regla: las corrientes van del nodo de número menor al nodo de número mayor. En el caso de las ramas conectadas en el sistema, tales como ramas magnetizantes, hornos de arco, etc., se considera que la corriente circula del nodo en el cual se conecta a tierra. Esta referencia se mantiene durante todo el proceso de

construcción del conjunto de las ODE's que modelan el sistema eléctrico, por lo que no se genera ningún error por utilizar esta referencia. La Figura 3.35 muestra las corrientes que entran y salen en todos y cada uno de los nodos del sistema de referencia.

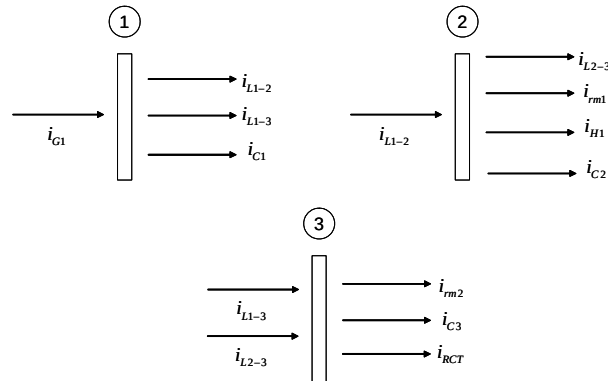


Figura 3.35 Corrientes incidentes en cada uno de los nodos en el sistema de análisis

El archivo de entrada de datos utilizado para representar la red mostrada en la Figura 3.28 es el que se muestra en la Tabla 3.23. Este archivo de entrada de datos se encuentra en el formato especificado con anterioridad para cada elemento.

Tabla 3.23 Archivo de entrada de datos para el sistema de prueba

3	10	0							
0.01666	1e-10	0	40	0	0				
L_1_2	1	2	0.01	0.1					
L_1_3	1	3	0.01	0.1					
L_2_3	2	3	0.01	0.1					
C_nodo1	1	0	0.1						
C_nodo2	2	0	0.1						
C_nodo3	3	0	0.1						
G_nodo1	1	0	1.0	0.0	0.001				
RM_nodo2	2	0	0.1	0.1	5.0				
H_nodo2	2	0	0.1	0.004	0.0005	0.005	0.0	2.0	0.1
RCT_nodo3	3	0	0.1	0.1	155.0				

Una vez que las listas de objetos que representan a los diversos elementos que conforman el sistema eléctrico de potencia han sido formadas, el sistema eléctrico ha sido representado como una serie de listas de objetos, las cuales están relacionadas a través de variables de estado tales como corrientes en los elementos y voltajes en los nodos.

3.4.5 Simulación eficiente

Una vez que se ha formado el conjunto de EDO's asociado con la red eléctrica analizada, se procede a la solución en EEP de la red eléctrica a ser analizada, En este proceso se utiliza ya sea el método de FB o el método Newton de acercamiento rápido de DN, según sea especificado en el archivo de simulación, Asimismo ya sea en el método de FB o en el método de DN puede

seleccionarse el método numérico de integración, ya sea el de Runge-Kutta de cuarto orden o el método de la Regla Trapezoidal, según sea definido dentro de los parámetros del archivo de simulación. El proceso de integración de conjunto de EDO's está basado en evaluaciones de la expresión

$$f(x, t) = Ax + Bu. \quad (3.84)$$

Para realizar esta evaluación se requiere un vector de tamaño n con las condiciones iniciales de las n variables de estado que describen la dinámica del sistema eléctrico a ser analizado. La Tabla 3.24 contiene las condiciones iniciales utilizadas para este Caso de Estudio. En este trabajo las variables de estado toman valores de cero, a menos que se especifiquen otros valores definidos por el usuario.

Tabla 3.24 Vector de condiciones iniciales para el Caso de Estudio

Variable de estado	Condición Inicial	Significado
0	0.0	Corriente en la línea 1-2
1	0.0	Corriente en la línea 1-3
2	0.0	Corriente en la línea 2-3
3	0.0	Voltaje en el nodo 1
4	0.0	Voltaje en el nodo 2
5	0.0	Voltaje en el nodo 3
6	0.0	Flujo en la rama magnetizante conectada al nodo 2
7	0.0	Corriente del generador conectado al nodo 1
8	0.0	Corriente en el horno de arco eléctrico
9	0.1	Radio del horno de arco eléctrico
10	0.0	Corriente en el RCT conectado en el nodo 3

Una vez que se tienen las diferentes listas de objetos que forman el sistema eléctrico de potencia, se procede a evaluación de $AX + BU$; este proceso se realiza por medio de recorridos a través de cada una de las listas de objetos que forman el sistema eléctrico. Cada objeto tiene las funciones miembros por medio de las cuales se obtiene el valor de la evaluación de la ecuación o ecuaciones diferenciales que modelan su comportamiento. Adicionalmente a esto, cada objeto contiene las variables de estado que relacionan a este elemento individual con el sistema eléctrico.

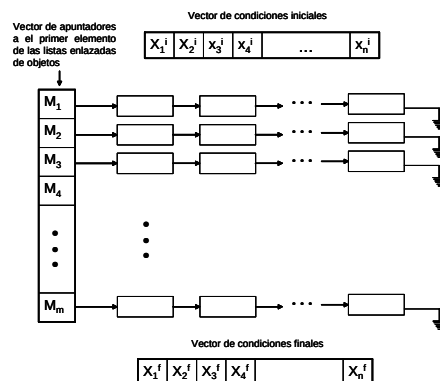


Figura 3.36 Proceso de evaluación de la función $f(x, t) = Ax + Bu$

En base a la Figura 3.36 puede observarse que cada una de las evaluaciones de los diferentes de cada tipo de elemento que forma parte del sistema eléctrico de potencia puede ser realizada de manera simultánea, tal y como se muestra en la Figura 3.37. El proceso consiste en asignar a cada uno de los elementos de proceso uno o varios conjuntos de elementos con el objeto de que a partir de un vector de condiciones iniciales puedan calcularse un cierto número de elementos del vector de condiciones finales. En el caso de que los elementos de proceso estén en el mismo equipo de cómputo (para el caso del *Multithreading*), el vector de condiciones iniciales no tiene que ser enviado a cada elemento de proceso, únicamente debe estar disponible en la memoria compartida. Debe considerarse que en el momento en que cada uno de los hilos vaya concluyendo su tarea asignada, debe ser utilizarse un esquema de protección para el vector de condiciones finales con el objeto de que no exista colisión de datos debido a un intento de dos elementos de proceso de acceder a una misma variable simultáneamente; para el caso de una red heterogénea de computadoras, cada elemento de proceso debe recibir el vector de condiciones iniciales y dar como resultado el estado correspondiente a los elementos correspondientes a la o las listas analizadas por el elemento de proceso.

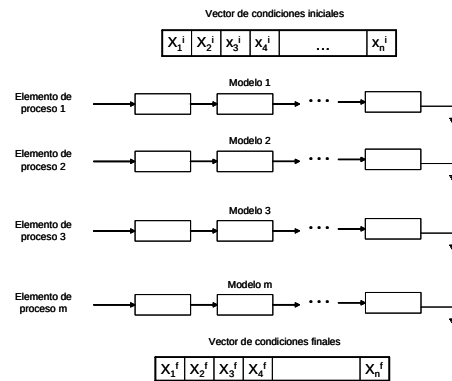


Figura 3.37 Esquema paralelo propuesto para la evaluación de $Ax+Bu$

En la Tabla 3.25 se muestra el proceso de recorrido sobre listas las listas enlazadas que representan las líneas de transmisión, las ramas magnetizantes y los hornos de arco eléctrico. Puede apreciarse que el recorrido se realiza por medio de un ciclo *while*, el cual tiene la condición asociada con el apuntador al inicio de la lista. Durante el recorrido el apuntador toma el valor del siguiente elemento de la lista enlazada hasta llegar al final, con lo que se cumple un recorrido sobre la lista enlazada.

Tabla 3.25 Proceso de evaluación de la función $AX + BU$

```

// Evaluación par alas lineas de transmision
ref_lin = inicio_lin;
while(ref_lin)
{
    vector2[ref_lin->ve]=w*ref_lin->evaluacion(voltaje(ref_lin->vx,t,vector_estado),voltaje(ref_lin->vy,t,vector_estado),vector_estado);
    ref_lin = ref_lin->sig;
}
// Evaluación par las ramas magnetizantes
ref_ram = inicio_ram;
while(ref_ram)
{
    vector2[ref_ram->ve] = w*ref_ram->evaluacion(voltaje(ref_ram->nodo,t,vector_estado),vector_estado);
    ref_ram=ref_ram->sig;
}
// Evaluación para los hornos de arco
while (ref_horno)
{
    vector2[ref_horno->ve] = w*ref_horno->evaluacion1(voltaje(ref_horno->nodo,t,vector_estado),vector_estado);
    vector2[ref_horno->ve_r] = w*ref_horno->evaluacion2(voltaje(ref_horno->nodo,t,vector_estado),vector_estado);
    ref_horno=ref_horno->sig;
}
// Evaluación de los RCT's
ref_tcr = inicio_tcr;
while(ref_tcr)
{
    vector2[ref_tcr->ve] = ref_tcr->evaluacion(voltaje(ref_tcr->nodo,t,vector_estado),vector_estado,t);
    ref_tcr = ref_tcr->sig;
}
// Evaluacion de CSCT
ref_tcsc = inicio_tcsc;
while(ref_tcsc)
{
    vector2[ref_tcsc->ve[0]]=ref_tcsc->evaluacion1(voltaje(ref_tcsc->vx,t,vector_estado),voltaje(ref_tcsc->vy,t,vector_estado),vector_estado);
    vector2[ref_tcsc->ve[1]]=ref_tcsc->evaluacion2(voltaje(ref_tcsc->vx,t,vector_estado),voltaje(ref_tcsc->vy,t,vector_estado),vector_estado,t);
    vector2[ref_tcsc->ve[2]]=ref_tcsc->evaluacion3(voltaje(ref_tcsc->vx,t,vector_estado),voltaje(ref_tcsc->vy,t,vector_estado),vector_estado,t);
    ref_tcsc = ref_tcsc->sig;
}
// Evaluación de las ramas resistivas
ref_rama_resistiva = inicio_rama_resistiva;
while(ref_rama_resistiva)
{
    ref_cap = inicio_cap;
    while(ref_cap)
    {
        if (ref_cap->nodo == ref_rama_resistiva->nodo)
            vector2[ref_rama_resistiva->iny] = vector2[ref_rama_resistiva->iny] -vector_estado[ref_cap->ve]/(ref_rama_resistiva->r*ref_cap->c);
        ref_cap = ref_cap ->sig;
    }
    ref_rama_resistiva = ref_rama_resistiva->sig;
}
}

```

Una vez terminado este proceso de evaluación el vector *vector2* contiene el valor de la evaluación de $AX + BU$ en un tiempo t . Esta evaluación es necesaria por cualquier método de solución para el conjunto de EDO's que representan el comportamiento de un sistema.

En esta Tesis se analiza el comportamiento de redes eléctricas no lineales y variantes en el tiempo en el marco de referencia del dominio del tiempo, mediante una técnica que determina de manera implícita el conjunto de EDO's que describen al sistema eléctrico de potencia, por lo que no es necesaria una representación explícita del sistema de EDO's que modelan el sistema eléctrico de potencia. Sin embargo, como ejemplo, la Tabla 3.26 muestra la representación del conjunto de EDO's que modelan el sistema eléctrico mostrado en la Figura 3.28. La representación mostrada

en la Tabla 3.39, corresponde a un archivo de salida generado por el sistema. La representación mostrada en la Tabla 3.39 se diseñó con el objeto de mostrar que la técnica de generación automática del conjunto de EDO's que modelan un sistema eléctrico de potencia no lineal, produce un conjunto válido de EDO's.

Tabla 3.26 Representación del conjunto de EDO's que describen la dinámica del sistema de la Figura 3.28

El numero de variables de estado es 11
Generadores VE[6] = sin(w*t-teta) - VE[3]
Lineas VE[0] = (VE[3]-VE[4]-VE[0]*0.010000)/0.100000 VE[1] = (VE[3]-VE[5]-VE[1]*0.010000)/0.100000 VE[2] = (VE[4]-VE[5]-VE[2]*0.010000)/0.100000
Ramas magnetizantes VE[7] = 0.100000*(VE[7]^5.000000) + VE[4]
Hornos de Arco VE[8] = (-0.005000*VE[9]^(-0.000000-2.0)*VE[8] + VE[4])/0.100000 VE[9] = (0.005000/0.000500)*VE[9]^(-0.000000-3.0)*VE[8]^2.0 - (0.004000/0.000500)*VE[9]^(2.000000-1.0)
RCT's VE[10] = s*(VE[5] - VE[10]*0.100000)/0.100000
Bancos de capacitores VE[3] = (1.000000*VE[6]-VE[0]-VE[1])/0.100000 VE[4] = (-1.000000*VE[7]^5.000000 -1.000000*VE[8] +VE[0]-VE[2])/0.100000 VE[5] = (-1.000000*s*VE[10]+VE[1]+VE[2])/0.100000

Puede ser apreciado del conjunto de EDO's mostradas en la Tabla 3.26 que las ecuaciones diferenciales quedan en función de variables de estado, voltajes nodales (los cuales pueden ser a su vez variables de estado) y de los parámetros de los elementos. En la parte final del archivo de salida se muestra con que variable de estado se relaciona cada uno de los voltajes nodales. Cabe hacer mención que la numeración de las variables de estado inicia con el número cero.

3.4.5.1 Aplicación de la técnica Newton de acercamiento rápido al Ciclo Límite de DN

Una vez que se tiene la representación del sistema eléctrico de la forma dada por (3.37), se puede mejorar el proceso de convergencia de las variables de estado al Ciclo Límite mediante la aplicación de técnicas de acercamiento rápido de las variables de estado al Ciclo Límite. En particular en esta Tesis se eligió como técnica de acercamiento rápido el método Newton de Diferenciación Numérica presentado en [Semlyen y Medina 1995]. En esta técnica la Ecuación recursiva es,

$$x^{\infty} = x^i + C(x^{i+1} - x^i) \quad (3.85)$$

donde:

- x^∞ Vector de variables de estado en el Ciclo Límite
- x^i Vector de variables de estado al inicio del Ciclo Base
- x^{i+1} Vector de variables de estado al final del Ciclo Base
- $C = (I - \Phi)^{-1}$, I es la matriz identidad y Φ es la matriz de identificación

El diagrama mostrado en la Figura 3.38 ilustra la forma en la cual es aplicada la técnica Newton de acercamiento rápido de las variables de estado al Ciclo Límite de DN.

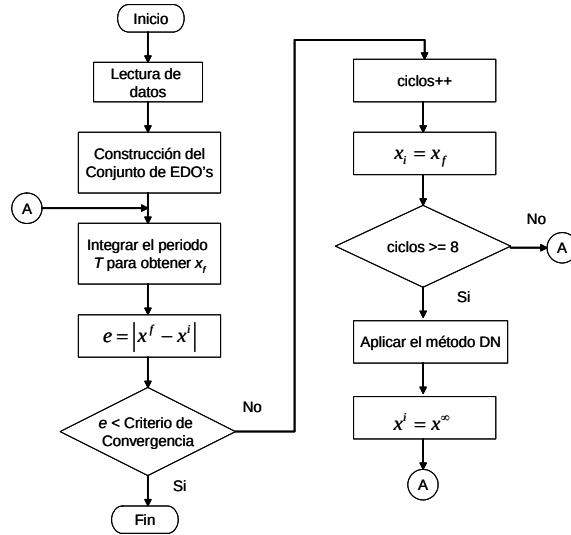


Figura 3.38 Aplicación de la técnica de Aceleración DN

En [García *et al.* 2001] se propuso la aplicación de técnicas de procesamiento en paralelo basadas en hilos a la técnica aceleración de la convergencia de las variables de estado al Ciclo Límite, en el proceso de identificación de las columnas de la matriz de identificación Φ de la Ecuación (3.38), en tanto que en [Medina *et al.* 2002][Medina, Ramos-Paz y Fuerte-Esquivel 2003] se mostró la aplicación exitosa de técnicas de procesamiento en paralelo basadas en PVM para este propósito. Mas recientemente en [García y Acha 2004], se hace la extensión a la solución en estado estacionario no-senoidal de sistemas eléctricos trifásicos aplicando procesamiento en paralelo basado en hilos. En [Medina, Ramos-Paz y Fuerte-Esquivel 2003a] se resuelven los sistemas del IEEE incorporando elementos no lineales y se aplican técnicas de procesamiento en paralelo PVM e Hilos, haciéndose la comparación respectiva entre ellos en términos de eficiencia relativa.

En esta Tesis se incorporan técnicas de procesamiento en paralelo basadas en PVM al cálculo paralelo de las columnas de la matriz de identificación Φ [García *et al.* 2001] [Medina, Ramos-Paz y Fuerte-Esquivel 2003a]. Primeramente se determina el número de variables de

estado del sistema así como el número de procesadores esclavos disponibles. Una vez que se tiene esta información, se procede a determinar el número de columnas de la matriz Φ que serán calculadas por cada uno de los procesadores esclavos. De manera general existen tres posibilidades de relación entre el número de variables de estado y el número de procesadores esclavos:

- 1) El número de procesadores es menor al número de variables de estado. En este caso cada procesador calculará al menos una columna de la matriz de identificación. El remanente será repartido entre los procesadores de mayor capacidad de cómputo.
- 2) El número de procesadores es igual al número de variables de estado. En este caso cada procesador calculará una columna de la matriz de identificación. Este es el caso ideal.
- 3) El número de procesadores es mayor al número de variables de estado. En este caso cada procesador calculará una columna de la matriz de identificación. Bajo esta situación se pueden seleccionar los procesadores más robustos.

El diagrama mostrado en la Figura 3.39 muestra de manera conceptual la forma en la cual se calculan de manera simultánea las columnas de la matriz Φ . Cada procesador esclavo recibe la información necesaria para construir el conjunto de EDO's que modelan el sistema. También recibe el vector de variables de estado en el ciclo base, así como el rango de columnas para ser calculadas. Esta información se envía a cada procesador esclavo empaquetada, por lo que son necesarias rutinas de empaquetado y desempaquetado de la información. Una vez que cada procesador esclavo termina de calcular la o las columnas de la matriz Φ calculadas, éstas se envían al procesador maestro con el objeto de continuar el proceso de solución.

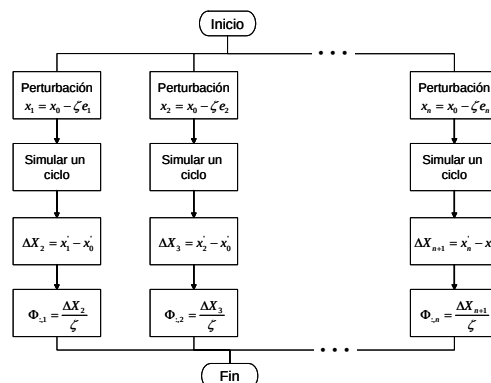


Figura 3.39 Esquema de procesamiento en paralelo basado en PVM propuesto

Para la simulación de los casos de estudio que se proponen en este Capítulo se utilizó una red heterogénea de 24 computadoras. La Figura 2.9 se muestra un mapa de Ciudad Universitaria, en el cual se aprecia la distribución de los diferentes edificios de las distintas escuelas, facultades, institutos y edificios administrativos. En la Figura 3.40 se observan algunas de las computadoras que formaron parte de esta red heterogénea de computadoras. En las experimentaciones utilizadas para la obtención de los resultados presentados en esta Tesis, se utilizó una red heterogénea de computadoras formada por 24 computadoras. De estas 24 computadoras una funcionó como computadora maestra y al mismo tiempo esclava de si misma, y las 23 computadoras restantes funcionaron como computadoras esclavas. La distribución física de estas 24 computadoras fue la siguiente:

- 22 Computadoras en el laboratorio de Computación de la FIE, Edificio A.
- 1 Computadora en el laboratorio de Sistemas Computacionales de la DEP-FIE
- 1 Computadora en la biblioteca de la DEP-FIE

La computadora maestra fue el servidor del laboratorio de Computación de la FIE, la cual cuenta con dos procesadores, las 21 computadoras de este laboratorio son computadoras con un solo procesador. Las computadoras del laboratorio de Sistemas Computacionales de la DEP-FIE y de la biblioteca de la DEP-FIE son computadoras con dos procesadores. Cabe hacer mención que durante el desarrollo de las simulaciones en dónde se utilizó la red heterogénea de computadoras nunca se dejo de prestar servicio en las computadoras del laboratorio de computación de la FIE.

En este trabajo de Tesis se establecieron mecanismos para verificar la integridad de la red heterogénea utilizada, es decir, antes de mandar información a cada procesador esclavo se verifica que exista una conexión con el procesador. En caso de que no exista esta conexión, se procede a redireccionar los datos a otro procesador esclavo.

El Apéndice B muestra las características de cada una de las computadoras que formaron la red heterogénea de computadoras. Las características mostradas son: velocidad (MHz); dirección IP, localización dentro de ciudad universitaria; sistema operativo utilizado y finalmente su identificador, el cual fue un nombre que se le dio a cada una de las computadoras que formaron parte de la red heterogénea de computadoras utilizada en el desarrollo de esta Tesis.



Figura 3.40 Ciudad Universitaria de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

3.4.5.2 Jacobiano Constante

Con el objeto de mejorar la eficiencia computacional en el proceso de la obtención del EEP de redes eléctricas en base a la técnica Newton DN, se ha utilizado la estrategia de realizar el cálculo del Jacobiano y mantenerlo constante. [Semlyen y Medina 1995].

Con esta estrategia se obtiene una convergencia lineal, sin embargo es una estrategia efectiva cuando se tienen sistemas los cuales son representados por un conjunto de ecuaciones diferenciales muy grande, en los cuales el esfuerzo computacional para llegar al EEP utilizando la Técnica de DN puede ser más grande que incluso la misma Técnica de Fuerza Bruta, si el jacobiano es actualizado en cada aplicación del método.

La Figura 3.41 muestra el diagrama en el cual se presenta la estrategia de mantener constante el Jacobiano. La modificación a la Técnica de DN consiste en un solo cálculo del Jacobiano. Una vez que se han determinado los elementos del Jacobiano se realiza el cálculo de x^∞ en base a x^i y x^{i+1} y considerando C constante. Con esta modificación no se tiene un proceso de convergencia cuadrática sino lineal o super-lineal, sin embargo, se logra un menor esfuerzo computacional que el método FB, que se ve reflejado en un tiempo de cómputo más reducido.

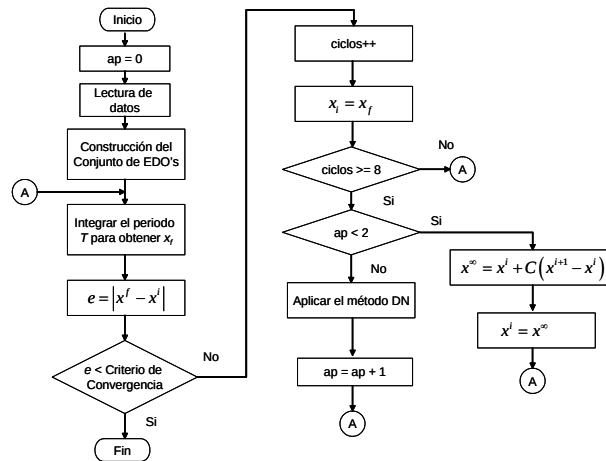


Figura 3.41 Técnica de DN con Jacobiano constante

3.4.5.3 Análisis eficiente de estabilidad transitoria

Una vez que ha sido propuesta e implementada una técnica que permite la construcción del conjunto de EDO's que modelan el comportamiento de redes eléctricas, se propone aplicarla, mediante algunas modificaciones, al análisis de estabilidad transitoria de redes eléctricas no lineales.

El esquema propuesto de análisis de estabilidad se sintetiza en el diagrama de flujo mostrado en la Figura 3.42. Como primer paso se tiene la construcción del conjunto de EDO's que modelan el comportamiento de la red eléctrica a ser analizada. Una vez que se tiene la representación en espacio de estado del sistema eléctrico se procede a determinar el EEP de operación mediante el uso de la técnica de aceleración de la convergencia de las variables de estado al Ciclo Límite DN. Una vez que se ha obtenido el estado estacionario de operación del sistema se procede a simular su comportamiento en el tiempo. El tiempo en el cual se obtiene el estado estacionario de operación se considera un tiempo cero ($t = 0$).

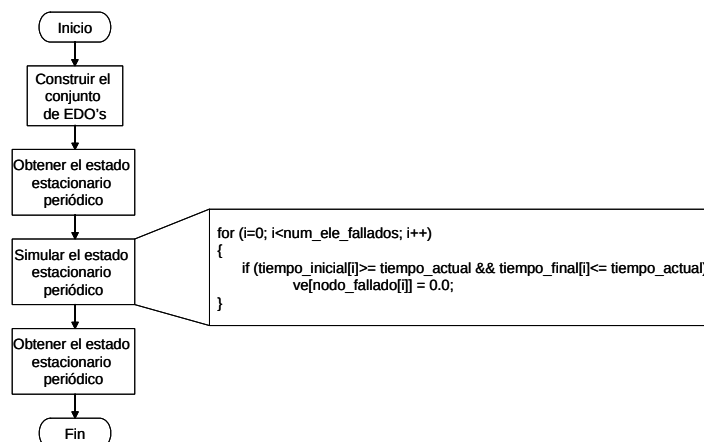


Figura 3.42 Técnica propuesta para análisis de estabilidad transitoria en sistemas eléctricos de potencia

A partir del tiempo $t = 0$, puede ocurrir alguna o algunas fallas en el sistemas, las cuales son especificadas en el archivo de simulación. Con el objeto de especificar que se realizará un estudio de estabilidad transitoria se agregar el parámetro 1 en la primera línea del archivo de entrada; este parámetro indica al sistema que realizará un estudio de estabilidad. Además de esta modificación se introduce un renglón (al final de todos los elementos del sistema eléctrico) en el cual se especifica el número de nodos fallados, seguido de un número igual de renglones en dónde se especifican las características de la falla, en decir, el nodo fallado, el tiempo en el cual ocurre la falla así como el tiempo en el cual se libera la falla.

La Tabla 3.27 muestra la sección del archivo de entrada de datos en dónde se especifica el número de fallas, considérese el formato general para especificar fallas:

Tabla 3.27 Sección para análisis de estabilidad transitoria

A					
B		C		D	
A:	Especifica el número de fallas	B:	Especifica el nodo fallado		
C:	Especifica el inicio de la falla en segundos	D:	Especifica la liberación de la falla en segundos		

El último renglón se repite tantas veces como fallas se hayan especificado en el valor del número de fallas.

La Tabla 3.28 muestra la sección del archivo de entrada de datos en el cual se especifican 3 fallas en los nodos 4, 8 y 15 respectivamente; la falla en el nodo 4 comienza en un tiempo $t = 0.05s$ y se libera en un tiempo $t = 0.1$ s. La falla en el nodo 8 ocurre en $t = 0.0666$ s y se libera en $t = 0.1166$ s, finalmente la falla en el nodo 15 inicia en $t = 0.08333$ s y se libera en $t = 0.1166s$.

Tabla 3.28 Ejemplo de 3 nodos fallados

3			// Especifica que hay falla en tres nodos
4	0.05	0.1	// Especifica que la falla en el nodo 4 así el inicio y fin de la falla
8	0.066	0.1166	// Especifica que la falla en el nodo 8 así el inicio y fin de la falla
15	0.0833	0.1333	// Especifica que la falla en el nodo 15 así el inicio y fin de la falla

La información asociada con las fallas que serán simuladas es almacenada mediante el uso de tres vectores, los cuales se muestran en la Figura 3.43. Los vectores *nodo_fallado*, *tiempo_inicial* y *tiempo_final* tienen un tamaño igual al número de fallas que son analizadas.

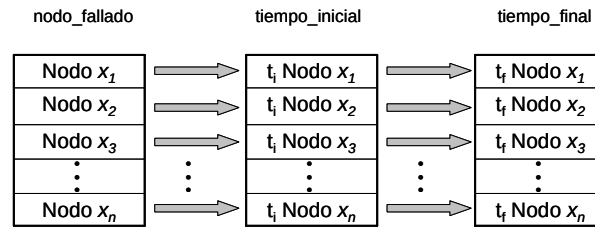


Figura 3.43 Vectores auxiliares utilizadas en el proceso de estabilidad transitoria

El vector *nodo_fallado* contiene los nodos en los cuales se generan las fallas. El vector *tiempo_inicial* contiene los tiempos en los cuales inician las fallas en cada uno de los nodos especificados en el vector *nodo_fallado*. Finalmente en el vector *tiempo_final* se almacena el tiempo en el cual se libera la falla en cada uno de los nodos. Dentro del proceso de solución se determina en qué momento existe la falla en los nodos especificados. Durante el tiempo de ocurrencia de la falla las variables de estado asociadas con los voltajes de los nodos fallados se igualan a cero. El tiempo inicial y final de la falla están en relación al tiempo $t = 0$ en el cual se obtiene el EEP de operación del sistema eléctrico de potencia.

Una vez que se obtiene el EEP de operación de la red eléctrica, se hace un recorrido por los vectores y se verifica si el tiempo actual de simulación se encuentra dentro del rango especificado en los vectores *tiempo_inicial* y *tiempo_final*, si se está dentro del rango, la variable de estado asociada con el voltaje en el nodo fallado se hace igual a cero. Una vez que se está fuera de rango, la variable de estado asociada con el voltaje en el nodo fallado se calcula mediante el uso de la ecuación diferencial ordinaria que modela su comportamiento. El ciclo que se muestra dentro del diagrama de flujo mostrado en la Figura 3.43 representa el proceso en el cual se recorren los vectores auxiliares con el objeto de simular la falla o fallas que pueden ocurrir en el sistema.

Una vez que se ha liberado la última falla se simula el comportamiento de la red eléctrica durante 8 ciclos, es decir 0.13333 segundos. Una vez que ha transcurrido este tiempo de simulación se aplica el método DN para obtener de una manera rápida la solución en EEP de la red eléctrica.

3.4.6 Generación de resultados

Una vez que se ha obtenido el EEP de la red eléctrica analizada, el sistema desarrollado es capaz de generar cuatro resultados,

- Error máximo durante cada uno de los periodos completos de integración hasta alcanzar el EEP.

- Archivo con los valores numéricos de las formas de onda relacionadas con el conjunto de EDO's generado.
- Conjunto de EDO's generado
- Espectro armónico de las formas de onda

El espectro armónico de las formas de onda se obtiene por medio de la aplicación de la Transformada Rápida Discreta de Fourier. [Wylie 1951],

3.5 Análisis de la complejidad del método propuesto

Con el objeto de realizar el análisis de la complejidad del método propuesto, se hará el análisis de la complejidad de dos procesos, que son los que consumen la mayor cantidad de tiempo de cómputo durante el proceso de generación del conjunto de EDO's y el proceso de simulación eficiente.

1. Formación de las listas de objetos
2. Simulación eficiente

Formación de las listas de objetos

Consideraciones

M representa el número de variables de estado que representan el sistema eléctrico a ser analizado.

P es el número de procesadores disponibles.

K es el número de puntos por periodo de integración

B es el número de periodos completos de integración requeridos para obtener un ciclo base.

A es el número de veces en que se aplica la técnica Newton de acercamiento rápido

Simulación eficiente

Método de integración

Si consideramos la utilización del método de integración de Runge-Kutta de cuarto orden, un ciclo de integración implica la integración de k puntos en los cuales está dividido el periodo de integración. En cada uno de estos k puntos se deben de calcular los vectores k_1 , k_2 , k_3 y k_4 . Cada uno de estos cálculos implica la evaluación de la expresión $f(x, t) = Ax + Bu$. Se propone que

cada proceso de evaluación tenga una complejidad $O(M)$ y dado que este proceso se repite k veces, se tiene que la complejidad es $O(MK)$

Técnica de acercamiento Rápido

La técnica Newton de acercamiento rápido de DN implica la repetición del proceso de integración M veces, por lo que la complejidad es $O(MMK)$, es decir, $O(M^2K)$. El uso del procesamiento en paralelo, reduce el tiempo en base a $O\left(\frac{M^2K}{P}\right)$. Si se considera un número B igual al número de periodos de integración necesarios para obtener un ciclo base y A el número de veces que se aplica la técnica Newton de DN, se tiene entonces que la complejidad de este proceso es:

$$O\left(A\frac{M^2k}{P}\right) + O(BMk) \quad (3.86)$$

simplificando,

$$O\left(\frac{AM^2k}{P} + BMk\right) \quad (3.87)$$

de la expresión anterior se aprecia que se tiene la máxima eficiencia posible cuando $M = P$, dado que la complejidad se reduce a:

$$O(AMk + BMk) \quad (3.88)$$

3.6 Generalidades sobre el sistema computacional desarrollado

- Lenguaje de programación utilizado
- Ambiente operativo utilizado
- Visualización de gráficas

La visualización gráfica de las formas de onda presentadas en esta sección de casos de estudio fue realizada por medio del visualizador de dominio público GNUPLOT[[GNUPLOT]]. GNUPLOT es un programa que genera las gráficas de datos contenidos en archivos de datos en un formato por columnas. Las gráficas generadas por GNUPLOT contienen todos los elementos de una gráfica tales como encabezados, títulos en los ejes x e y etc.

