



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO**

**DIVISIÓN DE ESTUDIO DE POSGRADO DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN DINÁMICA DE
SISTEMAS DE POTENCIA CON FUENTES
RENOVABLES DE ENERGÍA MEDIANTE
MODELOS DE ORDEN REDUCIDO Y
ESTIMACIÓN DE ESTADO ARMÓNICO**

TESIS

Que para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

Presenta:

MC. Juan Manuel Verduzco Durán

Director de Tesis:

Dr. J. Aurelio Medina Ríos

Morelia, Michoacán, Agosto de 2025





**ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN DINÁMICA DE SISTEMAS DE
POTENCIA CON FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA MEDIANTE
MODELOS DE ORDEN REDUCIDO Y ESTIMACIÓN DE ESTADO
ARMÓNICO**

Los Miembros del Jurado de Examen de Grado aprueban la **Tesis de Doctorado en Ciencias en Ingeniería Eléctrica con Opción en Sistemas Eléctricos** de Juan Mnauel Verduzco Durán.

Dr. Alejandro Zamora Méndez
Presidente del Jurado

Dr. J. Aurelio Medina Rios
Director de Tesis

Dr. Norberto García Barriga
Vocal

Dr. Antonio Ramos Paz
Vocal

Dr. Fernando Martínez Cárdenas
Revisor Externo (ITM)

Dr. J. Aurelio Medina Rios
*Jefe de la División de Estudios de Posgrado
de la Facultad de Ingeniería Eléctrica. UMSNH
(Por reconocimiento de firmas)*

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
Agosto 2025

Agradecimientos

- Gracias, Dios, por los caminos compartidos y por los pasos que, con determinación, aún aguardan el amanecer.
- A mi familia, por su resiliencia y su presencia constante. A mi madre Julia Araceli Durán Ramírez, mi padre Juan Manuel Verduzco Ocaranza, mis hermanas, sobrinas, sobrino, y a todos los que han sido parte de mi vida.
- Agradezco al Dr. J. Aurelio Medina Ríos por su orientación durante el desarrollo de esta tesis. También, agradezco la colaboración de los Drs. Rafael Cisneros Magaña, Julio César Godínez Delgado y M.c. Rubén Rodríguez Flores, quienes han sido importante en diversas etapas de este trabajo de investigación. Juntos, a lo largo de este proyecto y las colaboraciones realizadas, hemos logrado la publicación de 2 artículos en revistas indexadas JCR y 8 presentaciones en conferencias internacionales como IEEE PESGM, IEEE TPEC, IEEE ROPEC e IEEE CONCAPAN.
- Al DEP-FIE de la UMSNH por su entorno académico y el acceso a sus instalaciones, que permitieron el desarrollo de esta investigación.
- A SECIHTI, por su apoyo financiero, que permitió el desarrollo de mi formación académica y profesional durante este proceso de aprendizaje.

Resumen

En esta tesis, se presentan dos enfoques eficientes para el análisis y monitoreo de sistemas de potencia en el dominio del tiempo, utilizando el modelado de orden reducido y la estimación del estado armónico, respectivamente. Ambos enfoques proporcionan herramientas digitales para reducir la complejidad del modelado de sistemas de potencia y fueron desarrollados de forma independiente.

Uno de estos enfoques es el desarrollo de un modelado de orden reducido basado en un equivalente de red dependiente de la frecuencia (FDNE, por sus siglas en inglés) dentro del marco de referencia del análisis de circuitos acompañantes (CCA, por sus siglas en inglés), diseñado para mejorar la eficiencia computacional en el análisis de fenómenos transitorios electromagnéticos de sistemas de potencia. El enfoque propuesto simplifica la representación del sistema de orden completo, tanto el área externa mediante el uso de un equivalente FDNE, como el área de estudio, que se modela detalladamente a través de modelos discretos de Norton utilizando el CCA. Además, se mejora la eficiencia del proceso de solución mediante la factorización de matrices dispersas con descomposición LU.

El modelo FDNE se implementa mediante una función racional en el dominio z , cuyos coeficientes son estimados utilizando un algoritmo de identificación de parámetros en el dominio del tiempo. La precisión del modelo FDNE para representar las características de admitancia dependientes de la frecuencia en los terminales del sistema se evalúa a través de un análisis de respuesta de frecuencias.

La eficiencia computacional del modelado de orden reducido del FDNE mediante CCA se evalúa en el dominio del tiempo, comparando los tiempos de cómputo con los modelos de orden completo que utilizan los enfoques de espacio de estado y CCA. Además, se compara con un modelo de orden reducido del FDNE usando el enfoque de espacio de estado. El análisis se realiza en diferentes sistemas de potencia bajo diversas condiciones de operación, incluyendo fallas en nodos y perturbaciones causadas por la integración de fuentes de energía renovable basadas en electrónica de potencia.

Por otro lado, la estimación de estado armónico se realiza mediante un filtro de Kalman y un método de identificación de distorsión armónica, lo que permite analizar el comportamiento dinámico del sistema de potencia con fuentes de generación eólica y cargas no lineales bajo diversas condiciones de operación, estimando las formas de onda

distorsionadas de voltaje y corriente en nodos no monitoreados, así como las entradas del sistema correspondientes a cualquier fuente de distorsión armónica en su punto de conexión con la red. Este enfoque reduce la complejidad del modelado al evitar la representación detallada de estas fuentes en el proceso de solución.

Los resultados obtenidos en los casos de estudio analizados se validan mediante la comparación con las respuestas del simulador PSCAD/EMTDC®.

Palabras clave. Análisis de circuitos acompañantes, análisis en el dominio del tiempo, equivalente de red dependiente de la frecuencia, estimación de estado armónico, filtro de Kalman, identificación de parámetros, modelado de orden reducido, respuesta de frecuencia, sistema de potencia, transitorios electromagnéticos.

Abstract

In this thesis, two efficient approaches to time-domain power system analysis and monitoring are presented, using reduced-order modeling and harmonic state estimation, respectively. Both approaches provide digital tools to reduce the complexity of power system modeling and were developed independently.

One such approach is the development of a reduced-order model based on a frequency-dependent network equivalent (FDNE) within the framework of companion circuit analysis (CCA), designed to improve computational efficiency in the analysis of electromagnetic transient phenomena of power systems. The proposed approach simplifies the representation of the full-order system, both the external area by using an FDNE equivalent, and the study area, which is modeled in detail through Norton discrete equivalent models using the CCA. Furthermore, the efficiency of the solution process is improved through sparse matrix factorization with LU decomposition.

The FDNE model is implemented by a rational function in the z -domain, whose coefficients are estimated using a parameter identification algorithm in the time domain. The accuracy of the FDNE model in representing the frequency-dependent admittance characteristics at the system terminals is evaluated through a frequency response analysis.

The computational efficiency of the reduced-order modeling of the FDNE using CCA is evaluated in the time domain, comparing the computation times with full-order models using the state-space and CCA approaches. Furthermore, it is compared with a reduced-order model of the FDNE using the state-space approach. The analysis is performed on different power systems under various operating conditions, including node failures and disturbances caused by the integration of renewable energy sources based on power electronics.

On the other hand, harmonic state estimation is performed using a Kalman filter and a harmonic distortion identification method, which allows for the analysis of the dynamic behavior of the power system with wind generation sources and nonlinear loads under various operating conditions, estimating the distorted voltage and current waveforms at unmonitored nodes, as well as the system inputs corresponding to any harmonic distortion source at its point of connection to the grid. This approach reduces modeling complexity by avoiding the detailed representation of these sources in the solution process.

The results obtained in the analyzed case studies are validated by comparison with the responses of the PSCAD/EMTDC[®] simulator.

Keywords. Companion circuit analysis, electromagnetic transients, frequency-dependent network equivalent, frequency response, harmonic state estimation, Kalman filter, parameter identification, power system, reduced-order modeling, time-domain analysis.

Contenido

Agradecimientos	III
Resumen	V
Abstract	VII
Contenido	IX
Lista de Figuras	XIII
Lista de Tablas	XVII
Lista de Acrónimos y Símbolos	XIX
Lista de Publicaciones	XXIII
1. Introducción	1
1.1. Introducción	1
1.1.1. Análisis de sistemas de potencia	1
1.1.2. Estimación de estado en sistemas de potencia	3
1.2. Revisión del estado del arte	4
1.2.1. Representación de sistemas de potencia mediante modelos equivalentes dinámicos	4
1.2.1.1. Equivalentes de alta frecuencia	5
1.2.2. Estimación de estado armónico	9
1.3. Justificación	11
1.4. Objetivos de la tesis	12
1.4.1. Objetivo general	12
1.4.2. Objetivos particulares	12
1.5. Metodología	14
1.6. Contribuciones principales	15
1.7. Descripción de capítulos	16
2. Modelado y Análisis de Sistemas de Potencia Usando Equivalentes Dinámicos y Técnicas Numéricas	19
2.1. Introducción	19
2.2. Equivalentes dinámicos	19
2.3. Modelo de orden reducido utilizando un equivalente de red dependiente de la frecuencia	20
2.4. FDNE basada en una función racional	21
2.5. Técnica de identificación de parámetros	22

2.5.1.	Adquisición de datos usando una señal de excitación	22
2.5.2.	Estimación de los coeficientes de la función racional	23
2.5.3.	Criterio de cumplimiento de estabilidad	24
2.5.4.	Criterio de cumplimiento de pasividad	24
2.5.5.	Algoritmo de identificación de parámetros	25
2.6.	Respuesta de frecuencia del sistema de potencia	28
2.7.	Métodos de representación de sistemas de potencia	28
2.7.1.	Modelo de espacio de estado	29
2.7.2.	Análisis de circuito acompañante	29
2.8.	Solución de sistemas de potencia por técnicas numéricas	30
2.9.	Formulación unificada de un modelo de orden reducido FDNE discreto en el marco de referencia de CCA	30
2.9.1.	FDNE discreto conectado al área de estudio a través del nodo frontera aplicando el CCA	32
2.9.2.	Proceso de aplicación del método combinado CCA _{FDNE} -LU	34
2.10.	Configuración de la división entre el área de estudio y el área externa en el modelo equivalente	36
2.11.	Conclusiones	37
3.	Análisis de Respuesta de Frecuencia Utilizando FDNE e Implementación en el Dominio del Tiempo	39
3.1.	Introducción	39
3.2.	Evaluación de respuesta de frecuencia en sistemas de potencia	40
3.2.1.	Respuesta de frecuencia del sistema de prueba de 3 nodos	41
3.2.2.	Respuesta de frecuencia del sistema de prueba de 5 nodos	42
3.2.3.	Respuesta de frecuencia del sistema de la Isla Sur de Nueva Zelanda	44
3.3.	Modelo de orden reducido aplicado al sistema de prueba modificado de dos áreas de Kundur	46
3.3.1.	Respuesta de frecuencia del sistema de prueba de dos áreas de Kundur modificado	47
3.3.2.	Fallas monofásica y trifásica en el sistema de prueba de Kundur modificado usando un modelo de orden reducido	48
3.3.3.	Evaluación de la precisión y tiempo de CPU: Sistema de prueba de dos áreas de Kundur modificado	52
3.4.	Conclusiones	53
4.	Aplicación del Modelo de Orden Reducido Basado en FDNE para Sistemas de Potencia	57
4.1.	Introducción	57
4.2.	Caso de estudio 4.2: Análisis de transitorios electromagnéticos ante falla monofásica a tierra en sistemas modificado del IEEE de 118 nodos	59
4.2.1.	Respuesta de frecuencia del sistema de prueba de IEEE de 118 nodos modificado	61
4.2.2.	Eficiencia computacional de la representación mediante modelos equivalentes en la solución del sistema modificado IEEE de 118 nodos	63

4.2.3.	Evaluación en el dominio del tiempo del modelado de orden reducido del FDNE aplicado al sistema de prueba de IEEE de 118 nodos modificado	64
4.2.4.	Análisis de resultados de precisión del modelado de orden reducido del FDNE aplicado al sistema de prueba de IEEE de 118 nodos modificado	67
4.3.	Caso de estudio 4.3: Análisis de distorsión armónica en sistema modificado del IEEE de 30 nodos	68
4.3.1.	Respuesta de frecuencia del sistema de prueba de IEEE de 30 nodos modificado	69
4.3.2.	Eficiencia computacional del sistema de prueba de IEEE de 30 nodos modificado: Representación de modelos equivalente y tiempos de CPU	71
4.3.3.	Evaluación de precisión del modelo de orden reducido del FDNE aplicado al sistema de prueba de IEEE de 30 nodos modificado	72
4.4.	Caso de estudio 4.4: Análisis de transitorio electromagnético ante condiciones de falla en sistema IEEE de 30 nodos modificado con integración de WECS	75
4.4.1.	Eficiencia computacional del sistema de prueba trifásico IEEE de 30 nodos modificado: Representación de modelos equivalente y tiempos de CPU	77
4.4.2.	Análisis de transitorios ante la presencia de fallas trifásicas a tierra en sistema de prueba trifásico IEEE de 30 nodos modificado utilizando el método $CCA_{FDNE-LU}$	79
4.4.3.	Análisis de distorsión armónica en el área de estudio	85
4.4.4.	Evaluación de precisión del $CCA_{FDNE-LU}$ aplicado al sistema de prueba trifásico de IEEE de 30 nodos modificado	86
4.5.	Conclusiones	90
5.	Análisis y Evaluación de Estimación de Estado Armónico	93
5.1.	Introducción	93
5.2.	Formulación para la evaluación de estimación de estado	94
5.2.1.	Estimación de estado: Método del filtro de Kalman	94
5.2.2.	Identificación de fuentes de distorsión armónica	96
5.3.	Caso de estudio de estimación de estado en sistemas de potencia	98
5.3.1.	Caso de estudio 5.3.1: Evaluación de la estimación de estado en un sistema de potencia con un parque eólico y una carga no lineal	100
5.4.	Conclusiones	105
6.	Conclusiones Generales y Trabajos Futuros	107
6.1.	Conclusiones generales	107
6.2.	Trabajos futuros	110
A.	Modelo de Identificación de Parámetros	113
A.1.	Señal de excitación multiseno	113
A.2.	Estimación de parámetros usando RLS	114
B.	Método de Factorización Matricial	117

C. Elementos del sistema de potencia	119
C.1. Modelo del aerogenerador tipo 4	120
C.2. Modelo del sistema de potencia en PSCAD	122
Referencias	125

Lista de Figuras

2.1. Esquema del modelo de orden reducido con área de estudio y área externa conectadas en un solo puerto.	20
2.2. Diagrama de flujo general del algoritmo de identificación de parámetros. . .	26
2.3. Esquema de un modelo de orden reducido basado en FDNE discreto multi-puerto.	31
2.4. Esquema del FDNE conectado al nodo frontera.	33
2.5. Diagrama de flujo del proceso de solución del método $CCA_{FDNE-LU}$ propuesto. .	35
3.1. Sistema de prueba de 3 nodos.	42
3.2. Respuesta de frecuencia del sistema de prueba de 3 nodos, visto desde del nodo 1: a) Magnitud, b) Fase.	42
3.3. Sistema de prueba de 5 nodos.	43
3.4. Respuesta de frecuencia del sistema de prueba de 5 nodos, visto desde del nodo 2: a) Magnitud, b) Fase.	43
3.5. Sistema de prueba de la Isla Sur de Nueva Zelanda.	44
3.6. Respuesta de frecuencia del sistema de prueba de la Isla Sur de Nueva Zelanda, vista desde el nodo T220: a) Magnitud, b) Fase.	45
3.7. Sistema de potencia de prueba de dos áreas de Kundur modificado: a) Modelo del área de estudio, b) Modelo del área externa.	47
3.8. Respuesta de frecuencia del sistema de prueba de dos áreas de Kundur modificado, vista desde el nodo frontera: a) Magnitud, b) Fase.	48
3.9. Generador eólico tipo 4: a) Fluctuaciones del viento, b) Potencia activa y c) Detalle de los transitorios por fallas propuestas.	49
3.10. Sistema de prueba de dos áreas de Kundur: a) Voltaje en el nodo 8 con una vista ampliada en b) y c).	50
3.11. Sistema de prueba de dos áreas de Kundur: a) Flujo de potencia activa desde el nodo frontera hasta el nodo 9 con un enfoque detallado en b) y c).	51
3.12. Sistema de prueba de dos áreas de Kundur: a) Generación de potencia activa por el generador 1 con una vista cercana en b) y c).	51
3.13. Sistema de prueba de dos áreas de Kundur: a) Efecto del modelo reducido sin FDNE en el flujo de potencia activa desde el nodo frontera hasta el nodo 9; vistas ampliadas en b) y c).	52

4.1. Sistema de potencia de prueba de IEEE de 118 nodos modificado bajo condiciones de falla: a) Área externa para reducir, b) Área de estudio, c) Reducción a través del enfoque FDNE.	60
4.2. Respuesta de frecuencia en el puerto 2 del sistema de prueba de IEEE de 118 nodos modificado: a) Magnitud y b) Fase.	62
4.3. Forma de onda de voltaje en el nodo 95 durante la doble falla monofásica en el rango de tiempo entre 0.1 y 0.2 s y 0.3 a 0.4 s.	65
4.4. Forma de onda de voltaje en el nodo 102 aplicando doble falla monofásica en el rango de tiempo entre 0.1 y 0.2 s y 0.3 a 0.4 s.	66
4.5. Forma de onda de corriente de rama de 94-100, bajo doble falla monofásica.	66
4.6. Sistema de prueba de IEEE de 30 nodos modificado bajo distorsión armónica: a) Área externa a reducir mediante el enfoque FDNE, b) Área de estudio.	69
4.7. Respuesta de frecuencia en el puerto 2 del sistema de prueba de IEEE de 30 nodos modificado: a) Magnitud, b) Fase.	70
4.8. Comparación de la respuesta de voltaje en el nodo 3: a) Forma de onda, b) Espectro armónico.	74
4.9. Comparación de la respuesta de corriente en la rama de 1-3: a) Forma de onda, b) Espectro armónico.	75
4.10. Sistema de prueba trifásico IEEE de 30 nodos modificado: a) Área externa, b) Área de estudio, c) WECS.	77
4.11. Sistema de prueba trifásico IEEE de 30 nodos modificado, aplicando un modelo de orden reducido y su matriz equivalente en cada enfoque: a) SSM _{FDNE} , b) CCA _{FDNE} , c) Matriz L, d) Matriz U.	78
4.12. Configuración de operación de WECS: a) Fluctuaciones del viento, b) Torques mecánicos y eléctricos, c) Enlace de voltaje en corriente directa (CD).	80
4.13. Voltaje en el nodo 5 bajo condiciones de falla: a) Forma de onda 2.3-2.65 s, b) Vista detallada 2.30-2.32 s.	81
4.14. Forma de onda de corriente de rama 2-4: a) Forma de onda 2.3-2.7 s, b) Forma de onda 0-1.6 s.	81
4.15. Forma de onda de voltaje en el puerto 4: a) Forma de onda 2.3-2.7 s, b) Forma de onda 0-0.1 s.	82
4.16. Forma de onda de corriente desde el puerto 4 hasta el nodo 4: a) Forma de onda 2.3-2.65 s, b) Forma de onda 2.27-2.3 s.	82
4.17. Comparación entre el modelo reducido FDNE-omitido, PSCAD/EMTDC® y las respuestas CCA _{FDNE} -LU para la forma de onda de corriente desde el puerto 4 hasta el nodo 4.	83
4.18. Flujo de potencia activa desde el puerto 2 hasta el nodo 6.	84
4.19. Transferencia de flujo de potencia activa desde el WCES hacia el PCC.	84
4.20. Voltaje en el nodo 3: a) Forma de onda, b) Espectro armónico.	85
4.21. Corriente de rama 4-6: a) Forma de onda, b) Espectro armónico.	86
5.1. Algoritmo TDHSE basado en el filtro Kalman.	95
5.2. Sistema de prueba modificado de la Isla Sur de Nueva Zelanda con integración de un parque eólico y una carga no lineal.	98
5.3. Potencia activa estimada en el PCC del parque eólico mediante TDHSE.	101

5.4. Voltaje del nodo T220: a) Forma de onda, b) Espectro armónico (fase C). .	101
5.5. Corriente inyectada desde el parque eólico al PCC: a) Forma de onda, b) Espectro armónico.	102
5.6. Corriente de carga no lineal desbalanceada: a) Forma de onda, b) Espectro armónico (fase A).	103
5.7. Corriente de rama I220-R220: a) Forma de onda, b) Espectro armónico (fase B).	104
A.1. Esquema de energización de un nodo frontera.	114
C.1. Esquema de un WECS basado en un aerogenerador tipo 4 conectado al sistema de potencia.	121
C.2. Esquema del área de estudio del sistema de prueba IEEE de 30 nodos en el simulador PSCAD/EMTDC®	123

Lista de Tablas

3.1. MSE del sistema de prueba de 3 nodos.	41
3.2. MSE del sistema de prueba de 5 nodos.	44
3.3. MSE del sistema de la Isla Sur de Nueva Zelanda.	45
3.4. MSE del sistema de prueba de dos áreas de Kundur modificado.	48
3.5. Parámetros de falla del sistema de prueba de dos áreas de Kundur.	48
3.6. Error relativo (%) del sistema de prueba de dos áreas de Kundur modificado.	53
3.7. Tiempos de CPU (s) del sistema de prueba de dos áreas de Kundur modificado.	53
4.1. MSE de la respuesta en frecuencia en los puertos del sistema de prueba de IEEE de 118 nodos modificado.	62
4.2. Representación de variables de estado del sistema de prueba de IEEE de 118 nodos modificado.	63
4.3. Tiempos de CPU (s) del sistema de prueba de de IEEE de 118 nodos modificado.	64
4.4. Parámetros de falla del sistema de prueba de IEEE de 118 nodos modificado.	65
4.5. Error relativo (%) del sistema de prueba de IEEE 118 nodos modificado.	67
4.6. MSE de la respuesta en frecuencia en los puertos del sistema de prueba de IEEE de 30 nodos modificado.	70
4.7. Representación de variables de estado del sistema de prueba de IEEE de 30 nodos modificado.	71
4.8. Tiempos de CPU (s) del sistema de prueba de de IEEE de 30 nodos modificado.	72
4.9. Componentes de corriente armónica inyectada en los nodos 3 y 8 (p.u.).	73
4.10. Representación de variables de estado obtenidas mediante modelado en el dominio del tiempo.	78
4.11. Tiempo de ejecución de CPU (s) del sistema de prueba trifásico IEEE de 30 nodos modificado.	79
4.12. Parámetros de falla del sistema de prueba trifásico de IEEE de 30 nodos modificado.	80
4.13. Error relativo (%) de los métodos de solución.	87
4.14. Resumen de desempeño del CCA _{FDNE} -LU en términos de representación, tiempo de CPU y precisión, comparado con los métodos SSM _{FDNE} -BF, SSM-BF y CCA _{RT} -LU.	89
C.1. Modelos del inductor y del capacitor en el dominio del tiempo: SSM y CCA _{RT}	119

C.2. Modelo de la rama RL en serie en el dominio del tiempo: SSM y CCA _{RT} . . .	120
C.3. Modelo del aerogenerador tipo 4.	122

Lista de Acrónimos y Símbolos

Alternative Transients Program	ATP
Amplitud de la k-ésima componente de frecuencia	A_k
Brute force	BF
Capacitancia (Faradio)	C
Coeficientes del denominador	a_i
Coeficientes del numerador	b_i
Companion-Circuit Analysis	CCA
Conductancia equivalente	g
Corriente en el dominio del tiempo del modelo estimado	$\hat{i}(t)$
Corriente alterna	CA
Corriente constante del nodo frontera en el dominio del tiempo	$i_b(t)$
Corriente constante del nodo frontera en forma de fasor	$I_b \angle \delta_b$
Corriente de fuente de distorsión armónica	i_{nl}
Corriente de la fuente controlada	$i_{int}(t)$
Corriente de rama RL en serie	$i_{RL}(t)$
Corriente de salida del FDNE en el dominio del tiempo	$i_f(t)$
Corriente directa	CD
Corriente en el dominio del tiempo	$i(t)$
Ecuaciones algebraicas ordinarias	EAO
Ecuaciones diferenciales ordinarias	EDO
ElectroMagnetic Transients	EMT
ElectroMagnetic Transients including DC	EMTDC
Error cuadrático medio	e_{rms}
Factor de ponderación	γ
Fase de la k-ésima componente de frecuencia	α_k
Frecuencia angular	ω
Frecuencia de la k-ésima componente de frecuencia	f_k
Frecuencia del sistema	f
Frecuencia máxima	f_{max}
Frequency-Dependent Network Equivalent	FNDE
Función racional de admitancia en el dominio z	$Y(z)$
Ganancia de KF	$\mathbf{K}_k$
Ganancia de RLS	K^{RLS}
High Voltage Direct Current	HVDC

Índice de la muestra	k
Inductancia (Henrio)	L
Least Square	LS
Ley de Corrientes de Kirchhoff	LCK
Ley de voltajes de Kirchhoff	LVK
Lower-Upper	LU
Matriz de admitancia en la frecuencia	$\mathbf{Y}_f$
Matriz de conductancias equivalentes	$\mathbf{G}$
Matriz de covarianza de error de estimación inicial KF	$\mathbf{P}_0$
Matriz de covarianza de error de estimación KF	$\mathbf{P}$
Matriz de covarianza de medición	$\mathbf{R}$
Matriz de covarianza de proceso	$\mathbf{Q}$
Matriz de covarianza de RLS	$\mathbf{P}^{RLS}$
Matriz de entrada	$\mathbf{B}$
Matriz de entrada aumentado	$\mathbf{B}_{new}$
Matriz de entrada discreta	$\mathbf{G}_d$
Matriz de estado aumentado	$\mathbf{A}_{new}$
Matriz de estado	$\mathbf{A}$
Matriz de impedancia en la frecuencia	$\mathbf{Z}_f$
Matriz de medición de RLS	$\mathbf{X}$
Matriz de medición discreta	$\mathbf{H}$
Matriz de salida	$\mathbf{C}$
Matriz de salida aumentado	$\mathbf{C}_{new}$
Matriz de transición de estado discreta	$\mathbf{F}$
Modelo equivalente discreto de Norton	MEDN
Número de componentes de frecuencia	M_f
Número de fuentes de voltaje	r
Número de mediciones	m
Número de puertos	M
Número de variables de estados desconocidas	l
Número de variables de estados originales	h
Número entero asociado a la k-ésima componente de frecuencia	l_k
Número total de muestra	N
Operador de Laplace (funciones de tiempo continuo)	s
Operador de transformada Z (funciones de tiempo discreto)	z
Orden del modelo	n
Paso de frecuencia	Δ_f
Paso del tiempo	Δt
Point of Common Coupling	PCC
Polinomio característico en el dominio z	$P(z)$
Por unidad	p.u.
Potencia activa	P_b
Potencia reactiva	Q_b
Power Systems Computer Aided Design	PSCAD
Recursive Least Square	RLS
Regla trapezoidal	RT

Resistencia (ohm)	R
Root Mean Square	RMS
Señal multisenso en el dominio del tiempo	$x_f(t)$
State-Space Model	SSM
Submatriz de $\mathbf{B}$ asociada a fuentes de corriente	$\mathbf{B}_{ea}$
Submatriz de $\mathbf{B}$ asociada a fuentes de voltaje	$\mathbf{B}_{nl}$
Tiempo total de simulación	T_{max}
Tiempo	t
Total Harmonic Distortion	TDH
Transformada z de la corriente	$I(z)$
Transformada z del voltaje	$V(z)$
Transient Stability Analysis	TSA
Umbral de error	ϵ
Vector de voltaje nodal en la frecuencia	$\mathbf{V}_f$
Vector de corriente no lineales	$\mathbf{i}_{nl}$
Vector de corriente nodal en la frecuencia	$\mathbf{I}_f$
Vector de entrada	$\mathbf{u}$
Vector de estado	$\mathbf{x}$
Vector de estado aumentado	$\mathbf{x}_{new}$
Vector de estado estimado	$\hat{\mathbf{x}}$
Vector de estado inicial	$\mathbf{x}_0$
Vector de fuente de corriente de historia pasada	$\mathbf{I}_H$
Vector de fuente de corriente externa	$\mathbf{i}$
Vector de medición de RLS	ϕ
Vector de medición KF	$\mathbf{z}$
Vector de parámetros	θ
Vector de ruido aleatorio	ν
Vector de ruido de medición	$\mathbf{r}$
Vector de ruido de proceso	$\mathbf{w}$
Vector de salida	$\mathbf{y}$
Vector de salida aumentado	$\mathbf{y}_{new}$
Vector de voltaje nodal	$\mathbf{v}$
Voltaje de generador	e_a
Voltaje del nodo frontera en el dominio del tiempo	$v_b(t)$
Voltaje del nodo frontera en forma de fasor	$V_b \angle \theta_b$
Voltaje en el dominio del tiempo	$v(t)$
Wind Energy Conversion System	WECS

Lista de Publicaciones

Artículos publicados en revista indexadas por JCR:

1. J. M. Verduzco-Durán, A. Medina and R. Cisneros-Magaña, “Time-domain harmonic state estimation of three-phase power networks including wind generation sources,” *Electrical Engineering*, vol. 107, 2024, p.p. 3391–3402, doi: 10.1007/s00202-024-02711-2.
2. J. Tapia-Tinoco, A. Medina, J. Verduzco-Durán and R. Cisneros-Magaña, “Real-time harmonic state estimation of power systems using optimal placement of measurement devices through RT-LAB implementation,” *Electrical Engineering*, vol. 106, 2024, p.p. 6409–6421. <https://doi.org/10.1007/s00202-024-02391-y>.

Artículos de conferencia indexados por el ISI Thompson:

1. J. M. Verduzco-Durán, A. Medina-Rios and N. M. Salgado-Herrera, “State-Space Model of the Wind Energy Conversion System Integrated to Power Grid Using Type-4 Wind Turbine/PMSG,” *2020 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, Ixtapa, Mexico, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/ROPEC50909.2020.9258686.
2. J. Verduzco-Durán, A. Ramos-Paz, A. Medina-Rios and R. Cisneros-Magaña, “Power Systems Frequency Response using Frequency Dependent Network Equivalent based on a Rational Function in the z-domain,” *2023 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, Ixtapa, Mexico, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/ROPEC58757.2023.10409461.
3. J. Verduzco-Durán, A. Medina-Rios, J. C. Godinez-Delgado, R. Cisneros-Magaña and A. Ramos-Paz, “Assessment of Power Quality Adverse Phenomena in Power Systems Using Frequency Dependent Network Equivalent and Companion-Circuit Analysis,” *2024 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC)*, College Station, TX, USA, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/TPEC60005.2024.10472287.
4. J. M. Verduzco-Durán, A. Medina-Rios, A. Ramos-Paz, R. Cisneros-Magaña and J. C. Godinez-Delgado, “Electromagnetic Transient Analysis Using a Frequency Dependent Network Equivalent for Power Systems Integrating Wind Generation Sources,” *2024 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, Seattle, WA, USA, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/PESGM51994.2024.10688470.

5. J. M. Verduzco-Duran, J. Cesar Godinez-Delgado, A. Medina-Rios and R. Cisneros-Magaña, “An efficient and accurate technique for the reduction of power systems based on discrete equivalent frequency-dependent model,” 2024 IEEE 42nd Central America and Panama Convention (CONCAPAN XLII), San Jose, Costa Rica, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/CONCAPAN63470.2024.10933850.
6. J. M. Verduzco-Durán, R. Rodríguez-Flores, A. Medina-Rios, R. Cisneros-Magaña, J. C. Godinez-Delgado and J. G. Guzmán-Pérez, “Time-Domain Harmonic State Estimation of Unbalanced Three-Phase Power Networks with Nonlinear Electrical Load Using the Kalman Filter,” 2024 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), Ixtapa, Mexico, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/ROPEC62734.2024.10876958.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

El análisis eficiente de sistemas de potencia requiere técnicas avanzadas para representar y monitorear su comportamiento dinámico. El trabajo de investigación reportado en esta tesis aborda estos dos aspectos a través del desarrollo e implementación de equivalentes dinámicos y estimación de estado, respectivamente. La representación de un sistema de potencia mediante un modelo matemático basado en equivalentes dinámicos permite analizar su comportamiento dinámico, simplificando el modelado del sistema y reduciendo significativamente la carga computacional, manteniendo una adecuada precisión. En este enfoque, el sistema de potencia se divide en dos áreas: el área de estudio, correspondiente a la región de interés, donde se modelan en detalle los elementos que la conforman; y el área externa, que representa el resto del sistema, sustituida por una estructura equivalente. Por otra parte, la estimación de estado permite evaluar las condiciones reales del sistema de potencia utilizando un conjunto limitado o parcial de dispositivos de medición y el modelo del sistema, siendo una herramienta fundamental para controlar y operar la red eléctrica, al estimar las variables de estado que no son monitoreadas directamente.

1.1.1. Análisis de sistemas de potencia

La representación de sistemas de potencia en el dominio del tiempo, permite obtener adecuadamente modelos detallados para la evaluación de su comportamiento dinámico

[Subedi *et al.*, 2021]. Cabe destacar que este tipo de análisis de sistemas de potencia presenta inconvenientes debido al constante incremento de cargas eléctricas, fuentes de energía renovable, entre otros [Shah *et al.*, 2021]. Estos cambios en la estructura topológica y operación de los sistemas de potencia generan una variedad de fenómenos dinámicos, tales como transitorios electromecánicos y transitorios electromagnéticos. En particular, la evaluación de fenómenos transitorios se ha abordado utilizando dos enfoques principales: el análisis de estabilidad transitoria (TSA, por sus siglas en inglés), que se utiliza para simulaciones de transitorios electromecánicos, y el análisis de transitorios electromagnéticos (EMT, por sus siglas en inglés), que permite simular en un amplio rango de frecuencias [Annakkage *et al.*, 2012].

Por ejemplo, el enfoque TSA se implementa para el análisis de oscilaciones de bajas frecuencias (0 a 5 Hz) utilizando ecuaciones diferenciales en elementos electromecánicos y ecuaciones algebraicas (modelos fasoriales) para las líneas de transmisión. Esta configuración permite modelar sistemas de potencia de gran escala con un paso de integración grande. Sin embargo, no conserva la dinámica de transitorios de alta frecuencia. El TSA se utiliza para analizar problemas de estabilidad transitoria, determinando si el sistema de potencia alcanza su estado estable después de experimentar una o varias condiciones de falla. Por otra parte, las herramientas EMT utilizan modelos detallados de todos los elementos del sistema de potencia a través de ecuaciones diferenciales. Sin embargo, este enfoque utiliza un paso de integración pequeño, alrededor de $50 \mu\text{s}$, lo que conlleva a una mayor carga computacional, limitando el tamaño y tiempo de simulación de los sistemas de potencia. Los simuladores EMT permiten analizar una amplia gama de fenómenos, como transitorios de alta frecuencia y armónicos generados por componentes de electrónica de potencia, así como condiciones de funcionamiento desequilibradas, entre otros [Lin *et al.*, 2009, Liang *et al.*, 2011].

Los enfoques de TSA y EMT operan bajo determinadas limitaciones que establecen las condiciones para evaluar el comportamiento dinámico de los sistemas de potencia, proporcionando respuestas adecuadas en sus respectivos análisis. Sin embargo, en el contexto de sistemas de potencia de gran escala, es importante realizar un análisis detallado del comportamiento dinámico, debido a la amplia variedad de fenómenos transitorios dinámicos que se presentan en estos sistemas [Subedi *et al.*, 2021]. Esto implica la necesidad de utilizar

métodos y técnicas computacionales avanzadas para abordar los desafíos de su modelado complejo y la alta carga computacional requerida.

Para abordar estos problemas, en la literatura se han presentado varias propuestas de investigación basadas en técnicas de equivalentes dinámicos [Annakkage *et al.*, 2012, Subedi *et al.*, 2021]. Estas técnicas, que inicialmente surgieron como una solución a las limitaciones computacionales en términos de memoria y velocidad de procesamiento, siguen siendo relevantes hoy en día con los avances tecnológicos y las mejoras en la capacidad computacional, debido a que simplifican el análisis de sistemas de potencia complejos y reducen significativamente la carga computacional [Sowa y Zychma, 2022].

1.1.2. Estimación de estado en sistemas de potencia

La creciente expansión de las fuentes de generación eólica en los sistemas de potencia, debido a sus ventajas ambientales y sostenibilidad, presenta desafíos relacionados con fenómenos adversos de calidad de energía, así como con la variabilidad e intermitencia en la generación, entre otros [Ahmed *et al.*, 2020]. Estos aspectos requieren monitoreo y control de los sistemas de potencia bajo estándares técnicos para garantizar una operación confiable y estable. Sin embargo, el monitoreo global del sistema presenta restricciones económicas y técnicas que limitan la cantidad de medidores disponibles, cuyos datos pueden verse afectados por ruido y errores, siendo necesario la implementación de estimación de estado como una herramienta crucial para abordar estos desafíos [Simon, 2006, Cisneros-Magaña *et al.*, 2022]. En este contexto, la estimación de estado se ha ampliado para incluir fenómenos relacionados con la calidad de la energía, lo que dio origen a la estimación de estado de calidad de energía (PQSE, por sus siglas en inglés). Este enfoque incluye tres categorías principales: estimación de estado armónico (HSE, por sus siglas en inglés), estimación de estado transitorio (TSE, por sus siglas en inglés) y estimación de estado ante depresiones de voltaje (VSSE, por sus siglas en inglés) [Farzanehrafat y Watson, 2013]. Este trabajo de investigación se orienta a la estimación de estado armónico en el dominio del tiempo (TDHSE, por sus siglas en inglés), mediante el uso del filtro de Kalman (KF, por sus siglas en inglés), para abordar la distorsión armónica causada por fuentes de generación eólicas y cargas no lineales en sistemas de potencia, con

el objetivo de evaluar y mitigar sus efectos en la operación del sistema de potencia para garantizar su estabilidad.

1.2. Revisión del estado del arte

1.2.1. Representación de sistemas de potencia mediante modelos equivalentes dinámicos

En el análisis de sistemas de potencia de gran escala, el desarrollo de modelos equivalentes dinámicos se ha establecido como una alternativa fundamental. Estos modelos permiten una representación detallada de un área específica (área de estudio) del sistema de potencia, mientras que el resto del sistema (área externa) se simplifica utilizando un equivalente dinámico [Annakkage *et al.*, 2012]. De esta forma, la complejidad de estos sistemas puede disminuirse significativamente al implementar un modelo de orden reducido, lo que resulta en una reducción del tiempo total de cálculo y manteniendo una precisión adecuada [Sowa y Zychma, 2022].