En el Apéndice A se muestra a detalle la forma en la cual se ejecutan las simulaciones asociadas con los Casos de Estudio presentados en este Capítulo.

3.7 Conclusiones

En el presente Capítulo se ha desarrollado, implementado y mostrado la aplicación de una metodología que permite un análisis generalizado en el dominio del tiempo de redes eléctricas monofásicas de gran escala con componentes lineales, no lineales y variantes en el tiempo. Con el objeto de hacer más eficiente esta metodología se incorporaron técnicas de aceleración de la convergencia de las variables de estado al Ciclo Límite, Técnicas de programación Orientada a Objetos, Técnicas de Dispersidad y finalmente técnicas de Procesamiento en paralelo, las cuales incrementaron la eficiencia computacional requerida para el análisis en estado periódico estacionario de las redes eléctricas analizadas. El uso de POO permite que al sistema desarrollado puedan ser incorporados modelos de otros dispositivos de un sistema eléctrico de potencia. La adición al sistema desarrollado de técnicas de procesamiento en paralelo permitió demostrar la factibilidad del empleo redes heterogéneas de computadoras en el análisis de redes eléctricas de potencia. Se demostró que las computadoras contenidas en los laboratorios de cómputo de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la UMSNH pueden unirse y formar una supercomputadora con 28 procesadores. En el desarrollo de esta metodología se utilizó software de dominio público con el objeto de que la plataforma desarrollada sea de fácil distribución y utilización.

Capítulo No. 4

4.1 Introducción

Una vez que ha sido desarrollada e implementada la técnica para la generación automática del conjunto de EDO's que describen la dinámica de redes eléctricas, además de su solución en EEP, se presentan a continuación diez casos de estudio en dónde se muestra la aplicación de técnica de análisis propuesta en esta Tesis. Los casos de estudio están divididos en tres partes. En la primera parte se analizan redes eléctricas monofásicas; en la segunda parte se analiza el comportamiento en el tiempo de redes eléctricas trifásicas; finalmente en la última parte se muestra la aplicación de la técnica desarrollada para el análisis de fallas en los sistemas, en particular se analizan fallas de fase a tierra.

4.2 Sistemas monofásicos

4.2.1 Caso de Estudio 4.1. Sistema de 3 nodos

La Figura 4.1 muestra un sistema eléctrico de tres nodos. Está formado por un generador, tres líneas de transmisión, tres bancos de capacitores, un horno de arco eléctrico y una rama magnetizante conectadas en el nodo 2 y un RCT conectado en el nodo 3. La dinámica de este sistema eléctrico es representada por un conjunto de 11 EDO's.

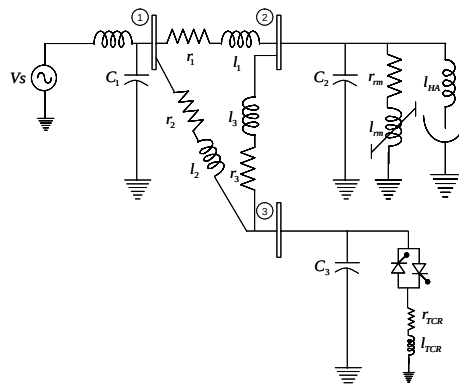


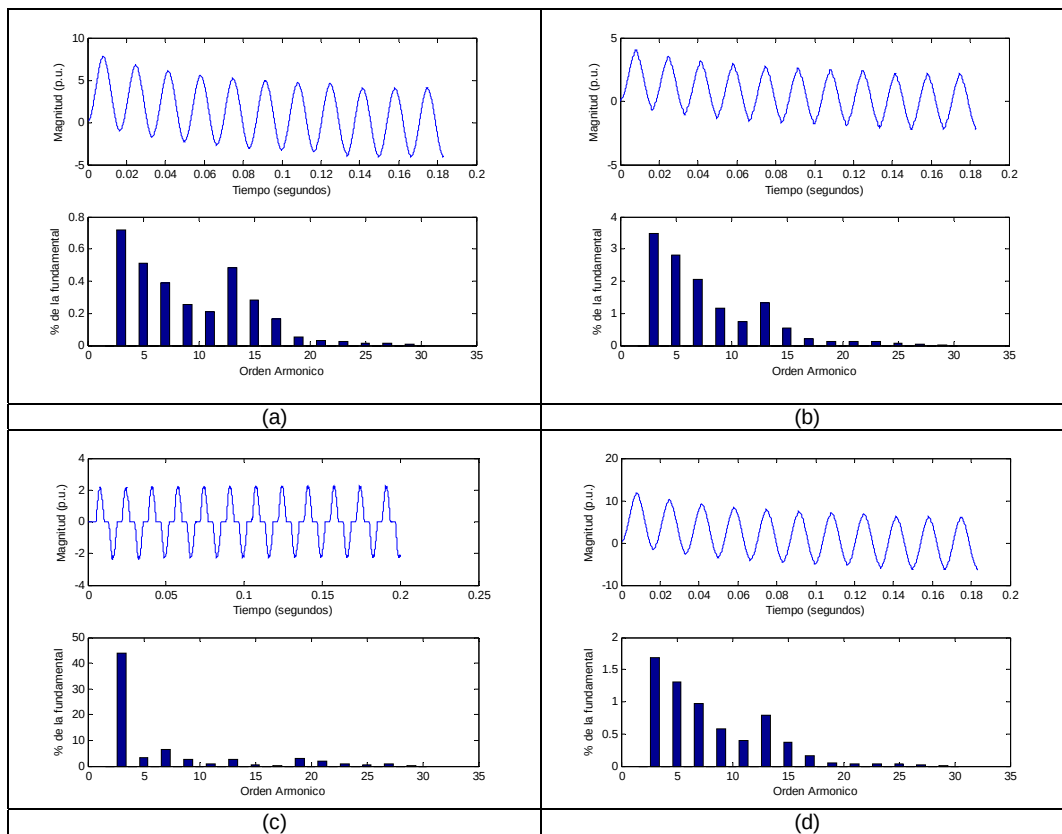
Figura 4.1 Caso de Estudio 4.1

La Tabla 4.1 muestra el proceso de convergencia hacia el EEP de la red de prueba mostrada en la Figura 4.1. Se aprecia que el método FB requiere el cálculo de 146 periodos completos de integración (ciclos), en tanto que la técnica DN requiere únicamente 44 periodos, los cuales representan el 30.13 % del número de periodos utilizados por el método FB.

Tabla 4.1 Proceso de convergencia de los métodos FB y DN. Caso de Estudio 4.1

NCC	FB	DN
1	1.559488E+00	1.559488E+00
2	1.074814E+00	1.074814E+00
3	8.177906E-01	8.177906E-01
⋮	⋮	⋮
8	2.160971E-01	2.160971E-01
20	9.974592E-03	9.863171E-03
32	8.714336E-04	1.240591E-05
44	1.668891E-04	9.912000E-13
⋮	⋮	
146	9.010940E-11	

En la Figura 4.2 se muestran formas de onda representativas de las variables de estado asociadas con el caso de estudio analizado. La Figura 4.2 (a) muestra la evolución en el tiempo y el espectro armónico, respectivamente, de la corriente en la línea de transmisión conectada del nodo 1 al nodo 2, la Figura 4.2 (b) muestra esta información para la corriente que circula a través de la línea que conecta los nodos 1 y 3. La Figura 4.2 (c) muestra el comportamiento en el tiempo de la corriente a través del RCT en tanto que la Figura 4.2 (d) muestra el comportamiento del flujo en la rama magnetizante conectada al nodo 2 del sistema eléctrico.

**Figura 4.2** Formas de onda de algunas variables de estado y su espectro armónico. Caso de Estudio 4.1

a) Corriente en la línea 1-2

b) Corriente en la línea 1-3

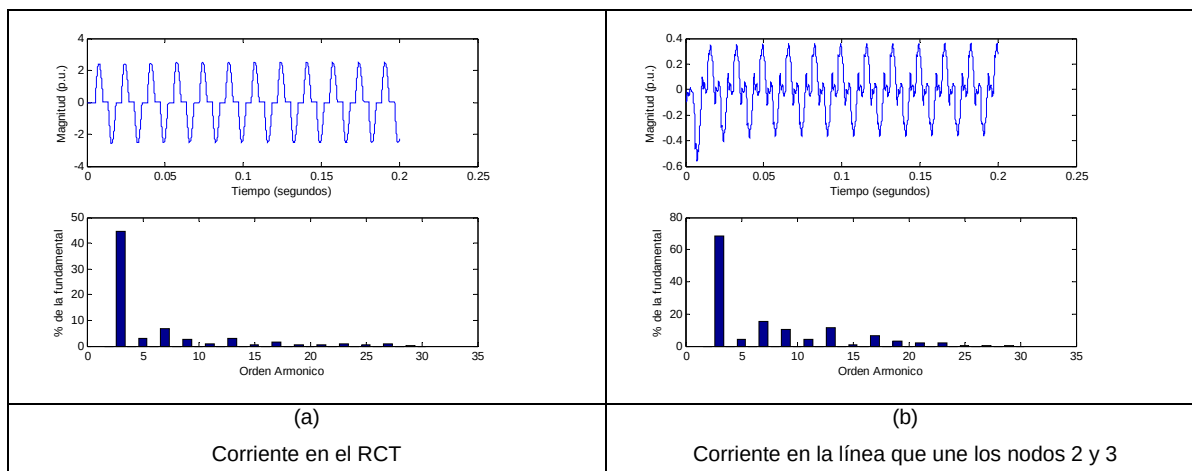
c) Corriente en el RCT

d) Flujo en la rama magnetizante

Tabla 4.3 Proceso de convergencia de los métodos FB y DN. Caso de Estudio 4.2

NCC	FB	DN
1	2.355778E+00	2.355778E+00
2	3.541265E-01	3.541265E-01
3	3.283550E-01	3.283550E-01
⋮	⋮	⋮
8	1.801051E-01	1.801051E-01
27	1.087298E-01	7.299271E-01
46	7.364223E-02	4.916016E-02
65	5.127368E-02	4.572763E-05
84	3.611218E-02	1.190200E-12
⋮	⋮	
1188	9.917220E-11	

La Figura 4.4 se muestra la evolución en el tiempo de algunas variables de estado representativas hasta llegar al EEP. En la Figura 4.4 (a) se muestra la corriente en el RCT así como su espectro armónico, el cual tiene un contenido armónico de 45 % de la fundamental para el tercer armónico; el quinto armónico representa casi el 5 % en tanto que el séptimo armónico es cercano al 8 %. La Figura 4.4 (b) muestra la forma de onda de la corriente que circula en la línea de transmisión que une a los nodos 2 y 3 del sistema. El contenido armónico de esta forma de onda está asociado principalmente con un tercer armónico con magnitud cercana al 70 %, el séptimo armónico con una magnitud cercana al 18 % y el treceavo armónico es aproximadamente 15 %. En la Figura 4.4 (c) se muestra el voltaje en el nodo 3 del sistema, así como su respectivo contenido armónico, en tanto que en la Figura 4.4 (d) se ilustra la forma de onda del voltaje en el nodo 5 del sistema. Puede apreciarse de las Figuras 4.4 (c) y (d) que la forma de onda del voltaje en el nodo 3 contiene un tercer armónico aproximadamente de 15 % de componente fundamental, así como armónicos de órdenes 7, 9, 13 con magnitudes cercanas al 6, 5 y 5 % del voltaje fundamental, respectivamente. En el caso del voltaje en el nodo 5 puede apreciarse que el tercer armónico representa casi el 10 % de la corriente fundamental, en tanto que el treceavo armónico es casi el 9 % de la corriente fundamental.



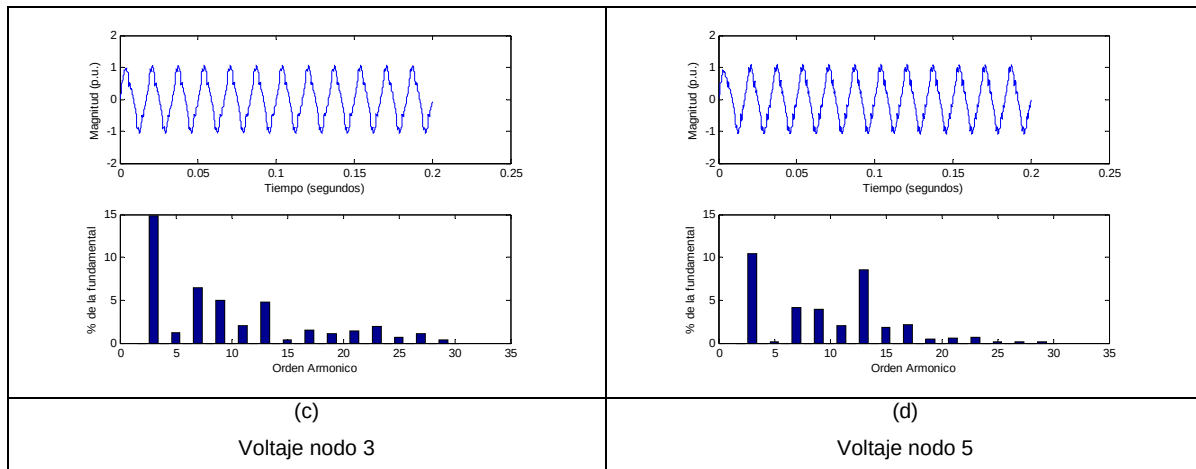


Figura 4.4 Formas de onda de algunas variables de estado y su espectro armónico. Caso de Estudio 4.2

En la Figura 4.5 se muestra la evolución de las formas de onda de la corriente del generador 1 y el generador 2 hasta alcanzar el Ciclo Límite, tal y como se muestra en el centro de esta figura.

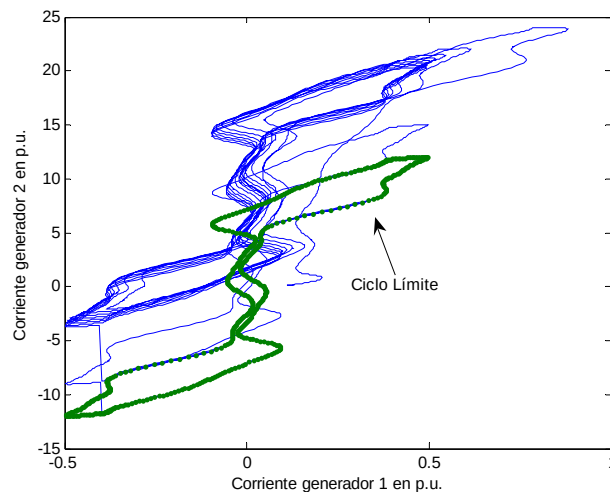


Figura 4.5 Ciclo Límite. Caso de Estudio 4.2

En la Tabla 4.4 se muestra el tiempo de cómputo requerido para llegar al EEP para el Caso de Estudio 4.2. Puede apreciarse que la utilización de la técnica de DN reduce el tiempo de cómputo de 87.84 segundos a 3.84 segundos, los cuales representan el 4.37% del tiempo total requerido por el método FB.

Tabla 4.4 Tiempo de cómputo. Caso de Estudio 4.2

FB	87.843 s
DN	3.84s

4.2.3 Caso de Estudio 4.3: Sistema de prueba de IEEE de 14 nodos modificado

El sistema eléctrico de análisis está formado por 15 líneas de transmisión, 5 transformadores, 5 generadores y 14 bancos de capacitores. Este sistema fue modificado por medio de la incorporación de dos hornos de arco eléctrico conectados en los nodos 11 y 14 del sistema eléctrico. La representación en espacio de estado de este sistema se realiza por medio de un conjunto de 55 EDO's. En los transformadores que forman este sistema se considera el efecto de saturación dado por la expresión (3.7).

La Tabla 4.5 muestra el número de periodos completos de integración requeridos para llegar al EEP en base al criterio de convergencia especificado en esta Tesis. De la Tabla 4.5 puede ser apreciado que el método FB requiere 5053 periodos completos de integración, en tanto que el método DN utiliza 120 periodos, lo cual representa el 2.37 % del número total de ciclos utilizados por el método FB. En estos resultados puede ser apreciada la característica de convergencia cuadrática asociada con los métodos Newton [Parker y Chua 1989].

Tabla 4.5 Proceso de convergencia de los métodos FB y DN.

Caso de Estudio 4.3

NCC	FB	DN
1	2.537909E+00	2.537909E+00
2	3.649385E-01	3.649385E-01
3	5.820431E-02	5.820431E-02
⋮	⋮	⋮
8	1.210356E-03	1.210356E-03
64	3.817456E-05	3.867882E-05
120	3.508878E-05	4.259000E-13
⋮	⋮	
5053	9.991160E-11	

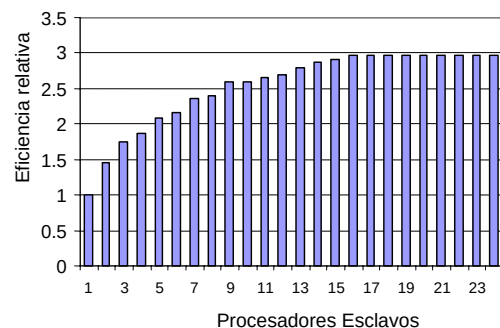


Figura 4.6 Eficiencia relativa obtenida con el uso de 1-24 procesadores esclavos. Caso de Estudio 4.3

De la Figura 4.6 se aprecia que se alcanza una eficiencia relativa máxima cercana a 3.0 con el uso de 24 procesadores esclavos. Obsérvese que la eficiencia relativa varía muy poco cuando se emplean de 17 a 24 procesadores esclavos. Puede apreciarse que a partir del uso de 15 procesadores esclavos ya no se mejora la eficiencia relativa.

De los resultados mostrados en la Figura 4.6 se aprecia que el uso de un segundo procesador incrementa la eficiencia relativa del 1 a un valor cercano a 1.5. Este aumento se justifica debido a que se está utilizando una red heterogénea de computadoras, las cuales no

tienen las mismas características; es por eso que la utilización de un tercer procesador no incrementa la eficiencia relativa a un valor cercano a 2.0.

4.2.4 Caso de Estudio 4.4 Sistema de prueba de IEEE de 30 nodos modificado

El sistema de prueba de IEEE de 30 nodos está formado por 34 líneas de transmisión, 7 transformadores, 6 generadores, 34 bancos de capacitores. Este sistema fue modificado por medio de la incorporación de un horno de arco eléctrico en el nodo 30 del sistema. Este sistema es modelado por medio de un conjunto de 97 EDO's.

La Tabla 4.6 muestra el número de periodos completos de integración requeridos por los métodos FB y DN para arribar al EEP. Se puede apreciar que el método FB requiere 14898 periodos completos de integración, en tanto que el método DN requiere exclusivamente 204, lo cual está asociado con dos aplicaciones de la técnica DN. Este número de aplicaciones representa el 1.36% del número total de ciclos requeridos por el método FB. Se puede apreciar en la tercera columna de la Tabla 4.6, la característica de convergencia cuadrática asociada con el método DN.

En la Figura 4.7 se aprecia el comportamiento de la eficiencia relativa obtenida con la aplicación de técnicas de procesamiento en paralelo basado en PVM con el uso de 1 a 24 procesadores esclavos. Se aprecia que se logra obtener una eficiencia relativa máxima cercana a 5.0.

Tabla 4.6 Proceso de convergencia de los métodos FB y DN.

Caso de Estudio 4.4

NCC	FB	DN
1	1.117788E+00	1.117788E+00
2	2.162617E-01	2.162617E-01
3	6.681112E-02	6.681112E-02
⋮	⋮	⋮
8	2.545522E-03	2.545522E-03
106	1.674104E-05	4.044592E-08
204	2.667905E-07	2.200000E-15
⋮	⋮	
14898	9.999510E-11	

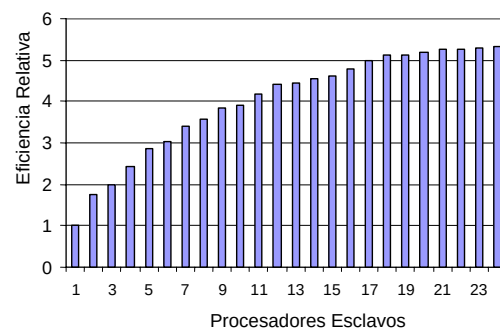


Figura 4.7 Eficiencia relativa obtenida con el uso de 1-24 procesadores esclavos. Caso de Estudio 4.4

Nuevamente de la Figura 4.7 se aprecia la característica no uniforme de incremento en la eficiencia relativa por el uso de 2 en adelante procesadores adicionales.

4.2.5 Caso de Estudio 4.5: Sistema de prueba de IEEE de 57 nodos modificado

El sistema de prueba de IEEE de 57 nodos está formado por 63 líneas de transmisión, 34 transformadores, 7 generadores y 63 bancos de capacitores. Este sistema fue modificado por medio de la incorporación de un horno de arco eléctrico en el nodo 57 del sistema. Este sistema es modelado por medio de un conjunto de 186 EDO's.

La Tabla 4.7 muestra el número de periodos completos de integración requeridos por los métodos FB y DN para arribar al EEP. Se puede apreciar que el método FB requiere 2507 periodos completos de integración, en tanto que el método DN requiere exclusivamente 382, lo cual está asociado con cuatro aplicaciones de la técnica DN. Este número de aplicaciones representa el 15.23 % del número total de ciclos requeridos por el método FB. Se puede apreciar en la tercera columna de la Tabla 4.7, la característica de convergencia cuadrática asociada con el método DN.

En la Figura 4.8 se aprecia el comportamiento de la eficiencia relativa obtenida con la aplicación de técnicas de procesamiento en paralelo basado en PVM con el uso de 1 a 24 procesadores esclavos. Se aprecia que se logra obtener una eficiencia relativa máxima cercana a 7.0.

Tabla 4.7 Proceso de convergencia de los métodos FB y DN.
Caso de Estudio 4.5

NCC	BF	ND
1	1.488684E+00	1.488684E+00
2	5.580060E-01	5.580060E-01
3	3.950136E-01	3.950136E-01
⋮	⋮	⋮
8	1.127601E-02	1.127601E-02
195	4.888185E-05	1.383870E-05
382	2.272502E-05	1.246100E-12
⋮	⋮	
2507	9.964190E-11	



Figura 4.8 Eficiencia relativa obtenida con el uso de 1-24 procesadores esclavos. Caso de Estudio 4.4

4.2.6 Caso de Estudio 4.6: Sistema de prueba de IEEE de 118 nodos modificado

El sistema de prueba de IEEE de 118 nodos está formado por 177 líneas de transmisión, 9 transformadores, 7 generadores y 177 bancos de capacitores. Este sistema fue modificado por

medio de la incorporación de un horno de arco eléctrico en el nodo 118 del sistema. Este sistema es modelado por medio de un conjunto de 390 EDO's.

La Tabla 4.8 muestra el número de periodos completos de integración requeridos por los métodos FB y DN para arribar al estado periódico estacionario. Se puede apreciar que el método FB requiere 11776 periodos completos de integración, en tanto que el método DN requiere exclusivamente 1572, lo cual está asociado con cuatro aplicaciones de la técnica DN. Este número de aplicaciones representa el 13.34 % del número total de ciclos requeridos por el método FB. Se puede apreciar en la tercera columna de la Tabla 4.8, la característica de convergencia cuadrática asociada con el método DN.

En la Figura 4.9 se aprecia el comportamiento de la eficiencia relativa obtenida con la aplicación de técnicas de procesamiento en paralelo basado en PVM con el uso de 1 a 24 procesadores esclavos. Se aprecia que se logra obtener una eficiencia relativa máxima cercana a 10.0.

Tabla 4.8 Proceso de convergencia de los métodos FB y DN.

Caso de Estudio 4.6

NCC	FB	DN
1	1.419945E+00	1.419945E+00
2	1.046282E+00	1.046282E+00
3	8.238483E-01	8.238483E-01
⋮	⋮	⋮
8	2.518677E-01	2.518677E-01
399	3.835443E-05	1.042335E-02
790	2.917796E-05	7.218852E-05
1181	2.217269E-05	2.126601E-10
1572	1.683363E-05	2.700000E-15
⋮	⋮	
11776	9.989880E-11	

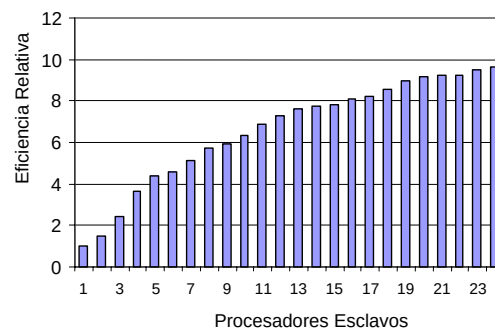


Figura 4.9 Eficiencia relativa obtenida con el uso de 1-24 procesadores esclavos. Caso de Estudio 4.6

4.3 Sistemas trifásicos

4.3.1 Caso de Estudio 4.7: Sistema trifásico de 3 nodos

Consideremos el sistema eléctrico de potencia mostrado en la Figura 4.10. Este sistema está formado por una unidad generadora, tres líneas de transmisión 3 bancos de capacitores, dos ramas magnetizantes y un horno de arco eléctrico. El sistema es modelado por medio de un conjunto 27 EDO's. La Tabla 4.9 muestra el número de periodos de integración requeridos para

llegar al estado periódico estacionario por medio de las técnicas FB y la técnica de aceleración DN. Puede apreciarse de los resultados mostrados en la Tabla 4.9 que el método de FB requiere 279 periodos completos de integración para llegar al EEP en tanto que la técnica DN requiere 120 periodos completos de integración, los cuales están asociados a 8 periodos antes de aplicar la técnica de aceleración y 4 aplicaciones de la misma. Los 120 periodos completos requeridos por la técnica de DN representan el 43% del total de periodos requeridos por el método FB. Adicionalmente, de los resultados mostrados en la Tabla 4.9 puede observarse que en cada una de las aplicaciones de la técnica de aceleración de la convergencia de las variables de estado al Ciclo Límite, el error decrece de manera cuadrática, lo cual demuestra la característica de convergencia cuadrática asociada del método Newton.

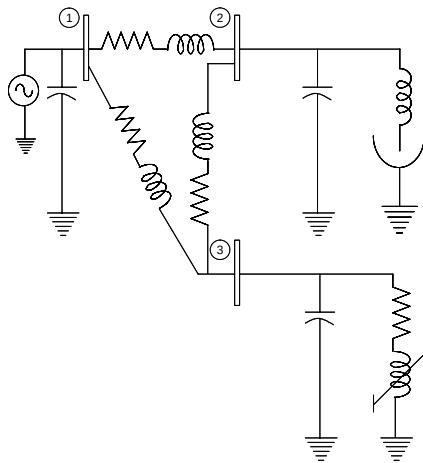


Figura 4.10 Caso de Estudio 4.7

La Figura 4.11 muestra el comportamiento de la eficiencia relativa con la aplicación de PVM y el uso de 1 a 24 procesadores esclavos. De los resultados mostrados puede apreciarse que se obtiene un valor máximo de eficiencia relativa cercano a 2.12 con el uso de 24 procesadores esclavos. Esta eficiencia se alcanza desde el uso de 12 procesadores esclavos y se mantiene prácticamente constante hasta con el uso de los 24 procesadores esclavos. Se observa que el máximo incremento de la eficiencia relativa se obtiene con el uso del segundo procesador esclavo. El uso de 3 a 8 procesadores esclavos genera incrementos pequeños en la eficiencia relativa. Es notorio apreciar de los resultados mostrados en la Figura 4.11 que el uso de un segundo procesador esclavo incrementa la eficiencia relativa de 1 a 1.5, sin embargo el uso de un tercer procesador esclavo incrementa de manera marginal la eficiencia relativa. La justificación de este resultado está asociada con el hecho de que el tercer procesador tiene menores características en cuenta a velocidad de cómputo que los primeros dos procesadores. Sin embargo sus características son aprovechadas para incrementar, aun de manera pequeña, la eficiencia relativa.

Tabla 4.9 Proceso de convergencia de los métodos FB y DN. Caso de Estudio 4.7

NCC	FB	DN
1	8.669902E-01	8.669902E-01
2	3.070718E-01	3.070718E-01
3	2.970357E-01	2.970357E-01
⋮	⋮	⋮
8	1.982992E-01	1.982992E-01
39	4.697966E-02	3.776332E-01
70	1.243744E-02	1.912404E-03
101	3.306248E-03	6.494579E-09
132	8.791989E-04	8.970000E-14
⋮	⋮	⋮
537	9.425970E-11	

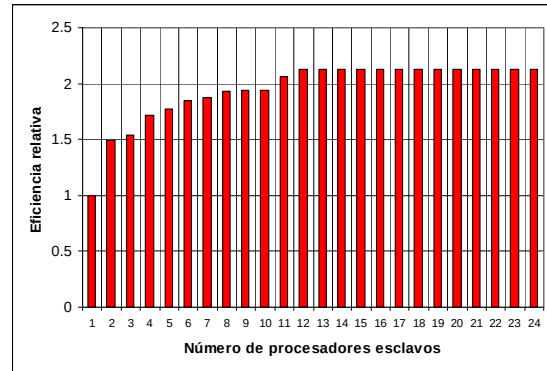
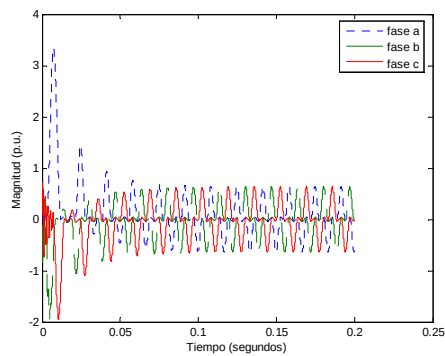
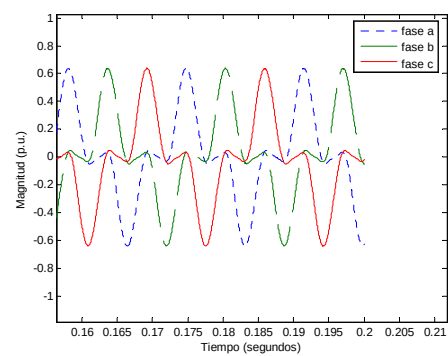


Figura 4.11 Eficiencia relativa obtenida con el uso de 1-24 procesadores esclavos. Caso de Estudio 4.7

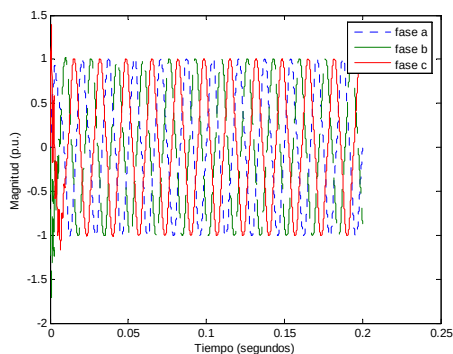
Las Figuras 4.12(a)-(b) muestran la evolución en el tiempo de las formas de onda de la corriente en la línea que une a los nodos 1 y 2 y su estado estacionario. La Figura 4.12(c)-(d) muestra esta información para el voltaje en el nodo 2 del sistema. En las Figuras 4.12(e)-(f) se ilustra el comportamiento de la forma de onda del radio del horno de arco eléctrico.