En el análisis convencional de sistemas de potencia, el modelo de equivalente más simple reportado en la literatura, generalmente se obtiene a través de impedancias de cortocircuito a frecuencia fundamental [Watson y Arrillaga, 2007, Sowa y Zychma, 2022]. De esta manera se describe en los libros de texto el equivalente Thevenin o su dual, equivalente Norton [Grainger y Stevenson, 1994]. Para estudios convencionales de fallas, esta aproximación se considera suficientemente adecuada. Sin embargo, para estudios que consideran frecuencias distintas a la fundamental, así como la operación dinámica de la red eléctrica, el uso de este tipo de equivalentes es inadecuado, debido a que puede introducir errores significativos en la respuesta dinámica del sistema de potencia analizado.

Para analizar adecuadamente el amplio rango de frecuencias en sistemas de potencia, es necesario utilizar modelos de equivalentes dinámicos que capturen la dinámica de fenómenos específicos [Annakkage *et al.*, 2012]. En esta investigación, se emplea un modelo de orden reducido a través de un equivalente de altas frecuencias para representar el área externa, lo que permite capturar fenómenos transitorios electromagnéticos, reduciendo la complejidad del modelado y la carga computacional. Este enfoque permite realizar un

análisis eficiente del comportamiento dinámico del sistema de potencia al reducir el tiempo de procesamiento de simulación, manteniendo una precisión adecuada en la respuesta transitoria del sistema.

1.2.1.1. Equivalentes de alta frecuencia

A finales de la década de 1960, se inició la investigación sobre un modelo de orden reducido para analizar fenómenos electromagnéticos, basado en equivalentes de red dependiente de la frecuencia (FDNE, por sus siglas en inglés). Generalmente, los FDNE se utilizan para aproximar las características de admitancia dependientes de la frecuencia vistas desde cualquier terminal de red y se pueden modelar mediante un circuito de parámetros agrupados o una función racional [Annakkage *et al.*, 2012, Subedi *et al.*, 2021].

Hingorani y Burbery fueron pioneros en la investigación de modelos de circuitos de parámetros agrupados, que propone un circuito equivalente RLC que representa la dependencia de la frecuencia de un sistema de corriente alterna (CA) para estudios de sistemas de corriente continua de alto voltaje (HVDC, por sus siglas en inglés) [Hingorani y Burbery, 1970]. Se continuó proponiendo trabajos de investigación de FDNE basado en circuitos de parámetros agrupados. En [Bowles, 1970] se presenta un circuito equivalente simple, en comparación con el modelo de [Hingorani y Burbery, 1970], para el análisis de interconexiones de sistemas CA y corriente directa (CD). Este modelo representa de manera adecuada la respuesta del sistema de potencia hasta el quinto orden armónico. Por otro lado, se propone un modelo basado en un método iterativo para la determinación de los parámetros de las ramas en paralelo RLC que conforman el equivalente, como se describe en [Morched y Brandwajn, 1983]. En [Gavrilovic y QueDo, 1984] se presenta un método iterativo que simplifica la representación de equivalentes de circuitos de parámetros agrupados RLC utilizando el método de mínimos cuadrados. Las respuestas obtenidas mediante estas propuestas coinciden con el comportamiento del sistema de potencia de orden completo en un amplio rango de frecuencias.

En [Watson y Arrillaga, 1988] fue retomada la propuesta de Hingorani y Hurbery. Se le aplicaron técnicas de optimización para mejorar la respuesta del equivalente a bajas frecuencias. Sin embargo, esto resultó en una discrepancia en su respuesta a altas frecuencias; lo

cual corrigió de manera limitada mediante la adición de ramas RLC adicionales en los rangos de frecuencias de mayores desviaciones. En una contribución posterior [Medina *et al.*, 1990], se propuso un método iterativo para la sintonización de los parámetros R, L y C de las ramas del circuito equivalente obteniéndose una buena aproximación de las impedancias dependientes de la frecuencia de la red eléctrica trifásica, vistas desde el punto de interés.

Por otro lado, la implementación de FDNE representado por una función racional se ha desarrollado en los dominios s o z [Ubolli y Gustavsen, 2011], mediante técnicas basadas en estructuras formadas por polinomios o en sumas de fracciones parciales (reubicación de polos o ajuste vectorial), con el objetivo de ajustar la función racional en un rango de frecuencia de interés [Ubolli y Gustavsen, 2012, Gustavsen y De Silva, 2013].

En [Girgis *et al.*, 1990, Girgis *et al.*, 1993] se describe un método para estimar la impedancia de la red eléctrica vista desde un nodo específico utilizando técnicas de identificación de parámetros por mínimos cuadrados para estimar la función racional en el dominio z . En [Girgis *et al.*, 1990], se obtiene la impedancia de una red monofásica, y en [Girgis *et al.*, 1993], el método se extiende a redes trifásicas para el diseño y análisis de filtros armónicos. En [Qiu *et al.*, 1993], se muestra la representación del área externa mediante un modelo de orden reducido multipuerto, ampliando los métodos descritos en [Girgis *et al.*, 1990, Girgis *et al.*, 1993].

En [Abur y Singh, 1993, Singh y Abur, 1995], se presenta un FDNE basado en una función racional para modelar el área externa en el dominio discreto, utilizado en simulaciones EMT. Este modelo se obtiene mediante la identificación de parámetros con el método de mínimos cuadrados y se emplea para representar sistemas externos de un solo puerto y multipuerto. En [Hong y Park, 1995], se presenta un modelo equivalente del sistema externo utilizando el análisis de Prony para identificar su función racional.

El ajuste vectorial es una técnica para aproximar una función racional en forma de fracciones parciales [Gustavsen y Semlyen, 1999]. Se formula mediante dos etapas resolviendo el problema como un sistema lineal utilizando el método de mínimos cuadrados. En la primera etapa, se identifican los polos iniciales y se determinan nuevos polos. En la segunda etapa, se utilizan estos polos calculados para obtener los residuos, logrando así una aproximación adecuada de la función. Este enfoque ha sido desarrollado y apli-

cado en diversas investigaciones, como se reporta en [Gustavsen, 2002, Gustavsen, 2006, Gustavsen y De Silva, 2013].

En [Lin *et al.*, 2009, Liang *et al.*, 2011], se presenta un equivalente multipuerto para simulaciones en tiempo real, que aborda los transitorios electromagnéticos mediante la implementación de un FDNE. Este FDNE se construye ajustando las curvas de admitancia en el dominio de la frecuencia utilizando el método de ajuste vectorial. En [Thakallapelli *et al.*, 2019], se describe un modelo multipuerto para simulaciones en tiempo real, basado en técnicas de identificación de parámetros para aproximar una función racional en el dominio discreto, capturando así los fenómenos de alta frecuencia.

En [Zhang *et al.*, 2017], se presenta un simulador electromecánico-electromagnético acoplado implícitamente, combinando un TSA para el área externa y un EMT para el área de estudio. Ambos simuladores se resuelven simultáneamente con diferentes pasos de tiempo en un único sistema de ecuaciones, utilizando un equivalente de Thévenin para la interfaz. El área de estudio actualiza continuamente este equivalente basado en los voltajes del TSA y emplea una impedancia FDNE ajustada mediante el método de ajuste vectorial. La corriente del nodo frontera derivada del EMT se convierte en un fasor de frecuencia fundamental mediante un análisis de Fourier y se inyecta en el simulador TSA.

En [Wang *et al.*, 2024] se describe la representación del área externa mediante un equivalente de circuito de parámetros agrupados, cuyos parámetros son obtenidos por el método de ajuste vectorial. Este enfoque aborda las oscilaciones subsíncronas en el sistema de potencia, dividiéndolo en subsistemas mediante la identificación de interfaces utilizando índices de observabilidad y distancia eléctrica.

Para modelar un FDNE, las metodologías actuales han utilizado la respuesta de frecuencia como base de datos para aproximar la función racional mediante el método de ajuste vectorial [Gustavsen y Semlyen, 1999, Lin *et al.*, 2009, Liang *et al.*, 2011]. Este enfoque requiere, como primer paso, calcular la respuesta de frecuencia en un amplio rango de interés. Sin embargo, el cálculo de la matriz de admitancias dependiente de la frecuencia implica una carga computacional significativa [Thakallapelli *et al.*, 2019], debido a que su precisión está relacionada con el tamaño del paso de frecuencia [Medina y Ramos-Paz, 2005], lo que aumenta la complejidad del análisis en redes de gran tamaño.

Como alternativa, se ha implementado el uso de datos en el dominio del tiempo para modelar el FDNE [Abur y Singh, 1993, Singh y Abur, 1995, Ubolli y Gustavsen, 2011, Thakallapelli *et al.*, 2019]. El trabajo de investigación reportado en esta tesis, utiliza técnicas de identificación de parámetros para aproximar una función racional en el dominio z . Las técnicas de identificación de parámetros se basan en la aplicación de una señal de excitación (entrada) en terminales del área externa y en la medición de la respuesta de salida en los mismos terminales. La adquisición de estos datos en el dominio del tiempo se utiliza para ajustar una función racional, con la ventaja de no requerir información detallada de los parámetros del sistema [Girgis *et al.*, 1993], que comúnmente no está disponible, ni depender del cálculo de la matriz de admitancias en un amplio espectro de frecuencias. Además, el modelo de FDNE formulado en el dominio discreto permite una implementación directa en los simuladores EMT, a diferencia de los algoritmos basados en el dominio continuo, que presentan una mayor complejidad para su integración [Thakallapelli *et al.*, 2019].

En este contexto, cabe destacar que el simulador PSCAD/EMTDC[®] dispone de un bloque FDNE basado en ajuste vectorial [PSCAD, 2025, Gustavsen y De Silva, 2013]. Este enfoque requiere la selección de polos iniciales, donde una elección arbitraria puede inducir errores significativos en el ajuste del modelo. Por esta razón, los polos deben ubicarse cerca de los picos de resonancia identificados en la respuesta de frecuencia [Lin *et al.*, 2009]. Adicionalmente, el bloque de FDNE de PSCAD/EMTDC[®] se representa como una función racional en el dominio s , cuya conexión al área de estudio no es directa y requiere su transformación a un equivalente de Norton mediante un proceso matemático adicional, lo que incrementa la complejidad de su implementación.

Un aspecto importante de este trabajo de investigación es el desarrollo e implementación de un marco de referencia unificado para el modelado del sistema de potencia que integre de manera eficiente el área de estudio y el área externa, optimizando significativamente el tiempo de simulación. Este enfoque se basa en FDNE, proporcionando una estructura de modelado unificada que permite una integración directa y así evitando procesos adicionales para acoplar el FDNE al área de estudio, lo que reduce la complejidad del modelado.

El modelo de un FDNE basado en una función racional en el dominio z proporcio-

na un equivalente Norton [Watson y Arrillaga, 2007]. Para conservar esta estructura en la representación de los elementos del sistema de potencia en el área de estudio, se establece una formulación que sustituye cada elemento lineal y no lineal por un equivalente Norton. Este enfoque permite derivar un modelo equivalente discreto de Norton (MEDN) mediante formulación de un conjunto de ecuaciones algebraicas ordinarias, que se determinan a través de un análisis nodal. Este método es conocido como análisis de circuito acompañante (CCA, por sus siglas en inglés) [Godínez-Delgado *et al.*, 2020].

El enfoque CCA es parte interna de simuladores del tipo EMTP[®], por ejemplo, PSCAD/EMTDC[®], ATP[®], MICROTRAN[®], entre otros. Su aplicación está basada en la discretización de ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO), obteniendo ecuaciones algebraicas ordinarias (EAO) a partir de la integración numérica mediante la regla trapezoidal (RT), Euler y otros. Por ejemplo, en [Godínez-Delgado y Medina-Rios, 2021], se presenta un análisis comparativo entre la aplicación de los enfoques CCA y el modelo en espacio de estado (SSM, por su siglas en inglés) en términos de eficiencia, tiempo de CPU y precisión, cuyos resultados demostraron que el enfoque CCA utilizando la RT es la aplicación más eficiente, precisa y con menor complejidad para el modelado de sistemas potencia.

En este trabajo, la implementación de la formulación unificada se basa en la representación del FDNE, cuya configuración puede generar un MDEN compatible con el enfoque CCA al integrarse en este marco de referencia. De esta manera, se reduce significativamente la complejidad del modelo y el tiempo de simulación.

1.2.2. Estimación de estado armónico

El desarrollo de metodologías para la estimación de estado en sistemas de potencia comenzó con la propuesta pionera de Fred Schweppe en 1970, que presentó un estimador de estado estático [Schweppe y Wildes, 1970, Schweppe y Rom, 1970, Schweppe, 1970]. Desde entonces, se han desarrollado e implementado diversas técnicas para el monitoreo [Abur. y Exposito, 2004], considerando tanto la disponibilidad de mediciones como el modelo del sistema.

Entre los métodos comúnmente utilizados, se basan en mínimos cuadrados y sus variantes ponderadas y recursivas, así como el KF [Simon, 2006]. Para sistemas no lineales,

se han desarrollado extensiones como el filtro de Kalman extendido (EKF, por sus siglas en inglés) y el filtro de Kalman *unscented* (UKF, por sus siglas en inglés), mientras que el filtro de Kalman paralelo (PKF, por sus siglas en inglés) [Cisneros-Magaña *et al.*, 2018] ha sido propuesto para su implementación en arquitecturas de procesamiento paralelo.

Diversos enfoques previos han implementado el KF para TDHSE en redes eléctricas, como en [Medina y Cisneros-Magaña, 2012], donde se usan técnicas para calcular de manera eficiente el estado estacionario periódico del sistema de potencia, junto con un modelo de medición sobredeterminado. En [Cisneros-Magaña *et al.*, 2014], se propone mejoras considerando la propiedad de simetría de media onda en las formas de onda para obtener de manera rápida y precisa el estado estacionario periódico. En [Zhao *et al.*, 2019] y [Zhao *et al.*, 2021] emplean el KF para solucionar la estimación de estado del sistema bajo condiciones transitorias y en estado estable. Otros trabajos, como [Chen *et al.*, 2010, Bagheri *et al.*, 2016], utilizan el KF para evaluar el comportamiento del sistema con armónicos variables, mientras que [Qi *et al.*, 2018, Liu *et al.*, 2020] aplican el UKF en redes con componentes no lineales para evaluar la dinámica del sistema.

La referencia [Molina-Moreno *et al.*, 2017] combina diversos métodos para resolver el TDHSE, utilizando técnicas como mínimos cuadrados ponderados, descomposición en valores singulares, un sistema de medición óptima, el uso de simetría de media onda en las formas de onda y un filtro FFT para reducir el ruido y mejorar la precisión en la estimación de estado. Por otra parte, [Tapia-Tinoco, 2017] propone una implementación en tiempo real en la plataforma OPAL-RT® y una ejecución offline en Matlab/Simulink® para solucionar el TDHSE basado en KF, utilizando un algoritmo de medición óptimo. Las fuentes de distorsión armónica se consideran como variables a estimar, a diferencia de [Molina-Moreno *et al.*, 2017], donde son conocidas por el estimador de estado. Ambas metodologías abordan cargas no lineales. Además, en [Molina-Moreno *et al.*, 2020] se presenta una TDHSE basado en KF para redes trifásicas desbalanceadas, donde se obtiene la sincronización entre un número limitado de dispositivos de medición de la red física experimental de prueba y el modelo matemático.

Aunque los estudios previos han evaluado las cargas no lineales en la estimación del estado armónico mediante diversas técnicas, la integración de fuentes de generación eóli-

ca no ha sido considerada. Este trabajo aborda esta cuestión implementando el modelo de medición propuesto en [Molina-Moreno *et al.*, 2017] y extendiendo el enfoque de identificación de fuentes de distorsión armónica de [Tapia-Tinoco, 2017] para incluir las fuentes de generación eólica.

En este estudio, la estimación de estado utiliza el KF en combinación del método de identificación de fuentes de distorsión armónica. Este enfoque permite la estimación de estado de las entrada del sistemas de potencia correspondiente a cualquier fuente de distorsión armónica en su punto de conexión con la red, sin requerir su modelo matemático detallado. Esta herramienta es útil en el contexto de la creciente integración de diversas fuentes de energía renovable, ya que permite evaluar los efectos no lineales y armónicos que estas fuentes pueden generar en el sistema. El método TDHSE propuesto estima las formas de onda distorsionadas de voltaje y corriente en nodos no monitoreadas de redes trifásicas conectadas a fuentes de generación eólica.

1.3. Justificación

El análisis y modelado de grandes sistemas de potencia en el dominio del tiempo son complejos debido a su constante crecimiento y a la integración de diversos elementos no lineales basados en electrónica de potencia [Subedi *et al.*, 2021, Shah *et al.*, 2021]. Aunque la simulación de tales sistemas es muy deseable, los recursos computacionales pueden ser insuficientes para modelar en detalle el sistema de potencia de orden completo en estudios EMT. Esta limitación está estrechamente relacionada con la alta carga computacional necesaria para los modelos detallados, lo que resulta en tiempos de simulación prolongados para capturar con precisión el comportamiento dinámico. Las herramientas de simulación EMT emplean técnicas computacionales avanzadas y métodos numéricos eficientes [Cheng *et al.*, 2020], pero están limitadas por la carga computacional intensiva en procesamiento y memoria requerida para resolver sistemas de orden completo. Por este motivo, en la literatura se considera necesario dividir el sistema de potencia en el área de estudio y el área externa para mejorar la eficiencia computacional en el análisis de sistemas de potencia [Annakkage *et al.*, 2012, Subedi *et al.*, 2021].

Este trabajo de investigación, propone la implementación de un método basado en

un FDNE para abordar el análisis de fenómenos transitorios electromagnéticos de sistemas de potencias. Este método permite representar el comportamiento dinámico del área externa del sistema de potencia, reduciendo significativamente la complejidad del modelado y los tiempos de simulación al representar de manera adecuada las características del sistema de orden completo. El enfoque FDNE considera su aplicación convencional, sin embargo, la unificación con el enfoque CCA permite aumentar aún más su rendimiento, en términos de representación de variables de estado, eficiencia y precisión.

Con respecto a la estimación de estado armónico, el enfoque propuesto combina el filtro de Kalman con el método de identificación de fuentes de distorsión armónica. Esto permite evaluar el comportamiento dinámico de las variables de estado y las entradas del sistema de potencia asociadas a diversas fuentes de energía renovable y cargas no lineales conectadas a la red, sin la necesidad de representar su modelo matemático. De esta forma, se reduce la complejidad de análisis de sistemas de potencia, permitiendo la evaluación de efectos adversos de calidad de energía, tal como la distorsión armónica.

1.4. Objetivos de la tesis

1.4.1. Objetivo general

Desarrollar una metodología para el análisis del comportamiento dinámico de sistemas de potencia con fuentes de energía renovables en el dominio del tiempo, mediante la implementación de equivalentes dinámicos para abordar fenómenos transitorios electromagnéticos, y la evaluación de los efectos adversos de calidad de energía a través de técnicas de estimación de estado armónico.

1.4.2. Objetivos particulares

- Desarrollar un equivalente dinámico basado en un FDNE para representar la admitancia dependiente de la frecuencia en las terminales del área externa del sistema de potencia, utilizando técnicas de identificación de parámetros para aproximar con precisión una función racional en el dominio z en un amplio rango de frecuencias de interés, ajustado según las características del sistema y los fenómenos a representar.

- Desarrollar e implementar un marco de referencia unificado para el análisis del sistema de potencia en el dominio del tiempo, que integre el enfoque CCA con métodos numéricos, como factorización LU de matrices dispersa, para simplificar el modelado y mejorar los tiempos de simulación en la representación detallada de los elementos del área de estudio.
- Integrar eficientemente el área externa representada por FDNE con el área de estudio dentro de un marco de referencia unificado basado en el enfoque de CCA, de forma que FDNE se incorpore como un elemento compatible sin incrementar el orden del modelo.
- Aplicar la metodología de equivalentes dinámicos basada en FDNE para el análisis de fenómenos transitorios electromagnéticos en sistemas de potencia, bajo distintos escenarios de operación, incluida la integración de energías renovables y condiciones de fallas.
- Validar la metodología de equivalentes dinámicos basada en FDNE-CCA mediante la comparación con la representación de orden completo del sistema de potencia en PSCAD/EMTDC[®], así como con modelos de orden completo obtenidos mediante los marcos de referencia CCA y SSM, para evaluar la capacidad del enfoque FDNE-CCA en términos de número de variables de estado (modelado), tiempo de simulación y precisión.
- Desarrollar e implementar un enfoque de estimación de estado armónico, utilizando un filtro de Kalman combinado con un método de identificación de fuentes de distorsión armónica, en redes eléctricas trifásicas representadas de forma detallada con integración de fuentes de generación eólica bajo diferentes condiciones de operación no senoidales, empleando el marco de referencia en el espacio de estado.
- Validar los casos de estudio de estimación de estado mediante la comparación directa con el simulador PSCAD/EMTDC[®].

1.5. Metodología

A continuación, se presenta la metodología utilizada para el desarrollo de este trabajo de investigación:

- Realizar una revisión del estado del arte de la representación de sistemas de potencia mediante equivalentes dinámicos, estimación de estado armónico y métodos numéricos, con el propósito de establecer los fundamentos teóricos del método desarrollado en este trabajo de investigación.
- Desarrollar un FDNE que permita representar con precisión las características de la admitancia dependiente de la frecuencia en terminales del área externa. La implementación del FDNE se obtiene mediante mediciones de las respuestas de entrada y salida al aplicar una señal de excitación, y utilizar técnicas de identificación de parámetros para aproximar una función racional en el dominio z .
- Desarrollar la representación detallada de los elementos del área de estudio utilizando métodos numéricos en el marco de referencia de CCA. Este enfoque permite representar el sistema de manera eficiente al reducir la cantidad de variables de estado, obteniendo soluciones precisas y reduciendo el tiempo de ejecución de las simulaciones.
- Desarrollar y acoplar el modelo de orden reducido basado en un FDNE dentro del proceso de solución del área de estudio. Este acoplamiento se realiza en un entorno de simulación unificado, utilizando un MEDN para representar ambas áreas. De esta manera, se logra una solución eficiente mediante una integración adecuada, sin modificar el orden del sistema.
- Implementación de la metodología de equivalentes dinámicos para evaluar la eficiencia computacional en el análisis de sistemas de potencia en el dominio del tiempo, abordando fenómenos transitorios electromagnéticos mediante diversos casos de estudio.
- Análisis de los resultados obtenidos de la metodología de equivalentes dinámicos mediante comparación con las respuestas generadas por el simulador PSCAD/EMTDC®.

- Desarrollar la formulación del estimador de estado armónico utilizando un filtro de Kalman, junto con un modelo de identificación de fuentes de distorsión armónica para estimar las entradas del sistema asociadas a fuentes de energía renovable y cargas no lineales.
- Implementar y analizar el método de estimación de estado desarrollado, considerando distintas condiciones operativas en sistemas de potencia que integran fuentes de generación eólica.
- Realizar un análisis comparativo entre los resultados obtenidos con el algoritmo de estimación de estado y las simulaciones obtenidas en PSCAD/EMTDC®.

1.6. Contribuciones principales

Las principales contribuciones de este trabajo de investigación se muestran a continuación:

- Metodología que permita realizar estudios de fenómenos transitorios electromagnéticos en sistemas de potencia con fuentes renovables de energía, haciendo uso de un equivalente dinámico basado en FDNE.
- Herramienta digital basada en FDNE, diseñada para representar las características de la admitancia dependiente de la frecuencia en nodos específicos del sistema de potencia, utilizando técnicas de identificación de parámetros en el dominio del tiempo.
- Herramienta digital para el análisis de sistemas de potencia en el dominio del tiempo que utiliza un equivalente dinámico basado en FDNE, bajo un marco de referencia unificado con el método CCA, que permite integrar el área externa y el área de estudio como elementos compatibles mediante MEDN, lo que resulta en una reducción significativa en la complejidad del modelado y en los tiempos de simulación.
- La herramienta digital con equivalentes dinámicos basados en FDNE aplica técnicas numéricas que reducen significativamente el tiempo de cálculo en la simulación

de sistemas de potencia, permitiendo una solución rápida y eficiente bajo diversas condiciones operativas, incluyendo la integración de fuentes de energía renovable.

- Desarrollo de una metodología para la estimación de estado armónico en sistemas de potencia, utilizando una herramienta digital que combina un filtro de Kalman con el método de identificación de fuentes de distorsión armónica. Esta herramienta digital permite estimar el comportamiento dinámico de las variables de estado y entradas de sistemas trifásicos que integran fuentes eólicas y cargas no lineales, sin necesidad de conocer el modelo matemático de estas fuentes, simplificando el análisis del sistema de potencia.

1.7. Descripción de capítulos

El resto de la tesis está organizado de la siguiente manera:

El Capítulo 2 describe la formulación de un modelo de orden reducido basado en un FDNE para el análisis de sistemas de potencia. El modelo FDNE se basa en una función racional en el dominio z , cuyos coeficientes son determinados por un algoritmo de identificación en el dominio del tiempo. Además, se detalla la integración del modelo FDNE con el área de estudio mediante el enfoque CCA, y el proceso de solución se obtiene mediante la aplicación la factorización de matrices dispersas con descomposición LU, lo que resulta un modelo equivalente simplificado que mejora la eficiencia computacional.

El Capítulo 3 muestra el análisis de la respuesta de frecuencia del modelo FDNE, evaluando la capacidad del modelo para representar la admitancia dependiente de la frecuencia, en términos de magnitud y fase, dentro del rango de frecuencias de interés. Además, se aborda detalladamente la implementación del modelo FDNE en el dominio del tiempo para evaluar la eficiencia computacional en la simulación de fenómenos transitorios del sistema de potencia.

El Capítulo 4 presenta la implementación de la combinación de FDNE con CCA en modelos de orden reducido aplicados a sistemas de potencia, evaluando el comportamiento dinámico bajo diversas condiciones de operación y escala de la red. Se analizan diferentes casos de estudio para evaluar la eficiencia computacional y la precisión del enfoque propues-

to, en comparación con modelos de orden completo basados en SSM y CCA, así como otros modelos reducidos que combinan SSM con FDNE.

El Capítulo 5 ilustra la formulación para la evaluación de la estimación de estado armónico, basada en un filtro de Kalman combinado con el método de identificación de distorsión armónica. Asimismo, se detallan los casos de estudio bajo diversas condiciones operativas del sistema de potencia.

Finalmente, el Capítulo 6 describe las conclusiones generales resultantes de este trabajo de investigación y se proponen recomendaciones para trabajos futuros que permitan ampliar el alcance de la investigación.

Capítulo 2

Modelado y Análisis de Sistemas de Potencia Usando Equivalentes Dinámicos y Técnicas Numéricas

2.1. Introducción

Este capítulo describe el modelado de sistemas eléctricos de potencia para el análisis y la simulación EMT, utilizando equivalentes dinámicos, así como la aplicación de técnicas numéricas para obtener una solución eficiente y precisa. La combinación de estas aplicaciones en el dominio del tiempo permite una representación simplificada del sistema, reduciendo el número de variables de estado, lo que conlleva a una reducción significativa de tiempo de cálculo y de memoria durante el proceso de solución, particularmente en sistemas de potencia de gran escala que incluyan componentes no lineales y variantes en el tiempo.

2.2. Equivalentes dinámicos

Los transitorios EMT se propagan en una sección específica del sistema de potencia. Esto permite enfocar el análisis en esta sección, denominada área de estudio, que utiliza modelos detallados para representar su comportamiento dinámico. El resto del sistema, conocido como área externa, se reduce mediante la implementación de un equivalente

dinámico [Annakkage *et al.*, 2012].

El área de estudio representa la sección de interés para el análisis de transitorios dinámicos causados por fallas o perturbaciones, considera importantes las respuestas en los nodos límite o frontera que conectan el área de estudio con el área externa, ya que tienen un efecto significativo en su dinámica [Subedi *et al.*, 2021, Abur y Singh, 1993]. Aunque la dinámica del área externa no es de interés directo, es necesario representar adecuadamente su efecto mediante un equivalente dinámico. En la Figura 2.1 se muestra la conexión entre el área de estudio y el área externa a través de un solo nodo frontera (un puerto). Sin embargo, esta configuración puede volverse más compleja cuando el área de estudio se enlaza con el área externa a través de múltiples nodos frontera. En tales casos, estas conexiones generan un equivalente multipuerto, lo que puede dificultar el análisis, pero también representa condiciones más reales del sistema de potencia [Sowa y Zychma, 2022].

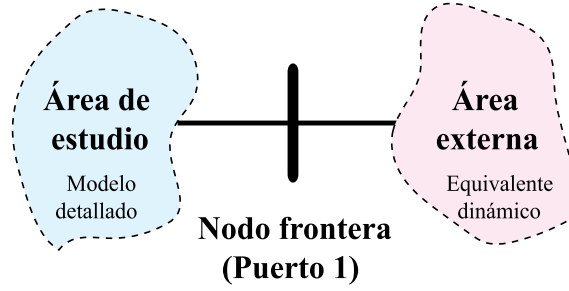


Figura 2.1: Esquema del modelo de orden reducido con área de estudio y área externa conectadas en un solo puerto.

La representación de una estructura equivalente para la sustitución del área externa en el análisis de EMT se ha estudiado durante años y sigue desarrollándose para representar adecuadamente la dinámica del área externa. El enfoque más eficiente consiste en determinar la estructura del equivalente en el dominio de la frecuencia y, posteriormente, aplicar técnicas de identificación de parámetros en el dominio del tiempo [Sowa y Zychma, 2022].

2.3. Modelo de orden reducido utilizando un equivalente de red dependiente de la frecuencia

El área externa se puede modelar como una red eléctrica lineal invariante en el tiempo, lo que permite simplificar y aproximar su sustitución mediante la construcción

de un esquema equivalente de red dependiente de la frecuencia [Ubolli y Gustavsen, 2011, Ubolli y Gustavsen, 2012]. Este enfoque permite modelar adecuadamente las características del área externa en un amplio rango de frecuencias [Watson y Arrillaga, 2007], garantizando que al implementar el modelo de orden reducido FDNE en el análisis en el dominio del tiempo, se logre una respuesta aproximada a la del sistema de orden completo. Asimismo, se obtiene una mayor eficiencia computacional al acelerar los cálculos requeridos para la simulación del modelo en el dominio del tiempo.

La representación de un modelo de orden reducido FDNE mediante una función racional se considera un enfoque adecuado y es ampliamente utilizado para aproximar la admitancia dependiente de la frecuencia en cualquier nodo frontera [Subedi *et al.*, 2021, Watson y Arrillaga, 2007].

La estructura equivalente del modelo FDNE propuesto se formula mediante los siguientes pasos:

1. Estructura de la función racional: Definir el esquema general del equivalente dinámico que representa el área externo.
2. Estimación de parámetros: Procedimiento para calcular los coeficientes del modelo.
3. Evaluación de criterios de cumplimiento de estabilidad y pasividad: Para garantizar la estabilidad numérica al aplicar el FDNE en el análisis del dominio del tiempo, es esencial cumplir con ambos criterios [Medina *et al.*, 2020]. El FDNE puede ser estable, pero su efectividad se compromete al no ser pasivo [Lin *et al.*, 2009]. Por lo tanto, es necesario aplicar las restricciones adecuadas para mantener la pasividad y garantizar la confiabilidad de los resultados.

2.4. FDNE basada en una función racional

La formulación del modelo FDNE discreto se presenta a través de una función racional en el dominio z [Watson y Arrillaga, 2007], caracterizada por la siguiente estructura:

$$Y(z) = \frac{I(z)}{V(z)} = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_n z^{-n}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}} \quad (2.1)$$

donde $Y(z)$ representa la admitancia dependiente de la frecuencia en el nodo frontera, que define la relación entre la entrada (señal de excitación de voltaje) $V(z)$ y la salida (respuesta de corriente de salida) $I(z)$ del sistema. El operador z corresponde al desplazamiento en el dominio del tiempo discreto; b y a son los coeficientes del polinomio numerador y denominador, respectivamente, y n representa el orden del modelo.

La transformación de (2.1) al dominio del tiempo discreto se expresa como:

$$I(z) = -I(z)(a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_nz^{-n}) + (b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_nz^{-n})V(z) \quad (2.2)$$

$$i(t) = -a_1i(t - \Delta t) - a_2i(t - 2\Delta t) - \dots - a_ni(t - n\Delta t) + b_1v(t - \Delta t) + b_2v(t - 2\Delta t) + \dots + b_nv(t - n\Delta t) \quad (2.3)$$

en (2.3) se observa que la salida $i(t)$ en el instante de tiempo t depende de las muestras previas de las entradas y salidas, donde $t = k\Delta t$, siendo k la k -ésima muestra y Δt el paso de tiempo.

2.5. Técnica de identificación de parámetros

El proceso de identificación de parámetros en el dominio del tiempo es utilizado para calcular los coeficientes de la función racional, cuya estructura está determinada por (2.1). Esta identificación tiene como objetivo principal, aproximar la admitancia dependiente de la frecuencia vista desde un nodo específico. Es importante destacar que en una la configuración de un modelo FDNE multipuerto no presenta conexiones directas entre sus puertos, excepto las conexiones a través del área de estudio, ya que los cálculos en cada puerto son independientes. A continuación, se describe el procedimiento para su implementación.

2.5.1. Adquisición de datos usando una señal de excitación

La construcción del modelo (2.1) se basa en la adquisición de datos en el dominio del tiempo, obtenidos a partir de la medición de las respuestas de entrada y salida del nodo

evaluado, como se ilustra en el Apéndice A. Los datos recopilados permiten caracterizar la admitancia vista desde el nodo frontera en un rango de frecuencias definido según el análisis a realizar. Desde este nodo se identifican las resonancias que reflejan los modos que permiten representar la dinámica del área externa. Para obtener esta información se implementa la inyección de una señal multiseno [Watson y Arrillaga, 2007, Abur y Singh, 1993].

La señal multiseno se utiliza para energizar el nodo analizado y se conecta al mismo como una fuente de voltaje constante con frecuencia variable (ver Apéndice A). Esta señal de excitación se compone de una combinación de múltiples ondas sinusoidales, con amplitud ajustable y fase optimizada [Abur y Singh, 1993]. Las fases optimizadas permiten que la señal multiseno tenga una distribución uniforme en el tiempo, sin generar picos excesivos, asegurando una excitación adecuada en todas las frecuencias de interés. En el Apéndice A se presenta una descripción general de la configuración de la señal de excitación multiseno.

2.5.2. Estimación de los coeficientes de la función racional

La estimación de los coeficientes de la función racional se realiza mediante el método de mínimos cuadrados recursivos (RLS, por sus siglas en inglés), que ajusta los parámetros del modelo utilizando los datos de medición del nodo evaluado.

La formulación del método RLS se implementa como una solución eficiente al método de mínimos cuadrados (LS, por sus siglas en inglés), debido a que evita la necesidad de calcular la inversa de la matriz de estado que se utiliza en la solución de LS. Este cálculo, en el enfoque tradicional LS, puede incrementar significativamente el tiempo de cómputo y, en algunos casos, puede resultar inviable [Thakallapelli *et al.*, 2019]. Apéndice A se detalla la formulación para la estimación de parámetros utilizando RLS.

Para evaluar la precisión de la función racional se usa el error cuadrático medio (RMS, por sus siglas en inglés), definido como:

$$e_{rms} = \frac{1}{N-n} \sqrt{\sum_{k=n+1}^N \left(i(k\Delta t) - \hat{i}(k\Delta t) \right)^2} \quad (2.4)$$

donde N es el número total de muestras en la simulación en el dominio del tiempo, $i(k\Delta t)$ y $\hat{i}(k\Delta t)$ son las corrientes inyectada en el nodo analizado y en el modelo estimado, res-

pectivamente, en el instante $k\Delta t$. Este modelo es adecuado si cumple la siguiente condición expresada por:

$$e_{rms} \leq \epsilon \quad (2.5)$$

donde ϵ es el umbral determinado. Si la condición descrita en (2.5) no se cumple, se incrementa el orden del modelo y se repite el proceso de estimación de parámetros.

2.5.3. Criterio de cumplimiento de estabilidad

La estabilidad de un sistema en el dominio de tiempo discreto, lineal e invariante en el tiempo se determina por la ubicación de los polos en el plano z [Naredo *et al.*, 2007, Ogata, 1995]. La función racional definida por (2.1), es estable cuando todos los polos del sistema están dentro del círculo unitario en el plano z . Cualquier polo que se encuentre fuera de círculo unitario indica que el sistema es inestable. El criterio del cumplimiento de estabilidad se basa en el análisis de las raíces del polinomio característico del denominador, expresado como:

$$P(z) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n} \quad (2.6)$$

a partir de (2.6), este polinomio se puede expresar como,

$$P(z) = z^n + a_1 z^{n-1} + a_2 z^{n-2} + \dots + a_n \quad (2.7)$$

Los polos del sistema $z_1, z_2, \dots, z_n$ se obtiene al factorizar $P(z) = 0$. Para determinar la estabilidad, se evalúa el módulo de cada polo $|z_i|$, el cual debe ser menor que 1, en caso contrario, incrementa el orden del modelo.

$$|z_i| < 1 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.8)$$

2.5.4. Criterio de cumplimiento de pasividad

La pasividad de un sistema establece que no puede generar energía por sí mismo, únicamente puede entregar energía si ha almacenado previamente energía en el sistema [Talocia y Gustavsen, 2016]. Durante el proceso de construcción (o ajuste) de la función

racional que aproxima el comportamiento del área externa, la estimación de la estructura equivalente puede causar un incumplimiento (violación) de la pasividad en determinados rangos de frecuencia [Lin *et al.*, 2009]. Evaluar la pasividad de un modelo permite detectar y cuantificar estas violaciones, así como eliminarlas [Gustavsen, 2021]. Además, la implementación de un modelo pasivo en simulaciones en el dominio del tiempo es crucial, debido que un modelo que no cumpla con esta propiedad puede generar inestabilidad numérica [Medina *et al.*, 2020, Talocia y Gustavsen, 2016].