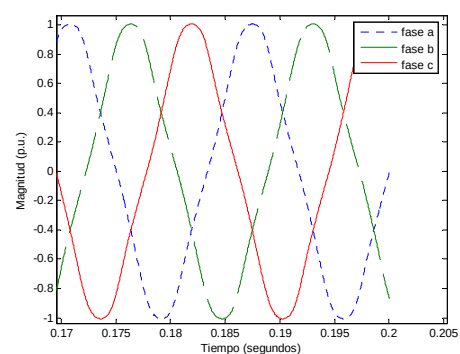
(a)



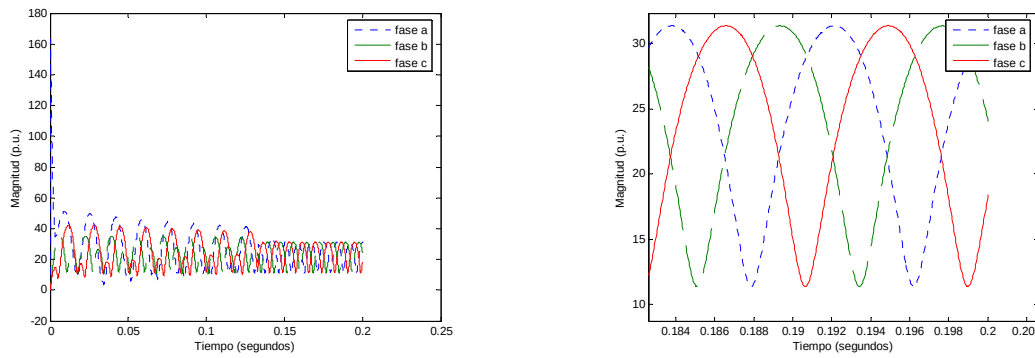
(b)



(c)



(d)



(e) (f)
Figura 4.12 Formas de onda representativas. Caso de Estudio 4.7

La Tabla 4.10 muestra el proceso de convergencia hacia el EEP aplicando la Técnica de aceleración de DN y la estrategia de Jacobiano constante, calculado una sola vez. Nótese que si se mantiene constante durante 12 iteraciones, se requieren tan solo 52 periodos completos de integración contra, los 537 periodos requeridos por el método de FB para lograr la convergencia de las variables de estado al Ciclo Límite. Los 52 periodos representan el 9.68 % del total de periodos requeridos por el método FB. Puede apreciarse adicionalmente que la característica de convergencia es lineal, sin embargo, esto es compensado por un menor esfuerzo computacional considerablemente menor (9.68%) que al asociado con el método FB.

En la Tabla 4.11 se muestra el proceso de convergencia al EEP, haciendo el cálculo de dos aproximaciones del Jacobiano. En este caso se aprecia que el método DN modificado requiere de 74 periodos completos de integración contra los 537 periodos completos de integración del método FB, los cuales representan el 13.78 % del total de periodos completos de integración requeridos por el método FB. Ahora el proceso de convergencia hacia el EEP presenta un comportamiento super-lineal.

De los resultados mostrados en la Tablas 4.10 y 4.11, se observa que la estrategia de mantener fijo el jacobiano, durante el proceso de acercamiento rápido, elimina la característica de convergencia cuadrática del método, sin embargo disminuye el esfuerzo computacional, lo cual se ve reflejado en un menor tiempo de cómputo requerido para la obtención del EEP de operación de las redes eléctricas analizadas. Esta alternativa es adecuada en particular para sistemas de gran escala, en dónde el número de variables de estado que describen su comportamiento es tan grande, que una sola aplicación del método Newton de acercamiento rápido al EEP puede resultar en un esfuerzo computacional mayor al requerido por la aplicación del método de FB.

Tabla 4.10 Proceso de convergencia de los métodos FB y DN
Caso de Estudio 4.7, un cálculo del Jacobiano

NCC	FB	DN
1	8.669902E-01	8.669902E-01
2	3.070718E-01	3.070718E-01
3	2.970357E-01	2.970357E-01
⋮	⋮	⋮
9	1.858778E-01	1.858778E-01
40	4.499790E-02	3.255826E-01
41	4.310082E-02	4.736847E-02
42	4.128468E-02	6.700002E-03
43	3.954594E-02	9.364275E-04
44	3.788122E-02	1.307838E-04
45	3.628729E-02	1.826062E-05
46	3.476108E-02	2.549570E-06
47	3.329964E-02	3.559691E-07
48	3.190016E-02	4.970060E-08
49	3.055998E-02	6.939240E-09
50	2.927653E-02	9.688592E-10
51	2.804736E-02	1.352536E-10
52	2.687013E-02	1.889380E-11
⋮	⋮	
537	9.425970E-11	

Aceleración

Jacobiano cte

Jacobiano cte

Jacobiano cte

Jacobiano cte

Jacobiano cte

Jacobiano cte

Jacobiano cte

Jacobiano cte

Jacobiano cte

Jacobiano cte

Jacobiano cte

Jacobiano cte

Tabla 4.11 Proceso de convergencia de los métodos FB y DN. Caso de Estudio 4.7, cálculo de dos Jacobiano

NCC	FB	DN
1	8.669902E-01	8.669902E-01
2	3.070718E-01	3.070718E-01
3	2.970357E-01	2.970357E-01
⋮	⋮	⋮
9	1.858778E-01	1.858778E-01
40	4.499790E-02	3.255826E-01
71	1.191699E-02	1.316883E-03
72	1.141833E-02	3.104739E-06
73	1.094054E-02	1.187948E-10
74	1.048275E-02	1.699170E-11
⋮	⋮	
537	9.425970E-11	

Aceleracion

Aceleracion

Jacobiano cte

Jacobiano cte

Jacobiano cte

Jacobiano cte

4.3.2 Caso de Estudio 4.8: Sistema trifásico modificado de 14 nodos de IEEE

El sistema de IEEE de 14 nodos está formado por 15 líneas de transmisión que han sido modeladas como líneas de longitud media, 5 transformadores de potencia, en los cuales el efecto de saturación ha sido modelado mediante la expresión (3.7). Se ha adicionado un horno de arco eléctrico en el nodo 14 así como una rama magnetizante, cuyo modelado de saturación es representado mediante la expresión (3.7). La representación de espacio de estado del sistema de prueba de IEEE de 14 nodos está formada por un conjunto de 226 EDO's.

La Tabla 4.12 muestra el número de periodos completos de integración para llegar al EEP mediante las Técnicas FB y DN respectivamente. Puede observarse de los resultados mostrados en esta Tabla que el número de ciclos requeridos por el método FB es 3500 en tanto que con el método DN este número se reduce a 1370, lo cual representa el 27.4 % del número de ciclos de integración requeridos por el método FB. Cabe hacer mención que durante las aplicaciones del método DN se observó la característica de convergencia cuadrática.

Tabla 4.12 Proceso de convergencia de los métodos FB y DN. Caso de Estudio 4.8

NCC	FB	DN
1	7.364787E+00	7.364787E+00
2	1.891711E+00	1.891711E+00
3	7.633227E-01	7.633227E-01
⋮	⋮	⋮
8	7.482124E-02	7.482124E-02
235	2.466616E-02	5.098835E-01
462	1.261921E-02	2.413039E-01
689	6.709477E-03	2.397719E-02
916	3.599754E-03	4.501770E-05
1143	1.884323E-03	2.721075E-09
1370	1.053273E-03	9.060000E-14
⋮	⋮	
3500	9.951240E-11	

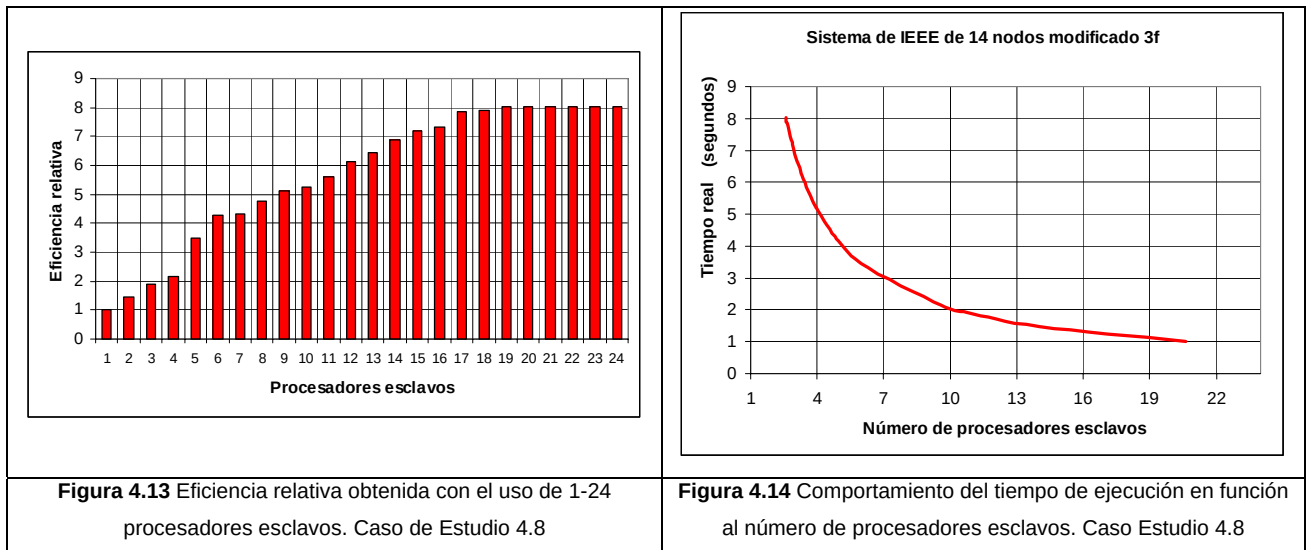
En la Tabla 4.13 se muestra el tiempo de ejecución (en segundos) para la simulación utilizando las Técnicas FB y DN, respectivamente.

Tabla 4.13 Tiempo de ejecución de la simulación. Caso de Estudio 4.8

Técnica	Tiempo
FB	57.561s
DN	9.932s

De los resultados mostrados en la Tabla 4.13 se observa que el tiempo de ejecución de la Técnica de DN representa el 17.25% del tiempo requerido por el método FB. Los resultados mostrados en la Tabla 4.13 fueron obtenidos con el uso de una computadora con procesador INTEL® XEON con una velocidad de 3.06 GHz.

La Figura 4.13 muestra el comportamiento de la eficiencia relativa obtenida con el uso de 1 a 24 procesadores esclavos. Puede apreciarse de Figura 4.13 que con el uso de 2 a 24 procesadores esclavos se tienen los mayores aumentos en la eficiencia relativa. De 14 a 24 procesadores esclavos el incremento en la eficiencia relativa es pequeño, sin embargo, se llega a un máximo valor de eficiencia relativa cercano a 8.



La Figura 4.14 muestra el tiempo de ejecución requerido para llegar al estado periódico estacionario con el uso de 1 a 24 procesadores esclavos. Puede apreciarse que con el uso de 1 procesador el tiempo requerido para llegar al estado periódico estacionario es cercano a los 8 segundos, sin embargo el uso de los 24 procesadores esclavos reduce este tiempo a un valor cercano a 1 segundo.

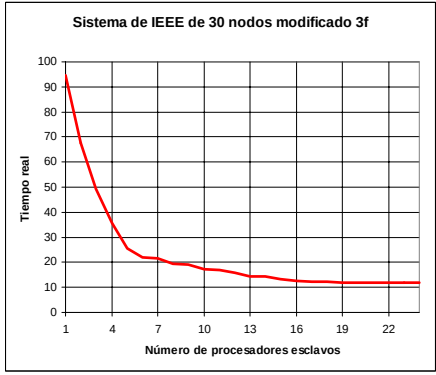
4.3.3 Caso de Estudio 4.9: Sistema trifásico modificado de 30 nodos de IEEE

El sistema de prueba de IEEE de 30 nodos está formado por 34 líneas de transmisión representadas mediante su modelo de longitud media, 7 transformadores de potencia y 6 generadores. El sistema de IEEE de 30 nodos fue modificado con la incorporación de un horno de arco eléctrico en el nodo 30 así como ramas magnetizantes en los nodos 29 y 30. El sistema es modelado matemáticamente por un conjunto de 423 EDO's, las cuales están asociadas con los modelos presentados en este Capítulo.

La Tabla 4.14 muestra los errores máximos obtenidos en cada periodo completo de integración durante el proceso de convergencia de las variables de estado al Ciclo Límite. Se observa que el método FB requiere 3388 periodos completos de integración en tanto que la Técnica DN requiere solo de 1280, los cuales representan el 37.86% del número de periodos requeridos por la Técnica FB. Se aprecia que en el proceso de convergencia hacia el EEP utilizando el método DN se tiene convergencia cuadrática.

En la Figura 4.15 se muestra la reducción del tiempo de ejecución mostrada en la Tabla 4.15 con la aplicación de 1 a 24 procesadores esclavos. Se observa que se reduce el tiempo de

ejecución a valores cercanos a 11.11 segundos, lo cual está representado por un incremento en la eficiencia relativa cercano a 8.5.

Tabla 4.14 Proceso de convergencia de los métodos FB y DN. Caso de Estudio 4.9			
NCC	FB	DN	
1	8.217033E+00	8.217033E+00	Figura 4.15 Comportamiento del tiempo de ejecución en función al número de procesadores esclavos. Caso de Estudio 4.9
2	1.052307E+00	1.052307E+00	
3	1.092364E+00	1.092364E+00	
⋮	⋮	⋮	
8	1.178125E-02	1.178125E-02	
432	5.309576E-03	7.333029E-02	
856	1.941390E-03	1.649060E-04	
1280	7.135790E-04	9.496140E-11	
⋮	⋮	⋮	
3388	9.973250E-10		

En la Tabla 4.15 se muestra el tiempo de ejecución (en segundos) de la simulación del caso de estudio presentado, utilizando los métodos FB y DN. Se observa que el tiempo de ejecución del método FB es de 2500.4 segundos en tanto que el método DN requiere solo de 94.6 segundos; este tiempo representa el 3.78 % del tiempo de ejecución asociado con el método FB.

Tabla 4.15 Tiempo de ejecución de la simulación. Caso de Estudio 4.9

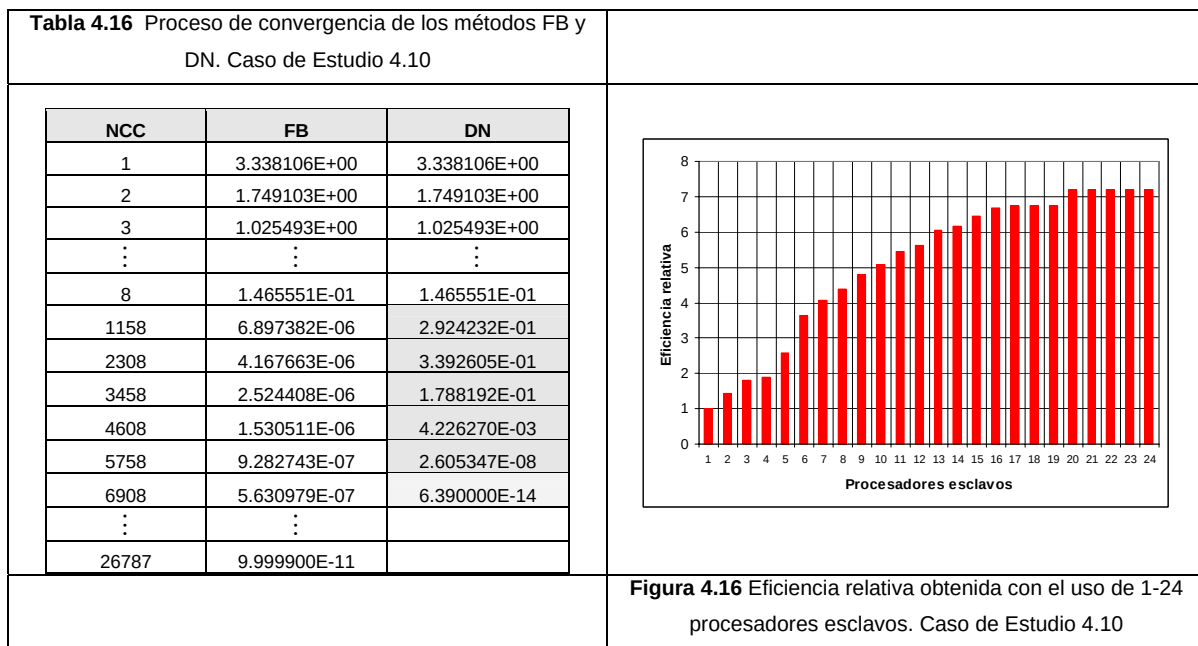
Técnica	Tiempo
FB	2500.413
DN	94.59

4.3.4 Caso de Estudio 4.10: Sistema trifásico modificado de 118 nodos de IEEE

El sistema de prueba de IEEE de 118 nodos está conformado por 176 líneas de transmisión que han sido modeladas como líneas de longitud media, 9 transformadores trifásicos y 53 generadores. El sistema de prueba de IEEE de 118 fue modificado con la incorporación de 4 hornos de arco eléctrico en los nodos 75, 88, 117 y 118. El sistema de prueba de IEEE de 118 nodos es modelado en el dominio del tiempo por un conjunto de 1149 variables de estado.

En la Tabla 4.16 se muestra el proceso de convergencia al EEP por medio de la aplicación de las Técnicas FB y DN. De los resultados mostrados en esta tabla se aprecia que el método FB requiere del uso de 26787 ciclos en tanto que el método DN requiere solamente de 6908, lo cual representa el 25.78% del total de ciclos requeridos por el método FB. Se observa que en las dos primeras aplicaciones del método DN el error obtenido se incrementa con respecto al ciclo anterior,

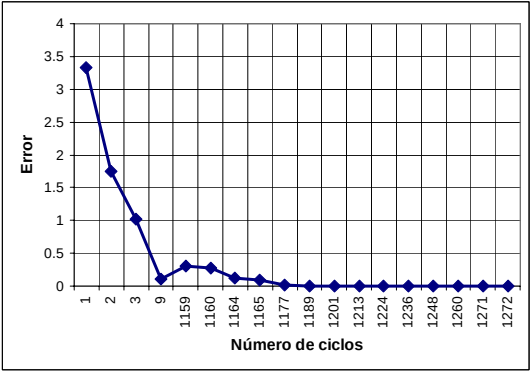
sin embargo de la tercera a la sexta aplicación de la Técnica DN se observa que el error se reduce de manera cuadrática.



La Figura 4.16 muestra la ventaja en la eficiencia computacional al combinar la Técnica DN con la aplicación del procesamiento en paralelo con PVM. De los resultados mostrados en la Figura 4.16 puede apreciarse el incremento en la eficiencia relativa con el uso de 1 a 24 procesadores esclavos. Puede apreciarse que se alcanza un valor máximo de eficiencia relativa cercano a 7.20.

Con el objeto de incrementar la eficiencia computacional en el proceso de la obtención del EEP del sistema de IEEE de 118 nodos modificado, se propone la aplicación del método DN calculando solamente el primer Jacobiano y manteniéndolo constante durante el resto del proceso de solución. La Tabla 4.17 muestra el proceso de convergencia hacia el EEP. De los resultados mostrados en esta tabla, puede observarse que una vez que se calcula el Jacobiano y éste se mantiene constante, el proceso de convergencia observa una característica super-lineal, lo cual se ve reflejado en un número menor de ciclos para alcanzar el EEP. Con este resultado se puede volver a mostrar la ventaja computacional que ofrece mantener constante el Jacobiano. Este procedimiento elimina la característica de convergencia cuadrática del método, sin embargo incrementa de manera notable la eficiencia computacional, lo cual se ve reflejado en un número menor de ciclos de integración y por tanto en un tiempo de cómputo menor. Se observa que esta Técnica es recomendada en particular para sistemas de gran escala, los cuales impliquen un número muy grande de variables de estado en su representación de espacio de estado. Debe de recordarse que cada una de las aplicaciones del método DN implica la simulación de un número de ciclos igual al número de variables de estado que modelan el comportamiento de la red eléctrica. El

método DN también implica el proceso de inversión matricial de una matriz de orden asociado al número de variables de estado que modelan la red eléctrica. Es por estas razones que el número mínimo de aplicaciones del método DN tiene que ser considerado como un elemento primordial en el análisis de redes eléctricas de gran escala.

Tabla 4.17 Proceso de convergencia. Caso de Estudio 4.10 con el uso del Jacobiano constante			
NCC	Error		
1	3.338106E+00		
2	1.749103E+00		
3	1.025493E+00		
⋮	⋮		
9	1.060799E-01		
1159	2.993022E-01	Aplicación Método DN	
1160	2.729213E-01	Jacobiano constante	
⋮	⋮		
1164	1.152133E-01	Jacobiano constante	
1165	9.779846E-02	Jacobiano constante	
⋮	⋮		
1177	9.550990E-03	Jacobiano constante	
⋮	⋮		
1189	9.372217E-04	Jacobiano constante	
⋮	⋮		
1201	8.971949E-05	Jacobiano constante	
⋮	⋮		
1213	8.561270E-06	Jacobiano constante	
⋮	⋮		
1224	9.933535E-07	Jacobiano constante	
⋮	⋮		
1236	9.475918E-08	Jacobiano constante	
⋮	⋮		
1248	9.039347E-09	Jacobiano constante	
⋮	⋮		
1260	8.624179E-10	Jacobiano constante	
⋮	⋮		
1271	1.000540E-10	Jacobiano constante	
1272	8.224490E-11	Jacobiano constante	
			Figura 4.17 Comportamiento del error durante el proceso de convergencia para el Caso de Estudio 4.4 con el uso del Jacobiano Constante

La Figura 4.17 muestra el comportamiento del error obtenido en cada ciclo durante el proceso de convergencia hacia el EEP, utilizando el método DN con un solo cálculo del Jacobiano. De esta gráfica puede observarse que durante la aplicación actualización de las variables de estado con el uso del Jacobiano incrementa el error, sin embargo las siguientes actualizaciones decrementan el error hasta llegar al EEP utilizando solamente 1272 ciclos con respecto a los 26787

ciclos utilizados por el método de FB y los 6908 ciclos utilizados por el método DN completo. Los 1272 ciclos representan el 4.74 % del total de ciclos requeridos por el método FB y el 18.41 % del total de ciclos utilizados por el método DN. Es evidente que se obtiene una notable ventaja en la eficiencia computacional.

4.4 Análisis de estabilidad transitoria

4.4.1 Caso de Estudio 4.11. Sistema de 3 nodos. Falla en el nodo 2

La Figura 4.18 muestra un sistema monofásico conformado por 3 nodos, el cual está conformado por 3 líneas de transmisión; tres bancos de capacitores conectados a los nodos 1, 2 y 3 respectivamente; 2 ramas magnetizantes conectadas en los nodos 2 y 3; un horno de arco eléctrico conectado en el nodo 2 y un generador conectado en el nodo 1. Una vez que se ha obtenido el EEP de operación en 44 ciclos utilizando el método DN, se procede a simular el EEP de la red eléctrica. En $t = 0.0$ segundos se genera una falla en el nodo 2, la cual consiste en un corto circuito sólido a tierra. La falla se mantiene durante 0.0666 segundos y es liberada.

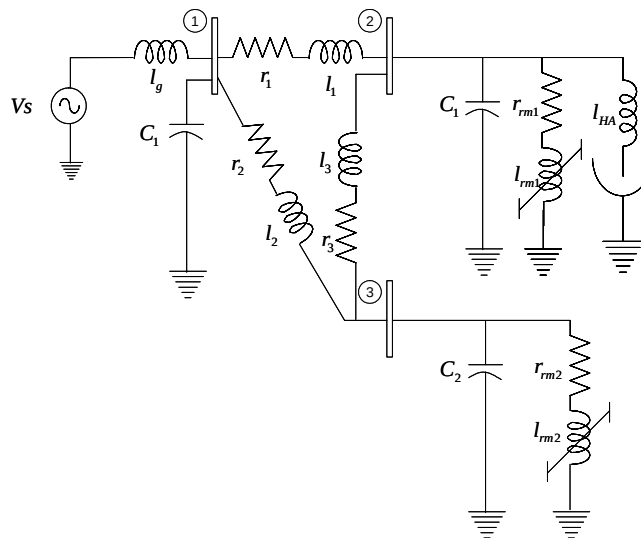


Figura 4.18 Caso de Estudio 4.11. Falla en el nodo 2

La Tabla 4.18 muestra el proceso de convergencia hacia el EEP, es decir para llegar al tiempo $t = 0$, utilizando los métodos FB y DN. Puede ser apreciado que se requieren de 147 periodos completos de integración para llegar al EEP mediante el uso del método FB en tanto que solamente se requieren de 44 periodos completos de integración por parte del método DN, los cuales representan el 29.93 % del total de ciclos utilizados por el método FB. Exactamente el $t = 0$ se genera una falla comienza la falla, la cual es liberada en el ciclo 152 ($t = 0.0666$ s). Una vez que la falla es liberada se simula el comportamiento del sistema hasta el ciclo 159 ($t = 0.1666$ s) en

dónde se aplica la técnica DN. A partir de este momento el método FB requiere de 143 periodos completos de integración para llegar al EEP en tanto que la utilización de la técnica DN reduce este número a 47, lo cual representa el 32.86 % del número total de periodos completos de integración requeridos por el método FB.

Puede apreciarse adicionalmente que en las dos etapas en que es aplicada la técnica de aceleración DN, se experimenta un proceso de convergencia cuadrática de las variables de estado hacia el EEP.

Tabla 4.18 Proceso de convergencia de los métodos FB y DN. Caso de Estudio 4.11

NCC	FB	DN	
1	1.523236E+00	1.523236E+00	
2	1.139482E+00	1.139482E+00	
3	8.872367E-01	8.872367E-01	
⋮	⋮	⋮	
8	2.120370E-01	2.120370E-01	
20	1.014991E-02	6.037877E-03	Aceleración
32	8.554134E-04	7.892172E-06	Aceleración
44	1.670457E-04	9.495000E-13	Aceleración
⋮	⋮		
147	8.955480E-11		
148	3.942126E+00	3.942126E+00	Falla
149	2.113333E+00	2.113333E+00	Falla
150	1.135043E+00	1.135043E+00	Falla
151	6.085440E-01	6.085440E-01	Falla
152	5.763410E+00	5.763410E+00	
153	5.400319E-01	5.400319E-01	
⋮	⋮	⋮	
159	8.794768E-02	8.794768E-02	
171	4.208463E-03	7.084798E-04	Aceleración
183	3.358976E-04	9.057644E-09	Aceleración
195	6.587332E-05	2.310000E-14	Aceleración
⋮	⋮		
291	9.43998E-11		

La Figura 4.19 muestra el comportamiento en el tiempo de algunas variables de estado representativas del sistema eléctrico de potencia que está siendo analizado. La Figura 4.19(a) muestra el comportamiento del voltaje en el nodo 2 del sistema en tanto que la Figura 4.19(b) muestra el comportamiento de la corriente en el generador; ambas figuras muestran el comportamiento de estas formas onda durante la pre-falla, la falla y la post-falla, mediante la utilización de las técnicas FB y DN respectivamente.

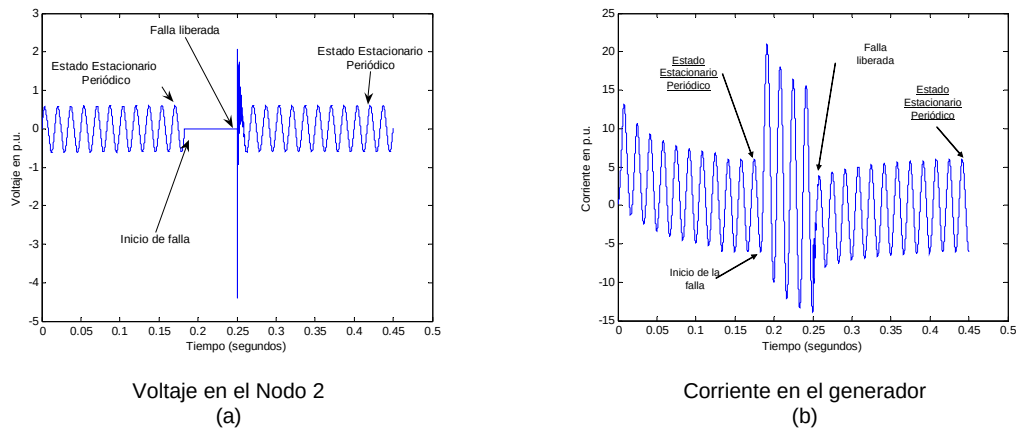


Figura 4.19 Voltaje en el nodo 2 y corriente en el generador. Caso de Estudio 4.11

4.4.2 Caso de Estudio 4.12. Sistema de 5 nodos. Falla en el nodo 5

La Figura 4.20 muestra el sistema de prueba que se considera para realizar un análisis de corto circuito. El sistema está compuesto por 2 generadores, 7 líneas de transmisión, 1 rama magnetizante y 5 bancos de capacitores. La dinámica del sistema es representada por un conjunto de 15 EDO's. Para este caso de estudio se analiza un corto circuito sólido a tierra en el nodo 2 del sistema, el cual ocurre en $t = 0$ y es liberado en $t = 0.0666$ s. Para este caso de estudio se utilizó un amortiguamiento muy pobre en las líneas de transmisión, haciendo la resistencia de todas las líneas de transmisión igual a 0.0001 en *p.u.*

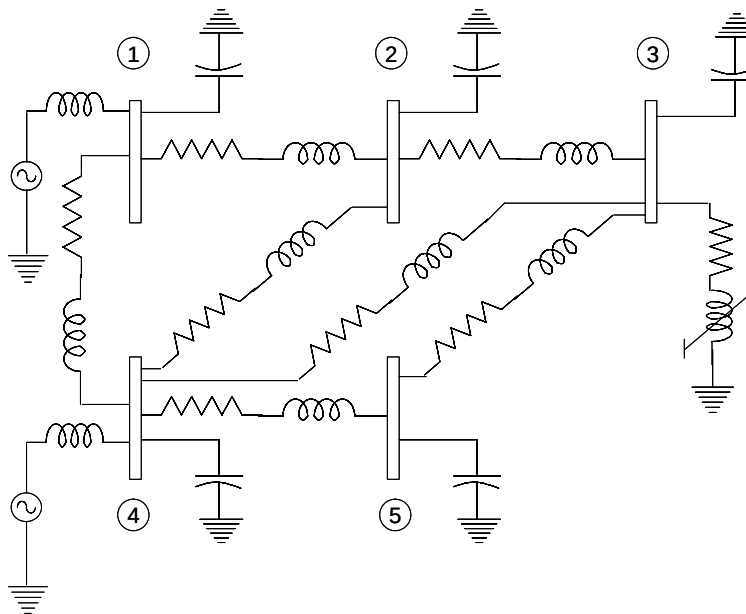


Figura 4.20 Caso de Estudio 4.12. Falla en el nodo 2

La Tabla 4.19 muestra el proceso de convergencia hacia el Ciclo Límite durante el proceso completo de simulación. Se puede apreciar que para obtener el EEP de operación ($t = 0$) se requirieron 419 periodos completos de integración por el método FB en tanto que el método DN requiere solamente de 56 periodos completos de integración. En el ciclo 420 se produce la falla y en el ciclo 424 es liberada. Puede apreciarse que en el ciclo 431 se aplica la técnica DN, obteniéndose el EEP en 511 periodos completos de integración, en tanto el EEP se obtiene con el método FB en 944 periodos completos de integración. El número de periodos completos de integración requeridos por el método DN representa el 54 % del número total de periodos completos de integración requeridos por el método FB. Adicionalmente, se observa que en las dos veces que se aplica la técnica DN se logra un proceso de convergencia cuadrática.

Tabla 4.19 Proceso de convergencia de los métodos FB y DN. Caso de Estudio 4.12

NCC	FB	DN	
1	7.823663E-01	7.823663E-01	
2	3.793310E-01	3.793310E-01	
3	2.713448E-01	2.713448E-01	
⋮	⋮	⋮	
8	4.063954E-02	4.063954E-02	
24	3.063646E-02	3.625237E-04	Aceleración
40	5.354821E-03	5.184742E-09	Aceleración
56	2.524312E-03	1.161293E-13	Aceleración
419	8.416511E-11		
420	7.210124E-01	7.210124E-01	Falla
421	7.682327E-01	7.682327E-01	Falla
422	7.458402E-01	7.458402E-01	Falla
423	7.069659E-01	7.069659E-01	Falla
424	1.571401E+00	1.571401E+00	Falla Liberada
425	2.002518E+00	2.002518E+00	
⋮	⋮	⋮	
431	1.147636E+00	1.147636E+00	
447	1.567487E-01	6.674442E-01	Aceleración
463	7.848848E-02	9.304016E-02	Aceleración
479	3.017694E-02	2.473785E-03	Aceleración
495	7.667887E-03	1.033349E-06	Aceleración
511	5.480140E-03	4.158895E-13	Aceleración
⋮	⋮	⋮	
944	9.863743E-11		

Las Figuras 4.21 y 4.22 muestran el comportamiento en el tiempo de variables de estado representativas en el sistema eléctrico de potencia analizado. En la Figura 4.21 se muestra el comportamiento de las corrientes de los generadores del sistema eléctrico de potencia, en tanto que en la Figura 4.22 se muestra la forma de onda del voltaje en el nodo fallado. De la Figura 4.21 se observa que durante la falla, el generador 2 aporta la corriente de falla. De esta misma figura puede observarse que una vez que se libera la falla el comportamiento de las formas de onda de corriente presenta un transitorio muy lento, el cual se ve reflejado en el número de ciclos

requeridos por el método FB para llegar al EEP una vez que ha sido liberada la falla. De esta misma Figura 4.21 puede observarse que una vez que se aplica la técnica DN, rápidamente las formas de onda de las corrientes vuelven a llegar a su condición de pre-falla, o de EEP de operación.

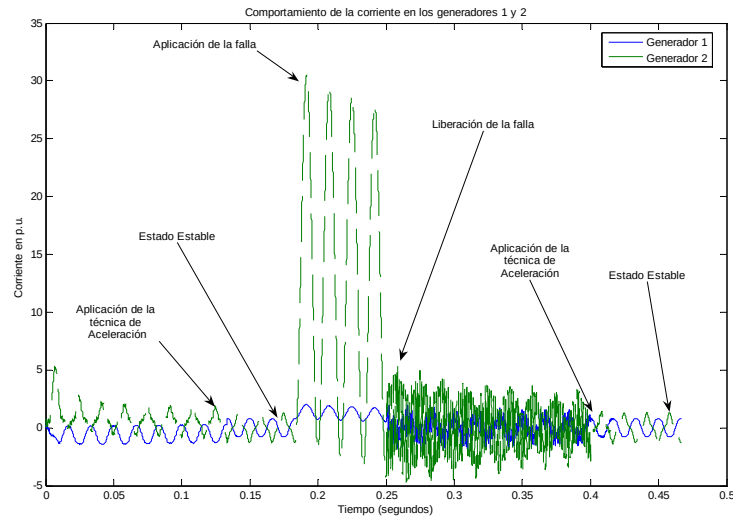


Figura 4.21 Corriente en los generadores 1 y 2. Caso de Estudio 4.12

La Figura 4.22 muestra un comportamiento similar al reportado en el comportamiento de las corrientes, pero ahora en la forma de onda del voltaje en el nodo fallado. Se aprecia que durante la post-falla se presenta un transitorio muy lento, sin embargo, en el momento de aplicar la técnica DN se obtiene rápidamente la condición de pre-falla, en donde el voltaje en el nodo 2 del sistema eléctrico vuelve a tomar un valor cercano a 1.0 en *p.u.*

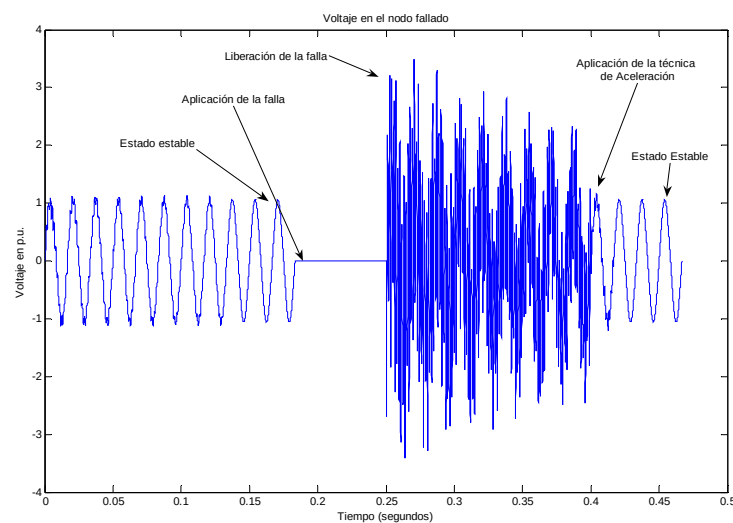


Figura 4.22 Voltaje en el nodo 2. Caso de Estudio 4.12

4.4.3 Caso de Estudio 4.13: Sistema monofásico de 8 nodos con CSCT

El sistema mostrado en la Figura 4.23 está compuesto por 8 nodos y 20 ramas, contiene 6 transformadores representados por su rama magnetizante en paralelo con un capacitor. Contiene dos fuentes de alimentación. Este sistema es robusto por el hecho de tener dos fuentes de generación, sin embargo su debilidad es el hecho de ser un sistema radial, en el cual no existen líneas que permitan suministrar fluido eléctrico a las diferentes cargas con que cuenta este sistema en caso de fallas en las líneas de que conforman el mismo. El sistema contiene además dos CSCT entre los nodos 3 y 4 el primero y 7 y 8 el segundo. Este sistema eléctrico es representado por un conjunto de 28 EDO's. En particular en este caso de estudio se utilizan como variables de estado los flujos en los diversos elementos, esto se hace con el objeto de mostrar el comportamiento de la técnica propuesta de análisis de estabilidad sujeta a una representación en espacio de estado en función de los flujos en los elementos que forman el sistema eléctrico de potencia.

Los CSCT's incorporados en este sistema tienen como finalidad poder controlar el flujo de potencia activa a través de las líneas en que están conectados [Hak-Guhn Han *et al.* 1997]. La configuración del sistema es radial, lo cual hace que no sea muy confiable, sin embargo, es robusto por el hecho de tener dos fuentes de alimentación.

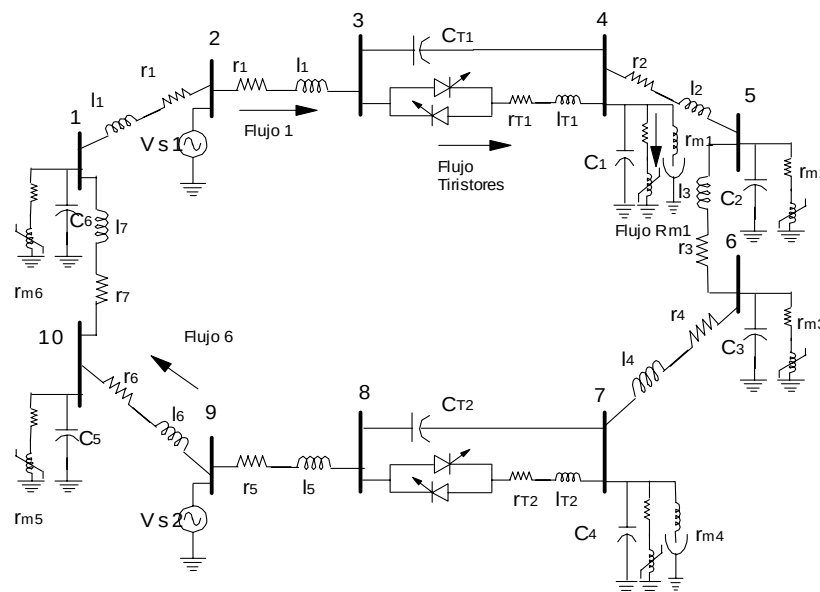


Figura 4.23 Caso de Estudio 4.13

Se considera un corto circuito sólido a tierra en el nodo 4 del sistema, el cual ocurre en el momento de llegar al EEP. La falla se mantiene durante 4 ciclos es liberada. Una vez liberada la falla.

La Tabla 4.20 muestra el número de periodos completos de integración requeridos para alcanzar el EEP mediante la aplicación de una técnica FB y mediante la aplicación de la técnica DN. De los datos mostrados en esta tabla se puede observar que la técnica FB requiere de la aplicación de 2934 periodos completos de integración para alcanzar el estado periódico estacionario; en tanto que el método DN requiere de la aplicación de 134 periodos completos de integración, lo cual representa el 4.56% del número total de periodos completos de integración requeridos por el método FB.

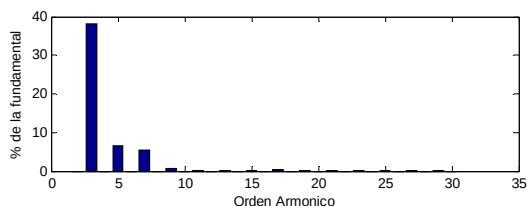
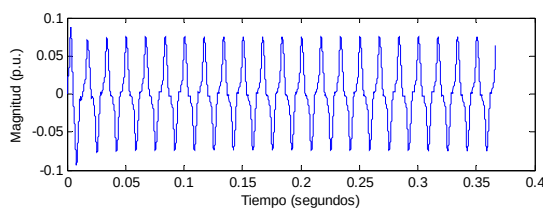
Tabla 4.20 Proceso de convergencia de los métodos FB y DN. Caso de Estudio 4.13

NCC	FB	DN	
1	2.674021E+00	2.674021E+00	
2	6.215691E-01	6.215691E-01	
3	8.443259E-02	8.443259E-02	
⋮	⋮	⋮	
8	6.559818E-03	6.559818E-03	
37	1.800545E-04	7.172172E-03	Aceleración
66	8.665660E-05	4.922722E-04	Aceleración
95	4.164375E-05	4.096786E-07	Aceleración
124	2.034429E-05	1.056932E-12	Aceleración
⋮	⋮		
2059	9.989243E-11		Estado Estable
2060	3.166810E+00	3.166810E+00	Falla
2061	2.113030E-01	2.113030E-01	Falla
2062	8.787171E-02	8.787171E-02	Falla
2063	3.581832E-02	3.581832E-02	Falla
2064	2.707236E+00	2.707236E+00	Liberación de la falla
2065	5.407629E-01	5.407629E-01	
⋮	⋮	⋮	
2072	1.128107E-02	1.128107E-02	
2101	2.629624E-03	7.785198E-03	Aceleración
2130	5.976235E-04	3.425070E-03	Aceleración
2159	2.851096E-04	5.817824E-04	Aceleración
2188	1.392599E-04	1.179930E-06	Aceleración
2217	6.900698E-05	1.871392E-12	Aceleración
⋮	⋮		
4652	9.962187E-11		

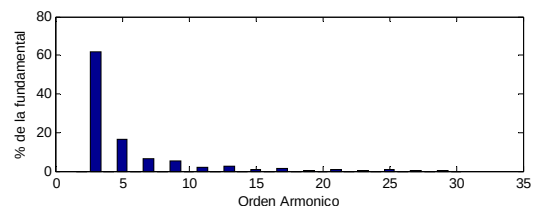
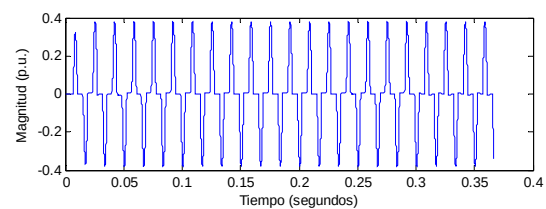
La Figura 4.24 muestra la forma de onda de algunas variables de estado representativas en el sistema durante las etapas de pre-falla, falla y post-falla. La Figura 4.24(a) muestra la forma de onda del flujo en la rama que conecta los nodos 2 y 3 del sistema, además de su espectro armónico en el estado periódico estacionario. Obsérvese que la falla en el nodo 4 del sistema no afecta la forma de onda del flujo en esta rama. La Figura 4.24(b) muestra la forma de onda del flujo en los tiristores del CSCT conectado entre los nodos 3 y 4 del sistema en dónde nuevamente se aprecia que la falla en el nodo 4 del sistema no afecta su forma de onda. En el caso de la forma de onda del voltaje en el nodo fallado, la cual se muestra en la Figura 4.24(c), puede ser apreciado el

periodo en el cual está presenta la falla (voltaje en el capacitor igual a cero), sin embargo en el momento de liberar la falla se aprecia la existencia de un alto voltaje en este nodo, el cual llega a valores cercanos a 5.0 en *p.u.* Finalmente la Figura 4.24(d) muestra la forma de onda del flujo que circula entre los nodos 9 y 10 del sistema en dónde puede ser observado que durante el periodo durante el cual está presente la falla, el flujo se eleva a valores cercanos a 0.4 en *p.u.*

Adicionalmente a las formas de onda de las variables de estado seleccionadas se muestra su respectivo espectro armónico en EEP. De la Figura 4.24(a) se aprecia que el flujo en la rama que une los nodos 2 y 3 contiene un tercer armónico cercano al 40 % en tanto que el quinto y séptimo armónico se acercan al 8 % del flujo fundamental. Los armónicos de orden superior tienen magnitudes despreciables. La Figura 4.24(b) muestra el espectro armónico del flujo en los tiristores del CSCT conectado entre los nodos 3 y 4 del sistema eléctrico. De esta figura se aprecia que se tiene un tercer armónico con una magnitud cercana al 60 % en tanto que el quinto armónico alcanza una magnitud cercana al 20 %. Los armónicos séptimo y noveno muestran magnitudes próximas al 8 %. Los armónicos de orden superior observan magnitudes despreciables. En el caso de la Figura 4.24(c) que muestra el espectro armónico del voltaje en el nodo 4, puede observarse que el tercer armónico es de una magnitud del 8 %, en tanto que los armónicos quinto y séptimo presentan magnitudes cercanas al 2 y 1 % del voltaje fundamental, respectivamente. Los armónicos de orden superior son despreciables. Finalmente en la Figura 4.24(d) que muestra el espectro armónico del flujo en la rama que une los nodos 9 y 10 se aprecia un contenido a 60 %, 10 % y 5 % de tercer, quinto y séptimo armónico respectivamente.



Flujo 1 vs tiempo



Flujo Tiristores CSCT 1 vs tiempo

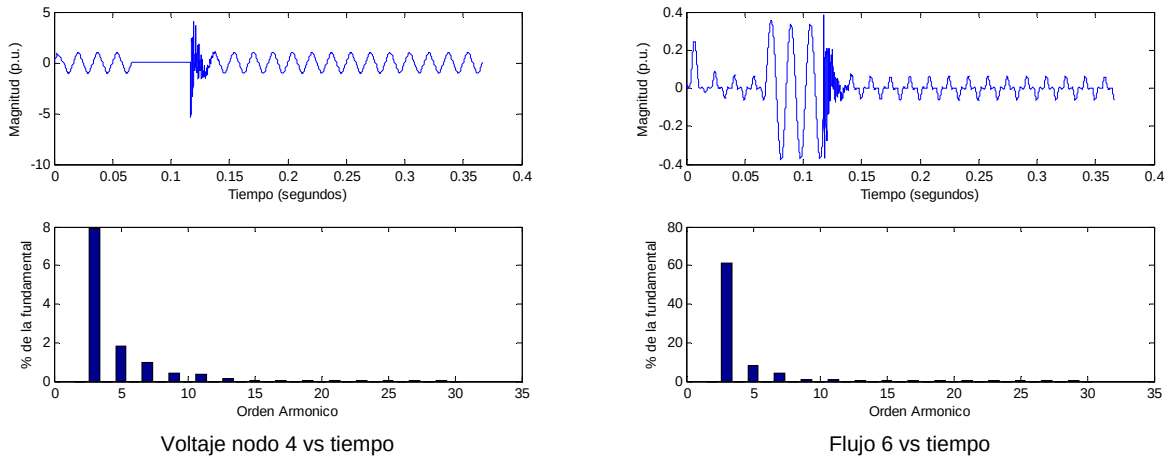


Figura 4.24 Formas de onda representativas. Caso de Estudio 4.13

4.4.4 Caso de Estudio 4.14: Máquina síncrona conectada a un bus infinito

Este caso de Estudio consiste en analizar el comportamiento en el tiempo de una máquina síncrona conectada a un bus infinito, sujeta a la condición de un corto circuito sólido a tierra de la fase *a*.

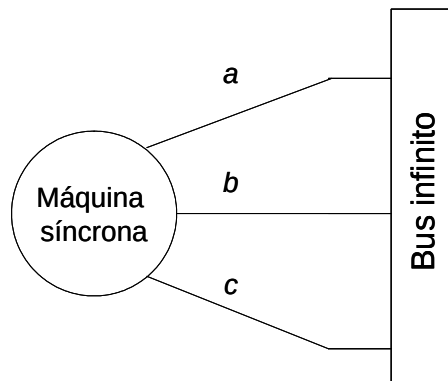


Figura 4.25 Máquina síncrona conectada a un bus infinito. Caso de Estudio 4.14

Una vez de que se llega al EEP ($t = 0$) ocurre una falla en la fase *a* de la máquina síncrona, la cual se sostiene durante 0.066 segundos, después de los cuales se libera. Una vez de que se libera la falla, se simula el comportamiento de la del sistema durante 0.1333 segundos, después de los cuales se aplica el método DN. En la Tabla 4.21 se muestra el proceso completo de convergencia al EEP con los métodos FB y DN. De los resultados mostrados en esta tabla puede apreciarse que el método de FB durante todo el proceso de simulación de la falla requiere de 11474 periodos completos de integración para alcanzar el EEP, en tanto que el método DN requiere únicamente de 83 periodos completos de integración lo que representa el 0.72 % del total del periodos de integración requeridos por el método FB. Puede apreciarse que durante las

aplicaciones de la técnica de aceleración DN se observa un proceso de convergencia cuadrática. También se observa que para alcanzar el primer EEP se requieren de 4 aplicaciones del método DN, en tanto que para alcanzar el segundo EEP se requieren de 3 aplicaciones del método DN.

Tabla 4.21 Proceso de convergencia de los métodos FB y DN. Caso de Estudio 4.14

NCC	FB	DN	
1	2.519309E-02	2.519309E-02	
2	1.658196E-02	1.658196E-02	
3	1.031189E-02	1.031189E-02	
⋮	⋮	⋮	
8	1.007072E-02	1.007072E-02	
17	9.650733E-03	1.794614E-02	
26	9.248264E-03	6.824086E-05	
35	8.862580E-03	5.994480E-09	
44	8.492979E-03	5.684342E-14	
⋮	⋮		
8345	9.966949E-11		Estado estable
8346	1.359658E-01	1.359658E-01	Falla
8347	9.629312E-02	9.629312E-02	Falla
8348	6.755754E-02	6.755754E-02	Falla
8349	4.676606E-02	4.676606E-02	Falla
8350	1.121255E-01	1.121255E-01	Liberación
8351	8.238289E-02	8.238289E-02	
⋮	⋮	⋮	
8357	1.127905E-02	1.127905E-02	
8366	1.869946E-03	4.379189E-04	DN
8375	1.512373E-03	2.609044E-07	DN
8384	1.083079E-03	1.705303E-13	DN
⋮	⋮		
11474	9.999962E-11		Estado estable

La Figura 4.26 muestra el comportamiento de la corriente y el flujo en la fase fallada. En esta figura se observan los periodos de pre-falla, falla y post-falla. La gráfica mostrada en la Figura 4.26 se obtuvo aplicando la técnica de aceleración DN.

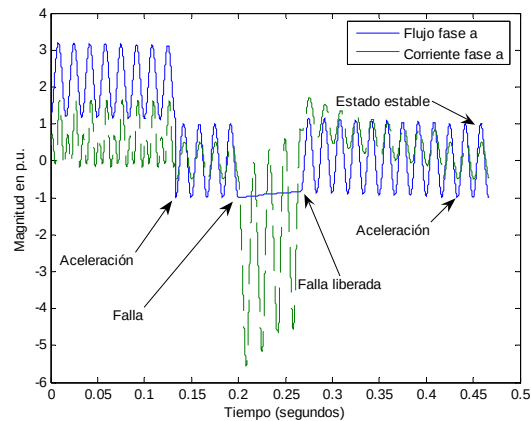


Figura 4.26 Flujo y corriente en la fase a. Caso de Estudio 4.14

La Figura 4.27 muestra el comportamiento de las corrientes en las tres fases de la máquina síncrona en los periodos de pre-falla, falla y post-falla. La gráfica mostrada en la Figura 4.27 se obtuvo aplicando la técnica de aceleración DN. Puede apreciarse de esta figura que durante la falla las corrientes se ponen en fase y una vez que se libera la falla vuelve a sus fases de pre-falla.

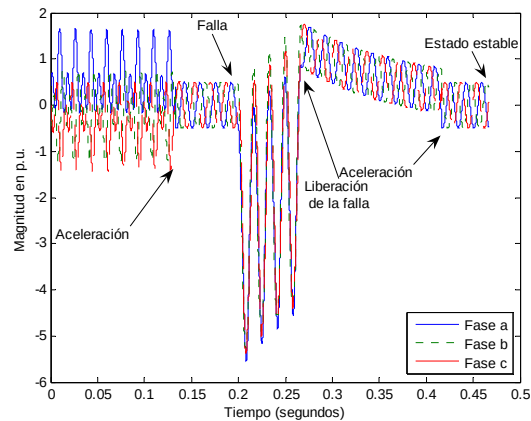


Figura 4.27 Corriente en las fases a, b y c. Caso de Estudio 4.14

Finalmente en la Figura 4.28 se muestra el comportamiento de las variables mecánicas de la máquina síncrona: la velocidad del rotor y el ángulo del rotor. En esta figura se observa el comportamiento de las corrientes en las tres fases de la máquina síncrona en los periodos de pre-falla, falla y post-falla. La gráfica mostrada en la Figura 4.28 se obtuvo aplicando la técnica de aceleración DN.

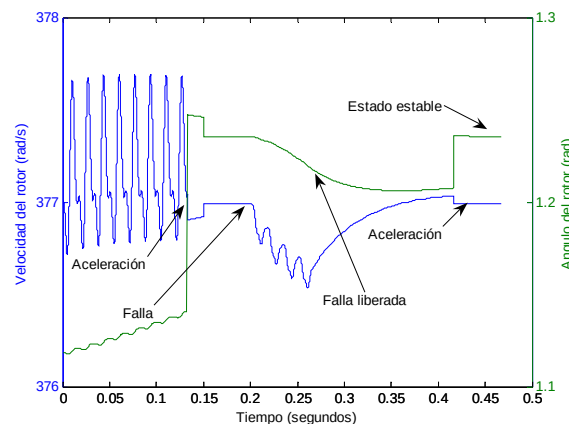


Figura 4.28 Velocidad y ángulo del rotor. Caso de Estudio 4.14

4.4.5 Caso de Estudio 4.15: Sistema de IEEE de 14 nodos trifásico modificado

La Figura 4.29 muestra el diagrama unifilar del sistema de prueba de IEEE trifásico, el cual ha sido modificado por medio de la adición de cuatro hornos de arco eléctrico en los nodos 11, 12, 13 y 14. La dinámica del sistema eléctrico es modelada por un conjunto de 156 EDO's. La falla

analizada en este caso de estudio consiste en un corto circuito sólido a tierra de la fase a en el nodo 13 del sistema. Esta falla ocurre justo en el momento en que se alcanza el EEP ($t = 0$) y se libera en un tiempo $t = 0.0666$ s. La adición de los cuatro hornos de arco eléctrico hace que el sistema presenta una convergencia muy lenta hacia el EEP, en particular por el modelo del mismo horno de arco eléctrico.

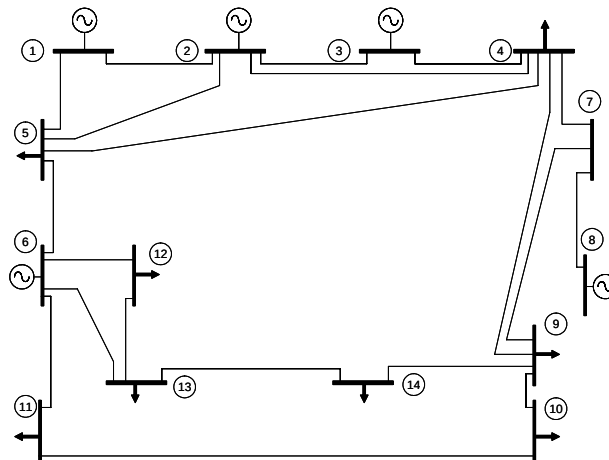


Figura 4.29 Caso de Estudio 4.15

En la Tabla 4.22 se muestra el proceso de convergencia antes de la falla y después de la falla considera. Puede apreciarse de los resultados mostrados que el método de FB requiere de 2059 periodos completos de integración para llegar al EEP, en tanto que el método DN requiere de solo 950 periodos completos de integración, los cuales representan el 46.13 % del total de periodos completos de integración requeridos por el método FB. Se observa que durante el momento de la falla los errores aumentan de manera drástica. Después de que la falla se ha liberado se determinan se simulan 8 ciclos para obtener el Ciclo Base con el objeto de poder aplicar la metodología DN. Esta se aplica en el Ciclo 2312. Son necesarias 4 aplicaciones de la técnica DN para llegar al EEP. Exclusivamente durante este segundo proceso de aceleración el método FB requiere de 2340 periodos completos de integración, en tanto que el método DN requiere solo de 636 periodos completos de integración, los cuales representan el 27.17 % del total de periodos completos de integración requeridos por el método FB. Durante el proceso global el método FB requiere de 4652 periodos completos de integración, en tanto que el método DN utiliza 2940 periodos completos de integración, los cuales representan el 63.19 % del total de periodos completos de integración requeridos por el método DN. La reducción en el total de periodos completos de integración requeridos está asociada con un menor esfuerzo computacional, así como una mayor rapidez para la determinación del estado estacionario de operación de la red. La eficiencia computacional en cuanto al tiempo de cómputo puede ser incrementada con el empleo de la modificación al método

DN, consistente en mantener constante el Jacobiano así como la aplicación de procesamiento en paralelo para el cálculo de las columnas de la matriz de identificación utilizada por el método DN.

Tabla 4.22 Proceso de convergencia de los métodos FB y DN. Caso de Estudio 4.15

NCC	FB	DN	
1	7.853696E+00	7.853696E+00	
2	6.326327E-01	6.326327E-01	
3	8.326330E-02	8.326330E-02	
⋮	⋮	⋮	
8	1.372352E-02	1.372352E-02	
165	7.530820E-06	3.455024E-03	
322	3.563014E-07	1.381458E-03	
479	1.113182E-07	4.146975E-04	
636	5.427337E-08	1.368247E-05	
793	2.706963E-08	1.520570E-10	
950	1.351371E-08	7.060000E-14	
⋮	⋮		
2059	9.989243E-11		
2060	7.407062E+00	7.407062E+00	Falla
2081	2.767030E-01	2.767030E-01	Falla
2102	8.186737E+01	8.186737E+01	Falla
2123	7.742321E+01	7.742321E+01	Falla
2144	4.131614E+00	4.131614E+00	Liberación
2165	2.487003E-02	2.487003E-02	
⋮	⋮	⋮	
2312	8.524480E-03	8.524480E-03	
2469	2.505259E-06	7.267845E-03	Aceleración
2626	1.248649E-06	9.803089E-04	Aceleración
2783	5.978984E-07	3.635797E-06	Aceleración
2940	2.861345E-07	9.552859E-11	Aceleración
⋮	⋮		
4652	9.96219E-11		

En la Figura 4.30 se observa el comportamiento del voltaje trifásico en el nodo 4, durante la pre-falla, falla y post-falla. Se observa que durante la falla el voltaje en la fase se hace cero. En el momento en que se libera la falla se experimenta un sobrevoltaje el cual de manera natural evoluciona hasta valores cercanos a 1.0 en *p.u.* En particular el voltaje obtiene rápidamente el EEP debido al amortiguamiento que le brinda el resto del sistema, sin embargo las variables de estado asociadas con el modelo de los transformadores de potencia hacen que el proceso de convergencia hacia el EEP sea lento, por lo que se observa la ventaja que tiene el uso de la técnica DN para obtener rápidamente el EEP.

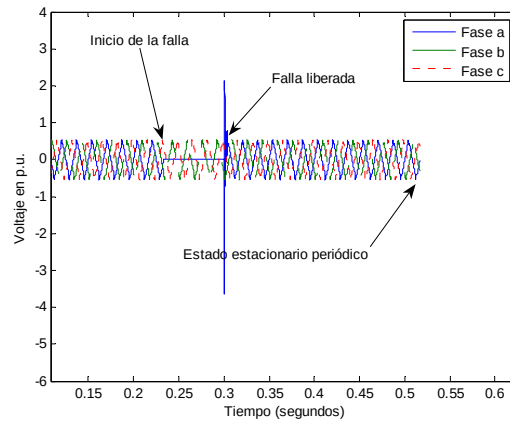


Figura 4.30 Voltaje trifásico en el nodo en el nodo 13. Caso de Estudio 4.15

La Figura 4.31 muestra el comportamiento de las corrientes de todos los generadores del sistema de prueba del IEEE de 14 nodos. Puede observarse que el generador conectado en el nodo 8 del sistema eléctrico es que el aporta la corriente de falla; en tanto que en los generadores restantes no se tiene un efecto significativo.

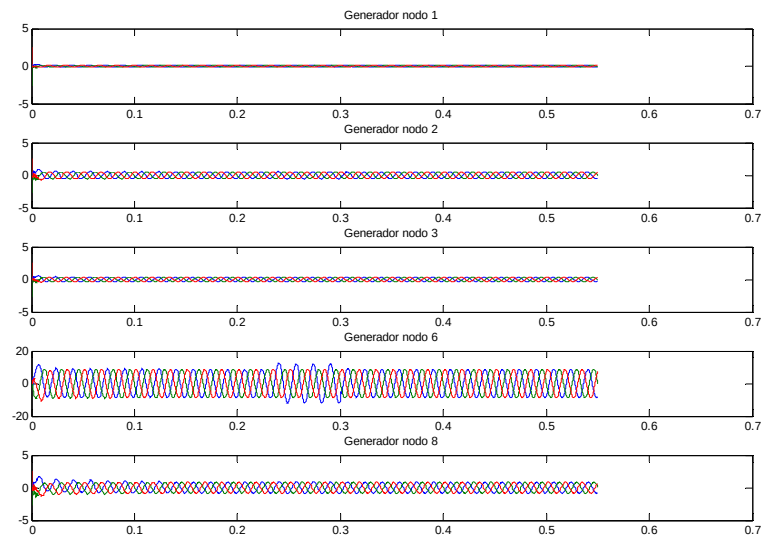


Figura 4.31 Corrientes en los generadores. Caso de Estudio 4.15

4.5 Validación de resultados

Con el objeto de validar los resultados obtenidos con el simulador desarrollado, se propone el circuito mostrado en la Figura 4.32, en el cual los resultados obtenidos serán comparados contra los obtenidos con ATP-DRAW. ATP-EMTP (*Alternative Transients Program – Electromagnetic Transients Program*) es una herramienta de software que permite llevar a cabo la simulación digital de fenómenos transitorios de naturaleza transitoria y electromecánica con fines de diseño,

especificaciones de equipos o definición de parámetros eléctricos fundamentales. Mediante este paquete es posible plantear y resolver la mayor parte de las situaciones que se pueden dar en las diferentes instalaciones eléctricas.

Es un circuito formado por tres nodos, un generador, tres líneas de transmisión, tres bancos de capacitores y dos cargas PQ conectadas en los nodos 2 y 3. La dinámica de este circuito es representada por un conjunto de 9 EDO's.

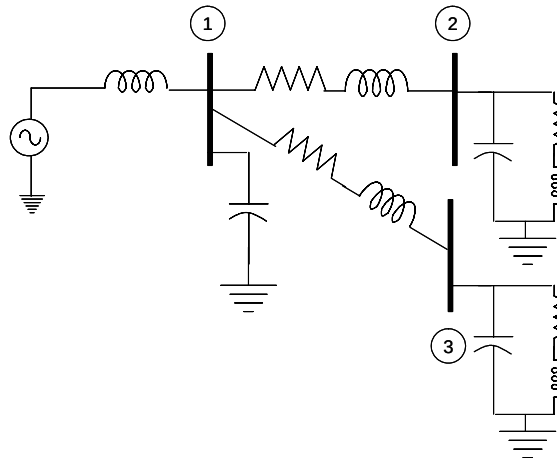


Figura 4.32 Caso de Estudio de validación

La Tabla 4.23 muestra el proceso de convergencia hacia el EEP de las variables de estado. Para este caso de estudio en particular no se utiliza la técnica de acercamiento rápido de las variables de estado al Ciclo Límite; esto se hace debido a que se van a comparar los resultados obtenidos con el simulador desarrollado contra los resultados generados por ATP-DRAW, el cual no utiliza una técnica de acercamiento rápido al EEP.

Tabla 4.23 Proceso de convergencia método FB. Caso de Estudio de validación

NCC	FB
1	4.560682E+03
2	9.999228E+02
3	1.268396E+02
4	1.473053E+01
⋮	⋮
17	7.959898E-09
18	8.885763E-10
19	1.109584E-10
20	1.932676E-11

La Tabla 4.24 muestra los parámetros de simulación utilizados en por ATP-DRAW. El parámetro ΔT especifica el paso de integración, T_{max} define el tiempo de simulación,

finalmente los parámetros $Xopt$ y $Copt$ definen que los valores de las capacitancias e inductancias se especifican en μF y mH respectivamente.