La evaluación de la pasividad se puede realizar a través de un barrido de frecuencia [Gustavsen, 2021]. Para considerar que la función racional (2.1) es pasiva, la parte real de la respuesta de frecuencia debe ser positiva en todo rango de interés. En caso contrario, si hay presencia de resistencia negativa, se viola la pasividad. Esta evaluación se realiza sustituyendo $z = e^{j\pi f \Delta t}$ en (2.1) como,

$$\operatorname{Re} \left\{ Y(e^{j2\pi f \Delta t}) \right\} \geq 0 \quad \forall f \in [f, f_{\max}] \quad (2.9)$$

si la condición (2.9) se cumple, entonces el sistema es pasivo, en caso contrario, incrementa el orden del modelo. La notación de $[f, f_{\max}]$ representa el rango de frecuencia de interés, donde $f_{\max}$ es la frecuencia máxima del intervalo considerado.

En esta tesis, se evalúa la pasividad utilizando la condición (restricción) (2.9), sin aplicar otros métodos que imponen la pasividad del modelo. Generalmente, estos métodos se basan en ajustar los parámetros de la estructura equivalente para garantizar el cumplimiento de la pasividad, de tal manera que las modificaciones en la respuesta de frecuencia del modelo sean mínimas, como se describe en los trabajos reportados en [Talocia y Gustavsen, 2016, Hu *et al.*, 2017, Thakallapelli *et al.*, 2019, Medina *et al.*, 2020, Gustavsen, 2008].

2.5.5. Algoritmo de identificación de parámetros

En la Figura 2.2 se muestra el diagrama de flujo general del algoritmo de identificación de parámetros basado en una función racional para representar la admitancia dependiente de la frecuencia de un nodo en particular. A continuación, se describen las etapas del algoritmo implementado:

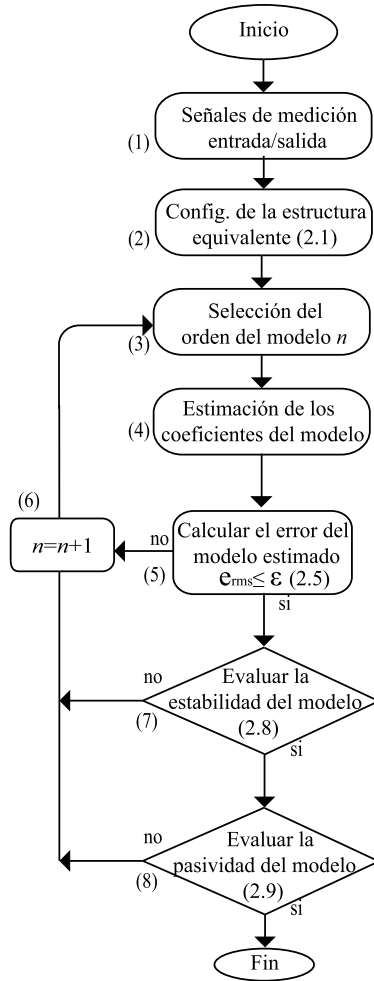


Figura 2.2: Diagrama de flujo general del algoritmo de identificación de parámetros.

- Extracción de datos del nodo analizado:** En el bloque 1, se inicia la recopilación de las señales de medición de entrada y salida para el proceso de identificación de parámetros. Este proceso se realiza mediante una simulación en el dominio del tiempo, donde se energiza el nodo bajo análisis utilizando una fuente de voltaje constante a frecuencia variable (señal multisenso), como se describe en la Sección 2.5.1. Durante esta etapa, se considera que todas las fuentes de voltaje del sistema están en cortocircuito y todas las fuentes de corriente en circuito abierto. La señal de entrada (voltaje) correspondientes a la excitación aplicada y la señal de salida (corriente) representan la respuesta del sistema.

- **Configuración de la estructura equivalente:** En el bloque 2, se configura la estructura equivalente utilizando en una función racional en el dominio z para modelar la admitancia dependiente de la frecuencia, tal como se detalle en la Sección 2.4. Posteriormente, en el bloque 3, se realiza la selección el orden del modelo, comienza desde el orden 1.
- **Proceso de estimación de parámetros:** En el bloque 4, se aborda el proceso de la estimación de los coeficientes del modelo a través del método de RLS, según lo descrito en la Sección 2.5.2. Este enfoque ajusta los parámetros del modelo utilizando los datos de entrada y salida medidos, y además se establece las condiciones iniciales (ver Apéndice A) que configuran el algoritmo RLS. Después, en el bloque 5, se realiza el cálculo del error e_{rms} para evaluar la precisión del modelo estimado usando (2.4). Asimismo, se verifica si $e_{rms} \leq \epsilon$, donde el umbral considerado es $\epsilon = 1.0e - 6$. Si se cumple esta condición, se considera que la estimación del modelo es satisfactoria y continua con el bloque 7. En el caso contrario, se procede a incrementar el orden del modelo en el bloque 6 y se realiza nuevamente la estimación para mejorar la precisión.
- **Evaluación del criterio de cumplimiento de estabilidad y pasividad:** Una vez obtenida la estructura del modelo estimado, se procede con la evaluación del criterio de estabilidad utilizando la ecuación (2.8), tal como se describe en la Sección 2.5.3. Si el modelo cumple con el criterio de estabilidad, se avanza al bloque 8. De lo contrario, se incrementa el orden del modelo (bloque 6) y se procede a realizar nuevamente la estimación del modelo. Aunque al aumentar el orden generalmente se obtiene un mejor ajuste del modelo, es necesario verificar en cada incremento si el modelo cumple con la condición de estabilidad, asegurando que los polos estén dentro del círculo unitario. En el bloque 8, se verifica el cumplimiento del criterio de pasividad, conforme a lo descrito en la Sección 2.5.4. Si el modelo cumple con la condición expresada en (2.9), el proceso finaliza. Sin embargo, si el modelo no satisface esta condición, se incrementa el orden del modelo en el bloque 6. Este incremento tiene como objetivo ajustar los parámetros del modelo y garantizar que, en cada iteración, se cumplan tanto la estabilidad como el criterio de pasividad dentro del rango de frecuencia de interés.

2.6. Respuesta de frecuencia del sistema de potencia

La respuesta de frecuencia de un sistema de potencia se puede determinar mediante la construcción de la matriz de admitancia nodal, lo que permite evaluar el comportamiento en cada frecuencia de interés [Watson y Arrillaga, 2007, Acha y Madrigal, 2001], expresada como:

$$\mathbf{I}_f = [\mathbf{Y}_f]\mathbf{V}_f \quad (2.10)$$

donde $\mathbf{Y}_f$ es la matriz de admitancia en la frecuencia f , $\mathbf{V}_f$ es el vector de voltaje nodal en la frecuencia f y $\mathbf{I}_f$ es el vector de corriente nodal en la frecuencia f . La inversa de la matriz $\mathbf{Y}_f$ es la matriz de impedancia $\mathbf{Z}_f$. Los elementos diagonales de $\mathbf{Y}_f$ son denominados admitancia de punto de conducción (*driving point admittance*) y en $\mathbf{Z}_f$ son conocidos como impedancia de punto de conducción (*driving point impedance*).

La respuesta de frecuencia vista desde un nodo en específico permite identificar comportamientos a través de picos y valles, que están relacionados con la resonancia en serie y en paralelo. A partir del estudio de la admitancia, los picos corresponden a resonancias en serie, mientras que los valles representan resonancias en paralelo. Por otro lado, en la respuesta de frecuencia de impedancia, los picos y valles representan las resonancias en paralelo y en serie, respectivamente [Campello *et al.*, 2023].

La estimación de la estructura equivalente del FDNE, obtenida a través del algoritmo de identificación de parámetros, se analiza utilizando la respuesta de frecuencia (en términos de magnitud y fase). La evaluación en el dominio de frecuencia permite verificar de manera más detallada que el comportamiento del modelo FDNE estimado corresponde a la admitancia del sistema real en el rango de frecuencias de interés. Al conservar las características de la respuesta de frecuencia desde cualquier terminal del sistema de orden completo, el modelo FDNE garantiza una aproximación adecuada del comportamiento dinámico en escenarios transitorios de tipo EMT [Morched y Brandwajn, 1983].

2.7. Métodos de representación de sistemas de potencia

La formulación de un modelo matemático para el análisis de sistemas de potencia se obtiene mediante la aplicación de las leyes de corriente y voltaje de Kirchhoff (LCK y LVK, respectivamente), junto con las características y conexiones de los elementos del sistema,

cada uno definido por un modelo de circuito específico. Estas consideraciones permiten describir el comportamiento del sistema mediante un conjunto de ecuaciones algebraicas y diferenciales, expresadas en una forma matricial para su solución eficiente mediante técnicas numéricas computacionales [Stagg y El-Abiad, 1968, Chua y Lin, 1975]. A continuación, se describen los enfoques utilizados en el análisis de sistemas potencia.

2.7.1. Modelo de espacio de estado

El sistema de potencia en el marco de referencia de espacio de estado (SSM, por sus siglas en inglés) se representa por un conjunto de ecuaciones diferenciales de primer orden [Ogata, 1995], expresado como:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \quad (2.11)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\mathbf{u}(t) \quad (2.12)$$

donde $\mathbf{x}$ es el vector de estado que representa el voltaje del capacitor y la corriente a través del inductor. La matriz de estado es $\mathbf{A}$, la matriz de entrada es $\mathbf{B}$ y el vector de entrada es $\mathbf{u}$. El vector de salida se representa como $\mathbf{y}$, la matriz de salida es $\mathbf{C}$ y la matriz de transmisión directa es $\mathbf{D}$. Para la solución del SSM, se emplean técnicas computacionales de fuerza bruta (BF, por sus siglas en inglés). Los elementos utilizados para modelar el sistema de potencia se detallan en el Apéndice C, en las Tablas C.1 y C.2.

2.7.2. Análisis de circuito acompañante

La formulación de análisis de circuito acompañante (CCA, por sus siglas en inglés) se basa en la sustitución de los elementos del sistema de potencia por modelos equivalentes discretos de Norton (MEDN) y en la aplicación de un análisis de incidencia nodal para resolver el sistema. Este enfoque realiza la discretización de los elementos del sistema, como resistencias, inductancias y capacitores, utilizando la integración numérica mediante la regla trapezoidal (RT), tal como se muestra en el Apéndice C, en las Tablas C.1 y C.2. Esto permite transformar las ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO), que modelan la dinámica del sistema, en ecuaciones algebraicas ordinarias (EAO). La formulación general del enfoque de CCA se puede expresar de la siguiente manera [Watson y Arrillaga, 2007]:

$$[\mathbf{G}]\mathbf{v}(t) = \mathbf{i}(t) + \mathbf{I}_H \quad (2.13)$$

donde $\mathbf{G}$ es la matriz de conductancias equivalentes, $\mathbf{v}$ es el vector de voltaje nodal que representa las variables de estado del sistema, $\mathbf{i}$ es el vector de fuentes de corrientes externas e $\mathbf{I}_H$ es el vector de fuentes de corrientes de historia pasada.

2.8. Solución de sistemas de potencia por técnicas numéricas

La solución de un sistema de potencia en el marco de referencia de CCA utilizando la regla trapezoidal (CCA_{RT}) presentan ventajas en términos de representación y su proceso de solución (eficiencia computacional) en comparación al SSM [Godínez-Delgado *et al.*, 2020]. La configuración de la estructura de CCA permite simplificar el modelado al representar los voltajes nodales del sistema como variables de estado, resultando en una ecuación matricial de menor orden en comparación con el enfoque SSM.

El modelo general del enfoque CCA descrito en (2.13) satisface la estructura estándar de un sistema de ecuaciones lineales $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$, cuya matriz $\mathbf{A}$ es equivalente a la matriz $\mathbf{G}$ (conectividad de sus nodos), mientras que el vector $\mathbf{x}$ corresponde a las variables establecidas por los voltajes nodales $\mathbf{v}$ y el vector $\mathbf{b}$ es equivalente a las corriente de rama del sistema $\mathbf{i}$. Este enfoque es aplicable a sistemas de potencia de pequeña, mediana y gran escala. Sin embargo, se han presentado algunos inconvenientes durante el proceso de solución en sistemas de gran escala. En este tipo de sistemas la topología de red equivale a un modelo disperso, cuya característica principal debe ser abordada mediante técnicas numéricas de solución de matrices más desarrolladas, según se describe en el Apéndice B. De esta forma, el proceso de solución de (2.13) se realiza utilizando la factorización LU de la matriz dispersa $\mathbf{G}$, lo que resulta en el método $\text{CCA}_{\text{RT-LU}}$.

2.9. Formulación unificada de un modelo de orden reducido FDNE discreto en el marco de referencia de CCA

Una vez descrito los principios básicos y formulaciones de distintos enfoques de representación y solución, en este trabajo de investigación se desarrolla una metodología

basada en los enfoques FDNE y el CCA, cuya solución se determina utilizando la descomposición LU de matrices dispersas. Este enfoque, se denomina método $\text{CCA}_{\text{FDNE-LU}}$. La implementación del enfoque FDNE permite analizar una región de interés del sistema de orden completo, reduciendo significativamente su representación. Al aplicar el enfoque CCA a la región de interés, previamente definido por el enfoque FDNE, se logra una reducción aún mayor del modelo equivalente, lo que resulta en un menor esfuerzo computacional durante el proceso de solución. Esta combinación de los enfoques FDNE y CCA simplifica la representación del sistema de orden completo, tanto en el área externa como en el área de estudio, y proporciona una solución más eficiente para la evaluación de sistemas de potencia dinámicos.

En la Figura 2.3 se presenta un esquema general de un modelo de orden reducido basado en FDNE discreto multipuerto, en el cual el área de estudio se conecta con el área externa a través de M puertos. Cada puerto se conforma por fuentes de corriente, cuya descripción se presenta en la siguiente sección.

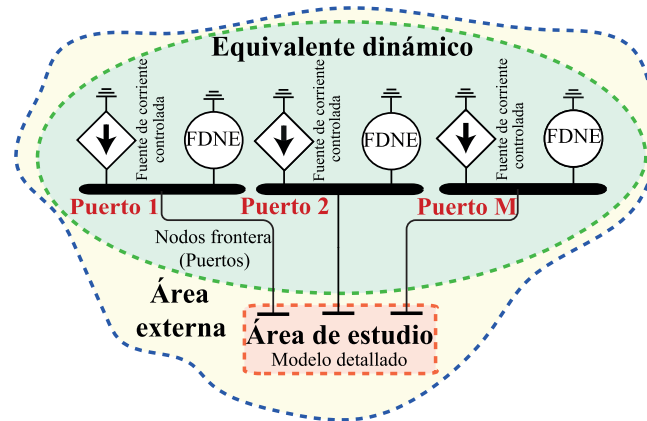


Figura 2.3: Esquema de un modelo de orden reducido basado en FDNE discreto multipuerto.

La identificación de parámetros de un modelo equivalente multipuerto, se describe de la siguiente manera:

- Desconectar el área de estudio del área externa.
- Todas las fuentes de voltaje y corriente del área externa se configuran en cortocircuito o en circuito abierto, respectivamente.

- En el procedimiento de adquisición de datos (Sección 5.5.2) se ajusta para M puertos. La señal de excitación se aplica individualmente a cada puerto. En cada aplicación (medición), los puertos restantes se mantienen cortocircuitados.

Una vez recopilados los datos de todos los puertos, se realiza la identificación de parámetros para cada puerto utilizando el algoritmo de identificación de parámetros.

2.9.1. FDNE discreto conectado al área de estudio a través del nodo frontera aplicando el CCA

Para conectar el FDNE en el área de estudio se puede realizar directamente, utilizando el voltaje del nodo frontera V_b como entrada al FDNE [Thakallapelli *et al.*, 2019]. Al sustituir V_b en (2.1), la corriente de salida del FDNE, i_f , se puede expresar como:

$$\begin{aligned} i_f(t) = & -a_1 i_f(t - \Delta t) - a_2 i_f(t - 2\Delta t) - \dots - a_n i_f(t - n\Delta t) \\ & + b_1 v_b(t - \Delta t) + b_2 v_b(t - 2\Delta t) + \dots + b_n v_b(t - n\Delta t) \end{aligned} \quad (2.14)$$

Para mantener los parámetros del nodo frontera en estado estable inicial, se suministra una fuente de corriente constante determinada por:

$$I_b \angle \delta_b = \left(\frac{P_b + jQ_b}{V_b \angle \theta_b} \right)^* \quad (2.15)$$

donde P_b , Q_b , V_b y θ_b son, respectivamente, los flujos de potencia activa y reactiva que se transfieren desde el área externa al área de estudio, el voltaje del nodo frontera y el ángulo asociado a dicho nodo. La corriente (2.15) se expresan en el dominio del tiempo como:

$$i_b(t) = |I_b| \sin(\omega t + \delta_b) \quad (2.16)$$

considerando que $|I_b|$, ω y δ_b representan la magnitud (pico), la frecuencia angular y el ángulo del fasor de corriente, respectivamente. Es necesario eliminar la componente de frecuencia fundamental (60 Hz) del FDNE, debido a que este componente está incluido en la fuente de corriente constante que se muestra en (2.16). Brevemente se presenta el siguiente procedimiento que detalla la aplicación.

- El FDNE (2.1) se evalúa a 60 Hz y se convierte a impedancia para obtener la rama en serie: RL .
- La corriente de la rama en serie RL se obtiene utilizando CCA como se ilustra en el Apéndice C, el cual establece el siguiente modelo:

$$i_{RL}(t) = I_{H_{RL}}(t - \Delta t) + g_{RL}v_b(t) \quad (2.17)$$

$$I_{H_{RL}}(t - \Delta t) = H_{RL}i_{RL}(t - \Delta t) + g_{RL}v_b(t - \Delta t) \quad (2.18)$$

donde,

$$g_L = \frac{\Delta t}{2L}; \quad g_{RL} = \frac{\Delta t}{(2L + R\Delta t)}; \quad H_{RL} = \frac{(1 - Rg_L)}{(1 + Rg_L)} \quad (2.19)$$

En estas expresiones, g_L y g_{RL} representan la conductancias equivalentes, mientras que $I_{H_{RL}}$ es la corriente de historia pasada, que representa el efecto del estado anterior de la rama RL . La Figura 2.4 muestra el FDNE conectado al nodo frontera. El voltaje del nodo frontera $v_b(t)$ se aplica a la rama RL correspondiente del FDNE, como se describe en las ecuaciones (2.17), (2.18) y (2.19) para evaluar $i_{RL}(t)$. La corriente $i_{RL}(t)$ se inyecta para eliminar la componente fundamental del FDNE expresado por,

$$i_{int}(t) = i_b(t) - i_{RL}(t) \quad (2.20)$$

donde (2.20) se representa como una fuente de corriente controlada.

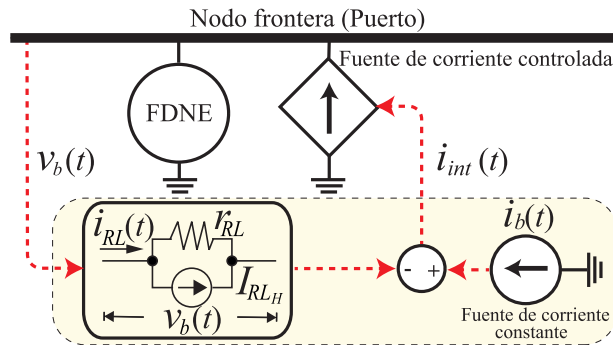


Figura 2.4: Esquema del FDNE conectado al nodo frontera.

La estructura equivalente del FDNE utiliza $i_f(t)$ para preservar los fenómenos transitorios y $i_{int}(t)$ para conservar el estado estable inicial del nodo frontera, garantizando una aproximación adecuada dentro del rango de frecuencia establecido. Además, el modelo FDNE propuesto proporciona una estructura equivalente simple para la implementación directa en el área de estudio, optimizando el modelado y el acoplamiento a través de una formulación unificada basada en MEDN utilizando el enfoque CCA.

2.9.2. Proceso de aplicación del método combinado CCA_{FDNE}-LU

La Figura 2.5 muestra el diagrama de flujo del proceso de solución del método CCA_{FDNE}-LU, descrito a continuación.

- **Inicio:** A partir de los datos del sistema de potencia, el algoritmo desarrollado genera la matriz de conductancia $\mathbf{G}$, en función de la conectividad de los nodos (Bloque 1); como se detalla en [Watson y Arrillaga, 2007, Godinez-Delgado y Medina-Rios, 2021]. Luego, se verifica la simetría de la matriz $\mathbf{G}$; si no es simétrica, regresa y se verifican nuevamente los datos del sistema en el bloque 1, de lo contrario, continúa (Bloque 2). Después, se decide si se desea implementar el FDNE; si la respuesta es negativa, se procede con la solución del sistema de potencia de prueba de orden completo (Bloque 3).
- **Algoritmo iterativo de solución CCA (sin FDNE):** Se formula el sistema mediante CCA (Bloque 4), se aplica la descomposición LU a la matriz $\mathbf{G}$ y se calculan los voltajes nodales (Bloque 5). Luego, se verifica la convergencia de la solución; si se alcanza el periodo de tiempo de simulación, el proceso finaliza, de lo contrario, continúa (Bloque 6). Finalmente, se actualizan los voltajes y corriente de rama, y se regresa al Bloque 4 para una nueva iteración (Bloque 7).
- **Configuración del FDNE:** El sistema de potencia se divide en el área de estudio y el área externa (Bloque 8). En el área de estudio se renumeran los nodos obteniendo una nueva estructura de conectividad para construir la matriz $\mathbf{G}$ de conductancia simplificada (Bloque 9). El área externa se modela mediante una función racional discreta

- **Integración del FDNE en el proceso iterativo CCA:** Desde el Bloque 4 se extraen los voltajes de los nodos frontera en cada paso de muestra, que entran al Bloque 16 y al Bloque 14 (Bloque 15). En el Bloque 16 se calcula la corriente de salida del FDNE. En el Bloque 17 se calculan las corrientes en los Bloques 14 y 12 para obtener la corriente de la fuente de corriente controlada. Finalmente, las corrientes de

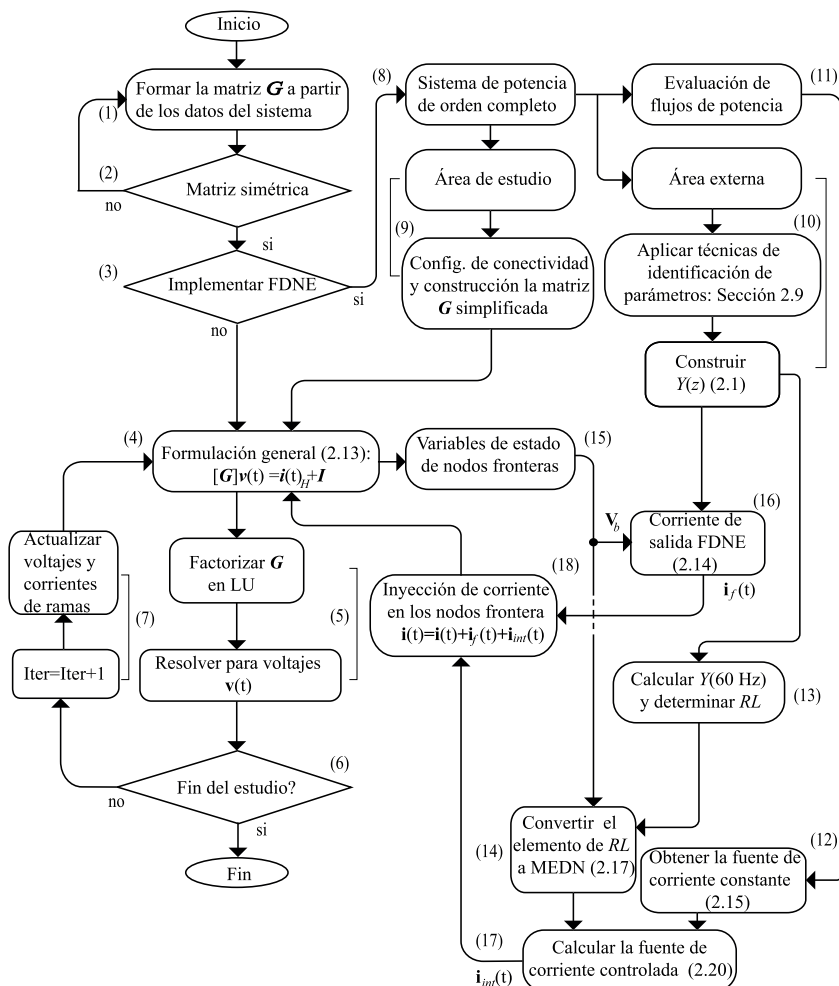


Figura 2.5: Diagrama de flujo del proceso de solución del método CCA_{FDNE}-LU propuesto.

los Bloques 16 y 17 se envían en cada paso de muestra al Bloque 4 para ser inyectadas en los nodos frontera (Bloque 18).

El método $CCA_{FDNE-LU}$ es aplicable a condiciones de operación balanceadas y desbalanceadas en sistema de potencia trifásicos. Utiliza un modelo FDNE con una estructura equivalente simplificada para representar la admitancia en terminales del nodo frontera dentro del rango de frecuencias de interés. Esto permite reproducir con precisión los transitorios EMT causados por disturbios, como fallas en nodos, así como los efectos asociados con la integración de fuentes de energía renovables basadas en dispositivos de electrónica de potencia, cuyos procesos de conmutación generan continuamente transitorios de alta frecuencia que se propagan hacia el área externa.

2.10. Configuración de la división entre el área de estudio y el área externa en el modelo equivalente

No hay una regla cuantitativa universalmente aceptada para dividir el sistema de potencia en áreas de estudio y áreas externas [Sowa y Zychma, 2022]. La delimitación entre estas dos áreas depende por tanto de los objetivos específicos del análisis y de los fenómenos a estudiar, lo que implica la necesidad de representar una estructura equivalente que se ajuste a estas condiciones, para obtener una aproximación adecuada al sistema de orden completo.

El área de estudio se delimita considerando que los transitorios EMT se atenúan rápidamente, que su intensidad disminuye conforme aumenta la distancia con respecto al punto de origen de la perturbación. En este contexto, el análisis se enfoca en el punto de acoplamiento común (PCC, por sus siglas en inglés), donde se conectan las fuentes de energía renovable basadas en electrónica de potencia, así como en los nodos de falla y los elementos cercanos a estos fenómenos. También, es importante considerar un número mínimo de puertos para la representación del modelo FDNE. Esto garantiza que el análisis se enfoque en las zonas donde los efectos de los transitorios son más significativos y afectan directamente la dinámica del sistema.

Además, para una implementación computacionalmente eficiente del modelado de orden reducido del FDNE, es fundamental considerar la representación del área de estudio, cuya complejidad depende tanto del nivel de detalle en el modelado de los componentes lineales y no lineales como de la extensión del área seleccionada. Un mayor nivel de detalle y una mayor extensión del área de estudio incrementan el número de variables de estado y la cantidad de ecuaciones a resolver, lo que genera un incremento en la carga computacional. Asimismo, la configuración de fases del sistema (monofásica o trifásica), el tiempo de simulación y el paso de integración influyen en el rendimiento del modelo.

2.11. Conclusiones

En este capítulo, se ha presentado una formulación unificada para el análisis de fenómenos transitorios EMT en sistemas de potencia, basada en un modelo de orden reducido de FDNE discreto. Este enfoque utiliza el CCA y técnicas numéricas para una solución eficiente del sistema, resultando en una herramienta digital que minimiza los tiempos de cálculo conservando una adecuada precisión.

El enfoque FDNE se ha implementado usando una función racional en el dominio z , estimada mediante un algoritmo de identificación de parámetro en el dominio del tiempo. Este algoritmo permite representar la admitancia dependiente de frecuencia de un nodo específico, procesando los datos recopilados del nodo frontera para estimar los coeficientes del modelo mediante el método RLS. En cada iteración, se ajusta el orden del modelo hasta que el error cumpla con el criterio de precisión, obteniendo así un modelo de orden mínimo. Si el error es aceptable, se procede a evaluar el criterio de cumplimiento de estabilidad y pasividad del modelo, ajustando su orden si es necesario, lo que garantiza la estabilidad numérica y precisión del FDNE en el dominio del tiempo. Además, la configuración de la estructura equivalente del FDNE, representada como fuente de corriente, permite un acoplamiento directo al área de estudio. El FDNE se conecta al nodo frontera usando dos fuentes de corrientes, la fuente de corriente histórica que representa la corriente de salida i_f del FDNE, y la fuente de corriente controlada, representada por $i_{int}(t)$. Esta última, está formada por un corriente constante para estabilizar las condiciones iniciales y una corriente de rama RL en serie, derivada de $Y(60 \text{ Hz})$, que elimina la componente fundamental del

FDNE.

Asimismo, se han descrito los enfoques SSM y CCA para desarrollar una metodología unificada que permita integrar de manera eficiente el modelo FDNE. En este contexto, la configuración de la estructura equivalente del FDNE, representada como fuente de corriente, permite su modelado en los marcos de referencia SSM o CCA sin la necesidad de ajustes complejos. Además, el enfoque CCA ha demostrado ser más eficiente en el análisis de sistemas de potencia, debido a que reduce el número de variables de estado, simplificando el modelo. Por lo tanto, esto lo convierte en la opción más adecuada para el modelado detallado del área de estudio.

Con respecto al enfoque SSM, es claro que la representación del área de estudio resulta en un mayor número de variables de estado. En este enfoque al integrar la estructura equivalente del FDNE, específicamente la representación de la corriente de rama RL , es necesario incluirla como variable de estado. Esto implica que cada puerto del FDNE introduce nuevas variables de estado al modelo (una por cada puerto monofásicos y tres en puertos trifásicos), lo cual incrementa el orden del sistema y la carga computacional. En cambio, en el enfoque CCA, la discretización de la rama RL permite que su dinámica se incluya en la matriz de conductancia nodal como una corriente equivalente. De esta manera, se evita definir la corriente de rama RL como variable de estado, preservando el orden original del área de estudio y optimizando la simplicidad del modelo.

Capítulo 3

Análisis de Respuesta de Frecuencia Utilizando FDNE e Implementación en el Dominio del Tiempo

3.1. Introducción

En este capítulo se describe la implementación del proceso de identificación de parámetros en el dominio del tiempo, cuya estructura equivalente FDNE se basa en una función racional en el dominio z . La metodología utiliza el algoritmo de identificación de parámetros descrito previamente, con el propósito de aproximar adecuadamente la admitancia dependiente de frecuencia de un nodo particular en distintos sistemas de potencia.

Se analiza la respuesta de frecuencia en magnitud y ángulo, así como la evaluación de los criterios de cumplimiento de estabilidad y pasividad, para garantizar la implementación adecuada del modelo FDNE en el dominio del tiempo. Para validar el algoritmo de identificación de parámetros, se estima la admitancia dependiente de frecuencia en nodos particulares de redes de pequeño tamaño. Lo anterior permite una verificación controlada antes de su aplicación en sistemas de mayor escala, por lo que en este análisis no se imple-

menta la sustitución del área externa. El estudio se realiza en los sistemas de prueba de 3 nodos, 5 nodos y la Isla Sur de Nueva Zelanda.

Finalmente, se desarrolla un modelo de orden reducido de un solo puerto aplicado al sistema de dos áreas de Kundur con generación eólica, donde la admitancia dependiente de frecuencia del nodo frontera se estima para representar el área externa mediante una estructura equivalente.

La implementación se realiza utilizando el software MATLAB[®] para el desarrollo y análisis de los casos de estudios, mientras que el simulador PSCAD/EMTDC[®] se utiliza para validar las respuestas en los dominios del tiempo y de la frecuencia, con un modelo de orden completo del sistema de potencia. El hardware utilizado consiste en una laptop Lenovo con procesador Intel Core i7, 16 GB de RAM y frecuencia de 2.50 GHz.

3.2. Evaluación de respuesta de frecuencia en sistemas de potencia

Para validar el método propuesto, se realiza un análisis comparativo entre la respuesta de frecuencia del modelo FDNE estimado, obtenido mediante el algoritmo de la Figura 2.2, y la respuesta real del sistema. El análisis compara las respuestas en magnitud y fase (amplitud vs frecuencia), observando cómo el modelo estimado sigue de manera precisa la trayectoria de la admitancia en función de la frecuencia del sistema real, mostrando correctamente los picos y valles que corresponden a las resonancias del nodo analizado.

El proceso de identificación de parámetros se realiza a través de un barrido de frecuencias con una señal multisenso conectada al nodo analizado, extrayendo las mediciones correspondientes a este nodo. El barrido de frecuencias se evalúa dentro del intervalo de 1 Hz a 2500 Hz, con un paso de 1 Hz. Esto se debe a que, en los casos de estudio analizados, la mayor parte de los picos de resonancia y variaciones de fase se presentan por debajo de 2500 Hz. Más allá de este rango, las magnitudes son bajas y estables, sin cambios significativos en la fase. Además, los sistemas de potencia analizados se consideran trifásicos balanceados y se modelan como sistemas lineales invariantes en el tiempo. Bajo esta consideración, la señal de excitación se aplica solo a la fase A para calcular el modelo FDNE para cada nodo

analizado. Para evaluar la respuesta de frecuencia de $Y(z)$, se sustituye $z = e^{2\pi f \Delta t}$, donde f es el rango de frecuencia de interés de la forma $f = 1 : f_{max}$, f_{max} es la frecuencia máxima.

El simulador PSCAD/EMTDC[®] se utiliza como referencia para obtener la respuesta real del modelo detallado del sistema de potencia. La red eléctrica se modela utilizando bloques de elementos pasivos (R , L , C) y fuentes, donde los generadores se representan como fuentes de voltaje con resistencia y reactancia inductiva; el transformador mediante una reactancia inductiva y las líneas de transmisión mediante el modelo nominal π . Además, el bloque de impedancia armónica se utiliza para obtener la respuesta de frecuencia y realizar la comparación con el modelo FDNE estimado, obtenido mediante el algoritmo de identificación de parámetros en el dominio del tiempo. Es importante destacar que, en ningún caso de estudio de esta tesis, se utiliza el bloque FDNE disponible en el simulador PSCAD/EMTDC[®].

3.2.1. Respuesta de frecuencia del sistema de prueba de 3 nodos

En la Figura 3.1 se muestra el sistema de prueba 3 nodos bajo análisis, los parámetros del sistema son reportados en [Acha y Madrigal, 2001]. En la Figura 3.2 se presenta la comparación de la respuesta de frecuencia entre el modelo FDNE y el simulador PSCAD/EMTDC[®], evaluado desde el nodo 1. La magnitud y la fase de la admitancia se muestran en la Figura 3.2a y 3.2b, respectivamente. El modelo FDNE estimado sigue adecuadamente las variaciones de frecuencia del sistema real, con valores de error cuadrático medio (MSE, por sus siglas en inglés) bajos (magnitud 5.5686e-4 y fase 2.1077e-5), lo que indica discrepancias mínimas en la respuesta de frecuencia, como se observa en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: MSE del sistema de prueba de 3 nodos.

Nodos	Orden (n)	Magnitud	Fase
Nodo 1	74	5.5686e-4	2.1077e-5
Nodo 3	131	4.8067e-4	1.05e-5

Estos resultados cumplen con los criterios de estabilidad y pasividad del sistema, garantizando la confiabilidad del modelo para la simulación del comportamiento dinámico

del sistema. La Tabla 3.1 presenta los valores MSE obtenidos al comparar la respuesta de frecuencia del modelo FDNE con la del simulador PSCAD/EMTDC®, correspondientes a los nodos 1 y 3. En general, los valores de MSE son prácticamente despreciables, mostrando una alta precisión del modelo FDNE, tanto en la magnitud como en la fase de la admitancia.

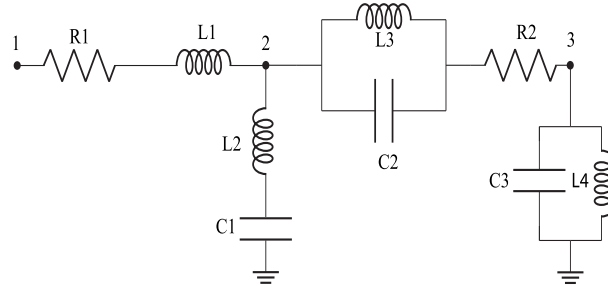


Figura 3.1: Sistema de prueba de 3 nodos.

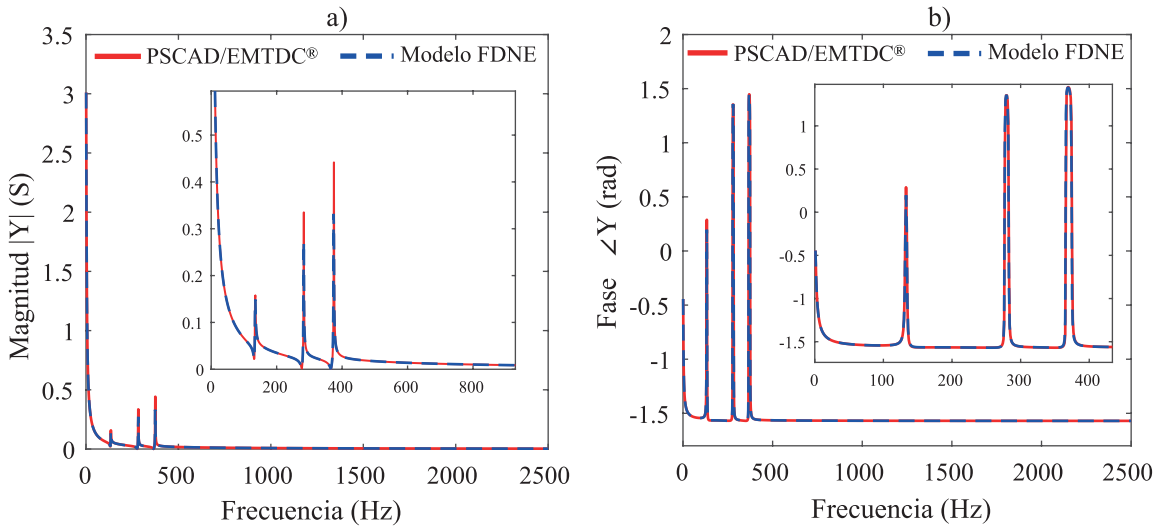


Figura 3.2: Respuesta de frecuencia del sistema de prueba de 3 nodos, visto desde el nodo 1: a) Magnitud, b) Fase.

3.2.2. Respuesta de frecuencia del sistema de prueba de 5 nodos

La Figura 3.3 muestra el sistema de potencia de prueba de 5 nodos utilizado para el análisis de la respuesta de frecuencia. Este sistema incluye siete líneas de transmisión, dos generadores y cuatro cargas, con los parámetros detallados en [Stagg y El-Abiad, 1968].

En la Figura 3.4 se compara la respuesta de frecuencia entre el modelo FDNE y

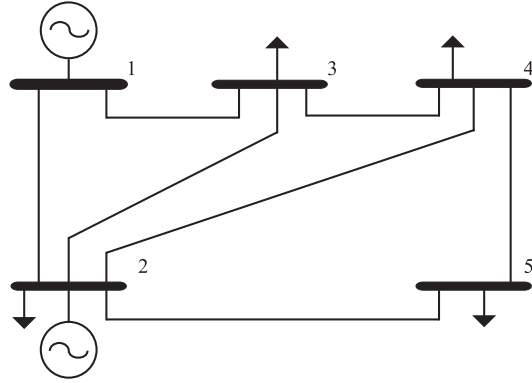


Figura 3.3: Sistema de prueba de 5 nodos.

el simulador PSCAD/EMTDC[®], evaluado desde el nodo 2. La representación de la admitancia, en magnitud (Figura 3.4a) y fase (Figura 3.4b), muestran una buena concordancia entre ambos enfoques. Los resultados del modelo FDNE muestran que sigue con precisión las características de la admitancia en función de la frecuencia.

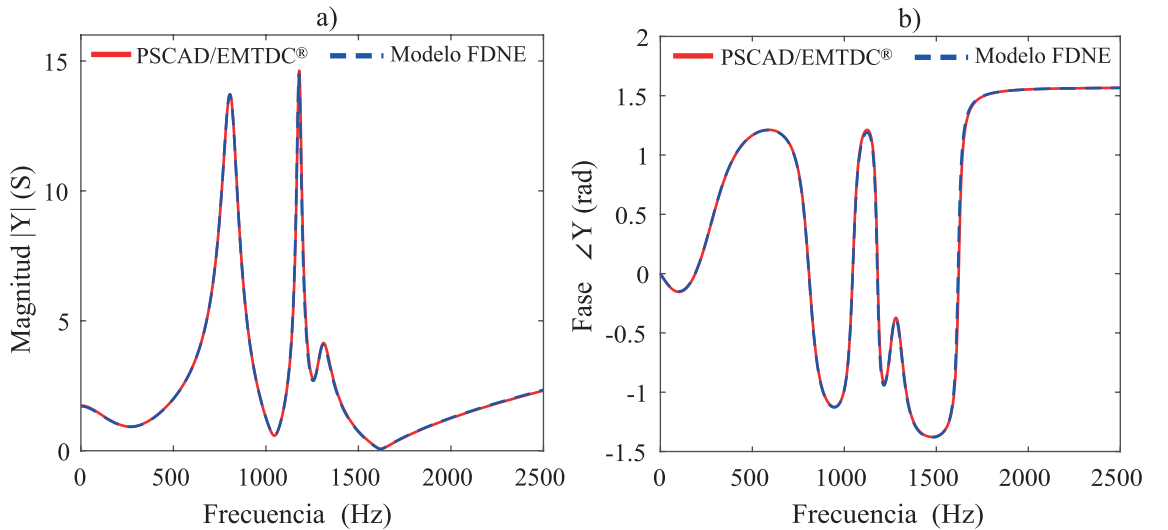


Figura 3.4: Respuesta de frecuencia del sistema de prueba de 5 nodos, visto desde el nodo 2: a) Magnitud, b) Fase.

La Tabla 3.2 muestra el MSE de la respuesta de frecuencia (magnitud y fase) del sistema de prueba de 5 nodos, para los nodos 1 y 2. En cuanto a la magnitud, ambos nodos presentan valores coincidentes, asociados con errores de $8.0756e-4$ y $8.0709e-4$, respectivamente, lo que resulta una representación precisa de la admitancia en magnitud

ante variaciones de frecuencia. Por otro lado, en la fase, el nodo 1 tiene un MSE de $1.2\text{e-}3$, mientras que el nodo 2 muestra un valor mayor de $7.3\text{e-}3$. La Figura 3.4b muestra que la trayectoria de la fase reproduce correctamente la respuesta real del sistema, garantizando una representación adecuada del comportamiento general de la admitancia en el nodo analizado.

Tabla 3.2: MSE del sistema de prueba de 5 nodos.

Nodos	Orden (n)	Magnitud	Fase
Nodo 1	112	$8.0756\text{e-}4$	$1.2\text{e-}3$
Nodo 2	100	$8.0709\text{e-}4$	$7.3\text{e-}3$

El orden del modelo FDNE utilizado para representar la admitancia de los nodos 1 y 2 es 112 y 100, respectivamente, cumpliendo con los criterios de precisión, estabilidad y pasividad establecidos en el proceso de identificación de parámetros.

3.2.3. Respuesta de frecuencia del sistema de la Isla Sur de Nueva Zelanda

La Figura 3.5 muestra el sistema de potencia de prueba de la Isla Sur de Nueva Zelanda; los datos del sistema se presentan en [Watson y Arrillaga, 2007]. El sistema de prueba consta de cuatro nodos y tres fuentes de voltaje, con dos conectadas al nodo M220 y una al nodo R220. Las cargas eléctricas lineales de 9.6 MW, 2.7 MW y 1.7 MW están conectadas a los nodos T200, I220 y R220, respectivamente. En la Figura 3.6 se mues-

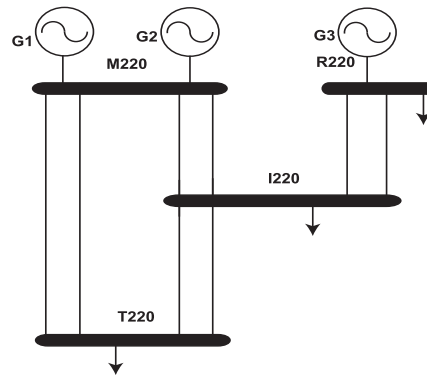


Figura 3.5: Sistema de prueba de la Isla Sur de Nueva Zelanda.

tra la comparación de la respuesta de frecuencia entre el modelo FDNE y el simulador

PSCAD/EMTDC[®], visto desde el nodo T220. Se observa una concordancia elevada entre la representación de la admitancia ante variaciones de frecuencia del modelo FDNE y la obtenida con el sistema real, tanto en magnitud como en fase, como se muestra en las Figuras 3.6a y 3.6b, respectivamente.

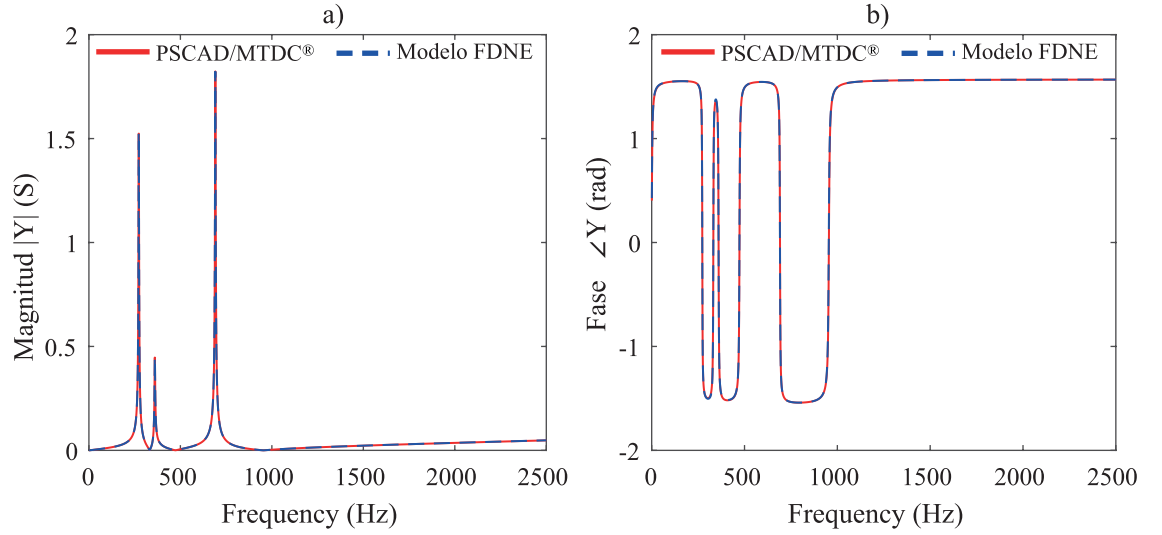


Figura 3.6: Respuesta de frecuencia del sistema de prueba de la Isla Sur de Nueva Zelanda, vista desde el nodo T220: a) Magnitud, b) Fase.

La Tabla 3.3 presenta los valores de MSE correspondientes a la respuesta de frecuencia del sistema de prueba de la Isla Sur de Nueva Zelanda, evaluados en los nodos M220 y T220. Para ambos nodos, se utilizó un orden de 150 en el análisis, cumpliendo con los criterios definidos en el proceso de identificación de parámetros. En el nodo M220, el MSE en magnitud es $3.5418\text{e-}5$ y en fase es $3.9368\text{e-}8$, mientras que en el nodo T220, los valores son $1.6213\text{e-}4$ para la magnitud y $2.5952\text{e-}5$ para la fase. En general, los valores obtenidos de MSE demuestran que el modelo FDNE reproduce de manera precisa la respuesta de frecuencia del sistema real, tanto en magnitud como en fase, con una diferencia mínima.

Tabla 3.3: MSE del sistema de la Isla Sur de Nueva Zelanda.

Nodos	Orden (n)	Magnitud	Fase
Nodo M220	150	$3.5418\text{e-}5$	$3.9368\text{e-}8$
Nodo T220	150	$1.6213\text{e-}4$	$2.5952\text{e-}5$

3.3. Modelo de orden reducido aplicado al sistema de prueba modificado de dos áreas de Kundur

El modelo FDNE se aplica al sistema de potencia de prueba de dos áreas de Kundur conectado a un generador eólico de tipo 4 bajo condiciones de falla. El sistema de potencia de dos áreas se muestra en la Figura 3.7. El sistema está dividido en las Áreas 1 y 2 (ver Figura 3.7a y Figura 3.7b, respectivamente), siendo el área de estudio que incluye los generadores G1-G2 y el generador eólico de tipo 4, y el área externa con los generadores G3-G4. El nodo de frontera conecta ambas áreas en el nodo 10, como se muestra en la Figura 3.7b. En esta representación de modelo de orden reducido del FDNE de un solo puerto, el área externa es reemplazada por el modelo FDNE. El sistema de prueba trifásico se considera balanceado, con una potencia base de 100 MVA y un voltaje base de línea a línea de 230 kV. Los parámetros se expresan en por unidad (p.u.), como se reporta en [Kundur, 1994].

La conexión del sistema de conversión de energía eólica (WECS, por sus siglas en inglés) en el nodo 6 utiliza un generador eólico tipo 4, basada con un generador síncrono de imanes permanentes (PMSG, por sus siglas en inglés) de accionamiento directo y un convertidor back-to-back de escala completa. Este sistema está diseñado para generar 2 MW de potencia de salida del PMSG, con un voltaje de línea a línea de 2500 V, como se describe en [Salgado *et al.*, 2018]. Además, considera fluctuaciones en la velocidad del viento y aumentos en la transferencia de potencia activa en el punto de acoplamiento común (PCC, por sus siglas en inglés). En este caso de estudio, el WECS se modela de forma detallada, tal como se muestra en el Apéndice C.

En este caso de estudio se utiliza el marco de referencia de espacio de estado para representar el modelo de orden reducido del FDNE ($SSM_{FDNE-BF}$) y el modelo de orden completo ($SSM-BF$). La solución de ambos modelos se obtiene mediante fuerza bruta (BF, por sus siglas en inglés), utilizando integración numérica con la regla trapezoidal (RT). El objetivo es evaluar el rendimiento computacional en términos de precisión y tiempos de CPU, realizando un análisis comparativo entre $SSM_{FDNE-BF}$, $SSM-BF$ y el simulador PSCAD/EMTDC®. El sistema se simula con un paso de tiempo de 512 puntos por período

a una frecuencia fundamental de 60 Hz.

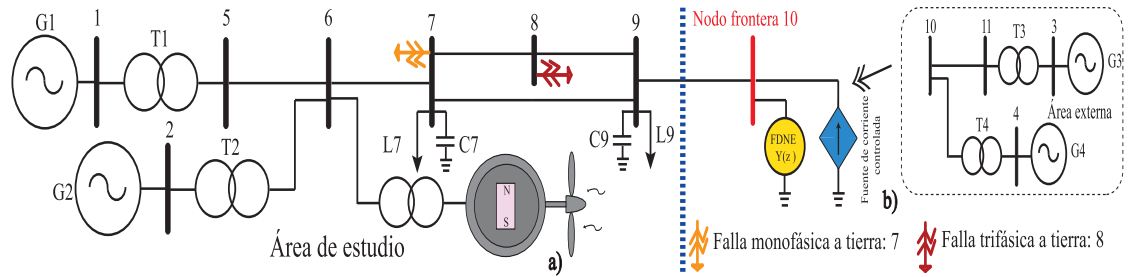


Figura 3.7: Sistema de potencia de prueba de dos áreas de Kundur modificado: a) Modelo del área de estudio, b) Modelo del área externa.

3.3.1. Respuesta de frecuencia del sistema de prueba de dos áreas de Kundur modificado

El área externa se representa mediante un modelo FDNE de un solo puerto. Para el proceso de identificación de parámetros, el sistema externo se desacopla del área de estudio. Posteriormente, las fuentes de voltaje ($G3$ y $G4$) se configuran en cortocircuito. A continuación, se energiza el nodo frontera utilizando una señal de excitación multisenso, mientras se registran simultáneamente las mediciones de voltaje y corriente. La señal multisenso utilizada realiza un barrido de frecuencia desde 1 Hz hasta 2500 Hz, con un paso de 1 Hz.

Las Figuras 3.8a y 3.8b muestran, respectivamente, la comparación de la magnitud y la fase de la admitancia del área externa en función de la frecuencia, entre el modelo FDNE y PSCAD/EMTDC[®]. El modelo FDNE proporciona una estimación satisfactoria de la admitancia del nodo frontera (puerto 1) ante cambios en la frecuencia, ajustándose con la respuesta de frecuencia del sistema real obtenida con el simulador PSCAD/EMTDC[®]. En la Tabla 3.4 se detalla el MSE obtenido de la respuesta de frecuencia del sistema de prueba, observado desde el puerto 1. En particular, el MSE para la magnitud es de $1.295e-7$, mostrando un ajuste satisfactorio. En cuanto a la fase, el MSE es de 0.0461, lo que implica una diferencia mínima en el ángulo de la admitancia. Observe de la Figura 3.7b, que el enfoque propuesto reproduce satisfactoriamente la trayectoria de la respuesta real del sistema. Además, el modelo FDNE tiene un orden de 200, cumpliendo con los criterios

de precisión, estabilidad y pasividad en el proceso de identificación de parámetros.

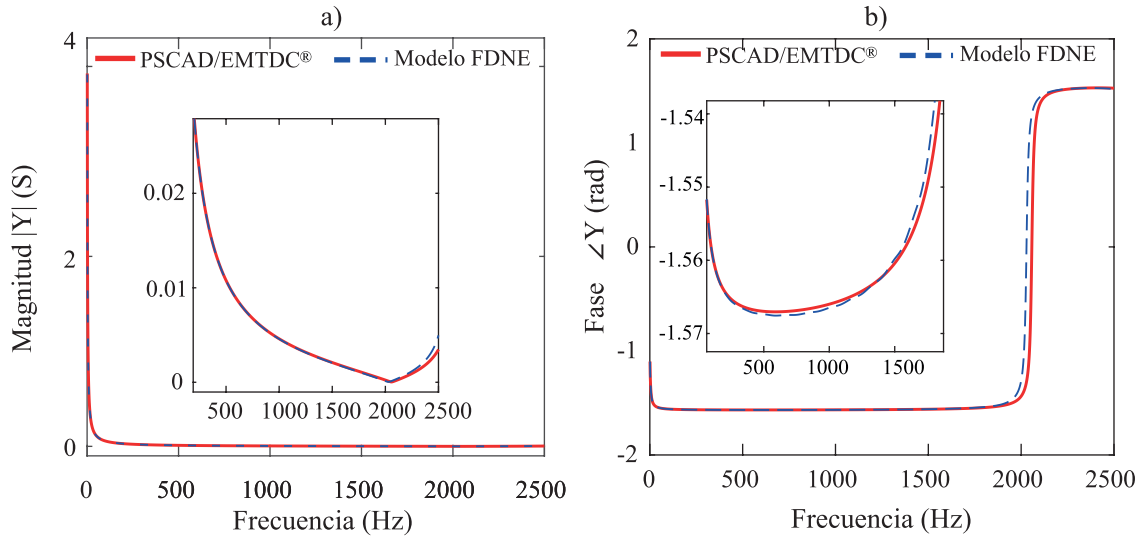


Figura 3.8: Respuesta de frecuencia del sistema de prueba de dos áreas de Kundur modificado, vista desde el nodo frontera: a) Magnitud, b) Fase.

Tabla 3.4: MSE del sistema de prueba de dos áreas de Kundur modificado.

Puertos	Orden (n)	Magnitud	Fase
Puerto 1	200	1.2950e-7	0.0461

3.3.2. Fallas monofásica y trifásica en el sistema de prueba de Kundur modificado usando un modelo de orden reducido

El análisis aborda la respuesta dinámica del sistema de prueba durante 15 s de simulación. En el área de estudio, se aplica una falla monofásica a tierra en el nodo 7 y una falla trifásica a tierra en el nodo 8, entre 11 a 11.2 s y 12 a 12.2 s, respectivamente, como se muestra en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5: Parámetros de falla del sistema de prueba de dos áreas de Kundur.

Nodos	Resistencia (p.u.)	Tiempo de falla (s)
7	1.8903e-6	11 a 11.2
8	1.8903e-6	12 a 12.2

Además, el WECS ajusta el control de transferencia de potencia, generando un incremento en la potencia activa durante los períodos de 5 a 10 s y de 10 a 15 s, respectivamente.

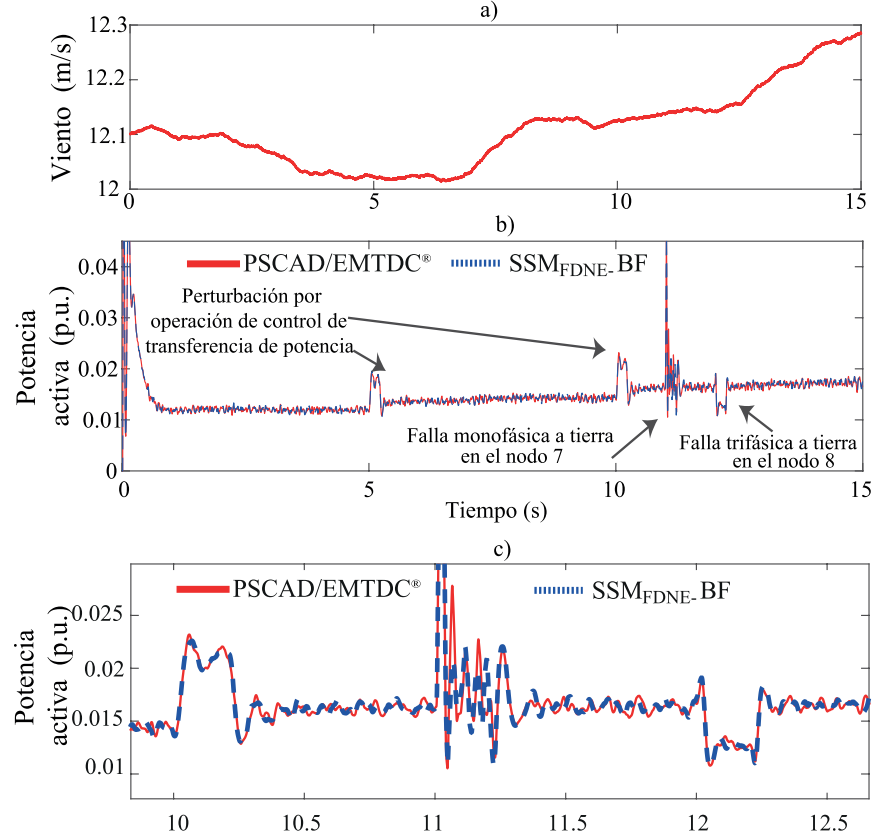


Figura 3.9: Generador eolico tipo 4: a) Fluctuaciones del viento, b) Potencia activa y c) Detalle de los transitorios por fallas propuestas.

Las Figuras 3.9a y 3.9b muestran el comportamiento dinámico de las fluctuaciones del viento y la potencia activa de salida del WECS (nodo 6), respectivamente. Además, en la Figura 3.9 se puede observar un transitorio inicial causado por el arranque del WECS. Sin embargo, después de aproximadamente 0.7 s, la potencia activa alcanza su valor estable. Los ajustes en el control de transferencia de potencia generan perturbaciones durante los intervalos de simulación de 5 a 5.2 s y de 10 a 10.2 s, respectivamente. Después de los transitorios, se observa un aumento continuo en la potencia activa, alcanzando la potencia nominal de generación del WECS. La Figura 3.9c presenta un acercamiento de los transitorios asociados a las fallas propuestas en el sistema de prueba, lo que permite analizar con mayor precisión

la evolución de la potencia activa. En general, se puede observar una respuesta aceptable del $\text{SSM}_{\text{FDNE-BF}}$ en comparación con la respuesta del simulador PSCAD/EMTDC®.

La Figura 3.10a presenta la comparación de las formas de onda de voltaje en el nodo 8 entre el $\text{SSM}_{\text{FDNE-BF}}$ y el simulador PSCAD/EMTDC®. Las Figuras 3.10b y 3.10c muestran un análisis detallado de las perturbaciones causadas por la falla monofásica a tierra en el nodo 7, observada desde el nodo 8, y la falla trifásica a tierra en el nodo 8, respectivamente.

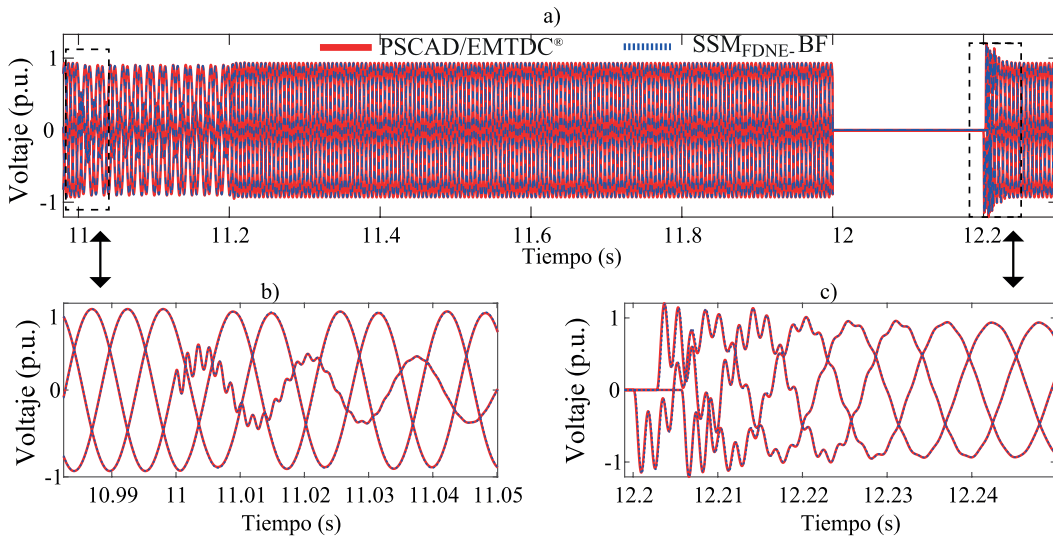


Figura 3.10: Sistema de prueba de dos ares de Kundur: a) Voltaje en el nodo 8 con una vista ampliada en b) y c).

La Figura 3.11a ilustra la comparación del flujo de potencia activa desde el nodo frontera hasta el nodo 9 entre el $\text{SSM}_{\text{FDNE-BF}}$ y el simulador PSCAD/EMTDC®. Las Figuras 3.11b y 3.11c muestran un acercamiento de las fallas generadas en los nodos 7 y 8, respectivamente. Se observa desde la perspectiva del flujo de potencia activa entre el nodo frontera y el nodo 9. La Figura 3.12a muestra la comparación de la potencia activa del generador 1 entre la representación del modelo de orden completo y la del modelo de orden reducido. Las Figuras 3.12b y 3.12c detallan los transitorios por la falla monofásica a tierra en el nodo 7 y la falla trifásica a tierra en el nodo 8, respectivamente, vistos desde la generación de potencia activa del generador 1.

En general, en el análisis en el dominio del tiempo de las respuestas del $\text{SSM}_{\text{FDNE-BF}}$

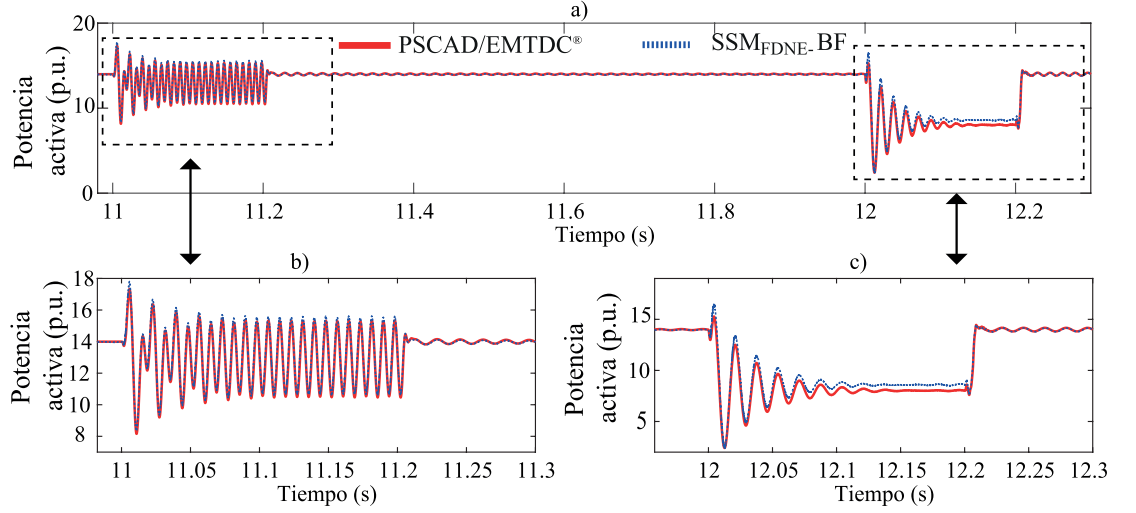


Figura 3.11: Sistema de prueba de dos áreas de Kundur: a) Flujo de potencia activa desde el nodo frontera hasta el nodo 9 con un enfoque detallado en b) y c).

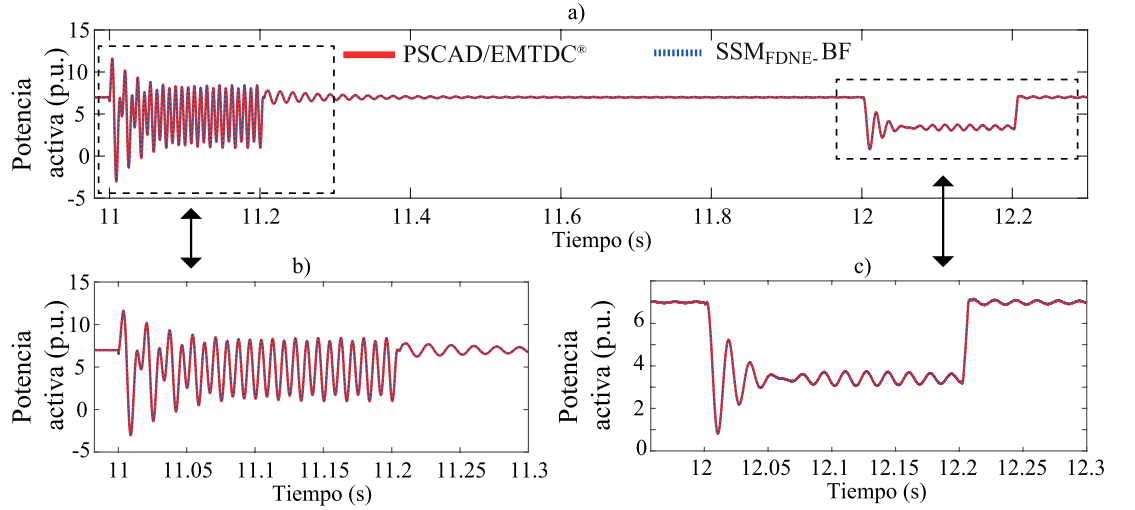


Figura 3.12: Sistema de prueba de dos áreas de Kundur: a) Generación de potencia activa por el generador 1 con una vista cercana en b) y c).

de un puerto aplicado al sistema de potencia de prueba, se observa una concordancia muy cercana con las respuestas obtenidas mediante el modelo de orden completo, según se observa de las Figura 3.10, 3.11 y 3.12. Además, el $SSM_{FDNE-BF}$ permite representar de manera precisa el comportamiento dinámico tanto en estado estable como en estado transitorio del sistema de prueba. Asimismo, se nota que, a medida que la falla se ubica más cerca del modelo FDNE, pueden presentarse mayores diferencias (ver Figuras 3.11b y 3.11c). Sin embargo,

esta discrepancia en la respuesta dinámica sigue permitiendo capturar el comportamiento general de la dinámica transitoria del sistema.

Por otro lado, se analiza el efecto de representar el área externa únicamente a la frecuencia fundamental, sin considerar su dinámica en un rango amplio de frecuencias, mediante un modelo reducido FDNE-omitido. Esta limitación genera diferencias significativas durante los intervalos de tiempo de falla, lo que afecta la precisión en el análisis transitorio del sistema, como se muestra en la Figura 3.13. La Figura 3.13a muestra la comparación del flujo de potencia activa desde el nodo frontera hasta el nodo 9 entre el modelo reducido FDNE-omitido y el simulador PSCAD/EMTDC®, mientras que las Figuras 3.13b y 3.13c presentan acercamientos de la respuesta ante perturbaciones en los nodos 7 y 8, respectivamente.

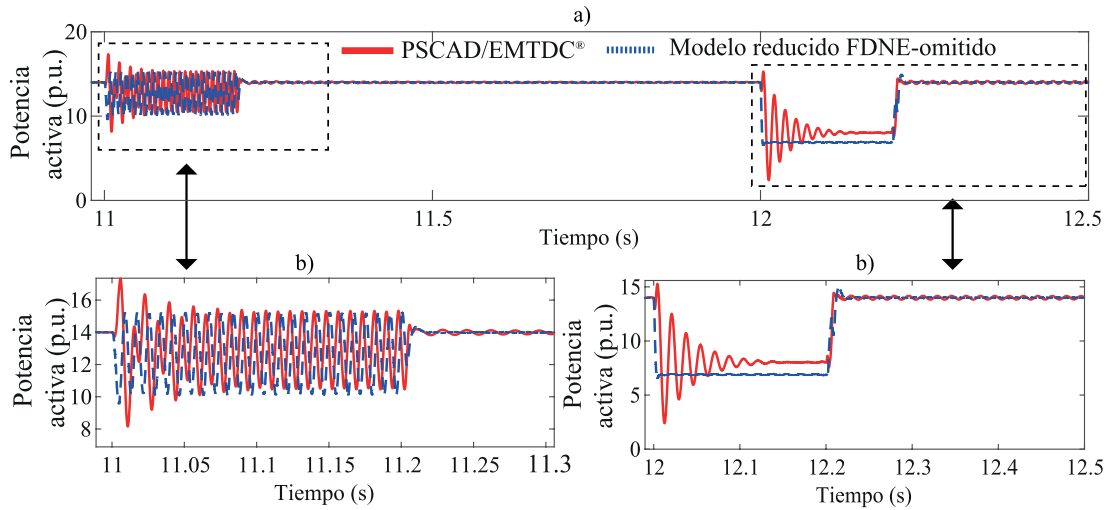


Figura 3.13: Sistema de prueba de dos áreas de Kundur: a) Efecto del modelo reducido sin FDNE en el flujo de potencia activa desde el nodo frontera hasta el nodo 9; vistas ampliadas en b) y c).

3.3.3. Evaluación de la precisión y tiempo de CPU: Sistema de prueba de dos áreas de Kundur modificado

La Tabla 3.6 muestra los errores relativos de las formas de onda para diferentes variables del sistema, obtenidas mediante los modelos de orden completo (SSM-BF) y el modelo de orden reducido (SSM_{FDNE}-BF). Se observa que los errores del SSM_{FDNE}-BF son mayores en comparación con el SSM-BF, pero estas diferencias permanecen dentro de

un rango bajo, del orden de 1 %, lo que demuestra una adecuada precisión del modelo propuesto. En términos del tiempo de CPU requerido, se observa que el $\text{SSM}_{\text{FDNE-BF}}$ es aproximadamente 1.62 veces más rápido que el SSM-BF , con tiempos de CPU de 66.28 s y 107.57 s, respectivamente, como se muestra en la Tabla 3.7. Esta diferencia debe ser mayor conforme la dimensión (escala) de la red de potencia se incrementa, por lo tanto, la aplicación del $\text{SSM}_{\text{FDNE-BF}}$ demuestra ser una alternativa eficiente para el análisis de sistemas de potencia.

Tabla 3.6: Error relativo (%) del sistema de prueba de dos áreas de Kundur modificado.

Formas de onda	SSM-BF	SSM _{FDNE-BF}
v_7	0.043	0.214
v_8	0.083	0.607
$P_{\text{puerto}-1}$	0.050	0.953
P_{G1}	0.010	0.186
P_{WECS}	0.083	1.135

Tabla 3.7: Tiempos de CPU (s) del sistema de prueba de dos áreas de Kundur modificado.

SSM-BF	SSM _{FDNE-BF}
107.57	66.28

3.4. Conclusiones

En este capítulo se ha evaluado la respuesta de frecuencia del modelo FDNE aplicado a diferentes redes eléctricas, comprobando su precisión en magnitud y fase para el rango de frecuencia de interés. Las comparaciones realizadas con el simulador PSCAD/EMTDC[®] han validado satisfactoriamente su capacidad para estimar la admitancia dependiente de frecuencia, analizada desde un nodo específico, e identificar los puntos de resonancia en cada caso de estudio.

El modelo FDNE se obtuvo a partir de la implementación del algoritmo de identificación de parámetros, utilizando una configuración general aplicada de manera uniforme

en los diversos casos de estudio. Este proceso se realizó mediante la recopilación de datos de medición (voltaje y corriente) desde el nodo frontera, energizado con una señal de excitación multiseno, lo que permitió estimar con precisión los coeficientes de la estructura equivalente (función racional en el dominio z), cumpliendo con los criterios de estabilidad y pasividad definidos.

Los resultados obtenidos muestran que la configuración general utilizada es adecuada en términos globales, debido a que los MSE para magnitud y fase en la mayoría de los casos de estudio analizados son del orden del 1 %. En particular, en el sistemas de la isla sur de Nueva Zelanda (Tabla 3.3), se alcanzaron valores mínimos en los nodos evaluados, con MSE de $3.5441\text{e-}5$ en magnitud y $3.9368\text{e-}8$ en fase en el nodo M220, mostrando una alta precisión. De manera similar, en el sistema de prueba de 3 nodos (Tabla 3.1), las diferencias también mínimas, con valores de MSE de $5.5686\text{e-}4$ en magnitud y $2.1077\text{e-}4$ en fase en el nodo 1. No obstante, en el sistema de prueba de 5 nodos (Tabla 3.2), se observaron discrepancias mayores, particularmente en el MSE de fase en los nodos analizados de $1.3\text{e-}3$ y $7.3\text{e-}3$ para los nodos 1 y nodo 2, respectivamente. Estos resultados muestran que, aunque la configuración general es adecuada en la mayoría de los casos, en algunos escenarios específicos puede ser necesario un ajuste individual en el proceso de identificación de parámetros para cada nodo, permitiendo mejorar la precisión en la estimación del modelo FDNE.

La implementación del modelo de orden reducido basado en FNDE ha demostrado ser una herramienta eficiente para el análisis de un sistema de potencia de prueba trifásica con una fuente de generación eólica. El modelo $\text{SSM}_{\text{FDNE-BF}}$, ha mostrado una buena concordancia con los resultados obtenidos mediante el simulador PSCAD/EMTDC[®], tanto en la evaluación de la respuesta de frecuencia como en el dominio del tiempo. En el análisis comparativo de respuesta de frecuencia de la admitancia del nodo frontera, el modelo FDNE muestra un ajuste satisfactorio (ver Tabla 3.4), con un MSE de magnitud de $1.295\text{e-}7$ y un MSE de fase de 0.0461. Aunque la discrepancia en la fase es mayor, el modelo sigue fielmente la trayectoria de la respuesta de frecuencia del sistema real. En cuanto a la simulación en el dominio del tiempo, los resultados obtenidos para diferentes fallas propuestas y la dinámica estocástica del WECS en el sistema de prueba muestran que el modelo $\text{SSM}_{\text{FDNE-BF}}$ reproduce satisfactoriamente los transitorios y el comportamiento global del sistema. Aunque

se observó diferencias mínimas en los transitorios cercanos (ver Figura 3.11) al modelo FDNE, estas discrepancias no comprometen la precisión del modelo propuesto (ver Tabla 3.6). Además, los errores relativos en las formas de onda del modelo de orden reducido, aunque ligeramente mayores que los del modelo de orden completo, siguen siendo suficientemente pequeños para garantizar una simulación confiable. También, el modelo $\text{SSM}_{\text{FDNE-BF}}$ es aproximadamente 1.62 veces más eficiente en términos de tiempos de CPU (Tabla 3.7), lo que lo convierte en una opción viable y eficiente para el análisis de sistemas de potencia.

Por otro lado, se ha observado que, aunque el modelo FDNE presenta discrepancias en la fase con respecto a la respuesta real del sistema, su implementación en el dominio del tiempo mantiene una alta precisión. En este estudio, se ha evaluado el rendimiento computacional de ambos modelos ($\text{SSM}_{\text{FDNE-BF}}$ y SSM-BF) dentro del marco de referencia de SSM, con el objetivo de analizar su eficiencia en la reducción de la complejidad del modelo del sistema de prueba, logrando una disminución significativa en los tiempos de simulación. Sin embargo, este análisis no aborda el incremento en las variables de estado dentro del área de estudio debido a la conexión de la estructura equivalente, así como la aplicación de técnicas computacionales para optimizar la eficiencia del método propuesto. Estos aspectos serán analizados en el siguiente capítulo, con el objetivo de evaluar la eficiencia de la estructura equivalente del FDNE en diferentes marcos de referencia.