Tabla 4.24 Parámetros de Simulación en ATP

delta T:	1E-6
T_max	0.3333
Xopt :	0
Copt:	0

La Figura 4.33 muestra el circuito esquemático realizado en ATP-DRAW con el objeto de simular el comportamiento de la red mostrada en la Figura 4.32. En serie con la fuente V_s se adiciona un interruptor el cual se cierra en $t = 0$ y se abre en $t = 0.3333$ segundos. Este interruptor se adiciona con el objeto de simular condiciones iniciales de cero en las variables del circuito. Las cargas se representan por medio de ramas RLC.

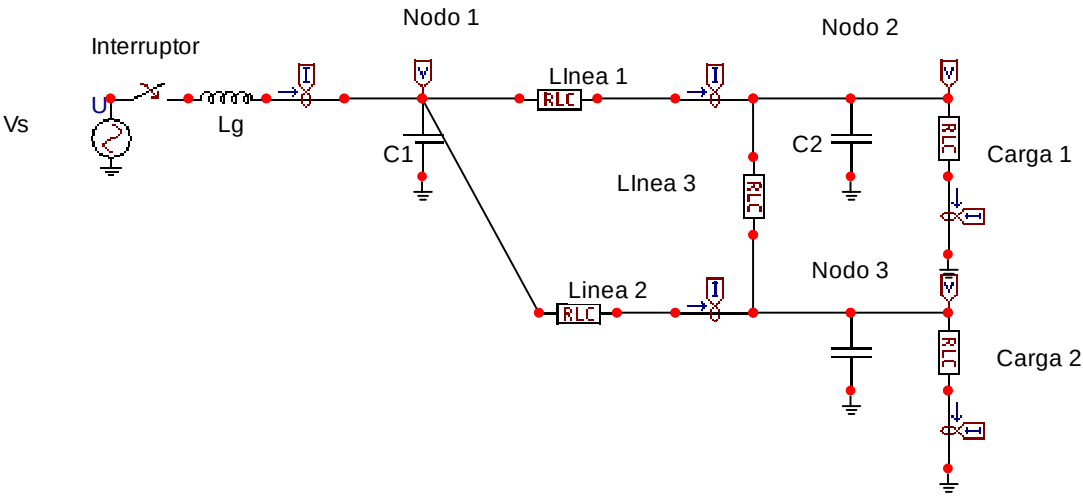


Figura 4.33 Diagrama esquemático en ATP-DRAW. Caso de Estudio de validación

En la Tabla 25 se muestran los parámetros utilizados por ambos simuladores para la realización de la simulación.

Tabla 4.25 Parámetros Caso de Estudio de Validación

$V_s = 10000\cos(\omega t)$	
Línea 1:	$R = 100 \Omega, L = 0.14 H$
Línea 2:	$R = 100 \Omega, L = 0.14 H$
Línea 3:	$R = 100 \Omega, L = 0.14 H$
Carga 1:	$R = 1000 \Omega, L = 0.1 H$
Carga 2:	$R = 1000 \Omega, L = 0.1 H$
Capacitor 1:	$C = 100 \mu F$
Capacitor 2:	$C = 100 \mu F$
Capacitor 3:	$C = 100 \mu F$
Lg:	$L = 0.14 H$

En la Tabla 4.26 se muestra el Archivo de simulación requerido por el simulador desarrollado en dónde se especifica la topología de la red, además de los parámetros de los diversos elementos que conforman el sistema eléctrico a ser analizado.

Tabla 4.26 Archivo de Simulación. Simulador desarrollado

3	10	0			
0.01666	1e-10	0	40	0	0
L_1	1	2	100	0.14	
L_2	1	3	100	0.14	
L_3	2	3	100	0.14	
C_1	1	0	100e-6		
C_2	2	0	100e-6		
C_3	3	0	100e-6		
G_1	1	0	10000	1.5707	0.14
RRLC_1	2	0	1000	0.1	0.0
RRLC_2	3	0	1000	0.1	0.0

En la Figura 4.34 se muestran 4 variables eléctricas. La Figura 4.34(a) muestra el comportamiento de la corriente que circula del nodo 1 al nodo 2 a través de la línea de transmisión. La Figura 4.34(b) muestra el comportamiento del voltaje en el nodo 2. La Figura 4.34(c) muestra la forma de onda de la corriente en la carga conectada en el nodo 2 y finalmente la Figura 4.34(d) muestra el comportamiento en el tiempo del voltaje en el nodo 2.

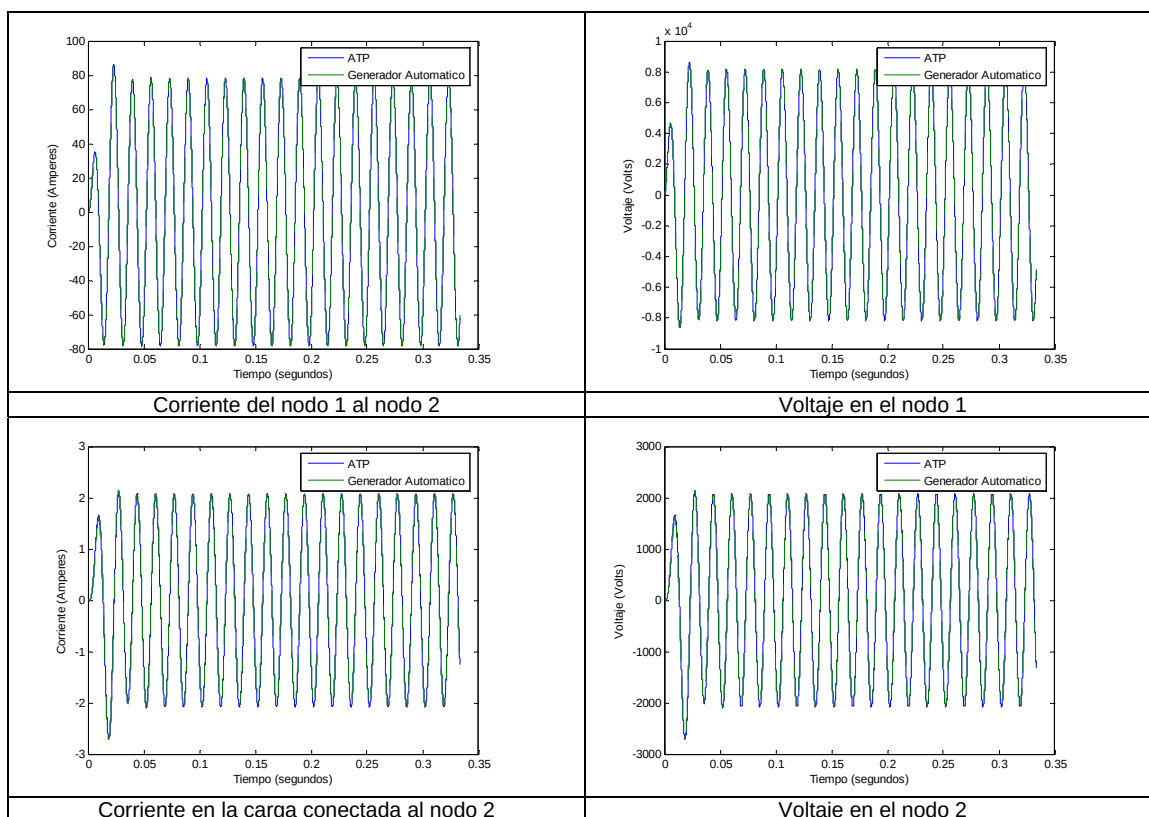


Figura 4.34 Formas de onda representativas. Caso de Estudio de validación

De la Figura 4.34 se aprecia que las formas de onda obtenidas con ATP-DRAW son completamente coincidentes con las formas de onda obtenidas con el simulador implementado en esta Tesis.

4.6 Conclusiones

El presenta Capítulo ha mostrado el uso de la plataforma de análisis desarrollada e implementada con el objeto de realizar un análisis eficiente del EEP de operación de redes eléctricas tanto monofásicas como trifásicas de diversos tamaños. Se mostró que los sistemas desarrollados son capaces de analizar el comportamiento de las redes eléctricas que incorporan diversos tipos de dispositivos no lineales y variantes en el tiempo.

Se ha mostrado nuevamente el potencial de las técnicas de procesamiento en paralelo aplicadas a la determinación del EEP de redes eléctricas con componentes lineales, no lineales y variantes en el tiempo. Se ha mostrado que conforme el sistema de ecuaciones es más grande se obtienen incrementos sustanciales en la eficiencia relativa con el uso de la máquina paralela virtual.

Se ha mostrado la factibilidad de desarrollo de software para el análisis eficiente de redes eléctricas de gran escala. Se ha presentado una aplicación práctica de la POO en el análisis de redes eléctricas de gran escala.

Se implementó la técnica Newton de acercamiento rápido de las variables de estado al Ciclo Límite de DN y se obtuvieron en todos y cada uno de los casos de estudio mostrados en este Capítulo procesos de convergencia al estado periódico estacionario cuadráticos, con lo cual se demostró que estas técnicas tienen esta característica de convergencia cuadrática. Adicionalmente se ha mostrado la aplicación de una modificación del método Newton de acercamiento rápido al EEP de DN por medio de mantener constante el Jacobiano; esta modificación logró reducir a un 4.74 % del total de ciclos requeridos por la Técnica FB en el proceso de alcanzar el EEP de operación de los sistemas eléctricos en los cuales fue aplicada esta modificación, en particular para sistemas eléctricos de potencia de gran escala.

El uso de POO permite que al sistema desarrollado puedan ser incorporados modelos de otros dispositivos de un sistema eléctrico de potencia. La adición al sistema desarrollado de técnicas de procesamiento en paralelo permitió demostrar la factibilidad del empleo redes heterogéneas de computadoras en el análisis de redes eléctricas de potencia.

Se demostró que las computadoras contenidas en los laboratorios de cómputo de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la UMSNH pueden unirse y formar una supercomputadora con 28 procesadores. En el desarrollo de esta Técnica se utilizó software de dominio público con el objeto de que la plataforma desarrollada sea de fácil distribución y utilización. Se implementó una máquina paralela virtual con 24 procesadores, lo cual permitió aumentar la eficiencia relativa a valores cercanos a 3 para el sistema de prueba de IEEE de 14 nodos, 5 para el sistema de prueba de IEEE de 30 nodos, 7 para el sistema de prueba de IEEE de 57 nodos y 10 para el sistema de prueba de IEEE de 118 nodos. Se puede afirmar en base los resultados obtenidos que conforme el tamaño de la red aumenta se incrementa de manera significativa la eficiencia relativa.

Se mostró que el sistema desarrollado tiene la posibilidad de generar un archivo de salida, el cual contiene el conjunto explícito de ecuaciones diferenciales ordinarias que modelan la red eléctrica a ser analizada.

Fueron probados sistemas tales como los sistemas de prueba de IEEE de 14, 30, 57 y 118 nodos, los cuales fueron modificados en base a la incorporación de diversos dispositivos no lineales y variantes en el tiempo.

Capítulo No. 5

Técnica de la Matriz de Diferencias Aplicada al Análisis de Redes Eléctricas

En el presente Capítulo se describe y aplica una técnica alternativa de acercamiento rápido para el cálculo del EEP de sistemas eléctricos de potencia con componentes no lineales [Campos *et al.* 2001], llamada Matriz de Diferencias (MD). Esta técnica está basada en un proceso de linealización del conjunto de EDO's que describen la dinámica del sistema a ser analizado. La linealización del conjunto de EDO's que describen la dinámica del sistema se convierte forma un sistema de ecuaciones algebraicas no lineales, el cual se soluciona por medio del método iterativo de Newton-Raphson [Hornbeck 1975]. La solución obtenida representa el EEP de operación del sistema analizado. En la implementación computacional de la técnica MD se aplican técnicas de manejo de matrices dispersas, con el objeto de aprovechar las características asociadas con esta metodología, en particular el manejo de matrices de grandes dimensiones y con coeficientes de dispersidad muy bajos. En [Medina y Ramos-Paz 2005a], [Medina y Ramos-Paz 2005b] se muestra la aplicación de esta técnica en el análisis de redes eléctricas no lineales y se compara en términos de eficiencia computacional con respecto a las técnicas Newton reportadas en [Semlyen y Medina 1995] y el método convencional FB.

5.1 Introducción

La búsqueda de nueva técnicas que permitan encontrar rápidamente el estado periódico estacionario de operación de redes eléctricas con componentes no lineales ha llevado al desarrollo de innumerables técnicas [Kunder *et al.* 1990] [Chua y Ushida 1981]. En [Chua y Ushida 1981] estas técnicas han sido clasificadas en métodos de fuerza bruta, métodos de perturbación, métodos de balance armónico y métodos de disparo. El uso de nuevas técnicas de análisis permite a los investigadores encontrar ventajas y desventajas de las mismas, con el objeto de poderlas aplicar de manera más eficiente en el análisis de sistemas eléctricos de potencia. Las nuevas técnicas de análisis brindan diversos retos. Por un lado, muchas de estas técnicas han sido demostradas matemáticamente, sin embargo no han sido aplicadas en el análisis de algún tipo de sistema físico. Por otro lado, la implementación de estas técnicas puede requerir el uso de una gran cantidad de herramientas computacionales tales como: manejo de métodos numéricos eficientes, manejo de matrices dispersas, uso de cómputo paralelo, etc. En [Campos *et al.* 2001] se propone una técnica llamada técnica de la *Matriz de Diferencias*, la cual discretiza un conjunto de EDO's convirtiéndolo en un conjunto de ecuaciones algebraicas no lineales. Este conjunto de ecuaciones algebraicas no lineales se soluciona por medio de algún método numérico de solución. Una vez obtenida la solución de este conjunto de ecuaciones algebraicas no lineales se encuentra la solución en estado periódico estacionario del conjunto de EDO's. El objetivo de este capítulo es

aplicar la técnica de la MD en la obtención del EEP de redes eléctricas con componentes no lineales y variantes en el tiempo. Una vez que haya sido implementada esta técnica será comparada contra las técnicas Newton de DN y AD en términos de tiempo de cómputo.

5.2 Técnica de la Matriz de Diferencias (MD)

La representación de un sistema físico, en particular de un sistema eléctrico de potencia con componentes, lineales, no lineales y variantes en el tiempo, puede obtenerse a través de un conjunto de ODE's de la forma,

$$\dot{x} = f(x, t) \quad (5.1)$$

El sistema de EDO's dado por la Ecuación (5.1) puede ser llevado a una representación N -dimensional [Campos *et al.* 2001] a través de la ecuación,

$$D_{jk}x_k = f(x_k, t_k) \quad (5.2)$$

donde N es un valor impar y D_{kj} se calcula como:

$$D_{kj} = \begin{cases} 0 & j = k \\ 2\text{sen}\left(\frac{\pi}{N}(j-k)\right) & j \neq k \end{cases} \quad (5.3)$$

Una vez que se tiene la representación N -dimensional del sistema dado por (5.1), éste puede ser discretizado, generando un conjunto de ecuaciones algebraicas que tiene la forma,

$$\sum_{l=1}^N D_{jl}x_k(t_l) = f_k(x_1(t_j), x_2(t_j), \dots, x_m(t_j)) \quad (5.4)$$

donde

$k=1, 2, 3, \dots, m$ y está asociado con el número de variables de estado que describen la dinámica del sistema a ser analizado.

$j=1, 2, 3, \dots, N$ y está relacionado con el número de puntos utilizados en el proceso de discretización.

En [Campos *et al.* 2001] se presenta una propuesta para el cálculo del vector t_j dada por,

$$t_j = -\pi + \frac{2\pi j}{N} \quad (5.5)$$

donde

$$j = 1, 2, 3, \dots, N$$

La Ecuación (5.4) puede ser representada en forma compacta como:

$$\mathbf{D}\mathbf{x} = \mathbf{f} \quad (5.6)$$

La solución de (5.6) puede ser obtenida con la aplicación del algoritmo Newton-Raphson, dado por la Ecuación (5.7), usando el vector de condiciones iniciales $\mathbf{x}_0$. Este vector de condiciones iniciales puede ser un vector de ceros o puede obtenerse una buena aproximación mediante el uso de un método de integración del conjunto de EDO's dado por (5.1).

$$\mathbf{x}_{i+1} = \mathbf{x}_i - \frac{f(\mathbf{x}_i)}{f'(\mathbf{x}_i)} \quad (5.7)$$

El vector de condiciones iniciales requerido por el método de Runge-Kutta es,

$$\mathbf{x}_k = [0 \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad 0]^T \quad (5.8)$$

en tanto que el vector de tiempo es

$$t_k = [T/N \quad 2T/N \quad 3T/N \quad \dots \quad kT/N]' \quad (5.9)$$

La Figura 5.1 muestra un diagrama de flujo en dónde se sintetiza el proceso de solución en EEP de sistemas eléctricos de potencia por medio del método MD. Del diagrama mostrado en esta figura se observa como primer paso se debe de obtener la representación en espacio de estado del sistema eléctrico de potencia a ser analizado. Una vez que se tiene esta representación se procede a simular el comportamiento en el tiempo de la red eléctrica con el objeto de obtener las condiciones iniciales requeridas por el método de MD. Esta simulación se realiza mediante la

aplicación de algún método de integración del conjunto de EDO's que describen la dinámica del sistema. En particular se utilizó el método de Runge-Kutta de cuarto orden. A continuación se procede a realizar la representación *N-dimensional* del conjunto de EDO's que modelan la dinámica del sistema eléctrico obteniéndose una expresión de la forma dada por (5.4) y en forma compacta por (5.6). Finalmente se resuelve (5.6) por medio del uso del algoritmo de Newton-Raphson. Dado que este algoritmo es un método numérico se debe de establecer un criterio de convergencia así como un número máximo de aplicaciones de este método en el caso de que la solución no converja. En cada iteración de este método se calcula el error máximo obtenido; cuando éste es menor que el criterio de convergencia el proceso finaliza. Por medio de una variable contadora se contabiliza el número de iteraciones del método de Newton-Raphson; cuando este número es mayor que el número máximo de iteraciones permisibles el proceso finaliza.

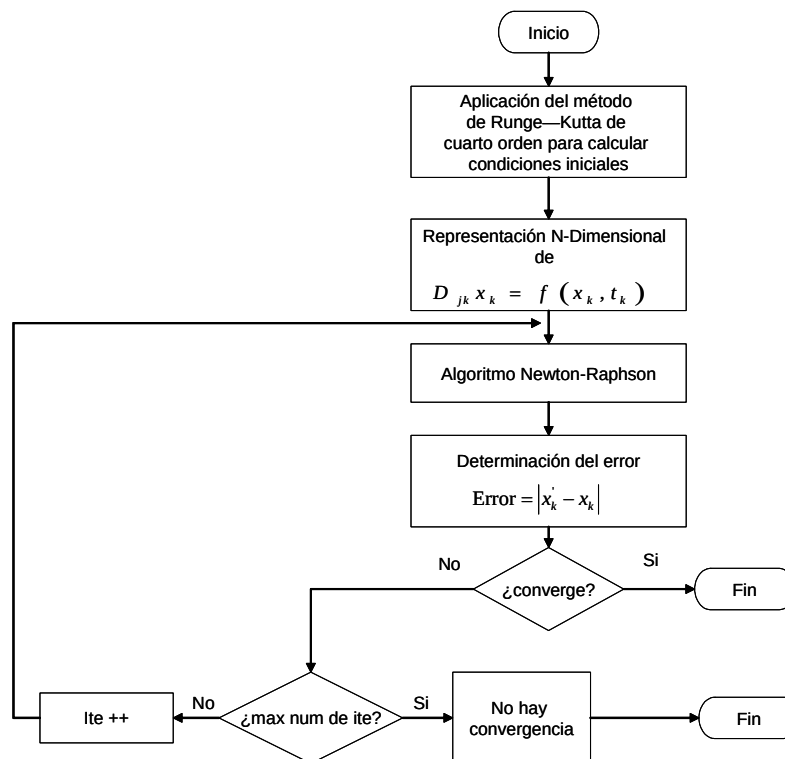


Figura 5.1 Técnica de la Matriz de Diferencias

5.3 Aplicación de Técnicas de Dispersidad en el método MD

Una vez que el sistema de EDO's ha sido transformado en un sistema de ecuaciones algebraicas no lineales en base a su representación *N-dimensional*, se procede a la aplicación del método Newton-Raphson. En base a la ecuación recursiva del método Newton-Raphson puede ser

apreciado que se requiere el cálculo de la inversa de $f'(\mathbf{x}_i)$. Este cálculo puede realizarse por cualquier método convencional, sin embargo, la representación N -dimensional provoca que la matriz $f'(\mathbf{x}_i)$ sea de orden $(N \times VE)$ $(N \times VE)$, además de ser altamente dispersa. La Figura 5.2 muestra la estructura de la matriz $f'(\mathbf{x}_i)$ para un sistema de VE variables de estado. En esta matriz cada bloque mostrado es de orden $N \times N$, es decir, si se tiene un sistema de 7 variables de estado y se discretiza con un tamaño $N = 63$, se tiene que el orden de la matriz $f'(\mathbf{x}_i)$ es de 441×441 , lo cual implica que se tienen 194481 elementos, de los cuales la mayor parte son ceros. Cada bloque que se encuentra sobre la diagonal es una submatriz llena, en tanto que los bloques fuera de la diagonal son submatrices diagonales, las cuales son matrices cero en el caso de que la ecuación diferencial i no tenga relación con la variable de estado j , en caso contrario es una matriz diagonal. Es evidente la necesidad del uso de técnicas de matrices dispersas, en primer lugar con el objeto de hacer un almacenamiento eficiente de los elementos de la matriz y en segundo lugar aprovechar los ceros contenidos en esta matriz de tal forma que no se realicen operaciones con ellos. El proceso de inversión matricial se hace por medio de la descomposición LU de la matriz $f'(\mathbf{x}_i)$ y después en un proceso de sustitución hacia atrás y hacia adelante. Debido a que el método de Newton-Raphson es un proceso iterativo, significa que la descomposición LU así como el proceso de sustitución hacia atrás y hacia adelante debe hacerse en cada iteración. Sin embargo, el proceso de ordenamiento se realiza exclusivamente en la primera iteración, dado que la topología de la red no se modifica durante el proceso de solución.

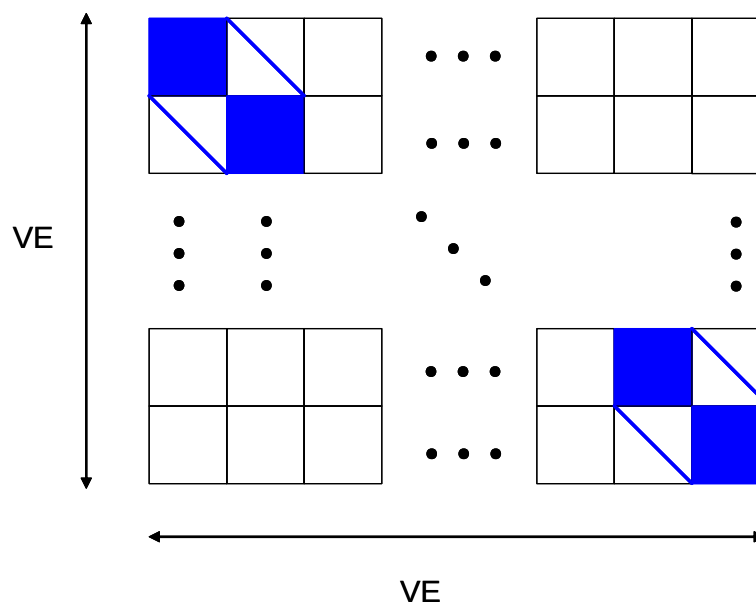


Figura 5.2 Estructura de la Matriz $f'(\mathbf{x}_i)$

Cabe hacer mención que los elementos de la matriz $f'(\mathbf{x}_i)$ se determinan mediante el cálculo explícito del Jacobiano asociado con la representación en espacio del estado del sistema eléctrico a ser analizado.

5.4 Casos de Estudio

La técnica presentada en [Campos *et al.* 2001] es aplicada a continuación en el análisis de redes eléctricas, no lineales. La técnica MD es comparada contra otras dos técnicas Newton, la DN y la Aproximación Directa (AD) [Semlyen y Medina 1995], además de la técnica FB.

En todos los casos de estudio presentados en este Capítulo se ha utilizado un criterio de convergencia de 10^{-10} p.u. El método de integración utilizado es el método de Runge-Kutta de cuarto orden. En este trabajo de Tesis se utilizó un valor de $N = 255$ para el proceso de discretización del conjunto de EDO's que modelan la red eléctrica.

La programación de los métodos mostrados en este Capítulo fue realizada en lenguaje C++ y las simulaciones fueron realizadas en una computadora Pentium IV, con procesador Intel Xeon con una velocidad de 3.06 GHz. El sistema operativo utilizado fue con la distribución de Linux Ubuntu [UBUNTU]. La representación gráfica tanto de las variables de estado como de sus respectivos espectros armónicos fue realizada por medio de GNUPLOT [GNUPLOT].

En la programación del método MD se utilizaron técnicas de dispersidad [Tinney y Walker 1967]. Se utilizó el segundo esquema de Tinney con el objeto de preservar la dispersidad en la matriz $f'(\mathbf{x}_i)$.

5.4.1 Caso de Estudio 5.1. Generador alimentando a horno de arco eléctrico

El circuito mostrado en la Figura 5.3 está formado por un horno de arco eléctrico conectado a una fuente de voltaje a través de una línea de transmisión, la cual está modelada por medio de una rama $r-l$. El horno de arco eléctrico se encuentra conectado en paralelo con un banco de capacitores. El circuito es modelado por medio de un conjunto de cinco EDO's. Los modelos de los dispositivos que conforman este circuito son los descritos en el Capítulos 3 de esta Tesis.

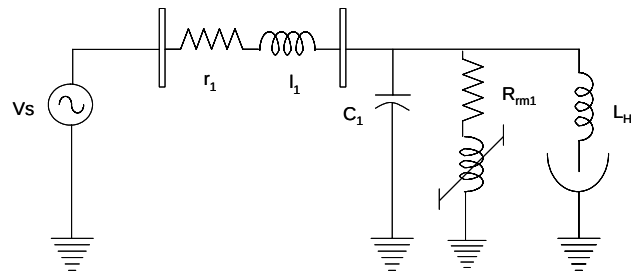


Figura 5.3 Caso de Estudio 5.1

La Tabla 5.1 muestra el número de periodos completos de integración requeridos por los métodos FB, DN y AD para llegar al estado periódico estacionario. De los resultados mostrados en la Tabla 5.1 puede ser apreciado que todas las técnicas de aceleración inician a partir del periodo 8. Obsérvese que las metodologías DN y AD requieren 4 aplicaciones para alcanzar el EEP. En el caso de la técnica MD, los errores máximos que se muestran en la columna correspondiente están asociados con el error máximo obtenido en cada una de las iteraciones del método de Newton-Raphson utilizado para la solución del sistema de ecuaciones algebraicas generado con la aplicación de la metodología.

Tabla 5.1 Proceso de convergencia de los métodos FB, DN y AD. Caso de Estudio 5.1

NCC	FB	DN	AD
1	1.491965E+00	1.491965E+00	1.491965E+00
2	1.031382E+00	1.031382E+00	1.031382E+00
3	7.380833E-01	7.380833E-01	7.380833E-01
⋮	⋮	⋮	⋮
8	1.395272E-01	1.395272E-01	1.395272E-01
14	1.950276E-02	4.682025E-03	4.682034E-03
20	2.634080E-03	2.748521E-07	2.753451E-07
26	1.344469E-03	1.213786E-13	2.778000E-14
⋮	⋮		
251	9.971490E-11		

Tabla 5.2 Proceso de convergencia del método de MD. Caso de Estudio 5.1

Iteración	Error
1	4.461329E-01
2	9.086468E-02
3	1.145610E-02
4	3.398060E-04
5	2.820845E-07
6	2.000000E-13

De los resultados mostrados en la Tabla 5.1 puede apreciarse que tanto el método DN como el método AD requieren de 26 periodos completos de integración para llegar al estado periódico estacionario, los cuales representan el 10.35 % del número total de ciclos requeridos por la técnica FB. La Tabla 5.1 muestra la característica de convergencia asociada con los métodos Newton. En la Tabla 5.2 se aprecia que el método MD requiere 6 iteraciones para alcanzar el EEP. De esta tabla puede observarse que los métodos DN y AD presentan un proceso de convergencia cuadrática de las variables de estado al Ciclo Límite, en tanto que el método MD presenta un proceso super-lineal en las primeras tres aplicaciones en tanto que en las últimas tres aplicaciones presenta un proceso cuadrático de convergencia.

La Figura 5.4 muestra algunas variables de estado asociadas con el caso de estudio. La Figura 5.4 (a) muestra la forma de onda de la corriente que circula entre los nodos 1 y 2 así como su respectivo espectro armónico. El tercer armónico tiene una magnitud de 2.5 % de la corriente fundamental, el quinto armónico de aproximadamente 0.7 %; los armónicos de orden superior son despreciables. La Figura 5.4 (b) muestra la forma de onda del flujo en la rama magnetizante así como su respectivo espectro armónico, en dónde el tercer armónico tiene una magnitud cercana al 2 %, el quinto armónico de 0.5 %; las magnitudes de los armónicos de orden superior son despreciables. En la Figura 5.4 (c) se muestra la forma de onda distorsionada de voltaje en el nodo 2 del sistema eléctrico. El tercer armónico tiene una magnitud cercana al 6 % del voltaje fundamental y los armónicos trece y quince de 3.0 y 3.5 % respectivamente. Finalmente, en la Figura 5.4 (d) se muestra la forma de onda de la corriente en el horno de arco, cuyo contenido de tercer armónico es cercano al 2 % y de quinto armónico con magnitud ligeramente cercana al 0.5 %; los armónicos de orden superior tienen magnitudes despreciables.

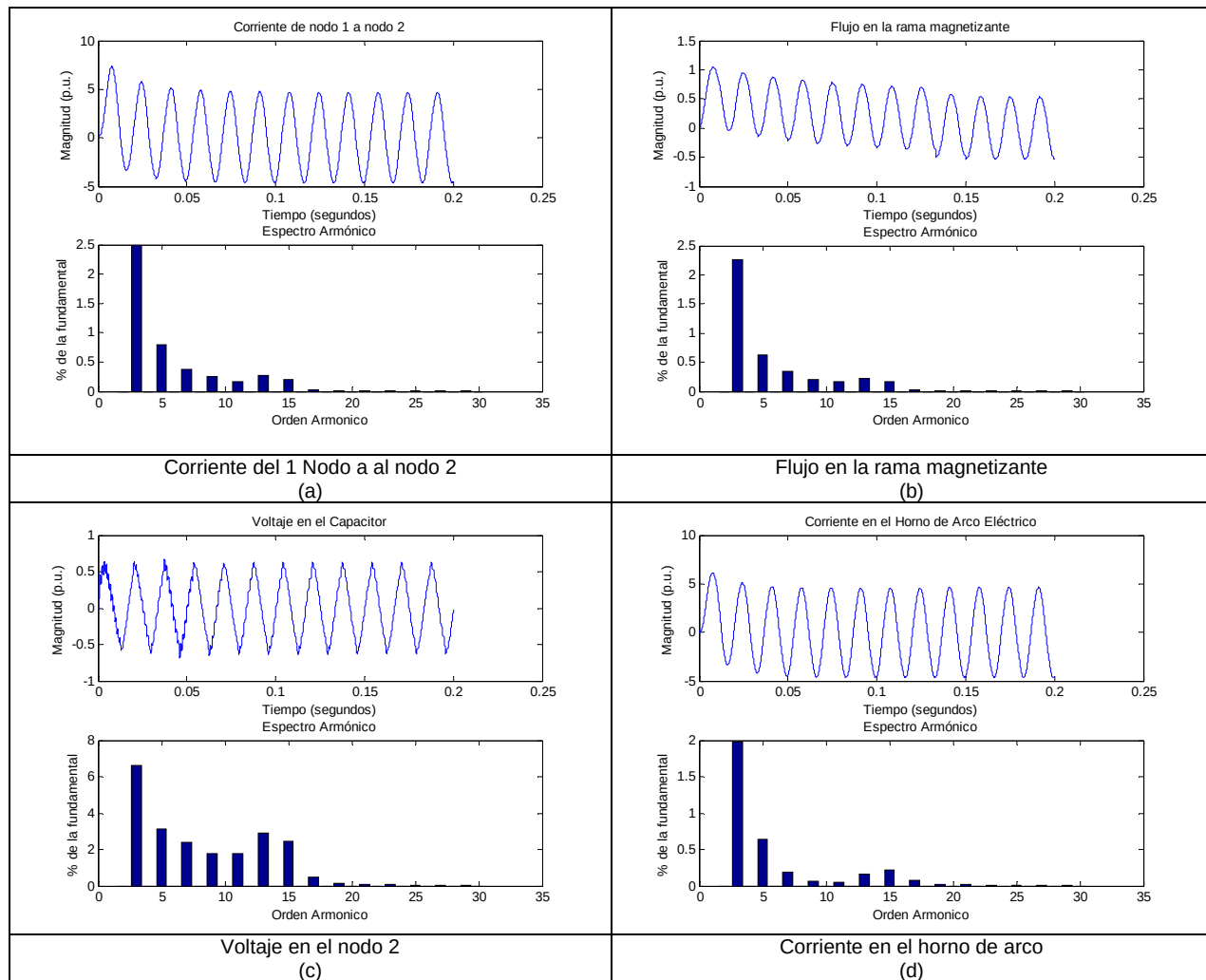


Figura 5.4 Variables de estado representativas. Caso de Estudio 5.1

La Figura 5.5 muestra la estructura de la matriz $f'(\mathbf{x}_i)$ asociada con el Caso de Estudio 5.1, en dónde se utiliza un valor de $N = 255$. De esta figura se observa que el orden de esta matriz es de (255×5) (255×5) , lo cual significa que contiene 1625625 elementos de los cuales solamente 81528 son diferentes de cero, lo cual implica un coeficiente de dispersidad de 0.0502. Es por esta razón por lo que se justifica el uso de técnicas eficientes de dispersidad. En primer lugar para almacenar exclusivamente los elementos diferentes de cero y por otro lado, preservar la dispersidad de la matriz en el proceso de solución, con el objeto de generar el menor número de elementos diferentes de cero.