Capítulo 4

Aplicación del Modelo de Orden Reducido Basado en FDNE para Sistemas de Potencia

4.1. Introducción

En este capítulo se presenta la aplicación del modelo de orden reducido basado en FDNE para el análisis transitorio de sistemas de potencia. Se realiza un análisis comparativo de la eficiencia computacional entre los modelos de orden reducido y modelos de orden completo, utilizando los enfoques SSM y CCA para ambos casos. El análisis considera diversas condiciones de operación del sistema de potencia, permitiendo evaluar la efectividad de cada enfoque de orden reducido en términos de precisión y tiempo de simulación.

El desarrollo del modelo FDNE proporciona una estructura equivalente simplificada para representar el área externa. Esta implementación puede generar modificaciones en la representación del área de estudio, las cuales están condicionadas por el marco de referencia utilizado. En particular, se analiza cómo el número de variables de estado requerido para su conexión incremental según el enfoque (SSM y CCA), lo que afecta el orden del modelo del área de estudio. Estos aspectos son importantes al considerar sistemas de potencia trifásicos y el uso de modelos equivalentes multipuerto, debido a que influyen en

la complejidad del modelado del sistema de potencia de prueba.

En la representación del área de estudio, la cantidad de variables de estado también depende del enfoque utilizado, lo que determina el orden y la complejidad del modelo. El enfoque SSM tiende a generar un modelo más complejo (de mayor orden), mientras que el enfoque CCA, generalmente, permite obtener un modelo simplificado (de menor orden). El análisis evalúa la eficiencia del modelado de orden reducido del FDNE, considerando la reducción de la complejidad de modelado en el área de estudio y en la conexión del área externa.

Los casos de estudio presentados analizan diferentes sistemas de potencia de prueba, modelados mediante un área de estudio conectado a múltiples modelos FDNE. Las configuraciones de los escenarios propuestos para el análisis del modelo de reducido del FDNE, no incluyen conexión eléctrica entre los modelos FDNE, excepto las conexiones a través del área de estudio. Por lo que, los modelos FDNE se pueden obtener de manera independiente usando el proceso de identificación de parámetros descrito en los capítulos anteriores. Durante la simulación, cada modelo FDNE es afectado únicamente por el área de estudio.

Para validar la formulación propuesta, se evalúa la eficiencia computacional mediante la comparación del tiempo de CPU del enfoque $CCA_{FDNE-LU}$ con los enfoques $SSM_{FDNE-BF}$, $SSM-BF$ y CCA_{RT-LU} . En términos de precisión, las respuestas obtenidas con cada enfoque se comparan directamente con los resultados del simulador PSCAD/EMTDC®, utilizando un modelo de orden completo del sistema de potencia.

Los enfoques propuestos se implementan en tres casos de estudio, en los cuales el sistema de potencia se modifica mediante la integración de elementos adicionales, la aplicación de distintas condiciones de falla y la implementación de un modelo FDNE.

- Caso de estudio 4.2: Análisis de transitorios electromagnéticos ante falla monofásica a tierra en el sistema modificado del IEEE de 118 nodos. El área externa es sustituida por un modelo FDNE de dos puertos.
- Caso de estudio 4.3: Análisis de distorsión armónica en el sistema modificado del IEEE de 30 nodos. El área externa es sustituida por un modelo FDNE de cuatro puertos.

- Caso de estudio 4.4: Variante en el Caso de estudio 4.3 que considerar una red trifásica con fuentes de generación eólica.

La división de los sistemas de potencia de prueba entre área de estudio y área externa, se definen de acuerdo con el análisis requerido. En este enfoque, el área de estudio se centra en el análisis de transitorios electromagnéticos generados por la integración de fuentes de generación eólica, la conexión de fuentes de distorsión armónicas y condiciones de falla. Debido a que los transitorios de alta frecuencia se atenúan rápidamente con la distancia, el análisis se realiza en el punto de acoplamiento común (PCC, por sus siglas en inglés) de estas fuentes, los nodos donde se producen las fallas y los elementos cercanos a estos fenómenos. Esta selección mejora la eficiencia computacional al enfocarse en las áreas donde los efectos de los transitorios son más significativos y afectan directamente a la dinámica del sistema.

La solución de los enfoques $SSM_{FDNE-BF}$ y $SSM-BF$ se obtiene mediante fuerza bruta (BF, sus siglas en inglés), mientras que en los enfoques $CCA_{FDNE-LU}$ y CCA_{RT-LU} , la solución se calcula utilizando la factorización de matrices dispersas mediante un proceso de descomposición LU. En todos los enfoques utilizan la regla trapezoidal (RT) como método de integración, con un paso de tiempo de 512 puntos por período a una frecuencia fundamental de 60 Hz. Los parámetros de los sistemas de potencia de prueba se reportan en [Zimmerman y Murillo-Sánchez, 2024]. Además, el desarrollo y programación de los algoritmos para los enfoques propuestos se realizaron utilizando MATLAB® y ejecutados en una laptop Lenovo con procesador Intel Core i7, 16 GB de RAM y frecuencia de 2.50 GHz.

4.2. Caso de estudio 4.2: Análisis de transitorios electromagnéticos ante falla monofásica a tierra en sistemas modificado del IEEE de 118 nodos

El modelo de orden reducido del FDNE se aplica en el sistema de potencia de IEEE de 118 nodos modificado, como se muestra en la Figura 4.1. Las Figuras 4.1a, 4.1b y 4.1c muestran, respectivamente, el área externa a reducir, el área de estudio considerada para la

aplicación de fallas monofásicas a tierra y el diagrama esquemático que representa el área reducida por el modelo FDNE. Además, se considera la aplicación de los enfoques SSM-BF y CCA_{RT}-LU para establecer una comparación basada en la eficiencia computacional con respecto al enfoque SSM_{FDNE}-BF. Esta aplicación esta asociada con el sistema de potencia de IEEE de 118 nodos modificado para la evaluación del comportamiento dinámico del sistema de potencia.

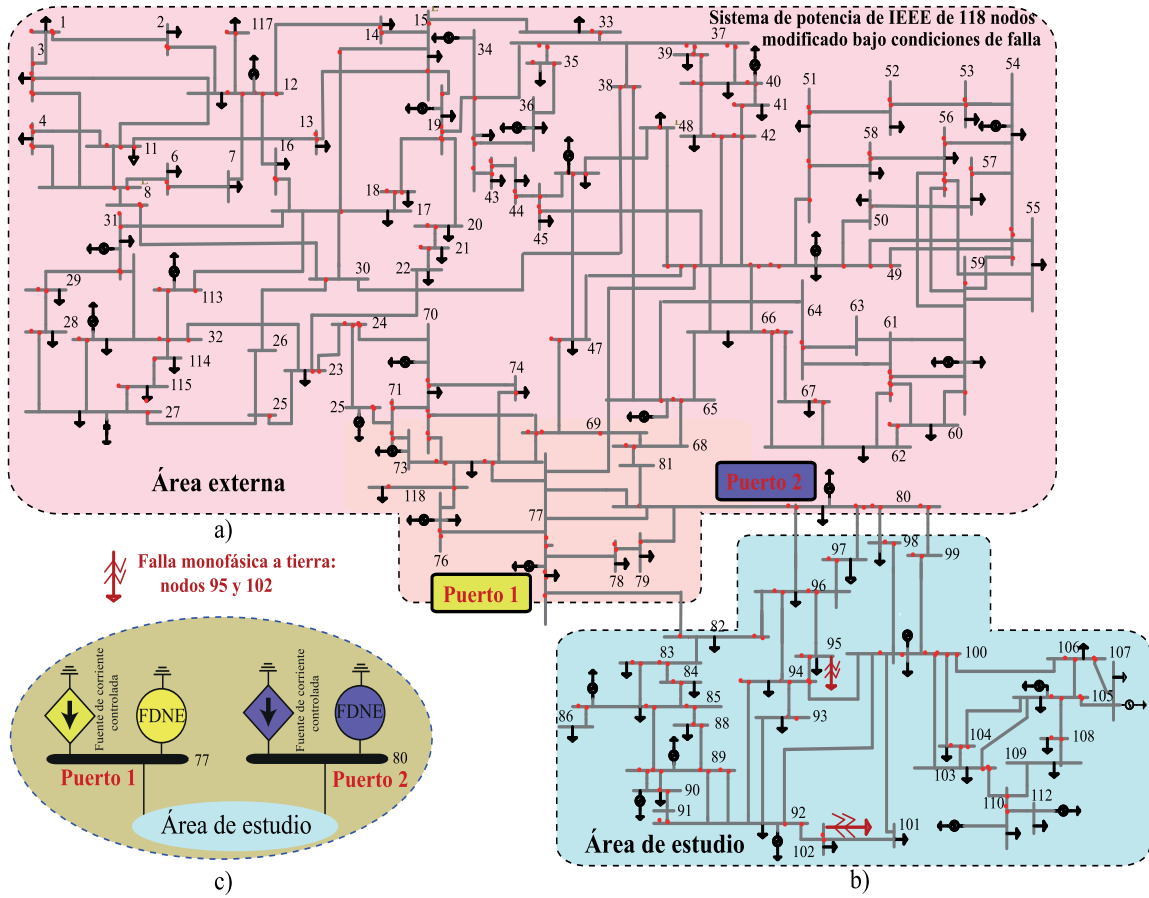


Figura 4.1: Sistema de potencia de prueba de IEEE de 118 nodos modificado bajo condiciones de falla: a) Área externa para reducir, b) Área de estudio, c) Reducción a través del enfoque FDNE.

El sistema de potencia de IEEE de 118 nodos modificado representa una parte del sistema de potencia americano (Midwest USA), que consta de 118 nodos, 54 generadores, 177 líneas de transmisión, 9 transformadores y 91 cargas eléctricas lineales. El sistema de potencia de IEEE de 118 nodos modificado considera una potencia base trifásica de

100 MVA, un voltaje base entre fases de 230 kV, que es considerado balanceado (sistema monofásico). El área de estudio considera desde el nodo 82 hasta el nodo 112, con los nodos frontera definidos en el nodo 77 (puerto 1) y el nodo 80 (puerto 2). El resto del sistema es representado mediante un modelo FDNE multipuerto. Los parámetros se expresan en por unidad (p.u.) y se describen en [Zimmerman y Murillo-Sánchez, 2024]. Los resultados obtenidos de los métodos se comparan en función del tiempo de CPU requerido durante la simulación de 30 períodos de tiempo o 0.5 s, mientras que la precisión se compara con respecto al simulador PSCAD/EMTDC®.

4.2.1. Respuesta de frecuencia del sistema de prueba de IEEE de 118 nodos modificado

En el cálculo del modelo FDNE se realiza un proceso de identificación de parámetros en el dominio del tiempo utilizando datos de medición de entrada y salida del nodo frontera, obtenidos a través de una señal de excitación multiseno. Esta señal está configurada para abarcar el ancho de banda de interés, excitando los modos vistos desde el nodo frontera y optimizando el tiempo de medición. La duración de medición no se define arbitrariamente, debido que está determinada por los parámetros de diseño de la señal multiseno, ver Apéndice A. En particular, el paso de frecuencia Δ_f está relacionado con el tiempo máximo de medición T_{max} mediante $\Delta_f = 1/T_{max}$. A su vez, el número de componentes de frecuencias excitadas en el rango hasta f_{max} se calcula como $M_f = f_{max}/\Delta_f$. De esta manera, se logra un tiempo de medición mínimo, manteniendo una estimación adecuada de los coeficientes de la función racional. En este estudio, la señal multiseno se configura con un ancho de banda de 2.5 kHz, un paso de frecuencia de 10 Hz y una duración máxima de 0.1 s. El modelo FDNE se aplica a un análisis de estado transitorio de alta frecuencia; los resultados son aceptables con una frecuencia de muestreo de 10 Hz, ya que los eventos transitorios en estudio se capturan adecuadamente con esta resolución. Esta configuración se implementa en todos los puertos, aunque puede ajustarse individualmente para cada puerto para mejorar la representación equivalente. El barrido de frecuencia puede ajustarse: una resolución más fina (menor paso de frecuencia) mejora la estimación de los coeficientes de la función racional, aunque requiere un mayor esfuerzo computacional. Para mejorar la pre-

cisión en la estimación de los coeficientes de la función racional, el intervalo de muestreo de frecuencia puede establecerse en 1 Hz en el rango de 1 a 100 Hz, 5 Hz en el rango de 100 a 200 Hz y 10 Hz para frecuencias superiores a 200 Hz. Si bien estos ajustes aumentan la carga computacional durante el proceso de identificación de parámetros, mejoran la precisión del modelo.

La Tabla 4.1 muestra los resultados de la evaluación de la respuesta en frecuencia para los nodos 80 y 77, puertos 1 y 2, respetivamente, incluyendo el orden del modelo y los MSE en magnitud y fase. La aproximación de la admitancia en ambos puertos se obtuvo mediante un modelo de orden 198, con magnitudes de MSE despreciables en magnitud y fase, lo que garantiza una adecuada precisión dentro del rango de frecuencias considerado, como se muestra en la Tabla 4.1. Además, el modelo FDNE estimado cumple con los criterios de precisión, estabilidad y pasividad establecidos en el proceso de identificación de parámetros.

Tabla 4.1: MSE de la respuesta en frecuencia en los puertos del sistema de prueba de IEEE de 118 nodos modificado.

Puertos	Orden (n)	Magnitud	Fase
Puerto 1	198	5.1921e-8	5.1012e-4
Puerto 2	198	4.1346e-8	5.0927e-4

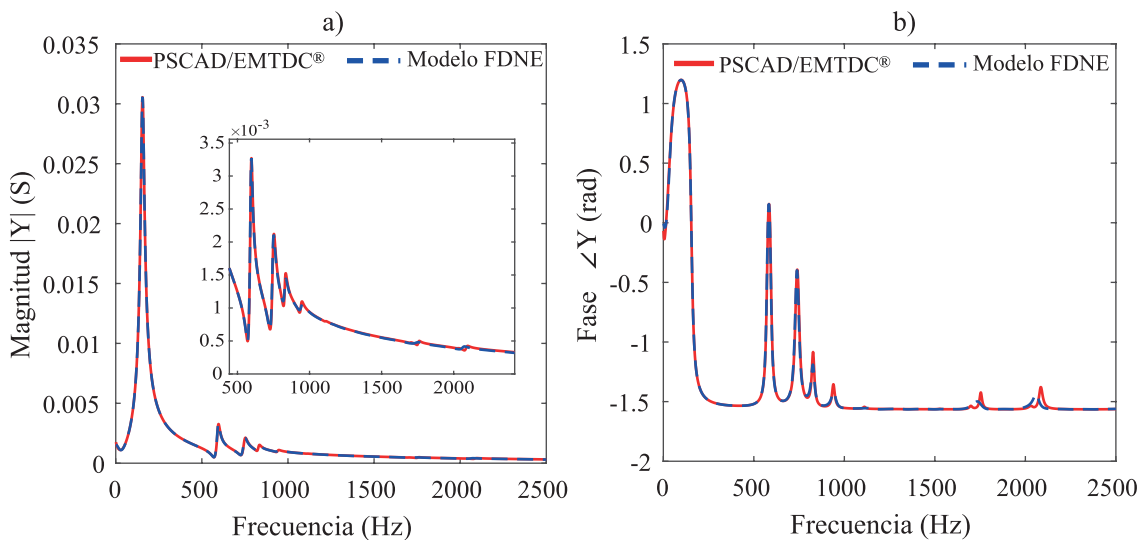


Figura 4.2: Respuesta de frecuencia en el puerto 2 del sistema de prueba de IEEE de 118 nodos modificado: a) Magnitud y b) Fase.

La Figura 4.2 presenta la comparación de la respuesta en frecuencia entre el modelo FDNE y el simulador PSCAD/EMTDC[®], vista desde el puerto 2. La Figura 4.2a muestra la magnitud de la admitancia y la Figura 4.2b la fase. Se observa que el modelo FDNE reproduce de manera muy cercana las variaciones de magnitud y fase en todo el espectro de frecuencia analizado, comparado con las respuestas obtenidas con simulador PSCAD/EMTDC[®].

4.2.2. Eficiencia computacional de la representación mediante modelos equivalentes en la solución del sistema modificado IEEE de 118 nodos

La Tabla 4.2 se muestra el número de variables de estado de los modelos equivalentes obtenidos mediante los enfoques SSM-BF, CCA_{RT}-LU y SSM_{FDNE}-BF para el sistema de prueba IEEE de 118 nodos modificado. El enfoque SSM consta de 329 variables de estado, de las cuales 18 corresponde a voltajes de nodos y 311 a corrientes de rama. El enfoque CCA_{RT} utiliza 118 variables de estados, correspondientes a voltajes de nodo, una matriz de conductancias, un vector columna de voltajes y un vector columna de corrientes de rama, con dimensiones de 118x118, 118x1 y 118x1, respectivamente. El SSM_{FDNE} cuenta con 48 variables de estado para las corrientes de rama, además una variable de estado adicional por puerto, con un total de 50 variables de estados.

Tabla 4.2: Representación de variables de estado del sistema de prueba de IEEE de 118 nodos modificado.

Método	Variables de estado		
	Modelo	Por puerto	Total
SSM	329	-	329
CCA _{RT}	118	-	118
SSM _{FDNE}	48	1	50

Se puede observar que el modelo CCA_{RT} obtiene una reducción en el número de variables de estado aproximadamente del 64 % con respecto a SSM, mientras que el enfoque SSM_{FDNE} logra una reducción de las variables de estado en comparación con SSM y CCA_{RT}

de aproximadamente el 85 % y el 58 %, respectivamente.

La Tabla 4.3 muestra el tiempo de CPU requerido por los enfoques SSM-BF, CCA_{RT-LU} y SSM_{FDNE}-BF para la simulación del sistema de prueba de IEEE de 118 nodos modificado. El enfoque SSM-BF requiere un tiempo de cómputo de 27.07 s, mientras que el CCA_{RT-LU} reduce el tiempo de simulación a 13.50 s, lo que representa aproximadamente una disminución del 50 %. Por otro lado, el proceso SSM_{FDNE}-BF disminuye el tiempo de simulación a 5.63 s, con una reducción de alrededor del 79 % y 58 % en comparación con SSM-BF y CCA_{RT-LU}, respectivamente.

Tabla 4.3: Tiempos de CPU (s) del sistema de prueba de de IEEE de 118 nodos modificado.

SSM-BF	CCA _{RT-LU}	SSM _{FDNE} -BF
27.07	13.50	5.63

Por lo tanto, el enfoque SSM_{FDNE}-BF muestra una mejora significativa en la eficiencia computacional, al reducir considerablemente las variables de estado, permitiendo mejorar significativamente los tiempos de simulación en comparación con los demás procedimientos propuestos, como se observa en las Tablas 4.2 y 4.3, respectivamente.

4.2.3. Evaluación en el dominio del tiempo del modelado de orden reducido del FDNE aplicado al sistema de prueba de IEEE de 118 nodos modificado

Para evaluar el comportamiento dinámico del sistema de prueba de IEEE de 118 nodos modificado durante un tiempo de simulación de 0.5 s, se considera la aplicación de dos fallas monofásicas a tierra. Las fallas se ubican en los nodos 95 y 102, entre los rango de tiempo de 0.1 a 0.2 s y 0.3 a 0.4 s, respectivamente, como se muestra en la Tabla 4.4. En las Figuras 4.3, 4.4 y 4.5, se muestran las comparaciones de las formas de onda de voltaje en los nodos 95 y 105, y de la corriente en la rama 94-100, obtenidas al aplicar los enfoques SSM_{FDNE}-BF, SSM-BF, CCA_{RT-LU}, incluida la respuesta del simulador PSCAD/EMTDC®.

La Figura 4.3 muestra la forma de onda del voltaje en el nodo 95, con los transitorios causados por la falla monofásica a tierra en el mismo nodo y el efecto de la falla en

Tabla 4.4: Parámetros de falla del sistema de prueba de IEEE de 118 nodos modificado.

Nodos	Resistencia (p.u.)	Tiempo de falla (s)
95	0.0378	0.1 a 0.2
102	0.113	0.3 a 0.4

el nodo 102. Se puede observar que en el intervalo de tiempo de 0.1 a 0.2 s, se produce una depresión de voltaje, cuya magnitud disminuye hasta en un 50 % respecto al valor nominal.

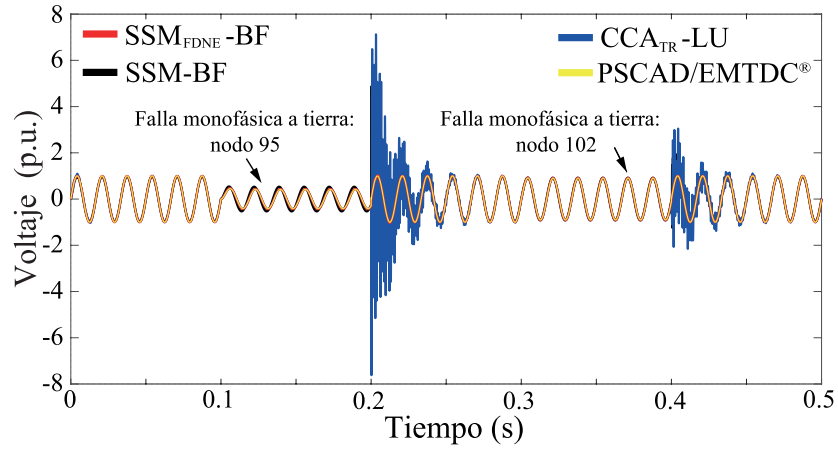


Figura 4.3: Forma de onda de voltaje en el nodo 95 durante la doble falla monofásica en el rango de tiempo entre 0.1 y 0.2 s y 0.3 a 0.4 s.

También, se observa que al final de cada falla analizada, se producen oscilaciones transitorias cuya amplitud y tiempo para alcanzar el estado estable depende de las condiciones específicas de cada perturbación. Las oscilaciones observadas después de la falla en el CCA se deben a efectos numéricos propios de la integración, mientras que PSCAD/EMTDC®, al contar técnicas de refinanciamiento que atenúa la señal, no presenta esas oscilaciones y muestra directamente la dinámica física del sistema. En el caso de la falla en el nodo 95, vista desde el mismo nodo, se presenta un transitorio de voltaje cuyo valor pico es 3.5 veces su valor nominal, alcanzando el estado estable en aproximadamente 53 ms.

La Figura 4.4 se muestra la forma de onda de voltaje en el nodo 102 considerando las fallas monofásica a tierra. Entre 0.3 y 0.4 s, se observa una reducción de voltaje del 25 % de su valor nominal. Asimismo, se observa la oscilación transitoria de voltaje de 2.8 veces

con respecto a su valor nominal, cuya duración hasta alcanzar condiciones estables es de aproximadamente 30 ms. También, se observa el efecto de la falla en el nodo 95, sostenida de 0.1 a 0.2 s. La magnitud de voltaje decrece hasta el 8 % de su valor nominal, visto desde el nodo 102.

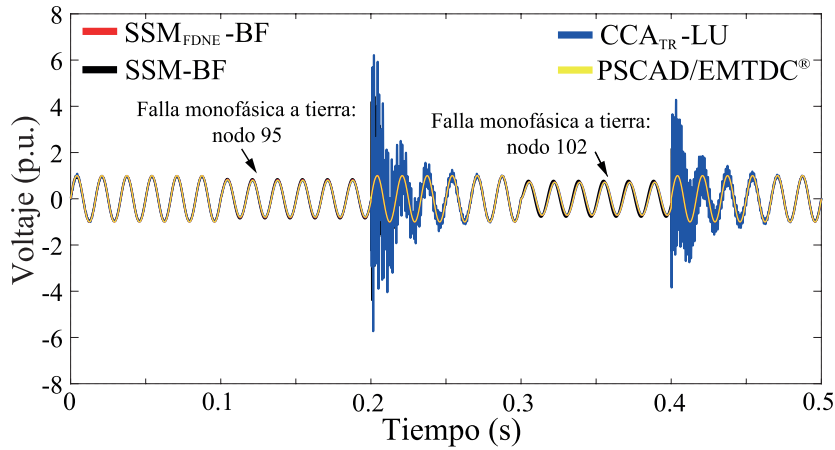


Figura 4.4: Forma de onda de voltaje en el nodo 102 aplicando doble falla monofásica en el rango de tiempo entre 0.1 y 0.2 s y 0.3 a 0.4 s.

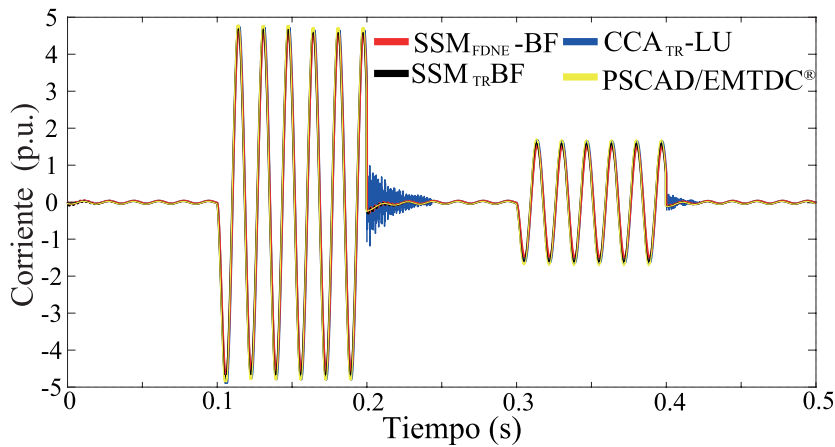


Figura 4.5: Forma de onda de corriente de rama de 94-100, bajo doble falla monofásica.

La Figura 4.5 se muestra la forma de onda de la corriente de rama 94-100 bajo el efecto de las fallas monofásica a tierra en los nodos 95 y 102. Se puede observar en el intervalo de tiempo entre 0.1 a 0.2 s, una sobrecorriente de magnitud de 46 veces el valor nominal debido a la falla en el nodo 95. También, en el rango de tiempo entre 0.3 y 0.4 s, la falla en el nodo 102 provoca una sobrecorriente de 17 veces el valor previo a la falla.

Posterior a la liberación de cada falla, el tiempo requerido para alcanzar el estado estable es de aproximadamente 48 ms y 15 ms, respectivamente.

4.2.4. Análisis de resultados de precisión del modelado de orden reducido del FDNE aplicado al sistema de prueba de IEEE de 118 nodos modificado

Las formas de onda de voltaje y corriente ilustradas en las Figuras 4.3, 4.4 y 4.5 muestran una estrecha concordancia entre las respuestas obtenidas mediante los enfoques $\text{SSM}_{\text{FDNE-BF}}$, SSM-BF y $\text{CCA}_{\text{RT-LU}}$, en comparación con la respuesta del simulador PSCAD/EMTDC[®], como se resume en la Tabla 4.5. Para evaluar la precisión de cada método, se calcularon los valores promedios de los errores relativos máximos en el sistema de prueba IEEE de 118 nodos modificado.

Tabla 4.5: Error relativo (%) del sistema de prueba de IEEE 118 nodos modificado.

SSM-BF	$\text{CCA}_{\text{RT-LU}}$	$\text{SSM}_{\text{FDNE-BF}}$
0.21	0.32	1.2

Los modelos de orden completo, como el enfoque SSM-BF , presentan la menor diferencia con un error relativo de 0.21 %, mientras que el método $\text{CCA}_{\text{RT-LU}}$ muestra una diferencia mínima de 0.32 %. Ambos enfoques presentan una buena concordancia al representar la dinámica del sistema de prueba. Por otro lado, el modelo de orden reducido del FDNE, obtenido mediante $\text{SSM}_{\text{FDNE-BF}}$, presenta un error relativo mayor de 1.2 %, lo que implica una diferencia ligeramente superior en comparación con los modelos de orden completo. Sin embargo, esta diferencia en $\text{SSM}_{\text{FDNE-BF}}$ sigue siendo adecuada para representar los transitorios causados por las fallas consideradas en el sistema de prueba.

Con base en los resultados obtenidos del caso de estudio propuesto con los enfoques $\text{SSM}_{\text{FDNE-BF}}$, SSM-BF y $\text{CCA}_{\text{RT-LU}}$, el método $\text{SSM}_{\text{FDNE-BF}}$ se presenta como una alternativa eficiente para reducir la complejidad del modelado mediante el uso del FDNE en la representación del área externa. Además, en términos de tiempo de CPU, optimiza los tiempos de simulación requeridos, manteniendo una concordancia cercana con la respuesta

del simulador PSCAD/EMTDC[®]. Esto lo convierte en una herramienta de simulación eficiente para el análisis de sistemas de potencia. No obstante, es posible aplicar este enfoque dentro de otros marcos de referencia, como CCA, para obtener una solución más eficiente.

4.3. Caso de estudio 4.3: Análisis de distorsión armónica en sistema modificado del IEEE de 30 nodos

Este caso de estudio analiza la implementación del modelado de orden reducido del FDNE dentro del marco de referencia CCA. La combinación de ambos enfoques, denominada CCA_{FDNE}-LU, permite su eficiente representación. El enfoque FDNE formula un modelo de orden reducido aplicado a una sección específica del sistema, mientras que el enfoque CCA modela los elementos del área de estudio mediante MEND. La solución se realiza a través de un análisis de incidencia nodal, aplicando la factorización matricial dispersa obtenida por descomposición LU, logrando así una reducción significativa de su modelo detallado, así como de su proceso de solución.

Para evaluar la eficiencia computacional y la precisión del enfoque CCA_{FDNE}-LU en el sistema de prueba de IEEE de 30 nodos modificado bajo condiciones de distorsión armónica, se comparan sus resultados con los obtenidos mediante los métodos SSM-BF, CCA_{RT}-LU, SSM_{FDNE}-BF y el simulador PSCAD/EMTDC[®]. El sistema consta de 30 nodos, 2 fuentes de voltaje sinusoidal (nodos 1 y 2), 3 transformadores y 21 cargas lineales. Se considera balanceado (sistema monofásico), con una potencia base de 100 MVA y un voltaje base de línea a línea de 230 kV. Los parámetros del sistema de prueba se describen en [Zimmerman y Murillo-Sánchez, 2024].

El método CCA_{FDNE}-LU se aplica al sistema de potencia de prueba, como se muestra en la Figura 4.6. Las Figuras 4.6a y 4.6b presenta los límites entre el área de estudio y área externas, respectivamente. El área de estudio considera fuentes de corriente armónica en los nodos 3 y 8, modeladas como inyecciones de corriente que representan las componentes generadas por convertidores electrónicos de potencia. Los armónicos seleccionados (3^{er}, 5^{er}, 7^{er}, 9^{er}, 11^{er} y 13^{er}) corresponden a las distorsiones típicamente introducidas por estos dispositivos, mientras que sus magnitudes y fases se definieron únicamente con fines de análisis, para

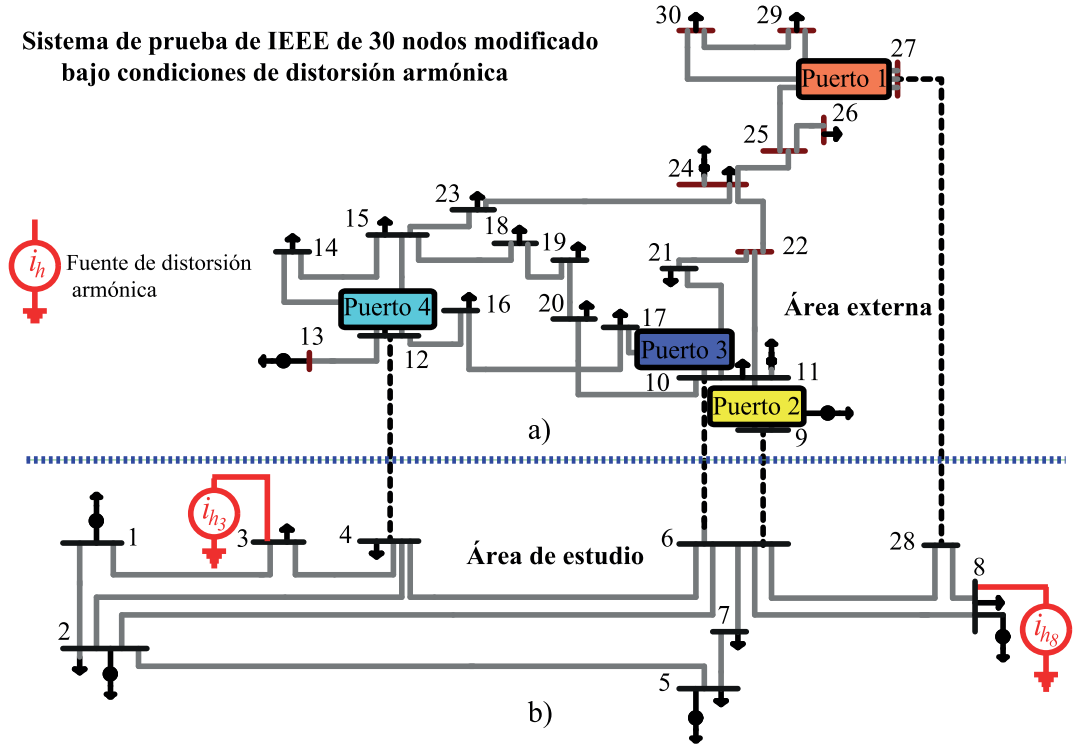


Figura 4.6: Sistema de prueba de IEEE de 30 nodos modificado bajo distorsión armónica: a) Área externa a reducir mediante el enfoque FDNE, b) Área de estudio.

evaluar los efectos propuestos. El área externa considera la estructura equivalente del FDNE, con nodos frontera en los nodos 27 (puerto 1), 9 (puerto 2), 10 (puerto-3) y 12 (puerto 4).

4.3.1. Respuesta de frecuencia del sistema de prueba de IEEE de 30 nodos modificado

Para determinar la admitancia dependiente de la frecuencia de los nodos frontera, se utilizó una señal de excitación multiseno con un ancho de banda de 2.5 kHz (frecuencia máxima) y un paso de frecuencia de 10 Hz, empleando un período de tiempo de 0.1 s. Esta señal se aplicó como una fuente de voltaje constante a frecuencia variable. Las mediciones de las formas de onda de voltaje (entrada) y corriente (salida) se realizaron siguiendo las especificaciones del proceso de identificación de parámetros. La Tabla 4.6 presenta los resultados de la evaluación de la respuesta en frecuencia para cada puerto, indicando el orden, los MSE de magnitud y fase. La Tabla 4.6 muestra la evaluación de la respuesta de frecuencia para los puertos seleccionados, con valores MSE bajos, que reflejan una excelente

precisión. La Figura 4.7 muestra la respuesta de frecuencia del puerto 2 (que tiene el MSE más alto en magnitud); la respuesta del modelo FDNE se compara satisfactoriamente con la solución obtenida con el simulador PSCAD/EMTDC®.

Tabla 4.6: MSE de la respuesta en frecuencia en los puertos del sistema de prueba de IEEE de 30 nodos modificado.

Puertos	Orden (n)	Magnitud	Fase
Puerto 1	166	1.1131e-6	0.0356
Puerto 2	200	3.4057e-4	0.0140
Puerto 3	232	5.7313e-5	0.0311
Puerto 4	200	1.6069e-5	0.0355

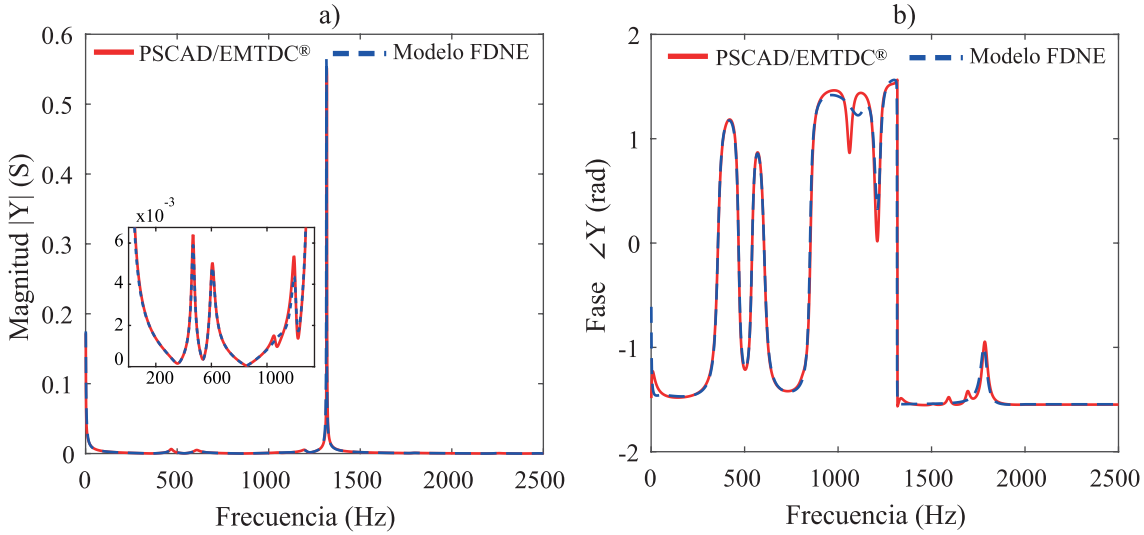


Figura 4.7: Respuesta de frecuencia en el puerto 2 del sistema de prueba de IEEE de 30 nodos modificado: a) Magnitud, b) Fase.

En la Figura 4.7 se observan discrepancias específicas entre las respuestas reales y estimadas en rangos de frecuencia específicos, particularmente en el puerto 2. Estas diferencias están relacionadas con la configuración de la señal de excitación multiseno, ajustada para un ancho de banda de 2.5 kHz y un paso de frecuencia de 10 Hz. Sin embargo, el modelo FDNE estimado representa adecuadamente la admitancia en los terminales del nodo frontera, capturando con precisión los picos de resonancia dentro del espectro de frecuencia de interés. El cálculo del FDNE se realizó en un sistema de potencia balanceado, modelado

como un sistema lineal invariante en el tiempo (LTI). Bajo esta consideración, la señal de excitación se aplica solo a la fase A para calcular el FDNE para cada puerto; esta señal se aplica a todas las fases para sistemas trifásicos desbalanceados.

4.3.2. Eficiencia computacional del sistema de prueba de IEEE de 30 nodos modificado: Representación de modelos equivalente y tiempos de CPU

A partir del sistema de prueba de IEEE de 30 nodos modificado, se obtiene el modelo mediante el enfoque SSM, lo que da como resultado 101 variables de estado, como se muestra en la Tabla 4.7. En la implementación del modelo FDNE, el área de estudio consta de 13 nodos. Al aplicar SSM_{FDNE} , se obtienen 38 variables de estado, a las que se suma 1 variable adicional por cada puerto del modelo, obteniendo un total de 42 variables de estado (ver Tabla 4.7). Por otro lado, al aplicar el enfoque CCA en el sistema de prueba de orden completo, se obtiene una relación matricial que contiene una matriz de conductancias ($\mathbf{G}$), un vector de voltajes nodales y un vector de corrientes de rama. La matriz $\mathbf{G}$ es de orden 30×30 y representa la conectividad del sistema. El enfoque CCA obtiene un modelo equivalente de 30 variables de estado (voltajes nodales), como se ilustra en la Tabla 4.7. Además, se puede observar que tanto la aplicación del SSM_{FDNE} como del CCA reducen el número de variables de estado. Al aplicar CCA_{FDNE} , se logra una mayor reducción, obteniendo un modelo con 13 variables de estado para representar el área de estudio, sin necesidad de agregar variables adicionales para la conexión del modelo FDNE.

Tabla 4.7: Representación de variables de estado del sistema de prueba de IEEE de 30 nodos modificado.

Método	Variables de estado		
	Modelo	Por puerto	Total
SSM	101	-	101
CCA_{RT}	30	-	30
SSM_{FDNE}	38	1	42
CCA_{FDNE}	13	-	13

El enfoque CCA_{FDNE} es la mejor alternativa para obtener un modelo simplificado

del sistema de potencia de prueba, logrando una mayor reducción en el número de variables de estado en comparación con SSM, SSM_{FDNE} y CCA_{RT}, con disminuciones aproximadas del 87 %, 69 % y 57 %, respectivamente.

La Tabla 4.8 muestra el tiempo de ejecución en CPU obtenido durante la solución para determinar la distorsión armónica del sistema de prueba de IEEE de 30 nodos modificado, utilizando SSM-BF, CCA_{RT}-LU, SSM_{FDNE}-BF y CCA_{FDNE}-LU en el emulador MATLAB®. Con CCA_{FDNE}-LU se logra una reducción significativa en el tiempo de simulación, con 2.69 s. Esto representa una disminución de aproximadamente 84 % y 58 % respecto a los modelos de orden completo SSM-BF y CCA_{RT}-LU, respectivamente. Además, en comparación con el modelo de orden reducido SSM_{FDNE}-BF, el tiempo de ejecución se reduce aproximadamente un 39 %.

Tabla 4.8: Tiempos de CPU (s) del sistema de prueba de de IEEE de 30 nodos modificado.

SSM-BF	CCA _{RT} -LU	SSM _{FDNE} -BF	CCA _{FDNE} -LU
16.59	6.36	4.37	2.69

Utilizando CCA_{FDNE}-LU se mejora significativamente la eficiencia computacional, reduciendo las variables de estado (ver Tabla 4.7) y los tiempos de cómputo (ver Tabla 4.8), lo que lo convierte en el enfoque más eficiente para representar modelos simplificados de sistemas de potencia, optimizando los tiempos de simulación en comparación con los otros métodos.

4.3.3. Evaluación de precisión del modelo de orden reducido del FDNE aplicado al sistema de prueba de IEEE de 30 nodos modificado

El análisis de la propagación de contenido armónico en el sistema de prueba IEEE de 30 nodos modificado se realiza conectando dos fuentes de corriente de distorsión armónica. Se considera que estas inyecciones de corrientes armónicas son generadas por la operación de dispositivos basados en electrónica de potencia, como convertidores, inversores y rectificadores. En este estudio, las corrientes se inyectan en los nodos 3 y 8 (i_{h3} y i_{h8} , respectivamente), tal como se muestra en la Figura 4.6b (representadas en color rojo). La

Tabla 4.9 muestra los componentes armónicos de corriente. La simulación comprende un intervalo de 0 a 0.1666 s, equivalente a 10 períodos de tiempo.

Las fuentes armónicas producen distorsión armónica en las formas de onda de voltaje y corriente, la cual se propaga a través del sistema, con mayor impacto en los nodos cercanos y una atenuación a medida que aumenta la distancia desde el PCC de estas fuentes. Debido a que estos efectos también se propagan hacia el área externa, el modelo FDNE debe representar adecuadamente la admitancia en terminales del nodo frontera en el rango de frecuencias de interés para reproducir con precisión la dinámica de estos elementos conectados en el área de estudio.

Tabla 4.9: Componentes de corriente armónica inyectada en los nodos 3 y 8 (p.u.).

Armónico.	3ro	5to	7mo	9no	11vo	13vo
Frecuencia (Hz)	180	300	420	540	660	780
I_{h3}	0.0238	0.0159	0.0079	0.0039	0.0019	0.0009
I_{h8}	0.0169	0.0125	0.0052	0.0041	0.0023	0.0011

La Figura 4.8a muestra la comparación de las formas de onda de voltaje en el nodo 3, obtenidas mediante CCA_{FDNE}-LU, SSM_{FDNE}-BF y el simulador PSCAD/EMTDC®. Las formas de onda obtenidas con los modelos de orden reducido presentan una cercana coincidencia con la respuesta de referencia del simulador PSCAD/EMTDC®, con un error máximo relativo de 0.32 % y 0.25 %, respectivamente.

Los modelos de orden reducido CCA_{FDNE}-LU y SSM_{FDNE}-BF se implementan en el dominio del tiempo, lo que permite analizar directamente las formas de onda de voltaje y corriente. Para evaluar la propagación del contenido armónico en el sistema, es necesario aplicar la Transformada Discreta de Fourier (DFT, por sus siglas en inglés), que convierte la respuesta en el dominio del tiempo en su representación en el dominio de la frecuencia, permitiendo obtener sus componentes armónicos.

La Figura 4.8b muestra la comparación del espectro armónico de voltaje en el nodo 3, obtenido mediante CCA_{FDNE}-LU y SSM_{FDNE}-BF, mostrando una cercana coincidencia con la respuesta del simulador PSCAD/EMTDC®. Los componentes armónicos de voltaje son menores que 1 % del fundamental. El error relativo máximo es de aproximadamente

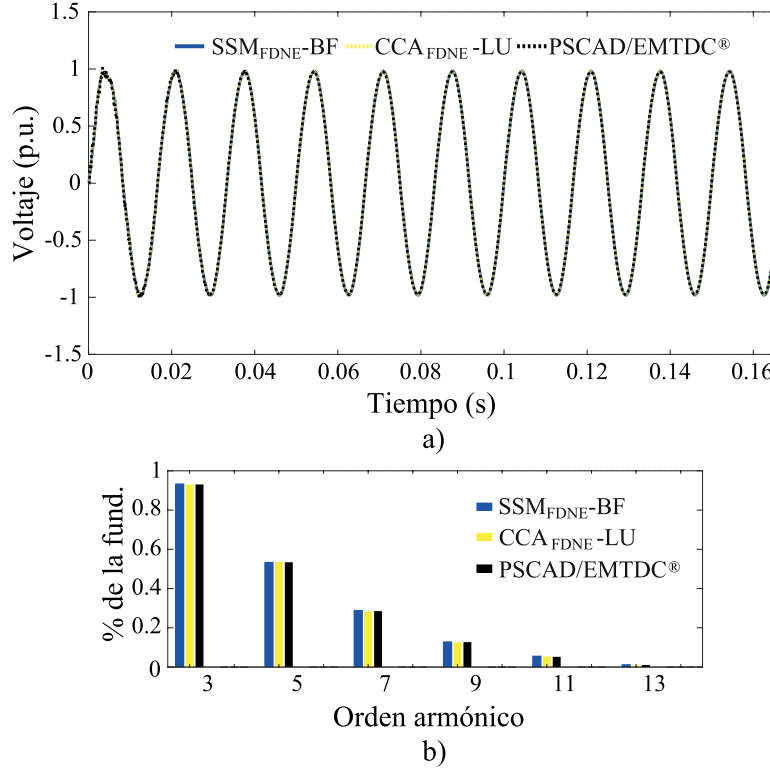


Figura 4.8: Comparación de la respuesta de voltaje en el nodo 3: a) Forma de onda, b) Espectro armónico.

0.65 % y 1.17 % para los armónicos de orden inferior (3ro a 7mo), y alrededor de 0.70 % y 0.86 % para los armónicos de orden superior (9no a 13vo).

La Figura 4.9a y la Figura 4.9b muestra la comparación de las formas de onda de corriente de la rama 1-3 y su contenido armónico, obtenidas mediante $CCA_{FDNE-LU}$, $SSM_{FDNE-BF}$ y el simulador PSCAD/EMTDC®, respectivamente. Los resultados muestran cercana coincidencia con respecto a la respuesta obtenida con el PSCAD/EMTDC®, con errores relativos bajos tanto en las formas de onda de corriente como en los componentes armónicos. El error relativo máximo en las formas de onda de corriente es de aproximadamente 0.54 % y 0.71 %, respectivamente. En cuanto a los componentes armónicos, para los armónicos de orden 3ro a 7to, los errores relativos máximos son de aproximadamente 0.41 % y 0.2 %, respectivamente, mientras que para los armónicos de orden 9no a 13vo, son de alrededor de 0.36 % y 0.41 %, respectivamente. A diferencia del caso anterior, ahora se tiene un elevado contenido armónico; en particular, los armónicos 3, 5, 7 y 9 son aproximadamente

12.5 %, 4.2 %, 2.2 % y 1.2 % de la componente fundamental, respectivamente.

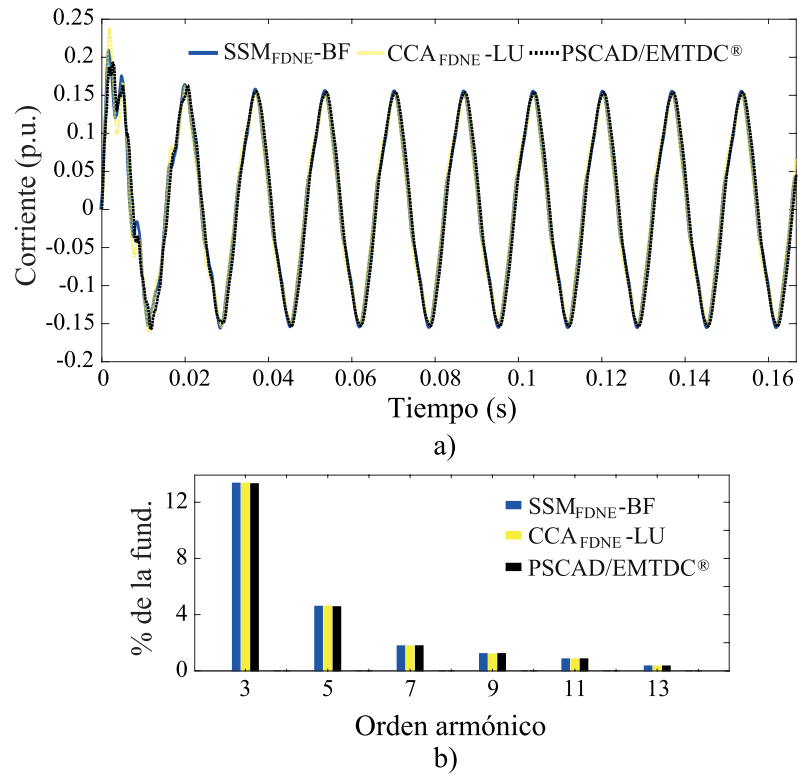


Figura 4.9: Comparación de la respuesta de corriente en la rama de 1-3: a) Forma de onda, b) Espectro armónico.

El método $CCA_{FDNE-LU}$ se presenta como una alternativa eficiente para el modelado y análisis de sistemas de potencia bajo distorsión armónica, mostrando una cercana coincidencia con el simulador PSCAD/EMTDC® tanto en la reproducción de la respuesta en el dominio del tiempo como en su espectro armónico.

4.4. Caso de estudio 4.4: Análisis de transitorio electromagnético ante condiciones de falla en sistema IEEE de 30 nodos modificado con integración de WECS

Este caso de estudio consiste en la evaluación de fenómenos transitorios electromagnéticos en el sistema de prueba trifásico de IEEE de 30 nodos modificado bajo condiciones de falla y la integración de WECS, que se ilustran en la Figura 4.10. La eficiencia

computacional se evalúa en términos de tiempo de CPU y precisión a partir de los resultados obtenidos por los métodos SSM-BF, SSM_{FDNE}-BF, CCA_{RT}-LU y CCA_{FDNE}-LU, y la respuesta PSCAD/EMTDC®. Este sistema de potencia de prueba conserva la topología del caso de estudio 4.3 monofásico y, en su formulación trifásica, no se consideran las fuentes de corriente armónica.

Para implementar CCA_{FDNE}-LU, el sistema de prueba se divide en dos áreas. El área de estudio, que se muestra en la Figura 4.10b, incluye trece nodos (1–10, 12, 27 y 28), dos generadores y un WECS conectado al nodo 3. Esta área se centra en el análisis de los transitorios de EMT generados por fuentes eólicas, particularmente en el PCC, los nodos de falla y los nodos cercanos, ya que estos efectos se atenúan rápidamente con la distancia, optimizando la eficiencia computacional. A medida que el área se expande, la complejidad y las variables de estado aumentan. Los nodos frontera o puertos se definen como el nodo 27 (puerto 1), nodo 9 (puerto 2), nodo 10 (puerto 3) y nodo 12 (puerto 4). El área externa, representada en la Figura 4.10a, se modela utilizando un equivalente dinámico a través del modelo FDNE, que considera la aplicación de un número mínimo de puertos.

El WECS se basa en un generador eólico de tipo 4 [Salgado *et al.*, 2018], que se modela utilizando un PMSG de accionamiento directo, junto con un convertidor back-to-back a escala completa que emplea convertidores de fuente de voltaje (VSC, por sus siglas en inglés) (ver Figura 4.10c). La potencia nominal de salida del WECS es de 2 MW con un voltaje de línea a línea de 2500 V. Se conectan cinco generadores eólicos de tipo 4, lo que proporciona una capacidad total de 10 MW en el PCC del sistema de potencia de prueba. En el CCA, el WECS se representa mediante una fuente de corriente controlada, cuya señal se obtiene directamente de la salida de corriente medida en el simulador. De esta manera, la fuente reproduce de manera implícita toda la dinámica interna del WCES. El modelo de los elementos del sistema de potencia se detalla en el Apéndice C, Tablas C.1 y C.2.

En este caso de estudio, se implementa la misma configuración de la estructura equivalente del FDNE con cuatro puertos para representar el área externa, utilizada en el caso de estudio 4.3 monofásico, ahora aplicada a un sistema trifásico. Considerando un sistema balanceado e invariante en el tiempo, la estimación de la admitancia en el nodo frontera se obtiene mediante el proceso de identificación de parámetros para la fase A. El

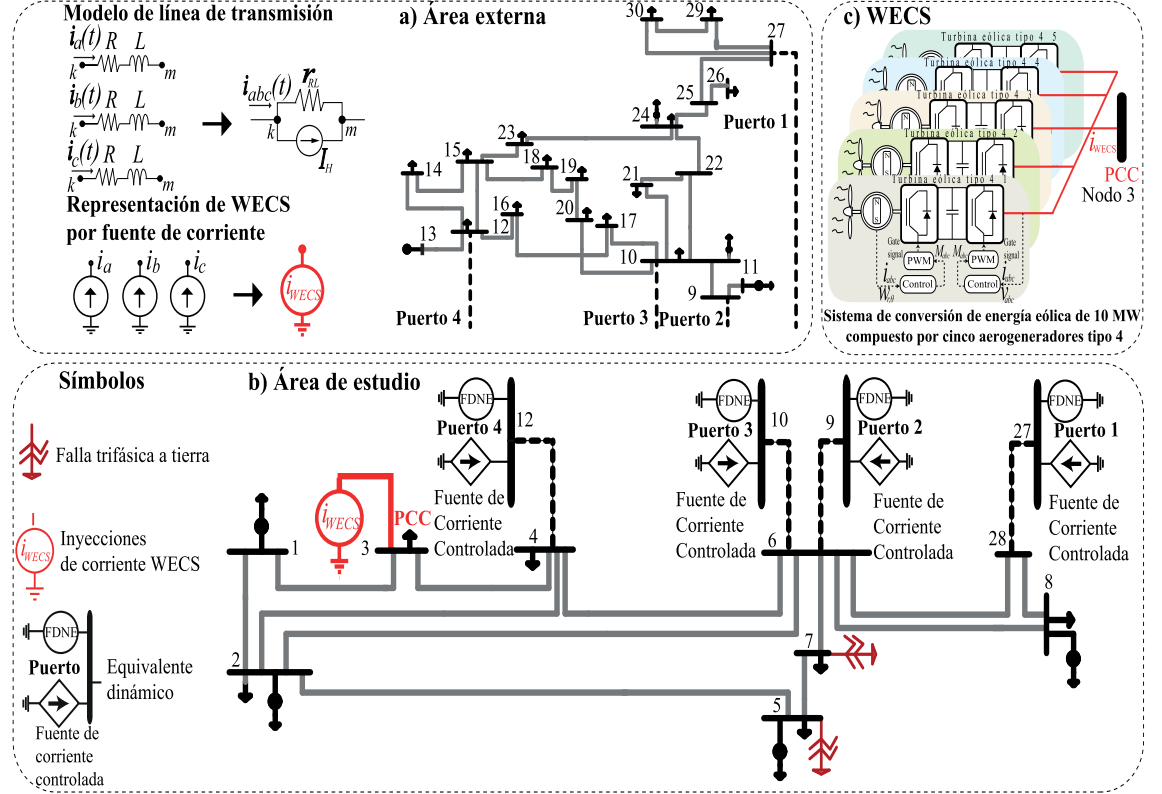


Figura 4.10: Sistema de prueba trifásico IEEE de 30 nodos modificado: a) Área externa, b) Área de estudio, c) WECS.

modelo FDNE derivado de la fase A se aplica a las fases B y C. Este proceso se realiza para cada puerto. En la Sección 4.3.1 se detalla el cálculo del modelo FDNE.

4.4.1. Eficiencia computacional del sistema de prueba trifásico IEEE de 30 nodos modificado: Representación de modelos equivalente y tiempos de CPU

La Tabla 4.10, columna 4, resume los modelos equivalentes obtenidos de la aplicación de los métodos SSM, SSM_{FDNE}, CCA_{RT} y CCA_{FDNE} (usando RT) en el sistema de prueba trifásico de IEEE de 30 nodos modificado. En la Tabla 4.10, fila 2, el método SSM consta de 303 variables de estado; 90 voltajes de capacitores, 213 corrientes de inductores, mientras que el método SSM_{FDNE} tiene 126 variables de estado; 39 voltajes de capacitores, 75 corrientes de inductores y 12 para la conexión del enfoque FDNE. El método CCA_{RT}

contiene 90 voltajes nodales; una matriz de conductancias, un vector de voltajes y un vector de corrientes de rama de 90×90 , 90×1 y 90×1 , respectivamente, y el método CCA_{FDNE} consta de 39 variables de estado, cuyas relaciones matriciales corresponden a 39×39 , 39×1 y 39×1 . Es importante destacar que el método CCA_{FDNE} no incrementa las variables de estado al introducir los puertos, a diferencia de SSM_{FDNE} .

Tabla 4.10: Representación de variables de estado obtenidas mediante modelado en el dominio del tiempo.

Método	Variables de estado		
	Modelo	Por puerto	Total
SSM	303	-	303
SSM_{FDNE}	114	3	126
CCA_{RT}	90	-	90
CCA_{FDNE}	39	-	39

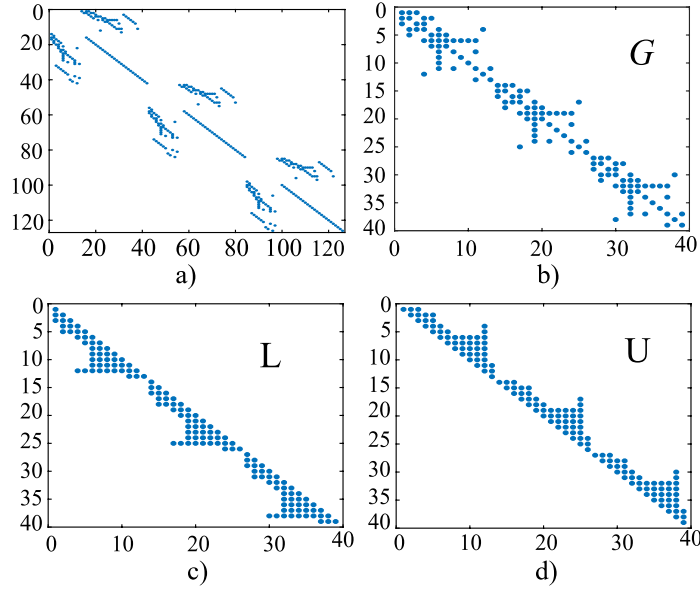


Figura 4.11: Sistema de prueba trifásico IEEE de 30 nodos modificado, aplicando un modelo de orden reducido y su matriz equivalente en cada enfoque: a) SSM_{FDNE} , b) CCA_{FDNE} , c) Matriz L, d) Matriz U.

La Figura 4.11 muestra la topología del sistema de prueba trifásico de IEEE de 30 nodos modificado. La Figura 4.11a muestra la matriz de estado obtenida por el método

SSM_{FDNE}, cuya topología es significativamente dispersa, mientras que la matriz de conductancia obtenida a partir del método CCA_{FDNE} como se muestra en la Figura 4.11b presenta una menor dispersidad en su topología. La descomposición LU se aplica a la matriz de conductancia obtenida por CCA_{FDNE}; se obtienen las matrices equivalentes L y U, como se muestra en las Figuras 4.11c y 4.11d, respectivamente.

La Tabla 4.11 muestra los tiempos de ejecución de CPU aplicando los métodos descritos (usando RT). El método SSM-BF obtenido por fuerza bruta utiliza un total de 303 variables de estado y requiere un tiempo de ejecución de CPU de 56.77 s. Al introducir el método SSM_{FDNE}-BF, el número de variables de estado se reduce significativamente a 126 (58.41 %), con un tiempo de proceso de 36.10 s (36.41 %). El método CCA_{RT}-LU utiliza 90 variables de estado y requiere 44.34 s de tiempo de ejecución de CPU. El método CCA_{FDNE}-LU propuesto reduce las variables de estado a 39 (56.66 %), lo que es una reducción significativa en el número de variables. El tiempo de ejecución se reduce a 21.95 s (50.49 %), mostrando una mejora en la eficiencia en términos del tiempo de ejecución.

Tabla 4.11: Tiempo de ejecución de CPU (s) del sistema de prueba trifásico IEEE de 30 nodos modificado.

SSM-BF	SSM _{FDNE} -BF	CCA _{RT} -LU	CCA _{FDNE} -LU
56.77	36.10	44.34	21.95

4.4.2. **Análisis de transitorios ante la presencia de fallas trifásicas a tierra en sistema de prueba trifásico IEEE de 30 nodos modificado utilizando el método CCA_{FDNE}-LU**

El método CCA_{FDNE}-LU se aplica durante un período de simulación de 4 s o 240 ciclos completos. Los parámetros utilizados en el caso de estudio se expresan en p.u. en [Zimmerman y Murillo-Sánchez, 2024]. El análisis incluye fallas trifásicas a tierra en los nodos 7 y 5, de 2.3 a 2.4 s, y de 2.5 a 2.6 s, respectivamente, como se muestra en la Tabla 4.12. El WECS está conectado al nodo 3, modelada por una fuente de corriente para representar su comportamiento dinámico a través de inyecciones de corriente, y así observar sus efectos en el área de estudio. Se consideran las variaciones en la salida de potencia activa del WECS debido a las fluctuaciones del viento y los cambios en el control de transferencia

de potencia (ver detalles en la Figura 4.12).

Tabla 4.12: Parámetros de falla del sistema de prueba trifásico de IEEE de 30 nodos modificado.

Nodos	Resistencia (p.u.)	Tiempo de falla (s)
5	0.277	2.5 a 2.6
7	0.219	2.3 a 2.4

El comportamiento dinámico del generador eólico tipo 4 integrada en el WECS se basa en el esquema de la Figura 4.12. Se muestra el ajuste del torque mecánico a las variaciones del viento, manteniendo una trayectoria que tiende a seguir la del torque eléctrico durante los cambios en el control de transferencia de potencia, y la estabilidad del enlace de voltaje de corriente directa bajo estas condiciones de operación.

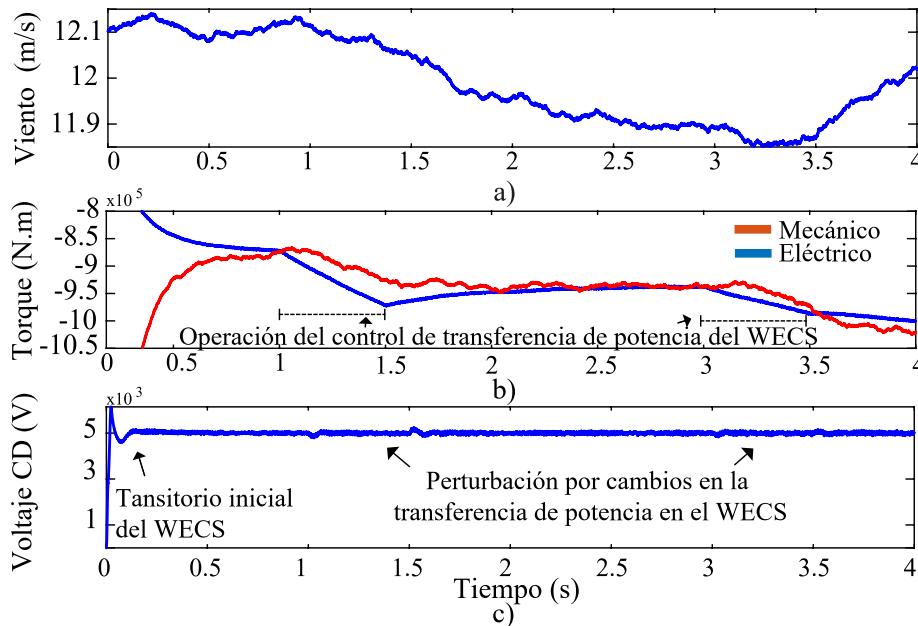


Figura 4.12: Configuración de operación de WECS: a) Fluctuaciones del viento, b) Torques mecánicos y eléctricos, c) Enlace de voltaje en corriente directa (CD).

La Figura 4.13 muestra la comparación de la forma de onda de voltaje en el nodo 5 entre las respuestas del método CCA_{FDNE}-LU y el simulador PSCAD/EMTDC®. Se observa una alta coincidencia tanto en el estado estable como en los transitorios generados por la falla trifásica a tierra en el nodo 5, así como la falla trifásica a tierra en el nodo 7,

vistas desde el nodo 5 entre 2.3 y 2.65 s. Se presentan vistas ampliadas desde 2.3 a 2.65 s, correspondientes al intervalo de tiempo en que las fallas se encuentran sostenidas. La Figura 4.13 también muestra una vista detallada de cómo la falla en el nodo 7 afecta la forma de onda de voltaje en el nodo 5, ilustrando el impacto de esta falla en su respuesta dinámica.

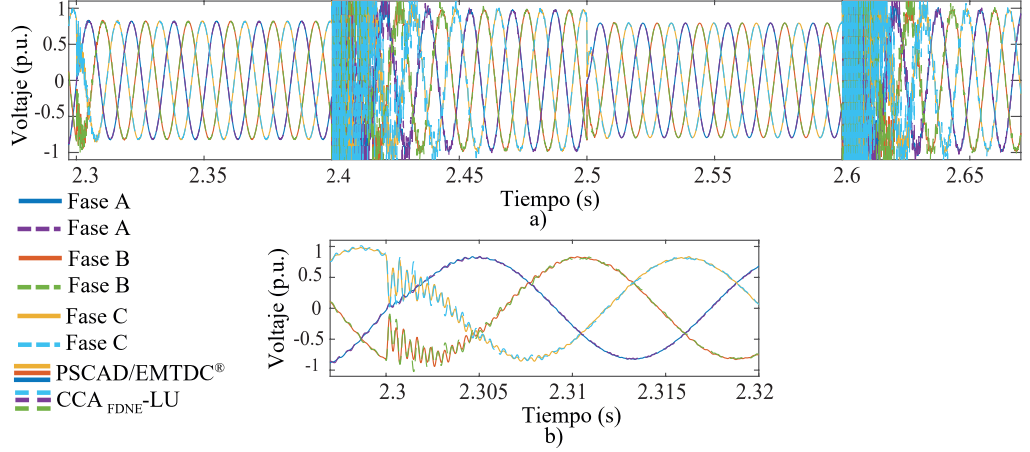


Figura 4.13: Voltaje en el nodo 5 bajo condiciones de falla: a) Forma de onda 2.3-2.65 s, b) Vista detallada 2.30-2.32 s.

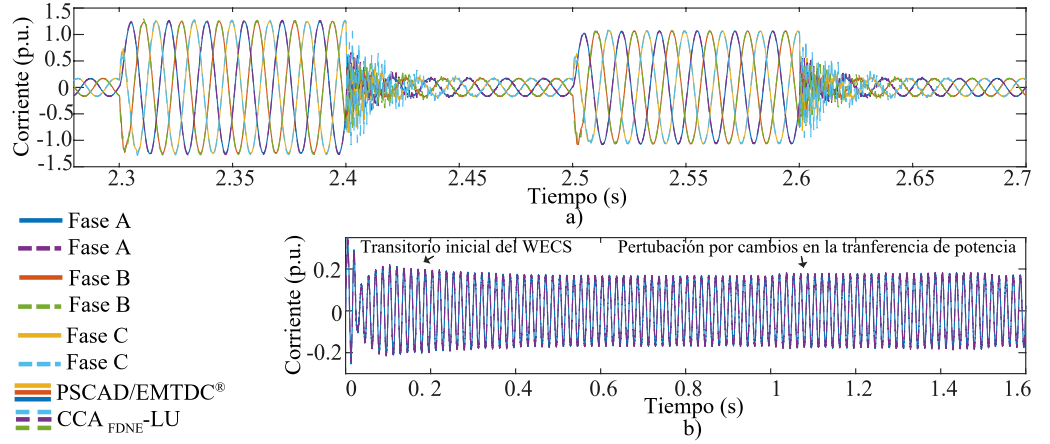


Figura 4.14: Forma de onda de corriente de rama 2-4: a) Forma de onda 2.3-2.7 s, b) Forma de onda 0-1.6 s.

La Figura 4.14 muestra la comparación de la forma de onda de corriente en la rama 2-4 entre el método $CCA_{FDNE-LU}$ y el simulador PSCAD/EMTDC®. Se pueden observar los transitorios que describen la dinámica del WECS, así como sus efectos generados durante las variaciones de transferencia de potencia en el PCC y los transitorios provocados por la

presencia de fallas trifásicas a tierra. En la Figura 4.14, en el acercamiento entre 2.3 y 2.6 s, se muestran las sobrecorrientes generadas durante la presencia de fallas en los nodos 7 y 5, cuya magnitud se incrementa a 3 y 2.5 veces su valor nominal.

Las Figuras 4.15 y 4.16 muestran el comportamiento dinámico de las formas de onda de voltaje y corriente del puerto 4, respectivamente. La Figura 4.15 muestra las reducciones de voltaje que se presentan durante el intervalos de tiempo en que las fallas trifásicas a tierra están sostenidas. Asimismo, se muestra un acercamiento al comportamiento del transitorio inicial del puerto 4, que alcanza su estado estacionario periódico aproximadamente a los 0.1 s.

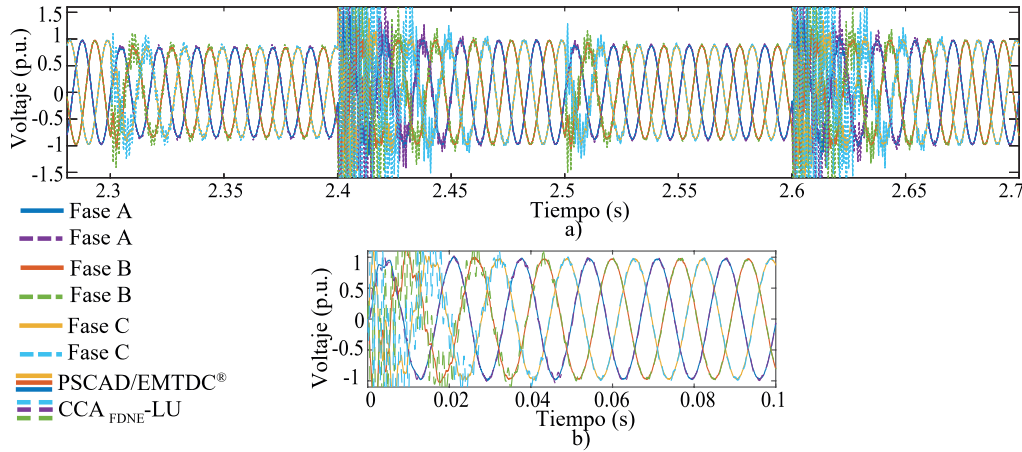


Figura 4.15: Forma de onda de voltaje en el puerto 4: a) Forma de onda 2.3-2.7 s, b) Forma de onda 0-0.1 s.

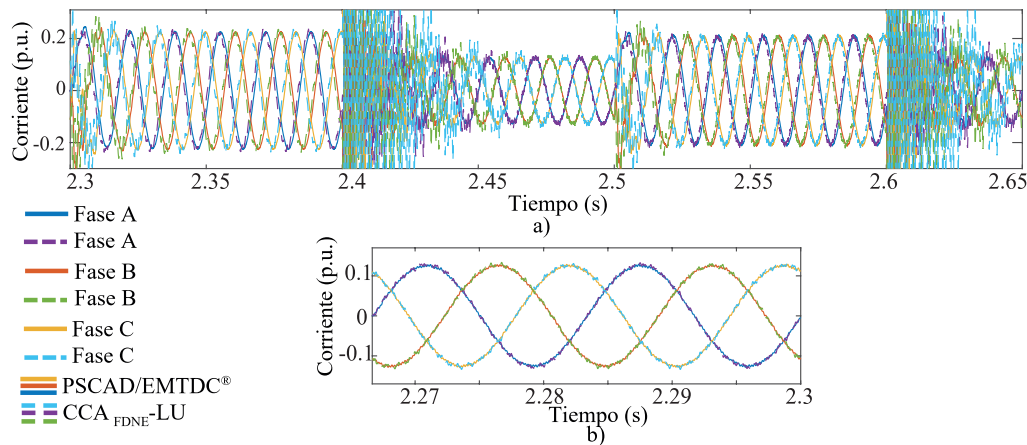


Figura 4.16: Forma de onda de corriente desde el puerto 4 hasta el nodo 4: a) Forma de onda 2.3-2.65 s, b) Forma de onda 2.27-2.3 s.

La Figura 4.16 muestra un acercamiento de las sobrecorrientes causadas por las fallas consideradas, así como un detalle del estado estacionario periódico. Las formas de onda del puerto 4 muestran una alta coincidencia con las obtenidas con el simulador PSCAD/EMTDC®.

La Figura 4.17 compara la forma de onda de la corriente en el puerto 4 entre $CCA_{FDNE-LU}$, PSCAD/EMTDC® y el Modelo reducido FDNE-omitido. En este último, la estructura equivalente que representa el área externa se limita a reproducir únicamente las características en la frecuencia nominal de operación del sistema; es decir, no está diseñada para conservar la admitancia en un rango amplio de frecuencias. Como consecuencia, el modelo reducido FDNE-omitido presenta discrepancias significativas en la dinámica transitoria, lo que demuestra sus limitaciones en comparación con $CCA_{FDNE-LU}$, que permite una mejor aproximación de la dinámica del sistema de orden completo.

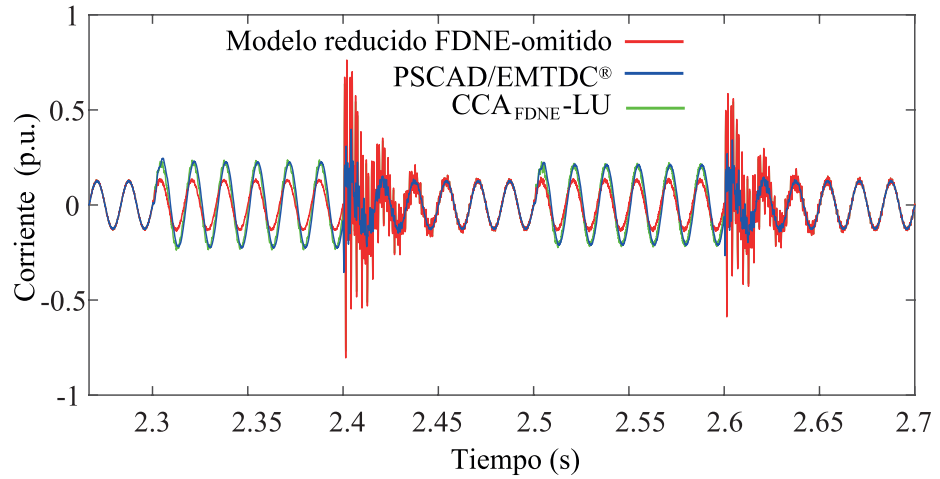


Figura 4.17: Comparación entre el modelo reducido FDNE-omitido, PSCAD/EMTDC® y las respuestas $CCA_{FDNE-LU}$ para la forma de onda de corriente desde el puerto 4 hasta el nodo 4.

Para el puerto 2, se analiza el flujo de potencia activa de la fase A desde el área externa al área de estudio, considerando un sistema de potencia trifásico equilibrado, cuya potencia activa se distribuye uniformemente entre las tres fases. La Fig. 4.18 se ilustra la comparación del flujo de potencia activa desde el puerto 2 hasta el nodo 6. Este disminuye significativamente entre 2.32 y 2.4 s, y entre 2.51 y 2.6 s (ver detalle de acercamiento), durante la presencia de fallas en los nodos 7 y 5, respectivamente. La Figura 4.18 muestra

la comparación del flujo de potencia activa en el puerto 2 entre el método $CCA_{FDNE-LU}$ y el obtenido con el simulador PSCAD/EMTDC®. Se observa una coincidencia cercana entre las respuestas obtenidas con el modelo de orden reducido y con el sistema de orden completo, respectivamente.