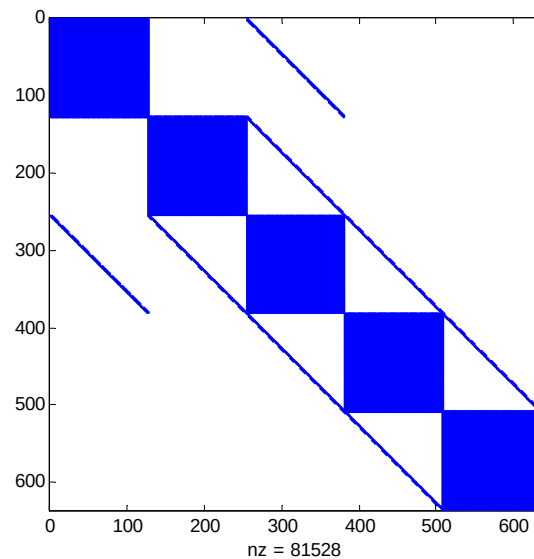


Figura 5.5 Estructura de la matriz $f'(\mathbf{x}_i)$. Caso de Estudio 5.1

5.4.2 Caso de Estudio 5.2. Sistema monofásico de tres nodos

El sistema eléctrico mostrado en la Figura 5.6 está formado por tres líneas de transmisión, dos ramas magnetizantes, un generador, tres bancos de capacitores y un horno de arco eléctrico conectado en el nodo 2 del sistema. La dinámica del sistema es representada por medio de un conjunto de once EDO's en las cuales se seleccionaron como variables de estado las corrientes a través de las ramas, los voltajes en los capacitores y el radio del horno de arco eléctrico. Los modelos de los diversos dispositivos que forman parte de este sistema eléctrico de potencia son los modelos descritos en el Capítulo No. 3 de esta Tesis. La construcción del conjunto de EDO's que modelan la dinámica de esta red se generó mediante el simulador desarrollado en el Capítulo No. 3 de esta Tesis.

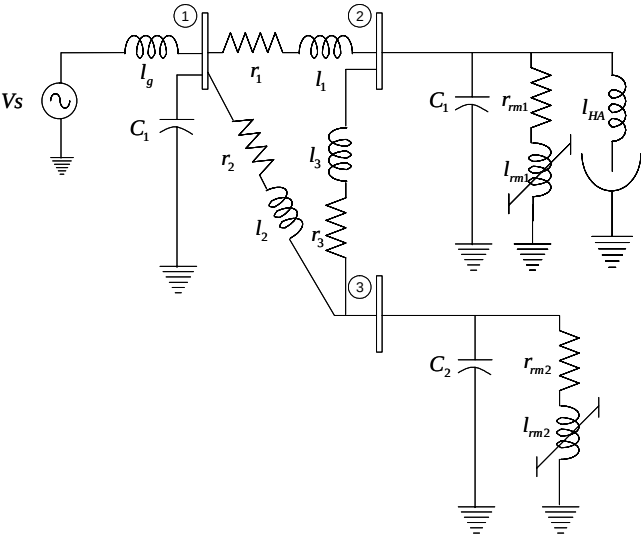


Figura 5.6 Caso de Estudio 5.2

La Tabla 5.2 muestra el número de periodos de integración requeridos por los métodos FB, DN y AD, respectivamente, para llegar al estado periódico estacionario. De los resultados mostrados en la Tabla 5.2 puede observarse que los métodos DN y AD requieren 4 aplicaciones (iteraciones). En el caso del método de MD, la Tabla 5.4 muestra que éste requiere 5 iteraciones para alcanzar el EEP. Obsérvese que los 3 métodos Newton de convergencia de las variables de estado al Ciclo Límite convergen cuadráticamente a la solución. En el caso de los métodos DN y AD se requieren 50 periodos completos de integración para llegar al estado periódico estacionario, los cuales representan el 44.64 % del número total de periodos de integración requeridos por el método FB.

Tabla 5.3 Proceso de convergencia de los métodos FB, DN y AD. Caso de Estudio 5.2					Tabla 5.4 Proceso de convergencia del método de MD. Caso de Estudio 5.2	
NCC	FB	DN	AD			
1	8.6655E+00	8.6655E+00	8.6655E+00			
2	9.8720E-01	9.8720E-01	9.8720E-01			
3	3.3283E-01	3.3283E-01	3.3283E-01			
⋮	⋮	⋮	⋮			
8	1.9843E-02	1.9843E-02	1.9843E-02			
20	2.8624E-03	4.6431E-03	4.6430E-03			
30	4.5231E-04	7.0651E-05	7.0648E-05			
40	7.1745E-05	1.3098E-10	1.2453E-10			
50	1.1384E-05	3.5388E-15	3.1560E-15			
60	1.8065E-06					
⋮	⋮					
112	8.7051E-11					

Iteración	Error
1	4.2029E-01
2	6.1948E-02
3	6.3007E-04
4	6.5624E-07
5	1.2000E-13

La técnica FB requirió 1.05 segundos para alcanzar el estado periódico estacionario en tanto que las metodologías DN y AD requirieron 0.19 y 0.20 segundos respectivamente, los cuales representan el 18 y 19 % respectivamente del tiempo consumido por el método FB. En el caso del método MD se requirió de 1421 segundos sin el uso de técnicas de dispersidad y de 398 segundos incorporando técnicas de dispersidad durante el proceso de solución. Estos valores representan 1353 y 379 veces, respectivamente, el tiempo requerido por la metodología FB. La ventaja de la aplicación de técnicas de dispersidad es claramente evidente puesto que se reduce a un 28 % del tiempo requerido por la misma metodología sin el uso de las técnicas de dispersidad. Sin embargo, de estos resultados puede apreciarse que las metodologías DN y AD requieren de una cantidad considerablemente menor de recursos computacionales, tales como memoria y tiempo de cómputo, que la técnica MD [Medina y Ramos-Paz 2005a] [Medina y Ramos-Paz 2005b]. Cabe hacer mención que la aplicación de técnicas de manejo de matrices dispersas, solamente se realiza durante el proceso de ordenamiento en la primera iteración. En las iteraciones subsecuentes no se realiza, en virtud de que no existe cambio en la topología de la red durante el proceso de solución.

La Figura 5.7 muestra las formas de onda y sus respectivos espectros armónicos de algunas variables de estado. Las formas de onda que se muestran fueron obtenidas con la técnica de MD. Las formas de onda obtenidas por medio de la aplicación de los métodos DN y AD son idénticas en el estado periódico estacionario.

Las Figuras 5.7(a) y 5.7(b) muestran la corriente que fluye del nodo 1 al nodo 2, así como su respectivo espectro armónico. Puede observarse que el tercer armónico tiene una magnitud de 3.0 % de magnitud con respecto a la fundamental. Existen armónicos de orden superior pero con magnitudes menores al 0.6 % de la fundamental. Las Figura 5.7(c) y 5.7(d) ilustran la forma de onda del flujo en el horno de arco eléctrico respectivamente. Puede apreciarse que el tercer armónico alcanza el 1.8 % en tanto que el quinto armónico el 0.8 %. Finalmente la Figura 5.7(e) ilustra el comportamiento del radio del horno de arco eléctrico. Las Figuras 5.7(a), 5.7(c) y 5.7(d) indican el momento cuando la Técnica Newton es aplicada y se alcanza el estado periódico estacionario. Las componentes armónicas fueron obtenidas por medio de la aplicación del algoritmo de la Transformada Discreta Rápida de Fourier [Arrillaga *et al.* 1997].

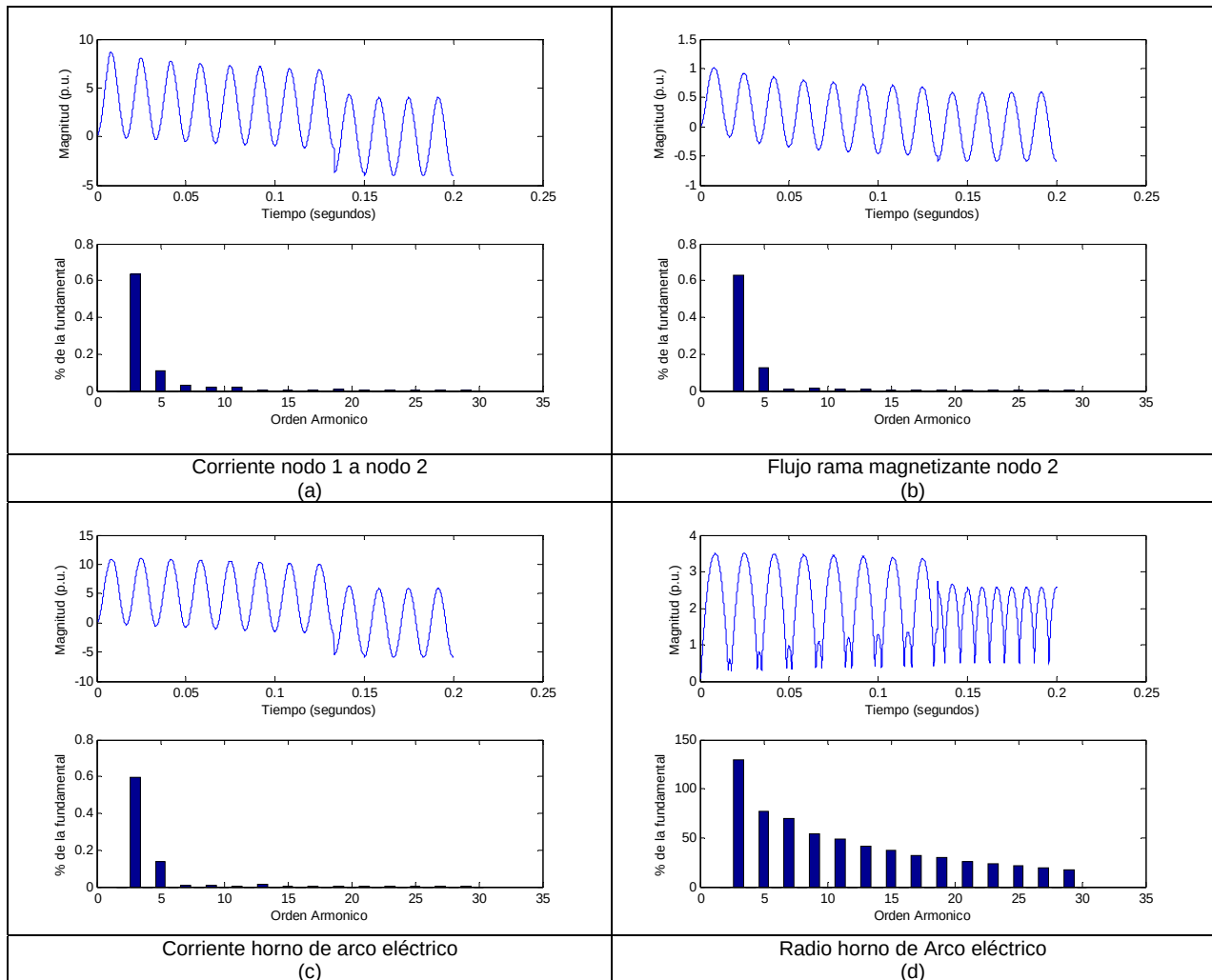


Figura 5.7 Variables de estado vs. tiempo y su espectro armónico. Caso de Estudio 5.2

Para este caso de estudio los métodos DN y AD resultaron ser 5.52 y 5.25 veces más rápidos que el método FB, en tanto que el método MD resultó ser 7100 veces más lento que el método FB. Utilizando técnicas de manejo de matrices dispersas, el método MD llegó a ser 2094, 1990 y 379 veces más lento que los métodos FB, DN y AD respectivamente. Puede apreciarse de estos resultados la ventaja en la eficiencia computacional obtenida con la aplicación de técnicas de manejo de matrices dispersas, sin embargo aun con la aplicación de estas técnicas, el método DN no resulta competitivo con respecto a los métodos DN y AD e incluso al mismo método FB. Una desventaja adicional a este método, es que conforme el número de variables de estado aumenta, el tamaño de la matriz D se hace proporcionalmente más grande, lo cual está asociado con un esfuerzo computacional mayor. Una desventaja adicional del método MD está asociada con el uso del Jacobiano asociado con el planteamiento de la Ecuación (5.7).

5.4.3 Caso de Estudio 5.3. Máquina síncrona conectada a un bus infinito

En este caso de estudio se analiza el comportamiento de la máquina síncrona conectada a un bus infinito. El modelo de la máquina síncrona utilizado es el presentado en el Capítulo 3 de esta Tesis.

La Tabla 5.5 muestra el número de periodos de integración requeridos por los métodos de FB y DN para llegar al EEP. De los resultados mostrados en la Tabla 5.5 puede verse que la metodología de aceleración de DN requiere de dos aplicaciones, 22 periodos completos de integración para llegar al EEP, los cuales representan el 0.28 % del número total de periodos requeridos por la técnica FB. De la Tabla 5.6 se aprecia que la técnica MD requiere de tres iteraciones del algoritmo Newton-Raphson. Se aprecia que en este caso de estudio tanto el método DN como el método MD presentan un proceso de convergencia cuadrática hacia la solución en EEP de las variables de estado que modelan la dinámica de la red eléctrica analizada.

Tabla 5.5 Proceso de convergencia de los métodos FB y DN. Caso de Estudio 5.3			Tabla 5.6 Proceso de convergencia del método de MD. Caso de Estudio 5.3	
NCC	FB	DN	Iteración	Error
1	1.036080E-02	1.036080E-02	1	2.182476E+00
2	1.031188E-02	1.031188E-02	2	7.873200E-10
⋮	⋮	⋮	3	3.000000E-14
8	1.002317E-02	1.002317E-02		
15	5.197820E-03	1.130417E-09		
22	5.028415E-03	1.498801E-15		
⋮	⋮			
7703	9.980827E-11			

Las Figuras 5.8, 5.9 y 5.10 muestran el comportamiento de algunas variables de estado asociadas con el sistema analizado tales como los flujos en las líneas y las corrientes en las líneas. La Figura 5.8 muestra el comportamiento de los flujos en las fases *a*, *b* y *c*. Puede ser apreciado que en el momento de la aplicación de la técnica DM el máximo error de flujo es de 1.0 *p.u.* La Figura 5.9 muestra el comportamiento de los flujos en las fases *a*, *b* y *c* mediante la aplicación de la técnica FB. Puede ser apreciado que se requiere de un tiempo de simulación de 128.38 segundos para llegar al EEP. La Figura 5.10 muestra el comportamiento del flujo y la corriente en la fase *a*. Puede ser apreciado que en el estado transitorio la corriente tiene una doble frecuencia, hasta que en el estado periódico estacionario se tiene la misma frecuencia que el flujo y una magnitud de 0.5 *p.u.*

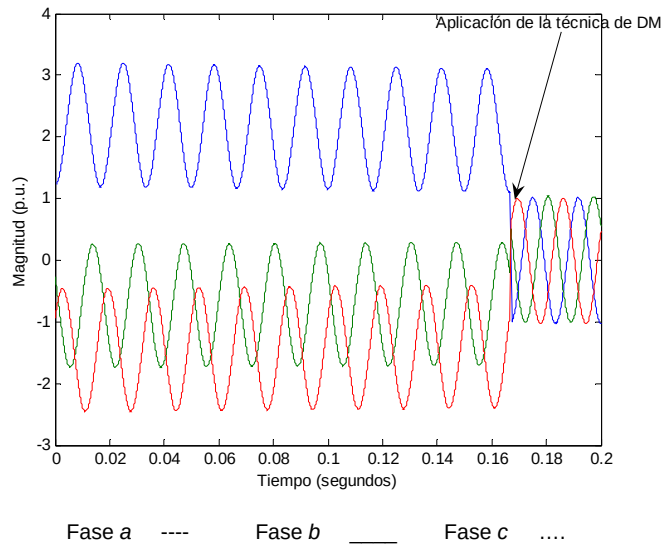


Figura 5.8 Flujos en las fases *a*, *b* y *c* (Aplicación de la técnica de aceleración). Caso de Estudio 5.3

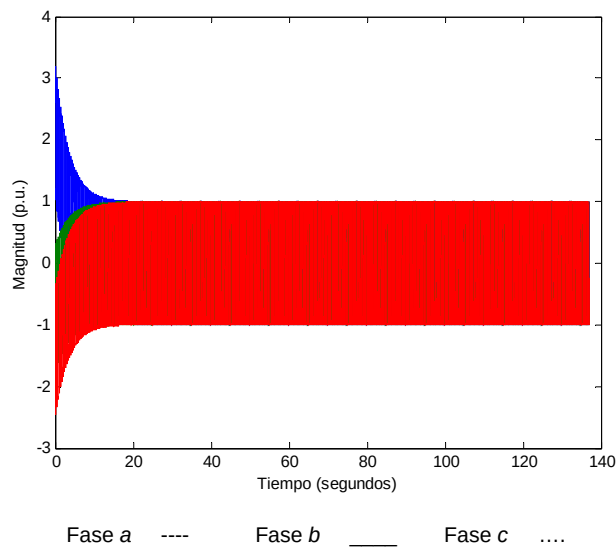


Figura 5.9 Flujos en las fases *a*, *b* y *c* (Sin la aplicación de la técnica de aceleración). Caso de Estudio 5.3

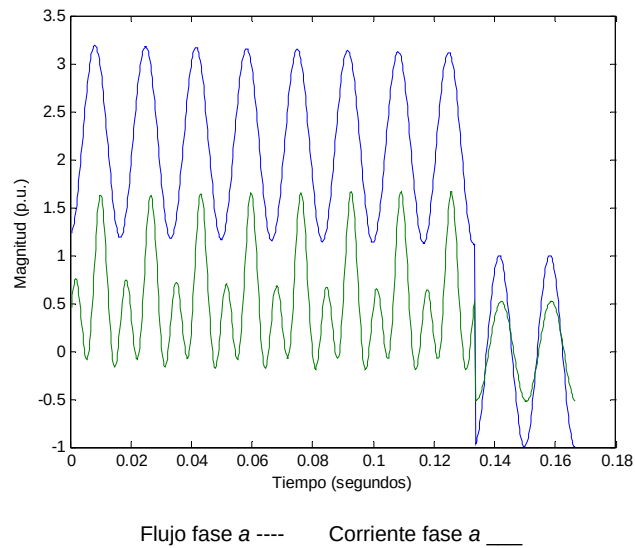


Figura 5.10 Flujo y corriente en la fase a (Aplicación de la técnica de aceleración). Caso de Estudio 5.3

5.5 Conclusiones

Se ha mostrado la aplicación de la técnica MD al análisis de redes eléctricas no lineales en el dominio del tiempo. Se ha observado que la técnica MD cumple con la característica de convergencia cuadrática asociada con los métodos Newton. Con el objeto de aumentar su eficiencia computacional así como de aprovechar la alta dispersidad asociada con la formulación de la técnica de MD, se aplicaron técnicas de dispersidad, las cuales mostraron su efecto en el tiempo de cómputo requerido por el método para alcanzar la solución periódica en estado estacionario del sistema eléctrico analizado. Se ha comparó la técnica DM con las técnicas FB, DN y AD.

Se observa que la técnica MD es una técnica que cumple con las características de convergencia de los métodos Newton, sin embargo debido a las características asociadas a su formulación se hace altamente ineficiente desde el punto de vista computacional para sistemas eléctricos de gran escala, incluso de pequeña escala. Se ha observado que las técnicas DN y AD son considerablemente más eficientes que la técnica MD en cuanto al tiempo de cómputo y recursos computacionales, tales como memoria.

Una desventaja que tienen tanto el método AD como el de MD es la necesidad de la expresión del Jacobiano asociado con el conjunto de EDO's que describen la dinámica del sistema a ser analizado. Se puede concluir que el método DN es el más eficiente desde el punto de vista de manejo de recursos computacionales. Se observó que en promedio el tiempo de proceso requerido por el método MD es mucho mayor que aquel requerido por el método FB así como por los

métodos DN y AD para obtener el EEP de las redes analizadas. Esta diferencia se incrementa en proporción directa con el tamaño del sistema analizado.

El uso de técnicas de manejo eficiente de matrices dispersas disminuyó de manera considerable el tiempo de cómputo asociado con el método MD, sin embargo, no se llegó a un tiempo equiparable con respecto a las técnicas DN y AD, incluso con respecto al tiempo de ejecución con el método FB.

Capítulo No. 6

Aplicaciones de Procesamiento en Paralelo

El presente Capítulo tiene como objetivo mostrar dos aplicaciones adicionales de técnicas de procesamiento en paralelo basadas en PVM y *Multithreading*. En particular estas técnicas serán aplicadas al análisis de la respuesta a la frecuencia de redes eléctricas y a la solución del problema de flujos de potencia monofásico.

6.1 Introducción

Las nuevas tecnologías en el ámbito de la informática presentan alternativas en el ámbito del análisis de los sistemas eléctricos de potencia. Tecnologías tales como el procesamiento en paralelo y la programación orientada a objetos cada vez son aplicadas al análisis de una mayor cantidad de problemas en el ámbito de la ingeniería eléctrica [Mariños *et al.* 1994], [Foley y Bose 1995], [Lemaitre y Thomas 1996], [Fuerte-Esquivel *et al.* 1997], [Medina, Ramos-Paz y Fuerte-Esquivel 2003a]. [García y Acha 2004]. Sin embargo, existen una gran cantidad de problemas en el análisis de sistemas eléctricos de potencia que son susceptibles a ser resueltos mediante un algoritmo de solución basado en la aplicación de procesamiento en paralelo. Se sabe, que no existe un algoritmo que sea 100 % paralelizable, sin embargo, se pueden buscar mejoras en los algoritmos, las cuales se vean reflejadas en tiempo de cómputo menores.

Conocer el comportamiento de una red eléctrica en función a diferentes frecuencias permite predecir fenómenos tales como puntos de resonancia en serie o paralelo, los cuales están asociados con altos o bajos voltajes en el sistema [Arrillaga *et al.* 1997]. El conocimiento de este tipo de fenómenos permite establecer esquemas de protección de los sistemas eléctricos de potencia, los cuales permitan rechazar la o las frecuencias que generan estos tipos de resonancias. Este tipo de estudio es de utilidad en los análisis transitorios y armónicos. En general se requiere un gran esfuerzo computacional con el objeto de reproducir la respuesta a la frecuencia de un sistema en un rango práctico de frecuencias. El paso de frecuencia utilizado en este tipo de estudios es directamente proporcional a la precisión obtenida.

Los estudios de flujos de potencia permiten determinar la magnitud y ángulo de los diferentes nodos de una red eléctrica en base a las cargas conectadas en sus nodos. El estudio de flujos de potencia es un elemento primordial para la realización de una gran cantidad de estudios en los sistemas eléctricos de potencia, tales como: análisis de estabilidad, solución en el dominio de la frecuencia de redes eléctricas usando el método de inyecciones de corriente, análisis de flujos de potencia trifásicos, solución al problema de flujos de potencia óptimos, etc.

6.2 Modelado en el dominio de la frecuencia

A continuación se presenta el modelo de la impedancia, en función de la frecuencia, de los principales elementos que conforman el sistema eléctrico de potencia.

La admitancia se define como el inverso de la impedancia,

$$y = \frac{1}{z} \quad (6.1)$$

donde:

$$z = r + jX \quad (6.2)$$

Si la parte imaginaria de la impedancia es positiva, se tiene una reactancia Inductancia X_L , la cual varía con la frecuencia como:

$$X_L = jh\omega_0 L \quad (6.3)$$

Si la parte imaginaria de la impedancia es negativa, se tiene una reactancia capacitiva X_C , la cual varía con la frecuencia como:

$$X_C = -\frac{j}{h\omega_0 C} \quad (6.4)$$

Líneas de transmisión

Una línea de transmisión puede ser representada por un modelo π , tal y como se muestra en la Figura 6.1.

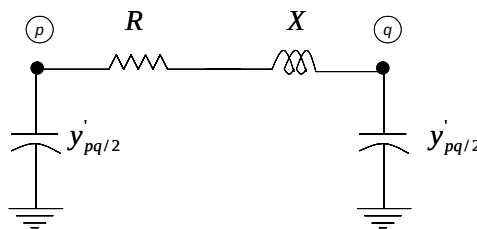


Figura 6.1 Representación de una línea de transmisión mediante el circuito equivalente π

Generadores

La impedancia de un generador en función de la frecuencia se calcula por medio de:

$$Z_{gh} = R\sqrt{h} + jX_d''h \quad (6.5)$$

donde

R depende de las pérdidas de la máquina

X_d'' es la reactancia subtransitoria del generador.

Transformadores

La impedancia de un transformador en función de la frecuencia es:

$$Z_{th} = R\sqrt{h} + jX_t h \quad (6.6)$$

donde

R depende de las pérdidas del transformador

X_t es la reactancia de corto circuito del transformador.

6.3 Análisis de la respuesta a la frecuencia de redes eléctricas usando procesamiento en paralelo

La respuesta a la frecuencia de una red eléctrica de potencia puede ser obtenida por medio de la construcción, a una frecuencia en particular, de la matriz de admitancias. La función de transferencia entre las corrientes nodales y los voltajes nodales que aparecen a través de los nodos del sistema, se representa, a cualquier frecuencia f , por medio de la ecuación matricial,

$$\tilde{I}_f = Y_f \tilde{V}_f \quad (6.7)$$

La inversa de la matriz de admitancias Y_f se conoce como la matriz de impedancias y se representa por medio de Z_f , en donde cada elemento de la diagonal $Z_{j,j}$ representa la impedancia del nodo j del sistema. El conjunto de puntos $Z_{j,j}$ para diferentes frecuencias representa la respuesta de la impedancia del nodo j del sistema a la frecuencia. Este conjunto de puntos se conoce como *Driving Point Impedance* del nodo j .

La combinación de elementos capacitivos e inductivos vistos, desde un nodo en particular del sistema, puede resultar en resonancias en serie o en paralelo. Las resonancias serie están asociadas con un elevado flujo de corrientes armónicas a través de ciertos elementos y nodos en la red, en tanto que el resultado de las resonancias en paralelo puede ser la presencia de voltajes armónicos excesivos a través de los elementos y nodos de la red [Watson et al. 1987] [Arrillaga et al. 1997].

6.3.1 Esquema para el cálculo de la respuesta a la frecuencia usando procesamiento en paralelo propuesto

Convencionalmente, el cálculo de Z_f se lleva a cabo por medio de un proceso secuencial en donde Z_{j-j} se obtiene en cada frecuencia. Un cálculo preciso de Z_{j-j} requiere un paso de frecuencia pequeño, de tal forma que permita una reproducción adecuada de las resonancias en serie y paralelo del sistema. Sin embargo, el paso de frecuencia es inversamente proporcional al esfuerzo computacional requerido para obtener Z_{j-j} en un rango práctico de frecuencias. Del cálculo de Z_f para frecuencias $f_0, f_1, f_2, \dots, f_n$ puede aprovecharse el hecho de que el cálculo de Z_{f_0} es independiente del cálculo de Z_{f_1} y este a su vez es independiente del cálculo de Z_{f_2} y así sucesivamente. Este proceso es ideal para la aplicación de procesamiento en paralelo. Considérese el esquema de cálculo paralelo de Z_f mostrado en la Figura 6.2. De la figura puede apreciarse que un elemento de proceso principal recolecta la información de la red la cual es almacenada en un archivo de datos, que contiene la topología además de la información asociada con los parámetros del sistema. Se forman entonces listas de objetos que contienen tres elementos principales de información, el primero está asociado con los parámetros del elemento tales como R, L y C ; el segundo elemento está asociado con el método que permite el cálculo de la admitancia del elemento en función de la frecuencia; finalmente, el tercer elemento almacena la conectividad del elemento, es decir, los nodos en los cuales está conectado el elemento.

Una vez de que la información ha sido almacenada, se procede al proceso de distribución de tareas, es decir, en este momento se calcula cual será el rango de frecuencias a ser calculado

por cada uno de los elementos de proceso. Se hace referencia a *elementos de proceso* debido a que la metodología presentada en este Capítulo de esta Tesis ha sido implementada utilizando dos plataformas de procesamiento en paralelo, PVM y *Multithreading* respectivamente. El elemento principal de proceso determina el rango de frecuencias a ser analizadas por cada uno de los elementos de proceso disponibles. Para realizar este cálculo se utiliza la Ecuación (6.8),

$$\text{Tareas por elemento de proceso} = \frac{\frac{f_{\max}}{\Delta f}}{\text{No. de elementos de proceso}} \quad (6.8)$$

Una vez que se hace el reparto de las tareas por elemento de proceso se procede a la ejecución de los diversos elementos de proceso. En el caso de PVM debido a que no maneja una memoria compartida, se envía a cada elemento de proceso las listas de objetos asociados con la red eléctrica a ser analizada, así como el rango de frecuencias a ser calculadas por el elemento de proceso. En el caso de *Multithreading* simplemente se envía a cada elemento de proceso el rango de frecuencias a ser calculadas, esto debido a que *Multithreading* maneja memoria compartida, lo cual permite compartir los recursos almacenados en memoria.

Una vez que se han ejecutado los elementos de proceso se procede a esperar los resultados provenientes de los elementos de proceso. Dado que los resultados se almacenan en una variable común, se implementaron esquema de señalización con el objeto de evitar colisiones de datos provenientes de uno o más elementos de proceso [Geist *et al.* 1994] [Hughes y Hughes 1996].

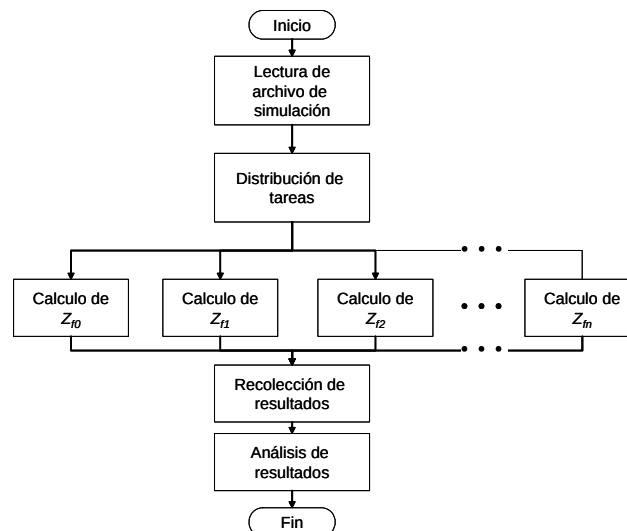


Figura 6.2 Esquema paralelo para el cálculo de la respuesta a la frecuencia de redes eléctricas

El proceso del cálculo de la inversa de Y_f para obtener Z_f se realiza por medio de un proceso de descomposición de la matriz Y_f en un producto LU . Una vez que se tiene la matriz expresada como un producto de dos matrices LU se procede a determinar la inversa de LU por columnas a través del proceso mostrado en el diagrama de la Figura 6.3.