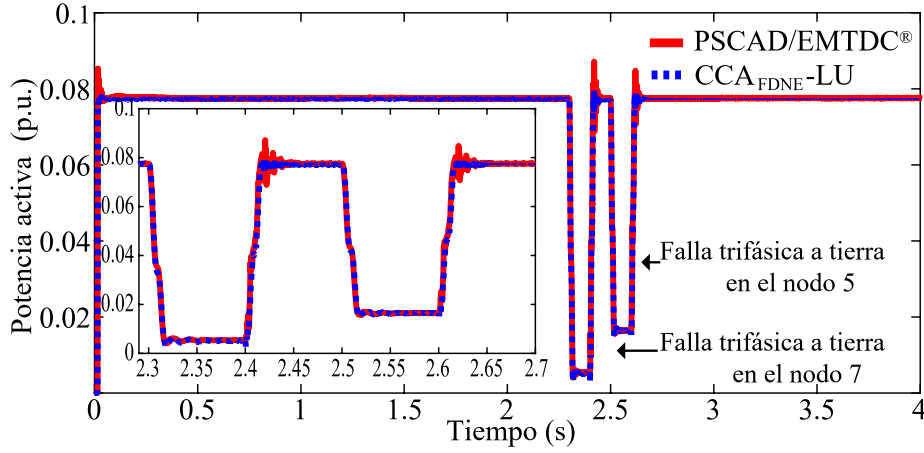


Figura 4.18: Flujo de potencia activa desde el puerto 2 hasta el nodo 6.

La Figura 4.19 se muestra el comportamiento dinámico del flujo de potencia activa total trifásico de los cinco aerogeneradores tipo 4 conectados al PCC (nodo 3).

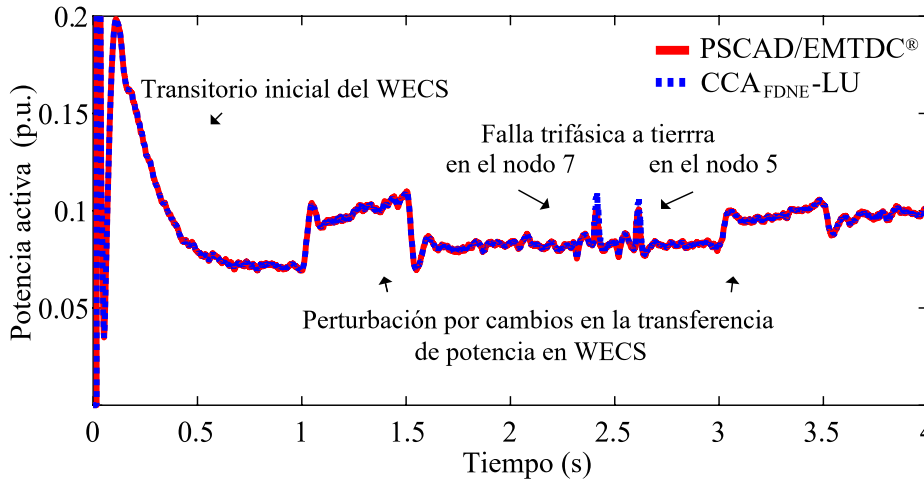


Figura 4.19: Transferencia de flujo de potencia activa desde el WECS hacia el PCC.

El WECS tiene un arranque de operación transitorio, correspondiente al arranque en vacío, para posteriormente alcanzar su estado estacionario. Se producen variaciones en el flujo de potencia activa causadas por las acciones de control interno del WECS y las

fluctuaciones del viento. Se pueden observar los efectos causados por las fallas trifásicas a tierra en los nodos 7 y 5. Se logra una buena precisión entre la respuesta del modelo de orden reducido propuesto y la obtenida con el simulador PSCAD/EMTDC®.

4.4.3. Análisis de distorsión armónica en el área de estudio

Se realiza un análisis comparativo de la distorsión armónica generada por el WECS, considerado como una fuente de corriente armónica. El análisis del contenido armónico se obtiene en el último ciclo de las formas de onda, utilizando la DFT para convertir el resultado en el dominio del tiempo a la respuesta en el dominio de la frecuencia. Las formas de onda con mayor contenido armónico se presentan en el nodo 3 y en la corriente de rama 4-6, como se muestra en las Figuras 4.20 y 4.21, respectivamente.

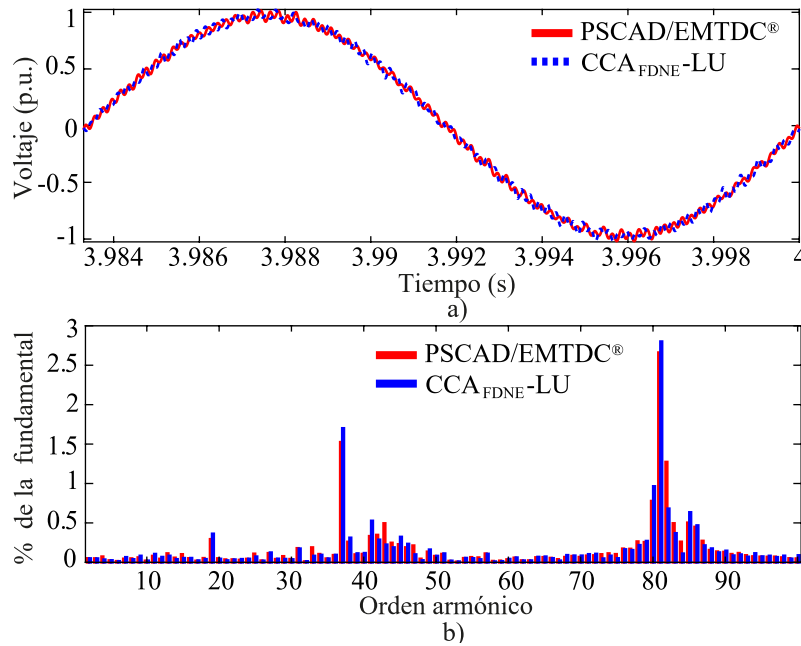


Figura 4.20: Voltaje en el nodo 3: a) Forma de onda, b) Espectro armónico.

Las Figuras 4.20a y 4.20b muestran la comparación del voltaje en el nodo 3 y su contenido armónico en la fase A, respectivamente, entre la aplicación del método CCA_{FDNE}-LU y el PSCAD/EMTDC®. El THD_v es de 3.80 % y 3.74 % para el método CCA_{FDNE}-LU y el PSCAD/EMTDC®, respectivamente. En promedio, el error relativo máximo entre ambas respuestas es aproximadamente del 1.6 %.

La forma de onda de la corriente y su contenido armónico medidos en la fase A se muestran en las Figuras 4.21a y 4.21b, respectivamente, cuyas respuestas se obtienen y comparan entre el método $CCA_{FDNE-LU}$ y el simulador PSCAD/EMTDC®. La THD_i medida en la forma de onda de corriente de rama 4-6 es aproximadamente 8.97 % y 8.80 %, aplicando el método $CCA_{FDNE-LU}$ y el simulador PSCAD/EMTDC®, respectivamente, con un error relativo máximo entre ambos de 1.93 %. Las respuestas obtenidas con el método $CCA_{FDNE-LU}$, en las formas de onda y el contenido armónico, muestran una adecuada coincidencia con respecto a las obtenidas con el simulador PSCAD/EMTDC®.

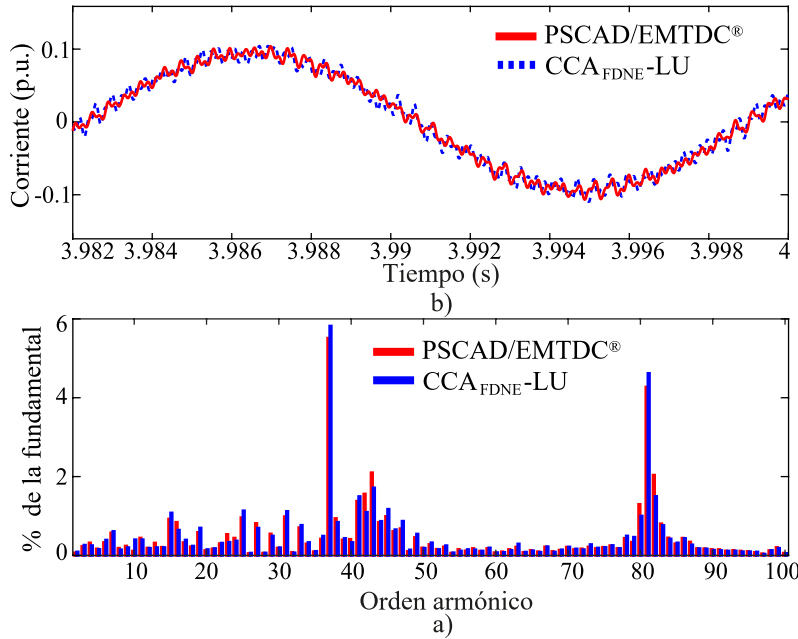


Figura 4.21: Corriente de rama 4-6: a) Forma de onda, b) Espectro armónico.

4.4.4. Evaluación de precisión del $CCA_{FDNE-LU}$ aplicado al sistema de prueba trifásico de IEEE de 30 nodos modificado

El método $CCA_{FDNE-LU}$ muestra una reducción del 87.5 % y 61.33 % en el número total de variables de estado y tiempo de ejecución de CPU, respectivamente, en comparación con el método SSM que utiliza fuerza bruta para obtener la solución. Además, al comparar los métodos $CCA_{FDNE-LU}$ y $SSM_{FDNE-BF}$, se observa una disminución significativa del 69.04 % en el número total de variables de estado, logrando una mayor eficiencia en términos

de reducción de tiempo de ejecución de CPU, resultando en una disminución del 39.19 %.

La Tabla 4.13 muestra la comparación de los errores relativos máximos de distintos métodos de solución usando el modelo de orden completo en el simulador PSCAD/EMTDC®. En general, los resultados muestran diferentes niveles de precisión entre los métodos. Específicamente, CCA_{FDNE} -LU tiende a exhibir errores relativos más altos en comparación con otros métodos, particularmente notorios en formas de onda como $v_{\text{port-4}}$ e $i_{\text{port-4}}$. Sin embargo, es importante notar que estos errores son relativamente bajos para todos los métodos, lo que indica un desempeño adecuado en la captura de la dinámica del sistema en referencia al modelo de orden completo.

Tabla 4.13: Error relativo (%) de los métodos de solución.

Forma de onda	SSM-BF	SSM _{FDNE} -BF	CCA _{RT} -LU	CCA _{FDNE} -LU
v_5	0.067	1.363	0.086	1.480
i_{2-4}	0.081	1.234	0.094	1.549
$v_{\text{puerto 4}}$	0.071	1.423	0.076	1.651
$i_{\text{puerto 4}}$	0.090	1.336	0.093	1.980
$P_{\text{puerto 1}}$	0.080	0.940	0.090	0.960
$P_{\text{puerto 2}}$	0.030	0.950	0.040	0.980
$P_{\text{puerto 3}}$	0.030	0.950	0.030	1.027
$P_{\text{puerto 4}}$	0.020	0.940	0.050	1.014
P_{WECS}	0.067	0.745	0.078	1.024

La principal contribución de este trabajo de investigación es el desarrollo y la validación del método CCA_{FDNE} -LU, diseñado para optimizar la eficiencia computacional en el análisis de fenómenos transitorios EMT en sistemas de potencia utilizando un modelo de orden reducido FDNE. La implementación del CCA_{FDNE} -LU en los casos de estudio propuestos ha permitido evaluar su eficiencia y precisión, demostrando su capacidad para aproximar satisfactoriamente el comportamiento dinámico del sistema de orden completo. Además, los resultados obtenidos demuestran la escalabilidad del enfoque y su aplicación en sistemas de mayor escala y complejidad. En estos escenarios de mayor escala, se espe-

ra una reducción significativamente mayor en la carga computacional en comparación con modelos de orden completo, particularmente cuando el tamaño y la complejidad del sistema aumentan considerablemente. Los sistemas de prueba abordados permitieron analizar el rendimiento del método $CCA_{FDNE-LU}$ y proporcionan una base para su aplicación en configuraciones más complejas.

El área de estudio permite representar en detalle las características de los componentes lineales y no lineales, incluidos los dispositivos de electrónica de potencia, utilizando el concepto general de CCA. Este marco de referencia hace posible modelar los convertidores de acuerdo con los interruptores de conmutación utilizados, representando los estados de encendido y apagado por valores de resistencia bajos y altos, respectivamente, dependiendo de la frecuencia de conmutación. No obstante, el uso de modelos detallados del WECS conlleva un aumento en el número de variables de estado, lo que incrementa el tiempo de cómputo. En este caso particular, los dispositivos de electrónica de potencia asociados con los WECS se representan de forma simplificada mediante una fuente de corriente, cuya modulación permite reproducir la respuesta global del sistema eólico. Para los generadores eólicos de tipo 4, el modelo combina fuentes de corriente de frecuencia fundamental con fuentes de corriente armónica para capturar los armónicos generados por el convertidor. Aunque los elementos internos del WECS no se modelan explícitamente, este enfoque permite capturar sus efectos dinámicos en la red eléctrica.

El método $CCA_{FDNE-LU}$ puede incorporar modificaciones apropiadas en el área de estudio para incluir un modelado detallado de diversas fuentes de energía renovable y considerar en el modelado FDNE un amplio rango de frecuencias que represente sus fenómenos EMT.

La Tabla 4.14 presenta un resumen comparativo del desempeño del $CCA_{FDNE-LU}$ respecto a los modelos convencionales ($SSM_{FDNE-BF}$, $SSM-BF$ y CCA_{RT-LU}) en términos de número de variables de estado, tiempo de CPU y precisión. Según los resultados, el $CCA_{FDNE-LU}$ requiere un menor número de variables de estado y un menor tiempo de simulación, manteniendo un nivel de precisión alto, alrededor 2 %. Esto demuestra que la sustitución del área externa por un equivalente FDNE, junto con la reducción del orden del área de estudio mediante el marco de referencia CCA y la implementación de factorización

LU de matrices dispersas, permite una representación más compacta y eficiente en el análisis de sistemas de potencia.

Tabla 4.14: Resumen de desempeño del $CCA_{FDNE-LU}$ en términos de representación, tiempo de CPU y precisión, comparado con los métodos $SSM_{FDNE-BF}$, $SSM-BF$ y CCA_{RT-LU} .

Modelo	Tipo de modelo / técnica de solución	Representación (variables de estado)	Tiempo de CPU	Precisión (Error relativo)
$CCA_{FDNE-LU}$	Orden reducido / Factorización LU de matrices dispersa	Menor número de variables, preserva el orden del sistema al conectar FDNE	Muy bajo	Alta ($\approx 2\%$)
$SSM_{FDNE-BF}$	Orden reducido / Fuerza bruta	Menor número de variables, pero incrementa la complejidad y la carga computacional al añadir variables adicionales por cada puerto del FDNE	Bajo	Alta ($\approx 2\%$)
$SSM-BF$	Orden completo / Fuerza bruta	Mayor orden de modelo y mayor carga computacional que CCA	Alto	Muy alta ($\approx 1\%$)
CCA_{RT-LU}	Orden completo / Factorización LU de matrices dispersa	Menor orden de modelo y menor carga computacional que SSM	Medio-alto	Muy alta ($\approx 1\%$)

4.5. Conclusiones

En este capítulo, se ha analizado la eficiencia e implementación de los modelos de orden reducido del FDNE desarrollados mediante los enfoques $\text{SSM}_{\text{FDNE-BF}}$ y $\text{CCA}_{\text{FDNE-LU}}$, en comparación con los modelos de orden completo SSM-BF y $\text{CCA}_{\text{RT-LU}}$. Los resultados obtenidos demuestran que la aplicación de la estructura equivalente del FDNE permite a ambos enfoques representar el sistema de potencia de manera eficiente, al reducir significativamente el número de variables de estado y simplificar la estructura matricial, lo que resulta en un modelo más compacto y una mayor eficiencia computacional.

Los modelos equivalentes obtenidos a través de los diferentes esquemas de configuración del FDNE (de un puerto o multipuerto) han demostrado que la simplicidad de su estructura equivalente permite la sustitución del área externa e integración directa al área de estudio con modificaciones mínimas, así como su compatibilidad para una implementación eficiente en los enfoques SSM y CCA. Los resultados de los casos de estudio (Tablas 4.2, 4.7 y 4.10) validan que la complejidad del modelado del sistema de orden reducido, medida por el número de variables de estado (orden del modelo), varía significativamente según el enfoque utilizado, afectando el número de variables necesarias tanto en el modelado del área de estudio como en la conexión del modelo FDNE al nodo frontera. El método SSM_{FDNE} presenta una mayor complejidad, ya que requiere un número mayor de variables de estado para representar el área de estudio. Además, necesita variables de estado adicionales por cada puerto para integrar el modelo FDNE. El método SSM_{FDNE} , tanto para sistemas monofásicos como trifásicos, requiere añadir 1 (ver las Tablas 4.2 y 4.7) y 3 (ver Tabla 4.10) variables adicionales por puerto para el modelo FDNE, respectivamente, lo que incrementa considerablemente el número total de variables de estado. Por el contrario, el enfoque CCA_{FDNE} se muestra como la opción más eficiente, al lograr una reducción más significativa en el número de variables de estado, sin modificar el orden del modelo del área de estudio durante la integración del modelo FDNE, como se muestra en las Tablas 4.7 y 4.10.

El método $\text{CCA}_{\text{FDNE-LU}}$ demostró ser una representación altamente eficiente en la reducción del sistema, y, mediante la implementación de la descomposición LU de matrices

dispersas, logra una mayor eficiencia computacional en términos de tiempo de CPU, en comparación con los enfoques SSM-BF, CCA_{RT}-LU y SSM_{FDNE}-BF. En el caso de estudio 4.2 (Tabla 4.3), el modelo de orden reducido SSM_{FDNE}-BF reduce el tiempo de ejecución a 5.63 s, en comparación con los 27.07 s (79 %) y 13.50 s (58 %) de los modelos de orden completo (SSM-BF y CCA_{RT}-LU, respectivamente), mostrando una mejora significativa en eficiencia computacional. En el caso de estudio 4.3 (Tabla 4.8), al comparar ambos modelos de orden reducido, CCA_{FDNE}-LU alcanza el mejor tiempo de CPU con 2.69 s, en relación a los 4.37 s (39 %) de SSM_{FDNE}-BF, y los 16.59 s (84 %) y 6.36 s (58 %) de los modelos de orden completo, respectivamente. Los resultados obtenidos en el caso de estudio 4.4 (Tabla 4.11) validan esta mejora de rendimiento, considerando que CCA_{FDNE}-LU obtiene 21.95 s, con una reducción significativa respecto a los 36.10 s (39.19 %) de SSM_{FDNE}-BF, los 56.77 s (61.33 %) de SSM-BF, y los 44.34 s (50.49 %) de CCA_{RT}-LU, tomando en cuenta que el sistema es trifásico y de mayor complejidad.

En términos de precisión, los diferentes métodos propuestos se comparan con las respuestas obtenidas mediante el simulador PSCAD/EMTDC[®]. Los enfoques CCA_{FDNE}-LU y SSM_{FDNE}-BF, evaluados bajo diversas condiciones de operación del sistema de potencia, presentan un aumento en el error relativo en comparación con los modelos SSM-BF y CCA_{RT}-LU, como se muestra en los casos de estudio 4.2 (Tabla 4.5), caso de estudio 4.3 (Sección 4.3.3) y caso de estudio 4.4 (Tabla 4.13). Sin embargo, las diferencias observadas son mínimas para todos los enfoques, lo que permite una representación adecuada de la dinámica global del sistema de potencia. Aunque con una diferencia ligeramente mayor, el enfoque CCA_{FDNE}-LU demuestra su capacidad como una herramienta eficiente para la evaluación de la operación dinámica del sistema de potencia, con una menor complejidad y carga computacional, conservando una precisión numérica satisfactoria.

Capítulo 5

Análisis y Evaluación de Estimación de Estado Armónico

5.1. Introducción

En el capítulo anterior se analizó el sistema de potencia en el dominio del tiempo mediante modelos de orden reducido del FDNE, aplicados a la simulación de fenómenos transitorios electromagnéticos. No obstante, la formulación en el dominio del tiempo también permite extender el análisis hacia fenómenos adversos de la calidad de la energía, en particular la estimación de estado armónico en sistemas de potencia.

En este capítulo presenta un método para la estimación del estado armónico en el dominio del tiempo (TDHSE, por sus siglas en inglés) en sistemas de potencia que incluyen fuentes de generación eólica. El enfoque TDHSE permite estimar las formas de onda de voltaje y corriente correspondientes a las variables de estado del sistema, así como las entradas del modelo en espacio de estados, considerando un conjunto limitado de dispositivos de medición, los cuales pueden estar afectados por ruido. Se desarrolla un caso de estudio en un sistema de potencia trifásico con inyecciones armónicas estáticas y un parque eólico dinámico.

5.2. Formulación para la evaluación de estimación de estado

La estimación del estado armónico se basa en la implementación numérica del filtro de Kalman (KF, por sus siglas en inglés), considerando un sistema de potencia trifásico balanceado representado por ecuaciones diferenciales de primer orden, mientras que las inyecciones de corriente de las fuentes de distorsión armónica pueden ser balanceadas o desbalanceadas. Se asume que los parámetros y la topología del sistema son conocidos, con mediciones limitadas y afectadas por ruido. Los principales componentes, como el generador, se modelan mediante un circuito equivalente con resistencia, reactancia inductiva y fuente de voltaje interno inducido; el transformador se modela mediante una reactancia inductiva; y las líneas de transmisión se representan mediante el modelo nominal π .

5.2.1. Estimación de estado: Método del filtro de Kalman

La estimación $\mathbf{x}_k$ asume que el modelo del sistema es conocido y la disponibilidad de un conjunto de mediciones. El modelo dado por (2.11) y (2.12) se transforma al dominio de tiempo discreto, tal como se describe en [Simon, 2006].

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{F}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{G}_d\mathbf{u}_{k-1} + \mathbf{w}_{k-1} \quad (5.1)$$

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{r}_k \quad (5.2)$$

donde $\mathbf{F}$, $\mathbf{G}_d$ y $\mathbf{H}$ son las matrices de transición de estado, entrada y medición, respectivamente, mientras que $\mathbf{z}$ es el vector de medición. $\mathbf{w}$ representa el ruido del proceso y $\mathbf{r}$ es el ruido de medición. Estos ruidos se consideran variables no correlacionadas, de promedio cero y aleatorias, con matrices de covarianza definidas $\mathbf{Q}$ y $\mathbf{R}$, respectivamente.

El KF recursivo tiene dos etapas de estimación de estado, cada una con su respectiva matriz de covarianza de error de estimación $\mathbf{P}_k$, es decir, la etapa de estimación de estado a priori ($\hat{\mathbf{x}}_k^- \rightarrow \mathbf{P}_k^-$) y la etapa de estimación de estado a posteriori ($\hat{\mathbf{x}}_k^+ \rightarrow \mathbf{P}_k^+$). Las ecuaciones del algoritmo KF son [Simon, 2006]:

$$\mathbf{P}_k^- = \mathbf{F}\mathbf{P}_{k-1}^+ \mathbf{F}^T + \mathbf{Q} \quad (5.3)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k^- = \mathbf{F}\hat{\mathbf{x}}_{k-1}^+ + \mathbf{G}_d \mathbf{u}_{k-1} \quad (5.4)$$

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T (\mathbf{H}\mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (5.5)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k^+ = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_k^-) \quad (5.6)$$

$$\mathbf{P}_k^+ = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}) \mathbf{P}_k^- \quad (5.7)$$

donde la ganancia de KF es $\mathbf{K}_k$. El KF obtiene la estimación de las formas de onda en el dominio del tiempo; el contenido armónico se puede evaluar mediante la transformada discreta de Fourier. La Figura 5.1 muestra el diagrama de bloques del proceso TDHSE basado en el KF, y a continuación se describen las etapas del algoritmo.

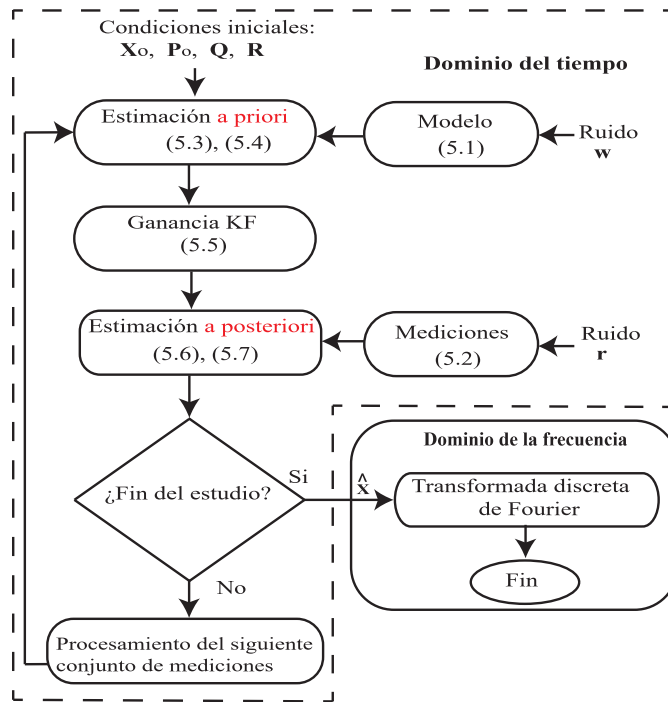


Figura 5.1: Algoritmo TDHSE basado en el filtro Kalman.

- **Estimación a priori:** El proceso inicia definiendo las condiciones iniciales, que incluyen el estado inicial $\mathbf{x}_0$ y las matrices $\mathbf{P}_0$, $\mathbf{Q}$ y $\mathbf{R}$. Además, es necesario construir el modelo del sistema, dado por (5.1), el cual está afectado por ruido de proceso. A

partir de este modelo, se realiza la predicción del estado utilizando las ecuaciones (5.3) y (5.4).

- **Ganancia de Kalman:** Se calcula la ganancia del filtro de Kalman mediante la ecuación (5.5).
- **Estimación a posteriori:** Se actualiza la estimación del estado con base en las mediciones (5.2), considerando el ruido de medición, y se aplican las ecuaciones (5.6) y (5.7).
- **Bloque condicional:** Se evalúa si el estudio ha finalizado. Si la respuesta es afirmativa, se procede al análisis en el dominio de la frecuencia, donde se calcula el contenido armónico, concluyendo el proceso. En caso contrario, se continúa con el procesamiento del siguiente conjunto de mediciones, regresando al bloque de estimación a priori para repetir el ciclo.

5.2.2. Identificación de fuentes de distorsión armónica

El método de identificación de fuentes de distorsión armónica permite analizar las formas de onda de voltaje y corriente asociadas a una amplia gama de fuentes, desde cargas estáticas no lineales (como armónicos inyectados) hasta fuentes de generación variables en el tiempo que incluyen componentes no lineales (dispositivos basados en electrónica de potencia), presentes en fuentes de energía renovables como la eólica y la fotovoltaica. Este enfoque permite la estimación del estado del comportamiento dinámico en el punto de acoplamiento común, simplificando el proceso de modelado [Tapia-Tinoco, 2017]. Las consideraciones de este método son las siguientes:

- Se desconocen las inyecciones de corriente y deben estimarse.
- Las inyecciones de corriente están conectadas al nodo y se asignan al grupo de vectores de corriente no lineales $\mathbf{i}_{nl}$, formando parte de los modelos de estado y medición.
- Los diferentes tipos de modelos para fuentes de distorsión armónica conectadas a la red son difíciles de representar mediante la formulación matemática, debido a las

características internas, como los componentes de potencia eléctrica y los sistemas de control. Dado el comportamiento dinámico desconocido del modelo, este se representa como una variable aleatoria modelada mediante el vector de ruido de proceso, modificando así el modelo de espacio de estado.

El modelo de espacio de estado considera que el vector de entradas $\mathbf{u}$ contiene los voltajes de los generadores e_a y las fuentes de distorsión armónica i_{nl} , de tal forma que $\mathbf{u} = [e_a \ i_{nl}]^T$.

Para estimar cualquier fuente de distorsión armónica o fuente de energía renovable sin necesidad de conocer sus modelos matemáticos, el estimador de estado evalúa las entradas de estas fuentes, considerando que son variables desconocidas. Entonces, para evaluar las entradas de corriente, se define el vector de estado aumentado $\mathbf{x}_{new}(t)$ como:

$$\mathbf{x}_{new}(t) = [\mathbf{x} \ i_{nl}]^T \quad (5.8)$$

Se configura un modelo de espacio de estado aumentado. La matriz $\mathbf{A}_{new}$ se construye a partir de la matriz original $\mathbf{A}$ del sistema, a la cual se le añade la submatriz $\mathbf{B}_{nl}$, que agrupa las columnas de la matriz $\mathbf{B}$ correspondientes a las fuentes de corriente no modeladas explícitamente (por ejemplo, carga no lineales y/o fuentes renovables). Estas corrientes son consideradas como entradas desconocidas que se incorporan al vector de estado para su estimación. Por otro lado, la nueva matriz de entrada $\mathbf{B}_{new}$ incluye únicamente las columnas de $\mathbf{B}$ asociadas con las fuentes de voltaje, formando la submatriz $\mathbf{B}_{ea}$. Observar que en el nuevo modelo tiene filas y columnas de ceros en las posiciones de las variables desconocidas. Para permitir su estimación mediante el KF, se introduce ruido de proceso sobre estas variables, representado por el vector $\mathbf{w}_p$.

$$\dot{\mathbf{x}}_{new}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B}_{nl} \\ 0 \cdot \mathbf{I}_{l \times h} & 0 \cdot \mathbf{I}_{l \times l} \end{bmatrix} \mathbf{x}_{new}(t) + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{ea} \\ 0 \cdot \mathbf{I}_{l \times r} \end{bmatrix} \mathbf{u}(t) + \begin{bmatrix} \mathbf{w} \\ \mathbf{w}_p \cdot \mathbf{I}_{l \times 1} \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

$$\mathbf{y}_{new}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{C} & 0 \cdot \mathbf{I}_{m \times l} \end{bmatrix} \mathbf{x}_{new}(t) + \mathbf{v} \quad (5.10)$$

Las matrices $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{(h+l) \times (h+l)}$, $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{(h+l) \times r}$ y $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{m \times (h+l)}$ están definidas según la estructura del sistema. Aquí, h representa el número de variables de estado originales,

l corresponde a las variables desconocidas introducidas, m es el número de mediciones disponibles y r denota el número total de fuentes de voltaje en el sistema. Se observa que la nueva formulación mantiene la misma estructura del modelo original en (5.1) y (5.2), lo que permite su implementación en el esquema de estimación de estado.

$$\mathbf{x}_{new}(t) = \mathbf{A}_{new}\mathbf{x}_{new} + \mathbf{B}_{new}\mathbf{u}_{new}(t) + \mathbf{w}_{new} \quad (5.11)$$

$$\mathbf{y}_{new}(t) = \mathbf{C}_{new}\mathbf{x}_{new}(t) + \mathbf{v} \quad (5.12)$$

5.3. Caso de estudio de estimación de estado en sistemas de potencia

El enfoque TDHSE se implementa en un sistema de potencia de prueba modificado, basado en la red de la Isla Sur de Nueva Zelanda, como se ilustra en la Figura 5.2.

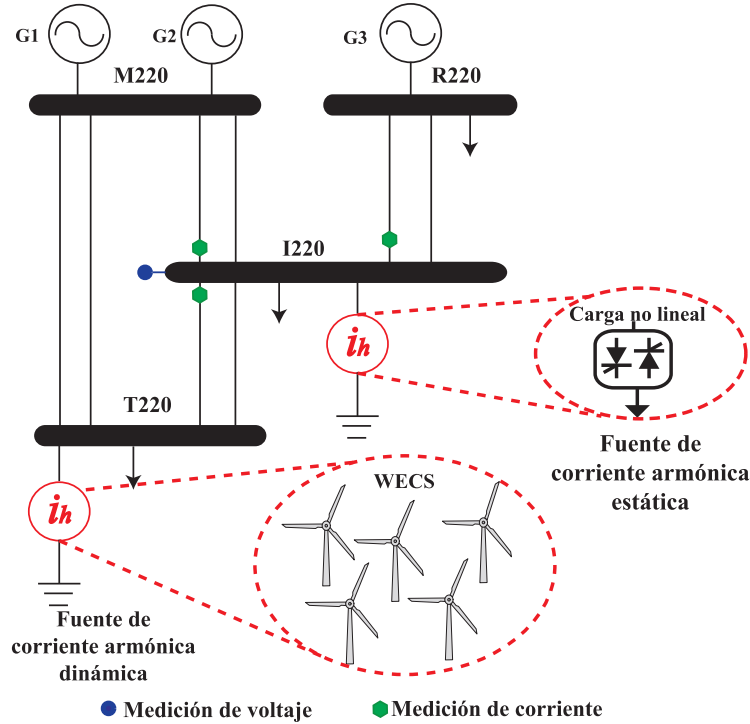


Figura 5.2: Sistema de prueba modificado de la Isla Sur de Nueva Zelanda con integración de un parque eólico y una carga no lineal.

Este modelo consta de cuatro nodos, con tres fuentes de voltaje ubicadas en los nodos M220 (dos fuentes) y R220 (una fuente). Además, se incluyen tres cargas lineales de 9.6 MW, 2.7 MW y 1.7 MW, conectadas a los nodos T200, I220 y R220, respectivamente. También, se conecta una fuente de generación eólica y una carga no lineal en los nodos T220 e I220, respectivamente, cuyas dinámicas se evalúan para analizar los fenómenos adversos de calidad de energía que se derivan de la operación de ambos elementos.

La fuente de generación eólica se modela mediante un WECS, basado por un generador eólica de tipo 4, que utiliza un PMSG y un convertidor back-to-back de escala completa. Este sistema tiene la capacidad de generar 2 MW de potencia, con un voltaje de línea de 2500 V, cuyos parámetros se especifican en [Salgado *et al.*, 2018]. En este caso de estudio, el WECS se modela de forma detallada, tal como se muestra en el Apéndice C. La carga no lineal se modela mediante un circuito resistivo trifásico controlado por tiristores, como se describe en [Tapia-Tinoco, 2017, Molina-Moreno *et al.*, 2020]. Los parámetros del sistema de prueba se reportan en [Watson y Arrillaga, 2007].

El sistema de potencia trifásico de prueba se modela con 45 variables de estado. Para evaluar el comportamiento dinámico de la fuente de generación eólica y la carga no lineal, se aplica el método de identificación de fuentes de distorsión armónica, lo que requiere agregar tres variables desconocidas asociadas por cada una de estas fuentes, obteniendo un total de 51 variables de estado. En [Molina-Moreno *et al.*, 2017], se establece un conjunto mínimo de mediciones compuesto por 9 corrientes de línea y 3 voltajes nodales, garantizando la observabilidad del sistema de prueba. En total, se disponen de 12 mediciones y se estiman 39 variables de estado. El sistema de prueba asume una potencia base trifásica de 100 MVA y un voltaje base de línea a línea de 220 kV.

La respuesta obtenida mediante el algoritmo TDHSE implementado en MATLAB®, se validó con la respuesta obtenida con el simulador PSCAD/EMTDC®. Las simulaciones se ejecutaron en una laptop Lenovo con procesador Intel Core i7, 16 GB de RAM y una frecuencia de 2.50 GHz, utilizando el mismo paso de tiempo de 512 muestras por periodo a una frecuencia fundamental de 50 Hz y el método numérico de integración de la regla trapezoidal.

5.3.1. Caso de estudio 5.3.1: Evaluación de la estimación de estado en un sistema de potencia con un parque eólico y una carga no lineal

La estimación de estado armónico evalúa el comportamiento dinámico de las variables de estado no monitoreadas del sistema, incluyendo las entradas correspondientes a un parque eólico y una carga no lineal, consideradas como fuentes de distorsión armónica conectadas en los nodos T220 e I220, respectivamente. El parque eólico está compuesto por cinco WECS, que en conjunto generan una potencia de 10 MW. En este caso, la carga no lineal reportada en [Tapia-Tinoco, 2017] se modela mediante un circuito resistivo trifásico desbalanceado, con las fases B y C ajustadas al 66.67 % y al 50 % de la impedancia de la fase A, respectivamente, para introducir condiciones desbalanceadas en el sistema de prueba.

En [Medina y Cisneros-Magaña, 2012] se reporta las condiciones iniciales para el estimador de estado armónico. El vector de estado inicial es $\hat{\mathbf{x}}_0 = [0, 0, \dots, 0]_{1 \times 51}^T$, los ruidos añadidos $\mathbf{v}$ y $\mathbf{w}$ presentan desviaciones estándar de 0.3 y 0.01, respectivamente, y sus matrices de covarianza son $\mathbf{R} = 0.1 \cdot \mathbf{I}_{12 \times 12}$, $\mathbf{Q} = 0.0001 \cdot \mathbf{I}_{51 \times 51}$. En la matriz de covarianza $\mathbf{Q}$, los coeficientes correspondientes a las fuentes de corriente armónica se ajustaron mediante la metodología TDHSE con base en la ejecución del KF, al igual que la matriz de covarianza $\mathbf{P}_0$. Como resultado, estas matrices tienen la forma $\mathbf{Q}_{(46:51, 46:51)} = 1 \cdot \mathbf{I}_{6 \times 6}$ y $\mathbf{P}_0 = 1000 \cdot \mathbf{I}_{51 \times 51}$.

Al asignar un mayor valor de $\mathbf{Q}$ a las variables de estado desconocidas (aquellas con mayor incertidumbre de modelado), el estimador reduce la confianza en el modelo para esas variables y da mayor peso tanto a las mediciones disponibles como al modelo en las variables con menor incertidumbre (es decir, aquellas con valores más bajos en $\mathbf{Q}$). Sin embargo, un incremento excesivo de $\mathbf{Q}$ puede causar inestabilidad numérica en el KF.

El enfoque TDHSE se implementa durante 3 segundos (150 ciclos a 50 Hz). El parque eólico se modela considerando las fluctuaciones del viento y los cambios en la transferencia de potencia. La Figura 5.3 presenta la comparación de la potencia activa total en el PCC entre el método TDHSE y el simulador PSCAD/EMTDC[®], mostrando una coincidencia muy cercana entre ambas respuestas obtenidas.

La respuesta del método TDHSE permite reproducir el comportamiento dinámico

del transitorio inicial y las variaciones de potencia activa del parque eólico, alcanzando aproximadamente 10 MW. El error relativo entre ambas respuestas es del 1.8468 %, lo que valida la precisión del método propuesto. El cálculo de la potencia activa se basa en las formas de onda estimadas de voltaje y corriente.