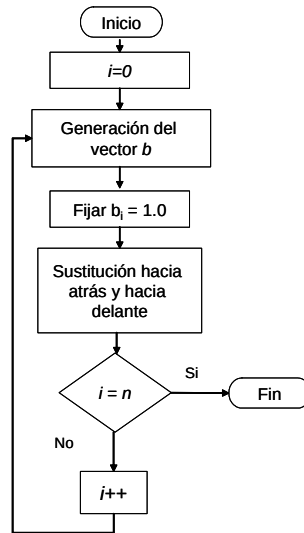


Figura 6.3 Proceso de inversión de la matriz Y_f

El proceso mostrado en la Figura 6.3 consiste en expresar la matriz Y_f en un producto de dos matrices una triangular inferior y otra triangular superior. Una vez que se tiene la bi-factorización de la matriz Y_f en el producto LU se procede a resolver el siguiente problema:

$$LUx = y \quad (6.9)$$

en donde x representa el vector solución del problema en tanto que y representa un vector de términos independientes. Si y es un vector de ceros en donde en la primera posición se coloca un 1, y se procede a resolver (6.9) a través de un proceso de sustitución hacia atrás y hacia delante se encontrará el vector x , el cual contendrá la primera columna de la matriz inversa de Y_f , es decir, la primera columna de Z_f . Para encontrar las diversas columnas de Z_f se repite el proceso de sustitución hacia atrás y hacia delante, pero utilizando el vector y con ceros y 1 en la posición asociada con la columna de Z_f a calcular. En base a este proceso puede ser calculada por columnas la inversa de la matriz Y_f .

Cada uno de los procesadores esclavos realiza solamente una vez el segundo esquema de ordenamiento de Tinney [Tinney y Walker 1967], dado que la topología de la red no se modifica, lo único que se modifican son los parámetros de los elementos.

6.3.2 Casos de estudio

Con el objeto de mostrar el funcionamiento de la metodología desarrollada, se plantea su aplicación en tres casos de estudio. En cada uno de los casos de estudio se aplica la metodología en las plataformas de PVM y *Multithreading*. Los resultados se muestran en términos de la eficiencia relativa alcanzada con el uso de una mayor cantidad ya sea de hilos, para el caso del uso de *Multithreading* o de computadoras esclavas, para el caso del uso de PVM.

El simulador diseñado fue implementado en lenguaje C++. Las gráficas presentadas fueron realizadas con el uso de GNUPLOT [GNUPLOT].

6.3.2.1 Caso de Estudio 6.1. Sistema de 5 nodos

El circuito mostrado en la Figura 6.4 está formada por cinco nodos los cuales son interconectados por medio de ramas de diversos tipos, tal y como se ilustra en esta misma figura.

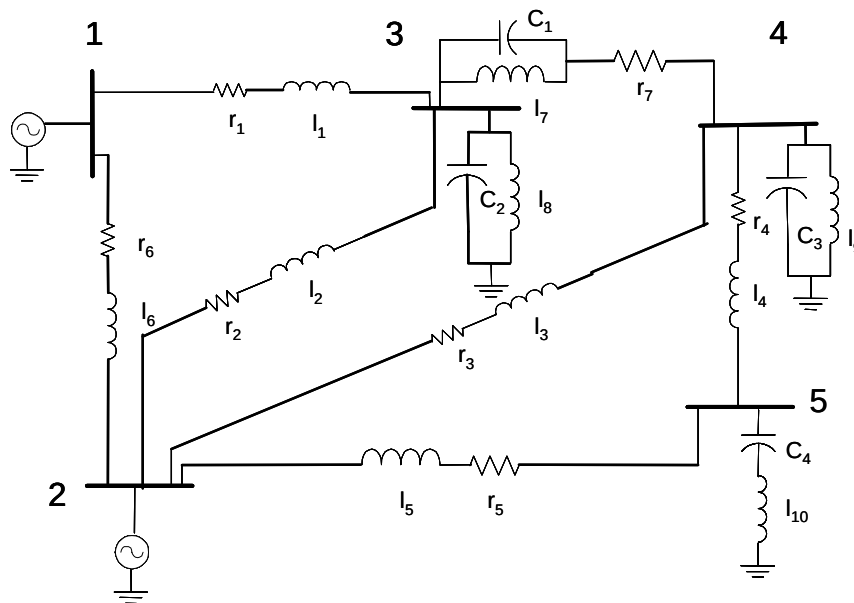


Figura 6.4 Caso de Estudio 6.1

La Figura 6.5 muestra la impedancia en función a la frecuencia vista en el nodo 2 del sistema. De la Figura 6.5 pueden ser apreciados 4 puntos de resonancia paralelo a los 120, 180, 230 y 360 Hz, respectivamente.

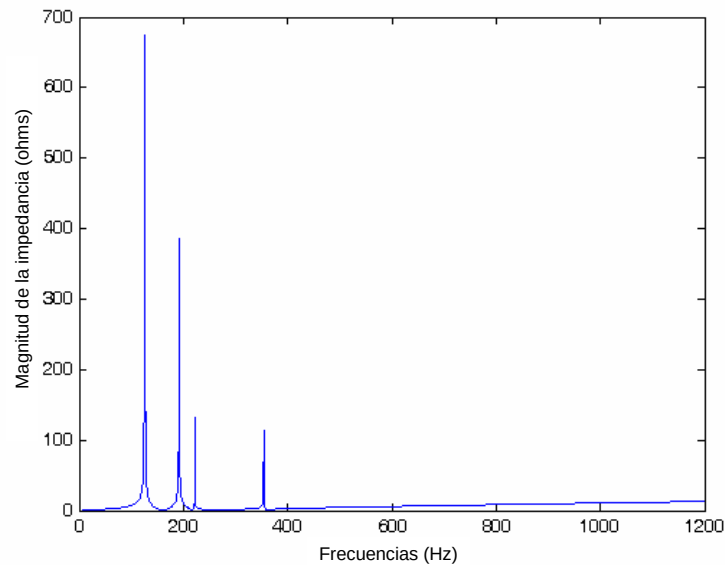


Figura 6.5 Respuesta a la frecuencia vista desde el nodo 2 del sistema. Caso de Estudio 6.1

La Figura 6.6 ilustra la respuesta a la frecuencia vista desde el nodo 4. Se tienen dos puntos de resonancia en paralelo, cercanos a 120 y 350 Hz, respectivamente. En este caso de estudio se utilizó un paso de frecuencia de 0.1 y una frecuencia base de 60 Hz.

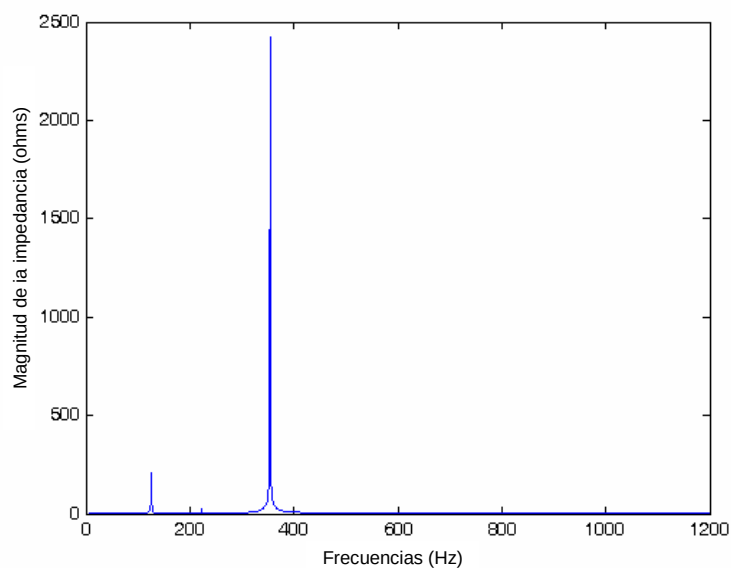


Figura 6.6 Respuesta a la frecuencia vista desde el nodo 4 del sistema. Caso de Estudio 6.1

La Figura 6.7 ilustra el efecto del paso de frecuencia en la reproducción de la respuesta a la frecuencia del sistema vista desde el nodo 2 del sistema. De esta Figura puede notarse que los pasos de frecuencia de 0.1 y 0.01 detectan todos los puntos de resonancia paralelo, en tanto que el uso de un paso de frecuencia de 1 Hz o inclusive mayor no detecta tres puntos de resonancia paralelo cercanos a 180, 225, 340 Hz respectivamente. El resultado mostrado en esta figura justifica un análisis riguroso en la determinación de los puntos de resonancia en un sistema eléctrico de potencia.

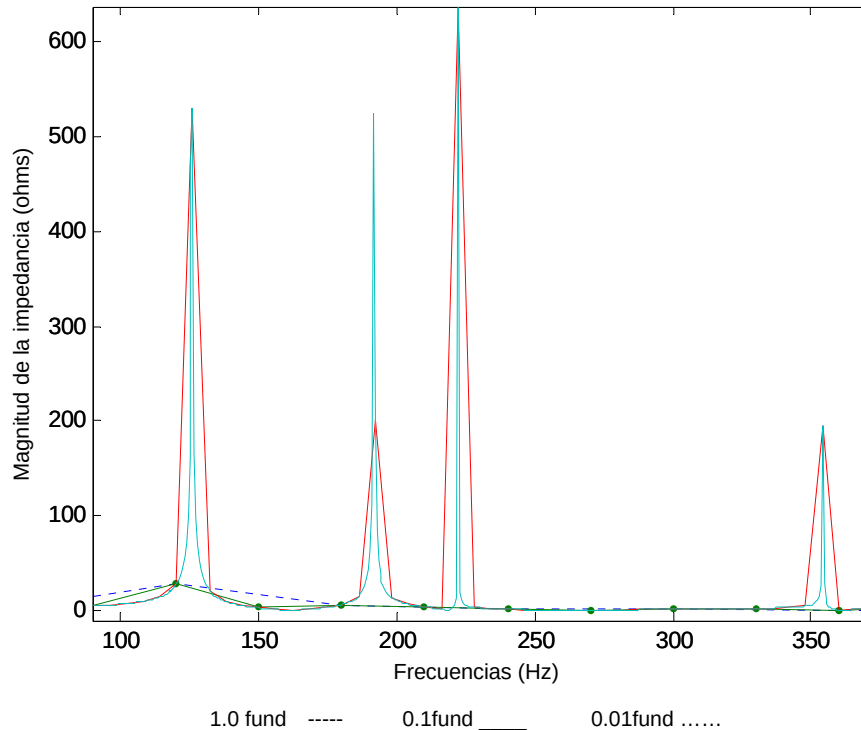


Figura 6.7 Efecto del paso de frecuencia en la evaluación de la respuesta a la frecuencia. Caso de Estudio 6.1

Las Tablas 6.1 y 6.2 muestran la eficiencia relativa obtenida con la aplicación del procesamiento en paralelo basado en el uso de *Multithreading*, utilizando dos pasos diferentes de frecuencia. Con $\Delta f = 0.1f_{fund}$ la eficiencia relativa se incrementa de 1 a 1.2727 para un análisis con 10 armónicos y 1.52 para un análisis con 40 armónicos.

Tabla 6.1 Eficiencia relativa con $\Delta f=0.1f_{fund}$. Caso de Estudio 6.1

Número de hilos	Número de armónicos			
	10	20	30	40
1	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
2	1.2727	1.4285	1.5294	1.5238
3	1.2727	1.2500	1.3000	1.3333

Tabla 6.2. Eficiencia relativa con $\Delta f=0.01fund$. Caso de Estudio 6.1

Número de hilos	Número de Armónicos			
	10	20	30	40
1	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
2	1.7631	1.8529	1.8979	1.9140
3	1.7631	1.8260	1.8979	1.8992

La Tabla 6.3 muestra la eficiencia relativa obtenida con el uso de PVM y tres procesadores esclavos. Puede apreciarse de los resultados mostrados en la Tabla 6.3 que conforme la magnitud del problema aumenta se incrementa de manera significativa la eficiencia relativa obtenida, llegando a un valor de 2.97 para el caso de un paso de frecuencia de 0.001 y tres procesadores esclavos.

Tabla 6.3 Eficiencia relativa obtenida con PVM y 3 procesadores esclavos. Caso de Estudio 6.1

Número de procesadores esclavos	Eficiencia relativa			
	Paso de Frecuencia			
	1.0	0.1	0.01	0.001
1	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
2	1.0556	1.1842	1.4474	1.9916
3	1.0000	1.5000	2.1154	2.9720

En base a los resultados mostrados en las Tablas 6.2 y 6.3 se puede hacer una comparación directa entre la eficiencia relativa obtenida con PVM y *Multithreading*. Considérese en particular la eficiencia obtenida con el uso de 2 hilos y 40 armónicos con *Multithreading* en donde se obtuvo una eficiencia de 1.9140, en tanto que el uso de 2 procesadores esclavos con PVM logra una eficiencia relativa de 1.9916. En términos reales, *Multithreading* es 1.040 veces más rápido que PVM. Sin embargo el uso de una computadora con dos procesadores, no permite un incremento significativo en la eficiencia con el uso de 3 o más hilos. Sin embargo un incremento sustancial de la eficiencia relativa puede obtenerse con el uso de PVM y la incorporación de más de 3 computadoras esclavas.

La Figura 6.8 muestra el comportamiento de la eficiencia relativa como función del número de procesadores esclavos utilizados. Para obtener los resultados mostrados en la figura se utilizó un paso de frecuencia de 0.001. Se puede mostrar que se llega a una eficiencia máxima de 5.36 con el uso de 20 procesadores esclavos. Esta eficiencia se logra de manera práctica desde el uso de 14 procesadores esclavos. Se puede apreciar que el incremento máximo en la eficiencia relativa se da con la aplicación de un segundo procesador esclavo. De 2 a 10 procesadores esclavos aparecen aumentos significativos con la incorporación de un procesador adicional.

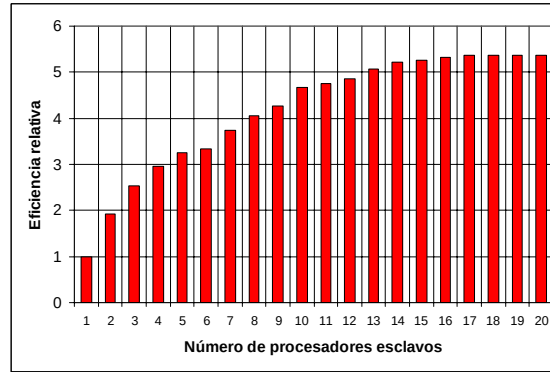


Figura 6.8 Eficiencia relativa obtenida con el uso de PVM y 1 a 20 procesadores esclavos. Caso de Estudio 6.1

6.3.2.2 Caso de Estudio 6.2. Sistema modificado de IEEE de 14 nodos

IEEE 14 nodos: en este caso de estudio se plantea la aplicación de la metodología al sistema de prueba de IEEE de 14 nodos. El sistema de prueba de IEEE de 14 nodos ha sido modificado de tal manera de incluir ramas con combinaciones serie-paralelo de elementos resistivos, inductivos y capacitivos.

Las Figuras 6.9(a) y 6.9(b) muestran la impedancia vista en los nodos 1 y 10 en función de la frecuencia. Puede apreciarse de la Figura 6.9(a) que existen resonancias paralelo a los 92, 109, 115, 123, 150, 174 y 229 Hz respectivamente. Por otro lado en la Figura 6.9(b) se observan puntos de resonancia paralelo a las frecuencias de 92, 108, 115, 125, 145 y 150 Hz.

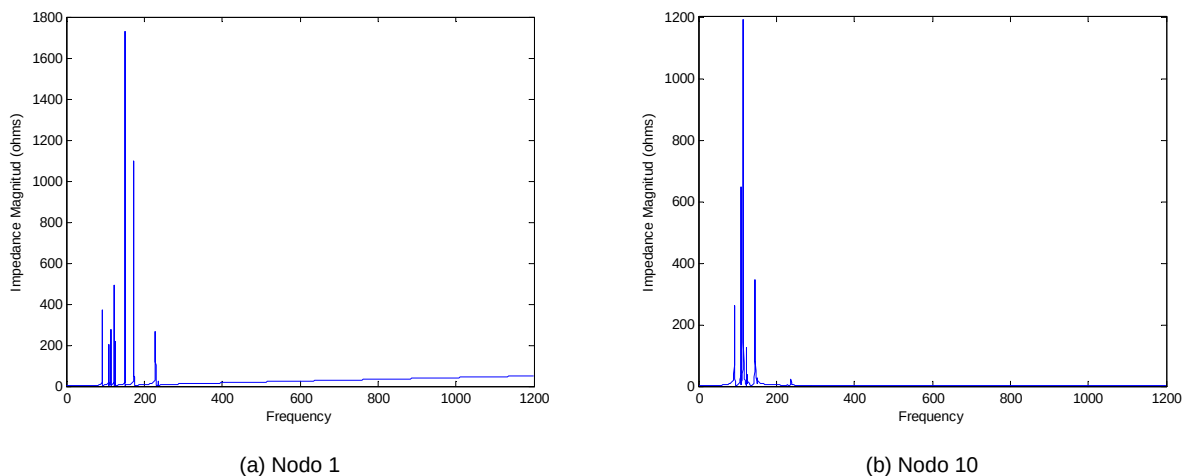


Figura 6.9 Respuesta a la frecuencia. Caso de Estudio 6.2

La Figura 6.11 muestra la variación de la eficiencia relativa con el uso de PVM y la aplicación de 1 a 20 procesadores esclavos. Nótese que se llega a un valor máximo cercano a 7.15

con el uso de 20 procesadores esclavos. En los resultados mostrados en esta figura, a diferencia de los presentados en la Figura 6.9 es evidente que existe un aumento en la eficiencia relativa con la aplicación de procesadores adicionales. Esta diferencia está asociada con la diferencia del tamaño de los problemas, es decir, el esfuerzo computacional asociado con el Caso de Estudio 6.1 es menor al Caso de Estudio 6.2.

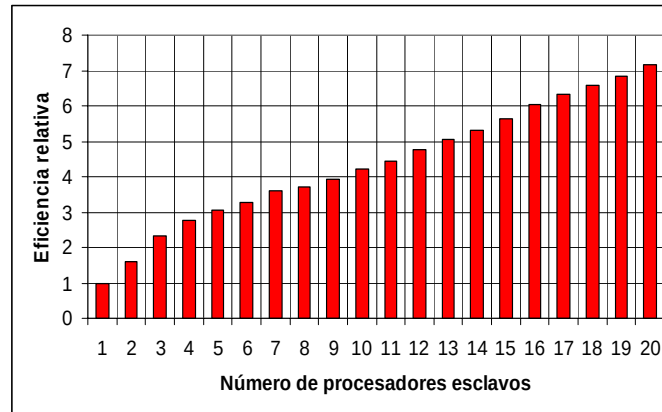


Figura 6.10 Eficiencia relativa obtenida con el uso de PVM y 1 a 20 procesadores esclavos. Caso de Estudio 6.2

6.4 Flujos de potencia monofásicos usando procesamiento en paralelo

El estudio más importante dentro del análisis de los sistemas eléctricos de potencia es el análisis de flujos de potencia. En el trabajo presentado por Tinney y Hart en [Tinney y Hart 1967] se resenta un algoritmo de solución al problema de flujos de potencia por medio del uso del método Newton. En trabajos posteriores se han ido aplicado nuevas herramientas en la solución al problema de flujos de potencia, tales como técnicas de dispersidad [Tinney y Walker 1967], programación orientada a objetos [Fuerte-Esquivel *et al.* 1997], etc.

El objetivo del estudio de flujos de potencia, es determinar las características de operación en estado estacionario periódico de la generación y transmisión de potencia en los diferentes nodos y ramas que conforman el sistema [Stevenson 1962].

En la Figura 6.11 se muestra un esquema general del proceso de solución del problema de flujos de potencia, mediante el algoritmo de Newton-Raphson completo en coordenadas polares [Arrillaga y Arnold 1990]. De manera general se lee un archivo de datos que contiene la topología de la red así como los parámetros de los elementos que la conforman, también en este archivo se especifican los límites de generación de potencia de los diversos elementos generadores. Finalmente se especifican las cargas en los diferentes nodos de carga que conforman el sistema eléctrico de potencia. En base a esta información se procede a la construcción de la matriz de

admitancias del sistema eléctrico. A continuación se procede a calcular la potencia en todos los nodos del sistema y determinar el error que existe en base a las potencias que han sido especificadas. Si no existe un error que supere el criterio de convergencia especificado, el proceso finaliza, en caso contrario se procede a resolver la Ecuación (6.16), en dónde como resultado se obtienen los ajustes tanto en la magnitud como en el ángulo para los nodos PQ (de carga) y los ajustes en el ángulo del voltaje para los nodos PV (voltaje controlado).

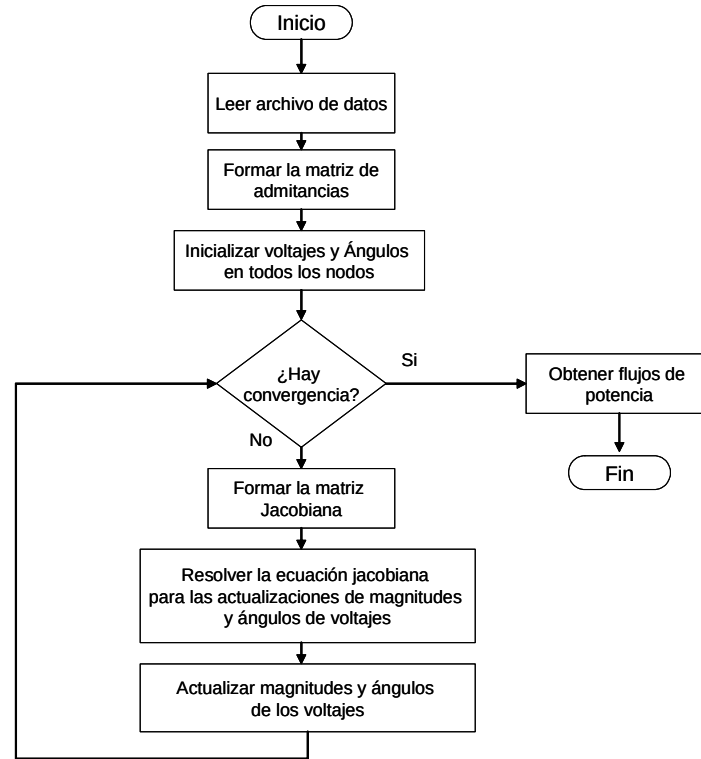


Figura 6.11 Diagrama de Flujo del Algoritmo de Flujos de Potencia

Los desajustes de potencia se en los diversos nodos se calculan,

$$\Delta P^{n-1} = P_{esp} - P_{cal}^{n-1} \quad (6.11)$$

$$\Delta Q^{n-1} = Q_{esp} - Q_{cal}^{n-1} \quad (6.12)$$

La potencia en los nodos se calcula como,

$$P_k = \sum_{m \in k} V_k V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (6.13)$$

$$Q_k = \sum_{m \in k} V_k V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (6.14)$$

donde

$$\theta_{km} = \theta_k - \theta_m \quad (6.15)$$

Cabe recordar que la potencia activa (P) y reactiva (Q) se calcula para todos los nodos de PQ en tanto que en los nodos PV exclusivamente se calcula la potencia reactiva, debido a que la potencia activa es especificada en el nodo.

Con el objeto de hacer que las diferencias entre las potencias especificadas y las calculadas tiendan a ser cero, se procede a determinar un ajuste en las magnitudes y ángulos de voltajes a través de la solución de la ecuación,

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{n-1} \\ \Delta Q^{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H^{p-1} & N^{p-1} \\ J^{p-1} & L^{p-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta^p \\ \frac{\Delta V^p}{V^{p-1}} \end{bmatrix} \quad (6.16)$$

donde la matriz $\begin{bmatrix} H^{p-1} & N^{p-1} \\ J^{p-1} & L^{p-1} \end{bmatrix}$ recibe el nombre de matriz Jacobiana.

los elementos de la matriz Jacobiana se calculan por medio de las expresiones

$$H_{km} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} = V_k V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (6.17)$$

$$N_{km} = V_m \frac{\partial P_k}{\partial V_m} = V_k V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (6.18)$$

$$J_{km} = \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} = -V_k V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (6.19)$$

$$L_{km} = V_m \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} = V_k V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (6.20)$$

cuando $m \neq k$.

y de las expresiones,

$$H_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} = -Q_k - B_{kk} V_k^2 \quad (6.21)$$

$$N_{kk} = V_k \frac{\partial P_k}{\partial V_k} = P_k + G_{kk} V_k^2 \quad (6.22)$$

$$J_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} = P_k - G_{kk} V_k^2 \quad (6.23)$$

$$L_{kk} = V_k \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = Q_k - B_{kk} V_k^2 \quad (6.24)$$

cuando $m = k$.

6.4.1 Esquema paralelo propuesto de cálculo de los elementos de la matriz Jacobiana propuesto

El esquema paralelo propuesto consiste en calcular de manera simultánea las filas de la matriz Jacobiana; esto puede realizarse debido a que existe independencia en el cálculo de los elementos de esta matriz.

La Figura 6.12 muestra el esquema de cálculo simultáneo de los elementos de la matriz Jacobiana propuesto. De la figura puede apreciarse que el número de filas de la matriz Jacobiana, el cual es igual al $2PQ + PV$, se reparte entre los elementos de proceso; dado que esta división no necesariamente es exacta, a cada elemento se le asigna el entero de la división entre el número de filas y el número de elementos de proceso; el remanente se reparte por de uno en uno entre los primeros elementos de proceso.

El elemento de proceso principal, en base al número de elementos de proceso disponibles, determina el número de filas que serán calculadas por cada elemento de proceso. El elemento de proceso principal envía a cada uno de los hilos la fila inicial y final. En base a esto se comienza a calcular los elementos de la matriz Jacobiana, los cuales se almacenan mediante un conjunto de listas simplemente enlazadas [Heileman 1998]. Dado que un recorrido sobre la lista enlazada que representa el primer renglón es independiente al recorrido sobre la lista enlazada que almacena el

segundo renglón y así sucesivamente, las listas se van llenando de manera simultánea, tal y como se muestra en la Figura 6.12.

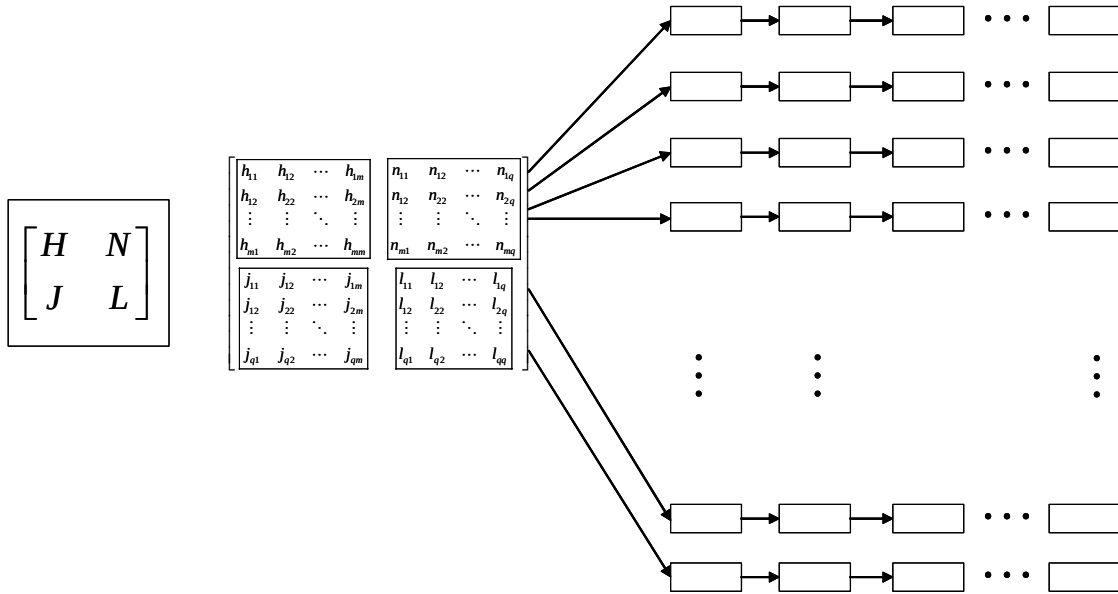


Figura 6.12 Esquema paralelo propuesto para el cálculo de los elementos de la matriz Jacobiana

Una vez que han sido calculados los elementos de la matriz Jacobiana se procede a realizar el proceso de solución de la Ecuación (6.16), el cual se basa en un proceso de ordenamiento, bi-factorización y sustitución. Una vez que finaliza este proceso se procede a actualizar las magnitudes y ángulos de los voltajes en los nodos PQ y PV; además de la actualización de la magnitud de los voltajes en los nodos PQ. Finalmente se procede a verificar si se ha llegado a la convergencia; si este es el caso se procede a determinar los flujos de potencia en todas las líneas que conforman el sistema; de lo contrario se repite el proceso hasta que se llegue a la convergencia o en su defecto hasta que se rebase de un número máximo de iteraciones especificadas.

Cabe hacer mención que el proceso de ordenamiento se realiza en la primera iteración del algoritmo. El ordenamiento puede volverse a realizar solamente si alguno de los nodos PV viola sus límites de generación y se convierte en un nodo de PQ, lo cual provoca que la topología de la matriz Jacobiana cambie.

6.4.2 Caso de Estudio 6.3: Sistema de prueba de IEEE de 14, 30, 57 y 118 nodos

Con el objeto de mostrar la aplicación del esquema paralelo propuesto, se realiza el estudio de los sistemas de prueba del IEEE de 14, 30, 57 y 118 nodos. En todos los casos de estudio presentados en esta sección se utilizó un criterio de convergencia de 1×10^{-10} en p.u. para los

desajustes en la potencia activa. Para el sistema de prueba del IEEE de 14 nodos la Tabla 6.4 muestra los voltajes obtenidos en los nodos al finalizar el proceso de solución, en tanto que para los sistemas restantes se muestra exclusivamente la eficiencia relativa obtenida con el uso de 1 a 4 hilos.

Tabla 6.4 Magnitudes y ángulos de los voltajes en el sistema de prueba de IEEE de 14 nodos

Nodo	Magnitud de voltaje	Angulo del voltaje
1	1.060000	0.000000
2	1.045000	4.980938
3	1.010000	12.717940
4	1.070000	14.222622
5	1.090000	13.368218
6	1.018623	10.324200
7	1.020264	8.782556
8	1.061951	13.368218
9	1.056346	14.946567
10	1.051328	15.104290
11	1.057082	14.795231
12	1.055220	15.077390
13	1.050443	15.158905
14	1.035795	16.038898

En la Tabla 6.5 se muestra la reducción en tiempo de cómputo con el uso de 1 a 4 hilos para los sistemas de prueba de IEEE de 14, 30, 57 y 118 nodos. El equipo de cómputo utilizado para la realización de esta prueba es una computadora INTEL-XEON con dos procesadores con una velocidad de 3.06 GHz. De los resultados obtenidos puede apreciarse que para el caso del sistema de prueba de IEEE de 14 nodos solamente se tiene una reducción del 98.89 % del tiempo de cómputo secuencial; sin embargo para el sistema de prueba de IEEE de 30 nodos la reducción alcanza el 94.35 % del tiempo original con el uso de 2 a 4 hilos. En el caso del sistema de prueba de IEEE de 57 nodos se obtiene una reducción máxima del 96.89 %. En base al tamaño del sistema de prueba podría pensarse que se tendría que obtener una eficiencia mayor con respecto al sistema de prueba de IEEE de 30 nodos, sin embargo se debe de comentar que en este caso de estudio se experimentan modificaciones en la topología del Jacobiano. Finalmente para el caso del sistema de prueba de IEEE se obtiene una ventaja máxima del 84.46 % con respecto al tiempo secuencial.

Tabla 6.5 Eficiencia relativa obtenida para los sistemas de prueba de IEEE de 14, 30, 57 y 118 nodos

Número de hilos	IEEE14	IEEE30	IEEE57	IEEE 118
1	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
2	98.89%	94.35%	97.51%	84.92%
3	98.89%	94.35%	97.10%	84.46%
4	98.89%	94.35%	96.89%	84.46%

Los resultados obtenidos representan la eficiencia computacional obtenida al paralelizar exclusivamente el proceso del cálculo de los elementos de la matriz Jacobiana en el algoritmo de solución del problema de flujos de potencia monofásico de Newton-Raphson completo en su forma polar. Estos tiempos pueden variar en función a varios elementos tales como: los criterios de convergencia utilizados, los límites de generación de los nodos PV, el uso de Sistemas Flexibles de Transmisión en Corriente Alterna. También hay que hacer notar que los resultados mostrados fueron obtenidos con el uso de una computadora de dos procesadores, pueden esperarse mejoras significativas con el uso de computadoras con más de dos procesadores. Otras mejoras en la eficiencia computacional pueden obtenerse al paralelizar otros procesos del algoritmo de flujos de potencia monofásico de Newton-Raphson, en particular el proceso de solución de la Ecuación (6.16).

6.6 Conclusiones

De los resultados obtenidos puede observarse que la aplicación de técnicas de procesamiento en paralelo basadas tanto en PVM como en *Multithreading* reduce de manera considerable el tiempo de cómputo asociado con el cálculo de la respuesta a la frecuencia de redes eléctricas. Los resultados obtenidos muestran que el empleo de pasos de frecuencia grandes reduce la posibilidad de encontrar algunos puntos de resonancia en paralelo.

Se realizó una comparación directa entre la eficiencia relativa obtenida con la aplicación de *Multithreading* y PVM observándose que *Multithreading* produce incrementos prácticamente imperceptibles con respecto a PVM. Sin embargo la aplicación de procesamiento en paralelo basado en la construcción de redes heterogéneas de computadoras basadas en los recursos disponibles en los centros de investigación produce incrementos sustanciales en la eficiencia relativa alcanzada en la solución de los problemas. Se ha demostrado además la factibilidad del uso eficiente de los recursos computacionales con los que se cuentan en los diversos centros de cómputo de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Se ha mostrado además la factibilidad del diseño y construcción de simuladores digitales utilizando software de dominio público, lo cual permite reducir de manera sustancial los costos asociados con el uso de licencias por el manejo de ciertos lenguajes de programación y simuladores comerciales.

Este Capítulo ha mostrado que en el análisis de los Sistemas Eléctricos de potencia existen estudios que son susceptibles de ser realizados con la incorporación de técnicas de procesamiento en paralelo.

Capítulo No. 7

Conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros

7.1 Conclusiones

Esta Tesis ha mostrado el diseño, la implementación y la aplicación de una técnica que permite la construcción automática del conjunto de EDO's que modelan el comportamiento dinámico de redes eléctricas monofásicas y trifásicas de gran escala con componentes no lineales y variantes en el tiempo.

Con los resultados obtenidos se realizaron estudios de calidad de la energía asociados con el impacto en las formas de onda de variables tales como voltajes y corrientes en los diversos elementos del sistema debido a la incorporación de elementos no lineales y variantes en el tiempo, tales como hornos de arco eléctrico, transformadores de potencia, ramas magnetizantes, y dispositivos FACTS.

Esta metodología fue aplicada con éxito en el análisis de los sistemas de prueba modificados del IEEE de 14, 30, 57 y 118 nodos tanto monofásicos como trifásicos.

En el desarrollo e implementación de esta técnica se aplicaron cuatro herramientas de alto impacto: técnicas de procesamiento en paralelo; técnicas de acercamiento rápido al estado estacionario periódico; técnicas de manejo de matrices dispersas y técnicas de POO. Se pudo comprobar que la incorporación de las herramientas computacionales anteriores ha redundado en una mejora significativa de la eficiencia computacional de los procesos de solución involucrados.

Las técnicas de aceleración de la convergencia de las variables de estado al Ciclo Límite permitieron disminuir en promedio en un 30 % el número de periodos completos de integración requeridos por la metodología FB. En todos y cada uno de los casos de estudio en los cuales se aplicó la técnica DN se observó la característica de convergencia cuadrática asociada con los métodos Newton.

La eficiencia computacional de la técnica de aceleración de la convergencia de las variables de estado al Ciclo Límite DN fue incrementada con el uso de procesamiento en paralelo basado en la Máquina Paralela Virtual (PVM; por sus siglas en Inglés). En promedio se consiguieron eficiencias relativas cercanas al 8. Se observó que conforme el tamaño del problema

crece, se alcanzan mejores incrementos en la eficiencia relativa con el uso de la máquina paralela virtual.

En este trabajo se ha demostrado la factibilidad del uso del procesamiento en paralelo en la Universidad Michoacana, en base a esquemas de cómputo distribuido, como es el caso de la máquina paralela virtual, la cual fue construida utilizando los recursos computacionales de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Michoacana. Esta alternativa de solución es aplicable a otras instituciones.

La incorporación de la programación orientada a objetos permitió generar un sistema que tiene la capacidad de incluir nuevos modelos de los diversos elementos que forman parte del sistema eléctrico de potencia. Esta característica permite que otras personas puedan utilizar como base el sistema desarrollado con el objeto de hacer nuevas aportaciones asociadas con modelos más rigurosos de los diversos dispositivos del sistema eléctrico de potencia.

Las técnicas de manejo de matrices dispersas hicieron posible manejar sin dificultad sistemas de gran escala, como es el caso de sistema de IEEE de 118 trifásico. La aplicación de estas técnicas permite un manejo eficiente de la memoria del sistema, así como un uso eficiente de la unidad aritmética y lógica de la unidad central de proceso asociada con cada uno de los elementos de proceso utilizados en este trabajo de Tesis.

Se ha diseñado e implementado una herramienta digital que puede ser utilizada para fines de investigación, desarrollo así como para fines académicos.

En este trabajo de Tesis se mostró el uso de una alternativa para el cálculo del estado estacionario periódico de operación de redes eléctricas con componentes no lineales. Se observó que esta técnica presenta las características de los métodos Newton, sin embargo su eficiencia computacional está muy alejada con respecto a los métodos Newton DN y AD, incluso con respecto al mismo método FB.

En este trabajo de Tesis se mostraron dos aplicaciones adicionales del procesamiento en paralelo al análisis de sistemas eléctricos de potencia. En los resultados obtenidos se mostró el potencial que tiene el uso del procesamiento en paralelo en el análisis eficiente de los sistemas eléctricos de potencia.

7.2 Recomendaciones para trabajos futuros

A manera de trabajos futuros de investigación asociados con esta Tesis se propone:

- Incorporar un modelo dependiente de la frecuencia para la línea de transmisión.
- Incorporar modelos dinámicos trifásicos de los dispositivos FACTS, tales como el CSCT, RCT, etc.
- Generar un entorno gráfico para el simulador digital desarrollado.
- Unificar el simulador de tal forma que el mismo simulador pueda hacer análisis monofásicos como trifásicos.
- Implementar una máquina paralela virtual con el mayor número posible de procesadores esclavos. Se propone para esto utilizar las computadoras de desecho que se encuentran en las diversas oficinas, centros de cómputo, etc. de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Aplicar la metodología desarrollada en estudios dinámicos en tiempo real.

Referencias

[Acha et al. 1990]

Acha E., Semlyen A., y Rajakovic N. "A Harmonic Domain Computation Package for Nonlinear Problems and its Application to Electric Arcs," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 5, No. 3, Julio 1990, págs. 1390-1397.

[Adkins 1975]

Adkins B. y Harley R.G. "The General Theory of Alternating Current Machines: Application to Practical Problems", John Wiley and Sons, 1975.

[Alvarado et al. 1992]

Alvarado F. et al. "Parallel Processing in Power Systems Computation", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 2, Mayo 1992, págs. 629-637.

[Aprille y Trick 1972]

Aprille T.J. y Trick T. N. "A Computer Algorithm to Determine the Steady State Response of Nonlinear Oscillators", IEEE Transactions on Circuit Theory, Vol. CT-19, No. 4, Julio 1972, págs. 354-360.

[Arrillaga y Arnold 1990]

Arrillaga J., Arnold C.P., "Computer Analysis of Power Systems", John Wiley and Sons. 1990.

[Arrillaga et al. 1995]

Arrillaga J., Medina A., Lisboa M., Cavia M., Sanchez P., "The Harmonic Domain. A Frame of Reference for Power System Harmonic Analysis". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 1, Febrero 1995, págs. 433-440.

[Arrillaga et al. 1997]

Arrillaga J., Smith B., Watson N., Wood A., "Power Systems Harmonic Analysis", John Wiley and Sons.

[Barthold et al. 1961]

Barthold L.O. y Carter G.K., "Digital Travelling-Wave Solutions. 1 – Single-Phase Equivalents", AIEE Transactions, Vol. 80, pt. III, Diciembre 1961, págs. 812-820.

[Campos et al. 2001]

Campos R.G., y Pimentel L.O., "A Finite-Dimensional Representation of the Quantum Angular Momentum Operador", Nuevo Cimento, B116, págs. 31-45, 2001.

[Chua y Pen-Min 1975]

Chua L.O. y Pen-Min L. "Computer-Aided Analysis of Electronic Circuits: Algorithms and Computacional Techniques", Prentice-Hall, EUA, 1975.

Referencias

[Chua y Ushida 1981]

Chua L.O. y Ushida A. "*Algorithms for Computing Almost Periodic Steady-State Response of Nonlinear Systems to Multiple Input Frequencies*", IEEE Transactions on Circuits and Systems, Vol. CAS-28, No. 10, Octubre 1981, págs. 953-971.

[Clarke 1950]

Clarke, E. "*Circuit Analysis of A-C Power Systems – Vol. II*" John Wiley & Sons 1950.

[De Carlo y Saeks 1981]

De Carlo R.A. y Saeks R. "*Interconnected Dynamical Systems*", Marcel Dekker, Inc, EUA, 1981.

[Dick y Watson 1981]

Dick E.P. y Watson W., "*Transformer Models for Transient Studies Based on Field Measurements*", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 100, No. 1, Enero 1981, págs. 409-419.

[Dommel 1969]

Dommel, H. W., "*Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single and Multiphase Networks*", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-88, No. 4, Abril 1969, págs.388-399.

[Dommel et al. 1986]

Dommel H.W., Yan A., Wei S., "*Harmonics from Transformer Saturation*", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRD-1, No. 2, Abril, 1986, págs. 209-214.

[Dorf 1993]

Dorf R.C., "*The Electrical Engineering Handbook*", IEEE PRESS, EUA, 1993.

[Elgerd 1971]

Elgerd O. I., "*Electric Energy Systems Theory: An Introduction*", Mc Graw Hill, EUA, 1971.

[Foley y Bose 1995]

Foley M., Bose A., "*Object-Oriented On-Line Network Analysis*", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 1, Febrero 1995, págs. 125-132.

[Foster 1994]

Foster I., "*Designing and Building Parallel Programs*", Addison Wesley 1994.

[Frey et al. 1961]

Frey W. y P. Althammmer, "*The Calculation of Transients on Lines by Means of Digital Computer*", Brown Boveri Rev., Vol. 48, págs., 334-355, Mayo/Junio 1961.

Referencias

[Fuerte-Esquivel et al. 1997]

Fuerte-Esquivel C.R., Acha E., Tan S.G., Rico J.J., "*Efficient Object Oriented Power Systems Software for the Analysis of Large-Scale Networks Containing FACTS-Controlled Branches*", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 2, Mayo 1998, págs. 464-472.

[García 1999]

García N., "Métodos Newton de aceleración de la convergencia en el dominio del tiempo aplicados a la determinación de la solución periódica en estado estacionario de redes eléctricas con componentes no lineales y variantes en el tiempo", Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería Eléctrica, U.M.S.N.H. 1999

[García et al. 2000]

Sigridt García, Aurelio Medina, Carlos Pérez, "*A State Space Single-Phase Transformer Model Incorporating Nonlinear Phenomena of Magnetic Saturation and Hysteresis for Transient and Periodic Steady-State Analysis*", Proceedings of the IEEE PES 2000 Summer Meeting, July 2000, U.S.A., Vol. 4, págs. 2417-2421.

[García et al. 2001]

García N., Acha E. y Medina A., "*Swift Time Domain Solutions of Electric Systems Using Parallel Processing*", Proceedings of the Sixth International Conference IASTED, Rodas, Grecia, Julio 2001, págs. 172-177.

[García y Medina 2003]

García, N. y Medina, A., "*Swift Time Domain Solution of Electric Systems Including SVSs*". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 3, Julio 2003, págs. 921-927.

[García y Acha 2004]

García N. Acha E., "*Periodic Steady-State Analysis of Large Scale Electric Systems Using Poincaré Map and Parallel Processing*", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 4, Noviembre 2004, págs. 1784-1793.

[Geist y Sunderan 1993]

Geist G.A., Sunderan V.S., "*The Evolution of the PVM Concurrent Computing System*", 1993.

[Geist et al. 1994]

Geist A., Beguelin A. y Dongarra J., "*PVM: Parallel Virtual Machine*", MIT Press 1994.

[GNUPLOT]

En línea disponible: www.gnuplot.info

[Gotham y Heydt 1998]

Gotham D.J., Heydt G.T., "*Power Flow and Power Flow Studies for Systems with Facts Devices*". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 1, Febrero 1998, Págs.60-65.

Referencias

[Hak-Guhn Han et al. 1997]

Hak-Guhn H., Park J., Lee B., "Analysis of Thyristor Controlled Series Compensator Dynamics Using the State Variable Approach of a Periodic System Model", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 4, Octubre 1997. págs. 1744-1750.

[Hakavik et al. 1994]

Hakavik B., Holen A.T., "Power System Modelling and Sparse Matrix Operations Using Object-Oriented Programming", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 2, Mayo 1994. págs. 1045-1051.

[Heileman 1998].

Heileman G. L. "Estructuras de Datos, Algoritmos, y Programación Orientada a Objetos". Mc Graw Hill. 1998.

[Hingorani 1993]

Hingorani N.H., "Flexible AC Transmission Systems", IEEE Spectrum, págs. 40-45, Abril 1993.

[Hingorani y Gyugyi 2000]

Hingorani N.H., Gyugyi L., "Understanding FACTS Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems", IEEE Press. E.U.A.

[Hornbeck 1975]

Hornbeck R. "Numerical Methods". Quantum Publishers, Inc. 1975. EUA.

[Hughes C. y Hughes T. 1996]

Hughes C. y Hughes T., "Object-Oriented Multithreading Using C++". John Wiley and Sons. EUA 1996.

[Jin 1994]

Jin L., "Parallel Processing: Exploring the Architectures and Algorithms Close Relationship", IEEE POTENTIALS, Diciembre 94-Enero 95, págs. 17-20.

[Joyanes 1994]

Joyanes L., "Programación Orientada a Objetos", Mc. Graw Hill.

[Kleiman et al. 1992]

Kleiman S., Smaalders B., Stein D., Shah D., "Writing Multithreading Code in Solaris". 1992.

[Kron 1963]

Kron G., "Diakoptics", Macdonald. Londres, 1963.

[Kunder et al. 1990]

Kundert K.S., White J.K. y Sangiovanni-Vincentelli A. "*Steady-State Methods for Simulating Analog and Microwave Circuits*", Kluwer Academic Publishers, Estados Unidos de América, 1990.

[Kundur 1994]

Kundur P., "*Power System Stability and Control*", Mc Graw Hill, 1994.

[Lemaitre y Thomas 1996]

Lemaitre C. y Thomas B., "*Two Applications of Parallel Processing in Power System Computation*", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 1, Febrero 1996, págs. 246-253.

[Lewis y Berg 1998]

Lewis B. y Berg D.J., "*Multithreaded Programming with Pthreads*", Prentice Hall, 1998.

[Lieberherr et al. 1993]

Lieberherr K. J.; Xiao C., "*Object-Oriented Software Evolution*". IEEE Transactions on Software Engineering. Vol. 19, No. 4, Abril. 1993 págs. 313 – 343.

[Manzoni et al. 1994]

Manzoni A., Silva A.S., Decker C., "*Power Systems Dynamics Simulation Using Object-Oriented Programming*". IEEE Transactions on Power Systems, Vo. 14, No. 1, Febrero. 1999, págs. 249 – 255.

[Mariños et al. 1994]

Mariños Z.A., Pereira J.L.R., Carneiro Jr., "*Fast Harmonic Power Flow Calculation Using Parallel Processing*", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol 141, No. 1. Enero 1994, págs. 27-32.

[Martínez-Velasco 1997]

Martínez-Velasco J. A. "*Computer Analysis of Electric Power System Transients: Selected Readings*", IEEE PRESS.

[Medina, Ramos-Paz y Fuerte-Esquivel 2003a]

Medina, A.; Ramos-Paz, A.; Fuerte-Esquivel, C.R., "*Periodic Steady State Solution of Electric Systems with Nonlinear Components Using Parallel Processing*". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 2, Mayo 2003, págs. 963 – 965.

[Medina, Ramos-Paz y Fuerte-Esquivel 2003b]

Medina A., Ramos-Paz A., y Fuerte-Esquivel C. R., "*Swift Computation of the Periodic Steady State Solution of Power Systems Containing TCSCs*". Electrical Power and Energy Systems. No. 25, 2003, págs. 689-694.

Referencias

[Medina, Ramos-Paz y Fuerte-Esquivel 2003c]

Medina A., Ramos-Paz A., y Fuerte-Esquivel C.R., "*Object Oriented Programming Applied to the Fast Steady State Solution of Nonlinear Electric Networks*". 7th WORLD MULTICONFERENCE ON SYSTEMICS, CYBERNETICS AND INFORMATICS (SCI 2003). 27-30 Julio de 2003. Orlando, Florida, U.S.A.

[Medina, Ramos-Paz y Fuerte-Esquivel 2004a]

Medina, A., Ramos-Paz A. Mora-Juarez R., Fuerte-Esquivel C.R., "*Object Oriented Programming Techniques Applied to Conventional and Fast Time Domain Algorithms for the Steady State Solution of Nonlinear Electric Networks*", *Power Engineering Society General Meeting*, 2004 IEEE, 6-10 de Junio 2004 págs. 342 - 346 Vol.1.

[Medina, Ramos-Paz y Fuerte-Esquivel]

Medina, A., Ramos-Paz, A., Fuerte-Esquivel C.R., "*Efficient Computation of the Period Steady State Solution of Nonlinear Electric Systems Applying Parallel Processing Techniques*". Artículo aceptado para ser publicado en el Vol. 25, No. 4 de 2006 de la revista, "*The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical & Electronic Engineering*".

[Medina et al. 2004b]

Medina A, Ramos-Paz A., Martínez-Cárdenas F., Silva-Chávez J.C., "*Computer Platform Comparison on the Dynamic Operation Simulation of the Synchronous Machine*". 8th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI 2004) Orlando, USA, in Julio 18-21, 2004.

[Medina y Ramos-Paz 2005a]

Medina A., Ramos-Paz A., "*Newton Techniques for the Steady State Solution of Nonlinear Electric Networks*", *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*. No. 8, Vol. 4, Agosto 2005, 842-849.

[Medina y Ramos-Paz 2005b]

Medina A., Ramos-Paz A., "*Newton Methods for the Steady State Solution of Nonlinear Electric Networks*". 5th WSEAS International Conference on SIMULATION, MODELLING and OPTIMIZATION (SMO '05). Corfu, Greece, August 17-19, 2005.

[Medina y Ramos-Paz 2005c]

Medina A., Ramos-Paz A., "*PVM and MT Parallel Processing Platforms Applied to the Computation of Driving Point Impedances in Power Systems*", *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*. No. 11, Vol. 4, Noviembre 2005. 1702-1709.

[Miller 1982]

Miller T.J.E., "*Reactive Power Control in Electric Systems*", John Wiley and Sons. E.U.A. 1982.

Referencias

[Nakhla y Vlach 1976]

Nakhla M. S. y Vlach J., "A Piecewise Harmonic Balance Technique for Determination of Periodic Response of Nonlinear Systems". *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, Vol. CAS-23, No. 2, Febrero 1976, págs. 85 – 91.

[Nakhla y Branin 1977]

Nakhla M. S. y Branin F. H., "Determining the Periodic Response of Nonlinear Systems by a Gradient Method", *Circuit Theory Appl.* Vol. 5, 1977, págs. 255 – 273.

[Neyer et al. 1990]

Neyer A. F., Wu F. F., Imhof K., "Object-Oriented Programming for Flexible Software: Example of a Load Flow", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 5, No.3, Agosto. 1990, págs. 689 – 696.

[Ogbuobiri y Tinney 1970]

Ogbuobiri E.C. y Tinney W.F., "Sparsity-Directed Descomposition for Gaussian Elimination on Matrices", *Transactions on Power Apparatus and Systems*", Vol. PAS-89, Enero 1970, págs. 141-149.

[Oyama et al. 1990]

Oyama T., Kitahara T., Serizawa Y., "Parallel Processing for Power System Analysis Using Band Matrix", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 5, No. 3, Agosto 1990, págs. 1010-1016.

[Pancake 1993]

Pancake C. M., "Multithreaded Languages for Scientific and Technical Computing", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 81. No. 2, Febrero 1993.

[Park 1929]

Park R.H. "Two-reaction Theory of Synchronous Machines: Generalized Method of Analysis – Part I", *AIEE Trans.*, 1929, 52 (2), págs. 716-730.

[Park 1933]

Park R.H. "Two-reaction Theory of Synchronous Machines: Generalized Method of Analysis – Part II", *AIEE Trans.*, 1933, 52 (2), págs. 352-355.

[Parker y Chua et al. 1989]

Parker T.S., Chua L.O., "Practical Numerical Algorithms for Chaotic Systems", Springer-Verlag, 1989.

[Parker 1993]

Parker A., "Algorithms and Data Structures in C++", CRC Press 1993, págs. 126-133.

Referencias

[Prikler and Kristian 2002]

Prikler L., Kristian H., *"ATPDRAW version 3.5 for Windows 9x/NT/2000/XP Users' Manual"*. Octubre 2002.

[PVM]

Referencia en línea, <http://www.csm.ornl.gov/pvm/>

[Ramos-Paz 2002]

Ramos-Paz A., "Aplicación de Técnicas de Procesamiento en Paralelo a la Solución en Estado Periódico Estacionario de Redes Eléctricas con Componentes no Lineales y Variantes en el Tiempo", Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería Eléctrica, U.M.S.N.H. 2002.

[Rico et al. 1998]

Rico J.J., Acha, E., *"The Use of Switching Functions and Walsh Series to Calculate Waveform Distortion in Thyristor Controlled Compensated Power Circuits"*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 4, Oct. 1998 págs, 1370 – 1377.

[Rico et al. 2001]

Rico J.J., Acha, E., Madrigal M., *"The Study of Inrush Current Phenomenon Using Operational Matrices"*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, No. 2, Abril 2001 págs, 231 – 237.

[Rico et al. 2003]

Rico J.J., Madrigal M., Acha E., *"Dynamic Harmonic Evolution Using the Extended Harmonic Domain"*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 2, Abril 2003 págs. 587 – 594.

[Rodríguez y Medina 2004]

Rodríguez O., Medina A., *"Efficient Methodology for the Transient and Periodic Steady-State Analysis of the Synchronous Machine Using a Phase Coordinates Model"*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 19, No. 2, Junio 2004, págs. 464 – 466.

[Rumbaugh et al. 1991]

Rumbaugh J., Blaha M., Premerlani W., Eddy F., Lorensen W., *"Modelado y Diseño Orientado a Objetos"* Prentice Hall. España 1991.

[Sundaram 1996]

Sundaram R.K. *"A First Course in Optimization Theory"* Cambridge University Press.. Estados Unidos de América 1996.

[Sedgewick 1992]

Sedgewick R., *"Algorithms in C++"*. Addison-Wesley Publishing Company. 1992.

Referencias

[Semlyen y Deri 1985]

Semlyen A., Deri A., "*Time Domain Modelling of Frequency Dependent Three-Phase Transmission Line Impedance*", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 6, Junio 1985, págs. 1549-1555.

[Semlyen y Medina 1995]

Semlyen A., Medina A., "*Computation of the Periodic Steady State in Systems with Nolinear Components Using a Hybrid Time and Frequency Domain Methodology*", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 3, Agosto 1995, págs. 1498-1504.

[Sigfried 1995]

Sigfried S., "*Understanding Object-Oriented Software Engineering*" IEEE Press. E.U.A. 1995.

[Silva-Bijit 2006]

Silva-Bijit L., "*Redes Eléctricas*", Pearse Prentice Halll. España 2006.

[Skelboe 1980]

Skelboe S., "*Computation of the Periodic Steady-State Response of Nonlinear Networks by Extrapolation Methods*", IEEE Transactions on Circuits and Systems, Vol. CAS-27, Marzo 1980, págs. 161-175.

[SUN 1997]

Sun Microsystems, Inc. "*Multithreaded Programming Guide*".

[Stagg y El-Abiad 1968]

Stagg G.W., El-Abiad A.H., "*Computer Methods in Power System Analysis*", Mc Graw Hill. Japón 1968.

[Stavarakakis et al. 1990]

Stavarakakis G.S., Lefas C., Pouliezios A., "*Parallel Processing Computer Implementation of a Real Time DC Motor Drive Fault Detection Algorithm*", IEE Proceedings, Vol. 137, No. 5 Septiembre 1990. págs. 309-313.

[Stevenson 1962]

Stevenson W., "*Elements of Power System Analysis*", Mc Graw Hill. Japón 1962.

[Subramaniam 1971]

Subramaniam P., Malik O.P. "*Digital Simulation of a Synchronous Generator in Direct-Phase Quantities*". Proc. IEE, Vol. 118, No. 1, Enero 1971, págs. 153-160.

[UBUNTU]

En línea disponible: www.ubuntu.com

Referencias

[Tinney y Walker 1967]

Tinney W.F. y Walker J.W., "*Direct Solutions of Sparse Network Equations by Optimally Ordered Triangular Factorization*", Proceedings of IEEE, Vol. 55, Noviembre 1967, págs. 1801-1809.

[Tinney y Hart 1967]

Tinney W.F. y Hart C.E., "*Power Flow Solution by Newton's Method*", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-86, No. 11, Noviembre 1967, págs. 1449-1456.

[Usaola 1990]

Usaola-García J. , "Régimen Permanente de Sistemas Eléctricos de Potencia con Elementos No lineales Mediante un Procedimiento Híbrido de Análisis en los Dominios del Tiempo y de la Frecuencia", Tesis de Doctorado, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, 1990.

[VIM]

En línea disponible: www.vim.org

[Watson et al. 1987]

N.R. Watson, y J. Arrillaga, "*Frequency-Dependent System Equivalents for Harmonic Studies and Transient Converter Simulation*", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No.3, págs. 1196-1203, Julio 1987.

[Werler y Glavitsch 1993]

Werler K. y Glavitsch H., "*Computation of Transients by Parallel Processing*", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 3, Julio 1993.

[Wiberg 1973]

Wiberg D.M., "*Espacio de Estado y Sistemas Lineales*", Mc. Graw Hill. Colombia 1973.

[Wirth 1986]

Wirth N., "*Algoritmos y Estructuras de Datos*", Prentice Hall. México 1986.

[Wylie 1951]

Wylie C.R., "*Advanced Engineering Mathematics*", Mc. Graw Hill. Japón 1951.

[Zamora et al. 2005]

Zamora M.A., et al., "*Simulación de Sistemas Eléctricos*", Prentice Hall. España 2005.

[Zhou 1996]

Zhou E. Z.; "*Object-Oriented Programming, C++ Power System Simulation*". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No.1, Febrero 1996, págs. 206 – 215.

Referencias

[Zollenkopf 1975]

[Zuberak 2001]

Zuberak W.M., *"Analysis of Performance Limitations in Multithreaded Multiprocessor Architectures"*, *Proceedings of the Second International Conference on Application of Concurrency to System Design*, 2001.

Apéndice A

Ejecución de Programas con PVM y *Multithreading*

PVM

Para realizar la compilación de los programas escritos con PVM se generó una secuencia de comandos, denominada *script*, la cual se muestra a continuación

```
#!/bin/sh
source=$1
shift
echo $source
g++ -g -o $PVM_BIN/$source $PVM_SOURCE/$source.c -lm -lpvm3 -w
echo termine
echo Antonio Ramos Paz
echo U.M.S.N.H
```

Para utilizar este *script* se escribe desde la línea de comandos

```
./comp <nombre del archivo fuente>
```

Dado que PVM requiere que la tarea a ser realizada por las computadoras esclavas se encuentre en ellas, se generó un *script* con el objeto de transferir los programas esclavos a todas las computadoras esclavas, el cual es el siguiente,

```
rsync -avz ~/pvm3/ lc.fie.umich.mx:~/pvm3/
rsync -avz ~/pvm3/ 148.216.38.12:~/pvm3/
```

Una vez que se tiene compilado el programa maestro, el programa esclavo y éste a su vez se encuentra en todas las computadoras esclavas, la ejecución del programa se realiza de la siguiente manera,

```
./<nombre archivo maestro salida>
```

Multithreading

La manera de compilar los programas realizados con hilos es la siguiente. Desde la línea de comandos se escribe:

```
gcc <nombre del archivo fuente> -o <nombre del archivo de salida > -lm -lpthread
```

donde,

gcc: es el compilador

lm: es una directiva de compilación que incluye librerías de funciones matemáticas

lpthread: es una directiva de compilación que incluye librerías de funciones de multithreading

Una vez que se ha realizado la compilación, para la ejecución del programa es escribe desde la línea de comandos:

```
./<nombre de archivo de salida>
```


Apéndice B

La Tabla B.1 muestra el conjunto de computadoras que formaron la red heterogénea de computadoras utilizadas en este trabajo de Tesis. En la Tabla B.1 se muestra la dirección IP de cada una de las computadoras, el Sistema operativo utilizado por la computadora, la velocidad en MHz de cada máquina y la ubicación física de la computadora. Con el objeto de reconocer a las personalidades en el ámbito de la Ingeniería Eléctrica y de las Matemáticas que han contribuido de manera sustancial en esta Tesis, a cada una de las computadoras se les dio un nombre. También dentro de esta lista de nombres aparecen algunos matemáticos y físicos que en no personal admiro. Finalmente en esta lista aparecen los apellidos de los profesores que han colaborado de manera directa e indirecta en esta Tesis.

Tabla B.1 Red Heterogénea de Computadoras utilizada

Dirección IP	Nombre	Sistema Operativo	Velocidad (MHz)	Ubicación
148.216.38.22	LSC	LINUX/UBUNTU	794.675	Laboratorio de Sistemas Computacionales PIE
148.216.38.12	Gauss	LINUX/UBUNTU	794.675	Biblioteca PIE
148.216.17.23	LC	LINUX/UBUNTU	930.434	Laboratorio de Computación
148.216.17.71	Kirchhoff	LINUX/UBUNTU	794.675	Laboratorio de Computación
148.216.17.72	Newton	LINUX/UBUNTU	794.675	Laboratorio de Computación
148.216.17.73	Einstein	LINUX/UBUNTU	794.675	Laboratorio de Computación
148.216.17.74	Galois	LINUX/UBUNTU	794.675	Laboratorio de Computación
148.216.17.75	Volta	LINUX/UBUNTU	794.675	Laboratorio de Computación
148.216.17.76	Ampere	LINUX/UBUNTU	794.675	Laboratorio de Computación
148.216.17.77	Arquímedes	LINUX/UBUNTU	794.675	Laboratorio de Computación
148.216.17.78	Descartes	LINUX/UBUNTU	794.675	Laboratorio de Computación
148.216.17.79	Poincaré	LINUX/UBUNTU	794.675	Laboratorio de Computación
148.216.17.80	Semlyen	LINUX/UBUNTU	794.675	Laboratorio de Computación
148.216.17.81	Arrillaga	LINUX/UBUNTU	794.675	Laboratorio de Computación
148.216.17.82	Maxwell	LINUX/UBUNTU	794.675	Laboratorio de Computación
148.216.17.83	Pitágoras	LINUX/UBUNTU	794.675	Laboratorio de Computación
148.216.17.84	Fourier	LINUX/UBUNTU	794.675	Laboratorio de Computación
148.216.17.85	Tinney	LINUX/UBUNTU	794.675	Laboratorio de Computación
148.216.17.86	Pascal	LINUX/UBUNTU	794.675	Laboratorio de Computación
148.216.17.87	Medina	LINUX/UBUNTU	794.675	Laboratorio de Computación
148.216.17.88	Fuerte	LINUX/UBUNTU	794.675	Laboratorio de Computación
148.216.17.89	Barrera	LINUX/UBUNTU	794.675	Laboratorio de Computación
148.216.17.90	Rico	LINUX/UBUNTU	794.675	Laboratorio de Computación
148.216.17.91	Ramos-Yépez	LINUX/UBUNTU	794.675	Laboratorio de Computación
148.216.17.92	umsnh	LINUX/UBUNTU	794.675	Laboratorio de Computación
148.216.17.93	fie	LINUX/UBUNTU	794.675	Laboratorio de Computación
148.216.17.94	ivq	LINUX/UBUNTU	794.675	Laboratorio de Computación
148.216.17.95	biblioteca	LINUX/UBUNTU	794.675	Laboratorio de Computación