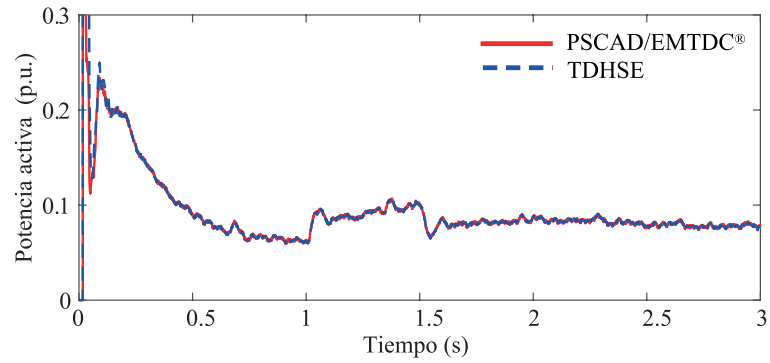


Figura 5.3: Potencia activa estimada en el PCC del parque eólico mediante TDHSE.

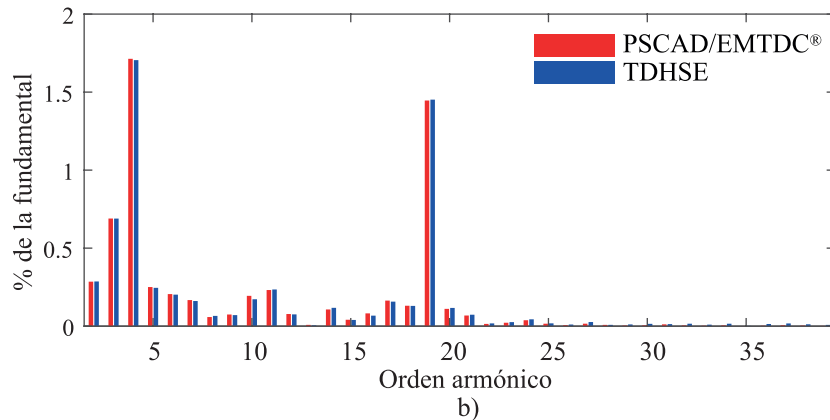
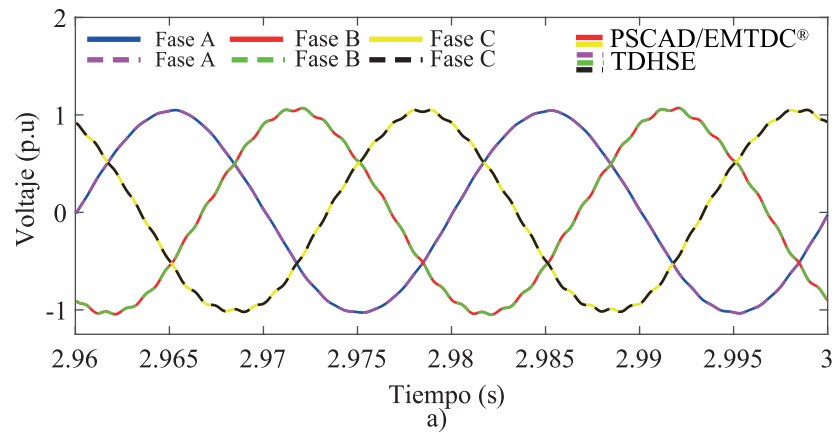


Figura 5.4: Voltaje del nodo T220: a) Forma de onda, b) Espectro armónico (fase C).

La Figura 5.4a muestra la comparación de la forma de onda de voltaje en el nodo T220 entre el método TDHSE y el simulador PSCAD/EMTDC[®], con una estrecha concordancia y un error relativo de 0.1016 %. El espectro armónico se calcula mediante la DFT del último ciclo de simulación. En la Figura 5.4b se presenta el contenido armónico de la fase C, que muestra la mayor distorsión entre fases, con un THD_v de 2.42 % para TDHSE y 2.43 % para PSCAD/EMTDC[®], con una diferencia relativa de 0.1892 %. El contenido armónico está desequilibrado por fase debido a la conexión de fuentes de distorsión armónica en el sistema de potencia, particularmente la carga no lineal conectada en el nodo I220.

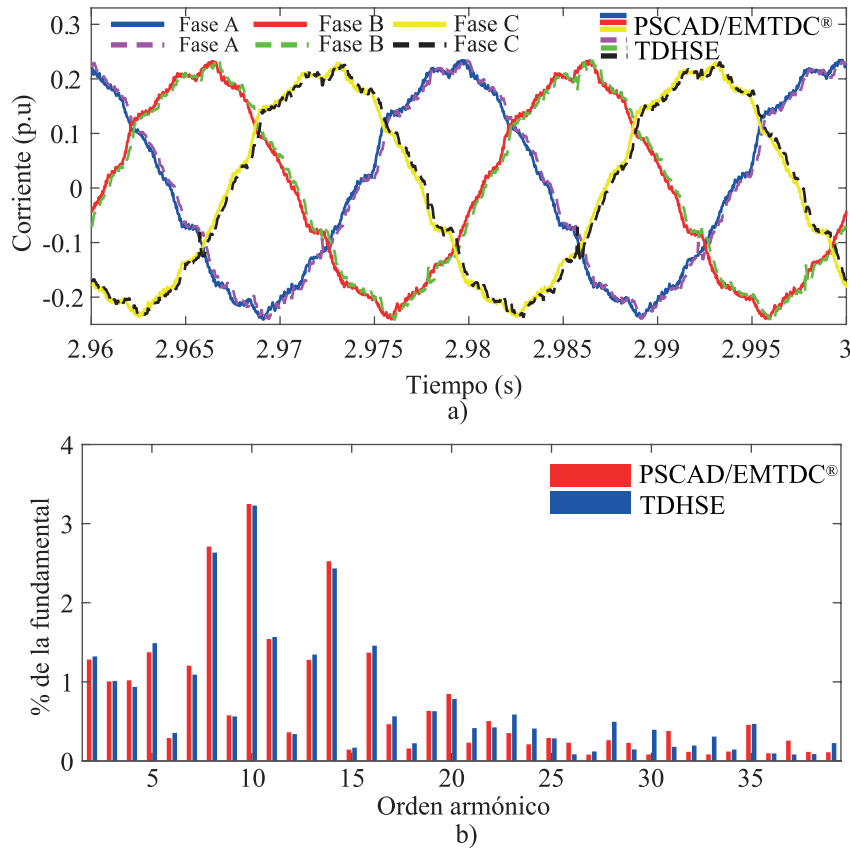


Figura 5.5: Corriente inyectada desde el parque eólico al PCC: a) Forma de onda, b) Espectro armónico.

La Figuras 5.5a y 5.5b muestran la comparación de la forma de onda y su espectro armónico de la corriente inyectada desde el parque eólico al PCC (nodo T220), obtenidos mediante TDHSE y el simulador PSCAD/EMTDC[®]. Se observa que la respuesta obtenida mediante TDHSE presenta un error relativo de 2.9850 %, siendo la mayor diferencia entre

las formas de onda analizadas, aunque mantiene una buena concordancia con la respuesta real. En cuanto al contenido armónico, la fase A presenta el mayor THD_i , con 6.35 % para el método TDHSE y 6.36 % para el simulador PSCAD/EMTDC[®], con una diferencia relativa de aproximadamente 0.2520 %.

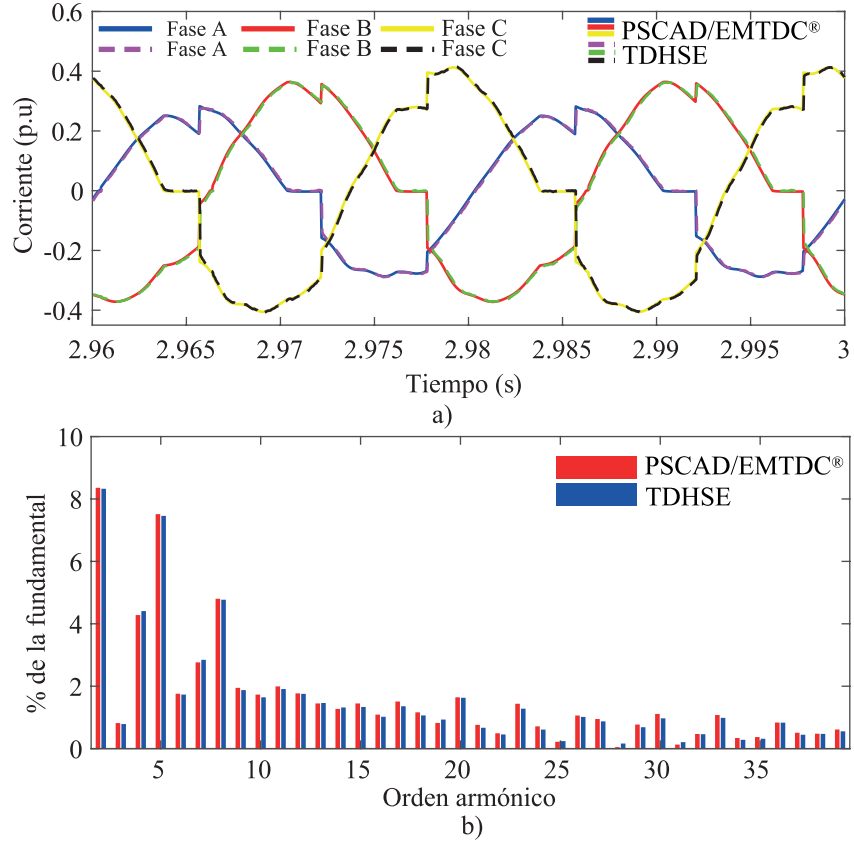


Figura 5.6: Corriente de carga no lineal desbalanceada: a) Forma de onda, b) Espectro armónico (fase A).

La Figura 5.6a muestra la comparación de la forma de onda de corriente de la carga no lineal desequilibrada conectada al nodo I220, obtenida mediante TDHSE y el simulador PSCAD/EMTDC[®]. Con un error relativo bajo de aproximadamente 1.2646 %, el método TDHSE estima con precisión la respuesta real. La Figura 5.6b muestra su contenido armónico, la fase A presenta el mayor THD_i , con valores de 14.74 % y 14.62 % para TDHSE y PSCAD/EMTDC[®], respectivamente, lo que representa una diferencia relativa mínima de aproximadamente 0.8563 %. Los resultados obtenidos con el método TDHSE demuestran su capacidad para representar adecuadamente el comportamiento dinámico y el contenido

armónico de sistemas trifásicos desbalanceados.

La Figura 5.7a y 5.7b muestran la comparación de la forma de onda y del contenido armónico de la corriente en la rama I220–R220, entre el método TDHSE y el simulador PSCAD/EMTDC®. El estimador de estado armónico proporciona una representación precisa de las formas de onda, con un error relativo de alrededor del 0.3495 %. En el análisis espectro armónico, la fase B presenta el mayor THD_i, con valores de 9.78 % y 9.76 % para TDHSE y PSCAD/EMTDC®, respectivamente, lo que corresponde a una diferencia relativa mínima de aproximadamente 0.1202 %.

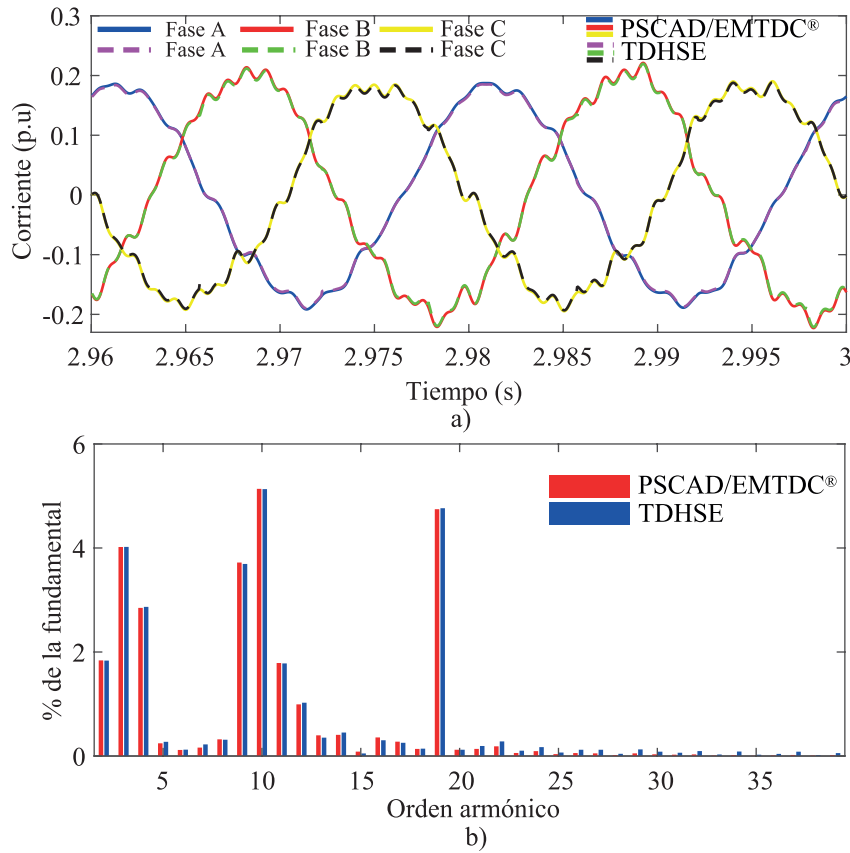


Figura 5.7: Corriente de rama I220-R220: a) Forma de onda, b) Espectro armónico (fase B).

Los resultados del caso de estudio obtenidos mediante TDHSE basado en el KF son satisfactorios. La implementación del modelo de medición óptimo garantiza la observabilidad total del sistema, condición esencial para la correcta aplicación del método de identificación de fuentes de distorsión armónica, que define un estado aumentado. De esta forma, es posible

estimar el comportamiento dinámico de las entradas del sistema asociadas a cualquier tipo de fuente de distorsión armónica, ya sean balanceadas y/o desbalanceadas, como cargas no lineales y fuentes de energía renovable. Al evaluar tanto las variables de estado originales como aquellas introducidas en el nuevo estado incrementado $\mathbf{x}_{\text{new}}(t)$, se pueden estimar adecuadamente sus formas de onda de voltaje y corriente.

Una característica importante del estimador de estado propuesto es que no incluye las ecuaciones dinámicas de estas fuentes, ya que se consideran como variables desconocidas a estimar. Una ventaja fundamental de este enfoque es que evita la necesidad de modelar en detalle cada fuente de distorsión armónica, lo cual implicaría un incremento considerable en el número de variables de estado y una mayor complejidad del modelo. El estimador de estado captura la dinámica de estas fuentes en el PCC, introduciendo tres variables de estado adicionales por cada conjunto de fuentes trifásicas conectadas a ese punto. Aunque esto incrementa la dimensión del vector de estado del sistema, el aumento es significativamente menor en comparación con un modelado detallado que incluiría los lazos de control internos y las dinámicas específicas de cada fuente.

5.4. Conclusiones

Este capítulo se ha presentado la formulación de TDHSE, que combina el KF con el método de identificación de fuentes de distorsión armónica para estimar las formas de onda de voltaje y corriente en redes eléctricas trifásicas con fuentes de generación eólica y cargas no lineales. El algoritmo TDHSE representa las corrientes de las fuentes de distorsión armónica como variables desconocidas para su estimación. Además, se ha aplicado un número limitado de dispositivos de mediciones corrompidas por ruido, obteniendo un modelo de medición subdeterminado para el análisis del caso de estudio.

En general, la implementación del KF y la identificación de fuentes de distorsión armónica permiten estimar satisfactoriamente las variables asociadas a estas fuentes en el PCC, evitando así la complejidad asociada al modelo matemático detallado. Esto simplifica el modelado y permite estimar el estado dinámico global del sistema.

La metodología TDHSE se ha validado con éxito mediante su comparación con

los resultados obtenidos del simulador PSCAD/EMTDC[®], mostrando una concordancia estrecha entre ambas respuestas.

El caso de estudio se aplicó a un sistema de potencia trifásico de pequeña escala; sin embargo, la metodología desarrollada es escalable y puede aplicarse a sistemas de mayor escala. El método TDHSE también tiene la capacidad de realizar la estimación del estado en condiciones transitorias, incluyendo fallas balanceadas y desbalanceadas en el PCC, y simular la respuesta dinámica de la red eléctrica, considerando el efecto de fuentes de energía renovable.

Capítulo 6

Conclusiones Generales y Trabajos Futuros

6.1. Conclusiones generales

En este trabajo de investigación, se ha desarrollado e implementado el modelado de orden reducido del FDNE utilizando CCA, lo que ha resultado en una mejora significativa de la eficiencia computacional en el análisis de fenómenos transitorios EMT en sistemas de potencia, sin detrimento de la precisión numérica del proceso solución. Además, la aplicación de la factorización de matrices dispersas mediante descomposición LU, ha permitido una mayor optimización en el proceso de solución, reduciendo considerablemente los tiempos de cómputo. La combinación de estos procesos, CCA_{FDNE}-LU, ha permitido realizar simulaciones eficientes del sistema de potencia en el dominio del tiempo.

Se ha desarrollado el algoritmo de identificación de parámetros en el dominio del tiempo para la estimación del modelo FDNE basado en una función racional en el dominio z . La evaluación del análisis de la respuesta de frecuencia del modelo FDNE en diversos sistemas de potencia ha demostrado su capacidad para representar adecuadamente la admitancia dependiente de la frecuencia en las terminales evaluadas. Las respuestas obtenidas por el modelo FDNE han sido comparadas directamente con las obtenidas con el simulador comercial PSCAD/EMTDC[®], mostrando que los MSE en magnitud y fase son

en general mínimos dentro del rango de interés. Asimismo, los ajustes del modelo FDNE cumplen con los criterios de precisión, estabilidad y pasividad establecidos en el algoritmo de identificación de parámetros, garantizando la estabilidad numérica al implementar el FDNE en el dominio del tiempo. Además, la configuración de la estructura equivalente del FDNE, representada como fuentes de corriente, permite su conexión directa al área de estudio considerada, utilizando CCA y SSM con modificaciones mínimas.

Se ha evaluado el desempeño del enfoque CCA_{FDNE} -LU mediante diversos casos de estudio que incluyen sistemas de potencia monofásicos y trifásicos de diferente escala y condiciones operativas. Asimismo, se utilizaron diferentes configuraciones del modelo FDNE tanto de un puerto como multipuerto. Los resultados se compararon con los obtenidos mediante los algoritmos de modelos de orden completo SSM-BF y CCA_{RT} -LU, así como con los de modelos de orden reducido SSM_{FDNE} -BF. En este análisis, se consideraron aspectos como la representación de modelos equivalentes, en relación con la complejidad de modelado en términos del número de variables de estado utilizadas por cada proceso de solución, el tiempo de ejecución en CPU y la precisión numérica.

En la representación de modelos equivalentes, el método CCA_{FDNE} logra representar el área de estudio con un menor número de variables de estado, preservando su orden al integrar el modelo FDNE. Por otro lado, SSM_{FDNE} requiere más variables de estado para modelar el área de estudio y la inclusión variables adicionales para conectar el modelo FDNE, lo que aumenta la complejidad del modelado, particularmente en sistemas trifásicos con modelos FDNE multipuerto. La implementación de ambos métodos permite una formulación más compacta del sistema de potencia, disminuyendo la complejidad modelado en comparación con los modelos de orden completo. No obstante, la combinación de CCA y FDNE optimiza de manera significativa la representación del sistema de orden reducido, simplificando tanto el modelado del área de estudio como el área externa.

Se ha demostrado que el método propuesto CCA_{FDNE} -LU es una solución eficiente al asumir un modelo equivalente simplificado, logrando la mayor reducción en los tiempos de simulación en comparación con SSM_{FDNE} -BF, SSM-BF y CCA_{RT} -LU. En cambio, SSM_{FDNE} -BF, aunque mejora los tiempos en comparación con los modelos de orden completo, presenta tiempos de cómputo mayores debido a su representación compleja del sistema

de orden reducido, lo que incrementa la carga computacional y limita su escalabilidad, particularmente cuando se modelan sistemas trifásicos con modelos FDNE multipuertos.

Se ha evaluado la precisión de $\text{CCA}_{\text{FDNE-LU}}$ en la representación de fenómenos transitorios EMT bajo diversos escenarios, incluyendo fallas monofásicas y trifásicas a tierra, la integración de fuentes de generación eólica estocástica y fuentes de corriente de distorsión estática. Los resultados obtenidos demuestran que el método $\text{CCA}_{\text{FDNE-LU}}$ logra aproximar con precisión el comportamiento dinámico del sistema de orden completo, garantizando la adecuada reproducción de los efectos en estado estable y transitorio, así como la propagación de distorsión armónica. En el análisis comparativo, se ha analizado que los procesos asociados con $\text{CCA}_{\text{FDNE-LU}}$ y $\text{SSM}_{\text{FDNE-BF}}$ presentan un pequeño aumento en el error relativo en comparación con los modelos SSM-BF y $\text{CCA}_{\text{RT-LU}}$, el cual es menor que 2%. No obstante, las diferencias observadas son mínimas, y todos los métodos implementados logran representar adecuadamente la dinámica del sistema, en comparación con las respuestas del simulador PSCAD/EMTDC®. El método $\text{CCA}_{\text{FDNE-LU}}$, aunque presenta un error relativo ligeramente mayor, mantiene una representación adecuada de la dinámica del sistema, con una notable mejora en la eficiencia computacional.

También, en este trabajo de investigación se ha desarrollado un método de estimación de estado bajo condiciones de distorsión armónica en el dominio del tiempo para la evaluación de sistema de potencia trifásicos con fuentes de generación eólica y cargas no lineales. El método TDHSE desarrollado ha demostrado ser eficiente en la representación del modelo del sistema de potencia al implementar el KF junto con el método de identificación de fuentes de distorsión armónica. Esta combinación permite desarrollar un modelo de espacio de estado aumentado que incluye variables de estado desconocidas, las cuales representan las corrientes generadas en el PCC por fuentes eólicas y cargas no lineales. Esto se debe a que no se dispone de un modelo dinámico preciso para las distintas fuentes de distorsión armónica y que, incluso cuando el modelo se considera conocido, su representación es compleja y conlleva un aumento mayor en el número de variables de estado. Esta configuración evita la necesidad de modelar a detalle las características internas de las fuentes de distorsión armónica, lo que reduce la complejidad de modelado.

La validación del método TDHSE, bajo diversas condiciones de operación, ha

demostrado una adecuada precisión en la estimación de las formas de onda de voltaje y corriente, así como sus contenidos armónicos. La estimación de las variables de estado, tanto las originales del sistema como las asociadas a las fuentes de distorsión armónica, coinciden cercanamente con los resultados obtenidos mediante el simulador PSCAD/EMTDC®. En la evaluación, los errores relativos en las variables originales del sistema son mínimos; las mayores discrepancias, del orden de 2.9850 %, se presentaron en las formas de onda del parque eólico, con un error relativo de THD_i de aproximadamente 0.2520 %.

6.2. Trabajos futuros

Los avances logrados en la investigación reportada en esta tesis permiten proponer las siguientes consideraciones para ampliar la capacidad de los métodos propuestos en futuros trabajos.

1. Se propone implementar métodos de forzamiento de pasividad en el modelo FDNE para garantizar su estabilidad numérica en las simulaciones en el dominio del tiempo. Al forzar la pasividad del sistema, se evitará el incremento del orden del modelo en el proceso de identificación de parámetros.
2. Se propone modificar la fuente de corriente controlada, actualmente compuesta por una fuente constante en la estructura equivalente del FDNE, y reemplazarla por una fuente dinámica (equivalente de baja frecuencia) calculada en cada paso de tiempo. Esto permitirá capturar la respuesta transitoria de los generadores síncronos del área externa, mejorando la precisión en la representación de transitorios electromagnéticos y electromecánicos.
3. Se propone desarrollar e implementar modelos detallados utilizando MEDN en el marco de referencia CCA, que incluya la representación de fuentes de energía renovables, como fotovoltaicas y eólicas, así como el modelado de líneas de transmisión de longitud largas.
4. Se propone analizar sistemas de potencia desbalanceados y de mayor escala, utilizando modelos detallados de componentes como generadores sincrónicos, fuentes de

energía renovables (fotovoltaicas y eólicas) y líneas de transmisión de longitud largas, para evaluar la eficiencia computacional al comparar modelos de orden completo con modelos de orden reducido.

5. Se propone mejorar la eficiencia computacional mediante la aplicación de técnicas de procesamiento en paralelo, utilizando arquitecturas CPU-GPU con el lenguaje de programación C++, para ejecutar el modelo de orden reducido en el dominio del tiempo, lo que permitirá reducir significativamente el tiempo de simulación.
6. Se propone realizar simulaciones en tiempo real para el análisis de sistemas de potencia dinámicos utilizando un modelo de orden reducido, ejecutando el código desarrollado en plataformas como OPAL-RT®.
7. Se propone aplicar y evaluar el enfoque TDHSE en sistemas de potencia trifásicos de diferentes escalas, tanto balanceados como desbalanceados, con diversas fuentes renovables, considerando condiciones operativas adversas, para analizar su capacidad en la estimación de estado transitorio, tanto fuera de línea como en tiempo real, utilizando la plataforma OPAL-RT®.
8. Se propone combinar los enfoques TDHSE y FDNE para mejorar el análisis de estimación de estado en sistemas de potencia complejos y de gran escala. El FDNE se utilizaría para simplificar el sistema, con el objetivo de reducir la complejidad computacional y permitir que el estimador de estado ejecute de manera más eficiente en la zona de interés, reduciendo así el tiempo de simulación y manteniendo una adecuada precisión.
9. Implementar técnicas de refinamiento en la integración numérica, orientadas a atenuar las oscilaciones numéricas para mejorar la precisión del método CCA.

Apéndice A

Modelo de Identificación de Parámetros

A.1. Señal de excitación multiseno

La recopilación de datos para llevar a cabo la identificación de parámetros se basa en el uso de una señal multiseno. Esta señal consiste en la combinación de múltiples ondas sinusoidales, cada una configurada con amplitud ajustable y fase optimizada, expresada como [Abur y Singh, 1993]:

$$x_f(t) = \sum_{k=1}^{M_f} A_k \sin(2\pi f_k t + \alpha_k), \quad f_k = \frac{l_k}{T_{max}}, \quad k \quad (\text{A.1})$$

$$\alpha_m = \alpha_1 - \frac{m(m-1)}{M_f} \pi, \quad m = 2, \dots, M_f \quad (\text{A.2})$$

donde A_k , f_k , l_k y α_k representan la amplitud, la frecuencia, número entero y la fase de la k -ésima componente, respectivamente, y M_f es el número total de componentes de frecuencia. El número entero se calcula como $l_k = k$ y la fase inicial se define como $\alpha_1 = 0$. Para realizar la simulación de la señal de excitación, es necesario configurar la duración total T_{max} y el paso de tiempo Δ_t , calculados como $T_{max} = 1/\Delta_f = M_f/f_{max}$, donde f_{max} es la frecuencia máxima y Δ_f es el paso de frecuencia. El paso de tiempo Δ_t debe cumplir con el criterio de Nyquist, definido como $\Delta_t = 1/K_1 f_{max}$ con $K_1 > 2$, permitiendo una

adecuada representación de la frecuencia máxima utilizada.

La Figura A.1 muestra el esquema utilizado para energizar un nodo frontera en el simulador PSCAD/EMTDC[®], con el objetivo de realizar un análisis de respuesta en frecuencia. Se utiliza una fuente de voltaje controlada que inyecta la señal multiseno importada desde un archivo externo (X-Y Transfer Function) en el nodo frontera de la red eléctrica, y un bloque de medición que captura las respuestas de voltaje y corriente.

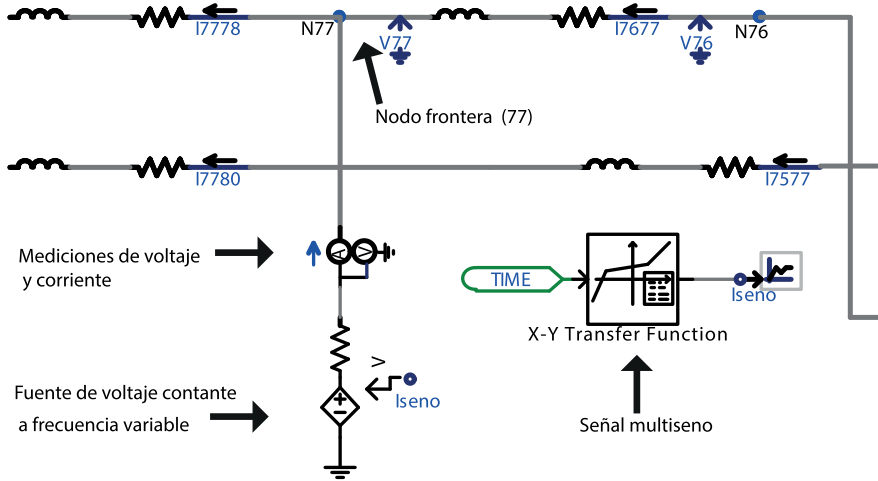


Figura A.1: Esquema de energización de un nodo frontera.

A.2. Estimación de parámetros usando RLS

La admitancia en un nodo frontera se puede modelar mediante una función racional en el dominio z , que se expresa como:

$$Y(z) = \frac{I(z)}{V(z)} = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_n z^{-n}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}} \quad (\text{A.3})$$

Al aplicar la transformada inversa de z , se obtiene la siguiente representación en el dominio del tiempo:

$$\begin{aligned} i(t) = & -a_1 i(t - \Delta t) - a_2 i(t - 2\Delta t) - \dots - a_n i(t - n\Delta t) \\ & + b_1 v(t - \Delta t) + b_2 v(t - 2\Delta t) + \dots + b_n v(t - n\Delta t) \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

esta expresión (A.4) describe cómo responde el área externa a una señal de excitación, representada por una fuente de voltaje constante a frecuencia variable, conectada en el nodo frontera. En forma matricial,

$$\begin{bmatrix} i(t_1) \\ i(t_2) \\ \vdots \\ i(t_k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -i(t_1 - \Delta t) & \cdots & -i(t_1 - n\Delta t) & v(t_1 - \Delta t) & \cdots & v(t_1 - n\Delta t) \\ -i(t_2 - \Delta t) & \cdots & -i(t_2 - n\Delta t) & v(t_2 - \Delta t) & \cdots & v(t_2 - n\Delta t) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -i(t_k - \Delta t) & \cdots & -i(t_k - n\Delta t) & v(t_k - \Delta t) & \cdots & v(t_k - n\Delta t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} \quad (\text{A.5})$$

donde k es el número de muestras consideradas durante el proceso de medición, con un paso de tiempo Δt y n corresponde al orden del modelo. En una representación compacta, (A.5) se puede formular como:

$$\phi = X\theta + \nu \quad (\text{A.6})$$

donde ϕ , θ , X y ν representan el vector de medición de RLS, el vector de parámetros (estado), la matriz que relaciona el vector de parámetros con el vector de medición, y el vector de ruido aleatorio, respectivamente. Para la estimación de los coeficientes θ se utiliza el método de mínimos cuadrados recursivos, cuyo desarrollo matemático se reporta en [Thakallapelli *et al.*, 2019]:

$$K_k^{RLS} = \frac{P_{k-1}X_k}{\gamma + X_k^t P_{k-1} X_k} \quad (\text{A.7})$$

$$P_k^{RLS} = \frac{(I - K_k X_k^t) P_{k-1}}{\gamma} \quad (\text{A.8})$$

$$\theta_k = \theta_{k-1} + K_k (\phi_k - X_k^t \theta_{k-1}) \quad (\text{A.9})$$

donde K^{RLS} es la ganancia de RLS, P^{RLS} es la matriz de covarianza de RLS y γ es el factor de ponderación.

Apéndice B

Método de Factorización Matricial

Una solución eficiente para el análisis de grandes sistemas de potencia, representados por n ecuaciones lineales en la forma estándar $Ax = b$, es la implementación del método de factorización matricial, dada la estructura dispersa del sistema. Este enfoque se basa en aplicar diversas modificaciones del método de eliminación de Gauss, combinado dos técnicas: el producto de n matrices factor y la descomposición LU.

La combinación de estas dos técnicas se denomina bifactorización, y se caracteriza por requerir menos almacenamiento, simplificar las operaciones y reducir la complejidad al obtener la solución de las ecuaciones utilizando las matrices factores. La formulación matemática se detalla en [Brameller *et al.*, 1976], y se expresa de forma general como:

$$G^1 G^2 \cdots G^{n-1} G_n = L_n L_{n-1} \cdots L_2 L_1 G \quad (\text{B.1})$$

despejando la matriz G , se obtiene que,

$$G = L_1^{-1} L_2^{-1} \cdots L_{n-1}^{-1} L_n G^n G^{n-1} \cdots G^2 G^1 \quad (\text{B.2})$$

donde $G^i = U_i$, por lo tanto,

$$G = L_1^{-1} L_2^{-1} \cdots L_{n-1}^{-1} L_n U_n U_{n-1} \cdots U_2 U_1 \quad (\text{B.3})$$

Para determinar las matrices factores de $L_1 L_2 \cdots L_{n-1} L_n$ y $G^1 G^2 \cdots G^{n-1} G_n$, se

utiliza la matriz G con la estructura:

$$G = \begin{pmatrix} g_{1,1} & g_{1,2} & \cdots & g_{1,k} \\ g_{2,1} & g_{2,2} & \cdots & g_{2,k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{j,1} & g_{j,2} & \cdots & g_{j,k} \end{pmatrix} \quad \text{donde } j = k = 3, 4, \dots, m \quad (\text{B.4})$$

Cada matriz L_i se construye a partir de la matriz identidad, ajustando $L_{i,i} = 1/g_{i,i}$ y los coeficientes de $L_{j,i} = -g_{j,i}/g_{i,i}$, donde g_{ii} es el coeficiente de la diagonal principal de G^{i-1} que se utiliza como pivote. La matriz L_i se emplea para eliminar los coeficientes columna i , excepto la posición $g_{i,i} = 1$, transformando la matriz G^{i-1} en una nueva matriz G^i . Por ejemplo, la estructura de las matrices L_1 y $G^1 = L_1 G$ tienen la forma:

$$L_1 = \begin{pmatrix} 1/g_{1,1} & 0 & \cdots & 0 \\ -g_{2,k}/g_{1,k} & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -g_{l,k}/g_{1,k} & 0 & \cdots & 1 \end{pmatrix} \quad \text{donde } \begin{matrix} j = k = 1 \\ l = 3, 4, \dots, m \end{matrix} \quad (\text{B.5})$$

$$G^1 = \begin{pmatrix} 1 & g_{1,2}^1 & \cdots & g_{1,k}^1 \\ 0 & g_{2,2}^1 & \cdots & g_{2,k}^1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & g_{j,2}^1 & \cdots & g_{j,k}^1 \end{pmatrix} \quad \text{donde } \begin{matrix} g_{1,k}^1 = \frac{g_{1,k}}{g_{1,1}} & j = 3, 4, \dots, m; & k = 1, 2, \dots, p \\ g_{j,k}^1 = g_{j,k} - \frac{g_{j,l} g_{l,k}}{g_{l,l}} & l = 1 \end{matrix} \quad (\text{B.6})$$

Este proceso se repite para cada columna hasta obtener n matrices de L_i y G^i .

Apéndice C

Elementos del sistema de potencia

Tabla C.1: Modelos del inductor y del capacitor en el dominio del tiempo: SSM y CCA_{RT}.

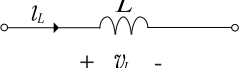
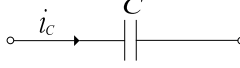
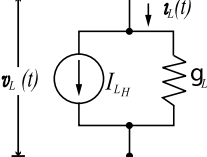
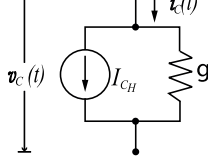
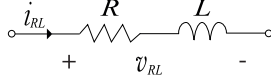
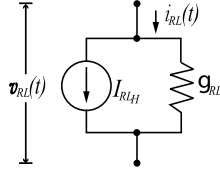
Inductor	Capacitor
SSM  $L \frac{di_L(t)}{dt} = v_L(t)$	SSM  $C \frac{dv_C(t)}{dt} = i_C(t)$
CCA_{RT}  $\int_{t-\Delta t}^t \frac{di_L(t)}{dt} dt = \frac{1}{L} \int_{t-\Delta t}^t v_L(t) dt$ $i_L(t) _{t-\Delta t} = \frac{1}{L} \int_{t-\Delta t}^t v_L(t) dt$ $i_L(t) = i_L(t - \Delta t) + \frac{1}{L} \int_{t-\Delta t}^t v_L(t) dt$ Aplicando la regla trapezoidal: $\int_{t-\Delta t}^t v_L(t) dt \approx \frac{\Delta t}{2} [v_L(t) + v_L(t - \Delta t)]$ Sustituyendo: $i_L(t) = \frac{\Delta t}{2L} v_L(t) + i_L(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2L} v_L(t - \Delta t)$ Rescribiendo: $g_L = \frac{\Delta t}{2L}$ $i_L(t) = I_{LH}(t - \Delta t) + g_L v_L(t)$ $I_{LH}(t - \Delta t) = i_L(t - \Delta t) + g_L v_L(t - \Delta t)$	CCA_{RT}  $\int_{t-\Delta t}^t \frac{dv_C(t)}{dt} dt = \frac{1}{C} \int_{t-\Delta t}^t i_C(t) dt$ $v_C(t) _{t-\Delta t} = \frac{1}{C} \int_{t-\Delta t}^t i_C(t) dt$ $v_C = v_C(t - \Delta t) + \frac{1}{C} \int_{t-\Delta t}^t i_C(t) dt$ Aplicando la regla trapezoidal $\int_{t-\Delta t}^t i_C(t) dt \approx \frac{\Delta t}{2} [i_C(t) + i_C(t - \Delta t)]$ $v_C(t) = \frac{\Delta t}{2C} i_C(t) + v_C(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2C} i_C(t - \Delta t)$ Despejando $i_C(t)$: $i_C(t) = \frac{2C}{\Delta t} v_C(t) - i_C(t - \Delta t) - \frac{2C}{\Delta t} v_C(t - \Delta t)$ Rescribiendo: $g_C = \frac{2C}{\Delta t}$ $i_C(t) = I_{CH}(t - \Delta t) + g_C v_C(t)$ $I_{CH}(t - \Delta t) = -i_C(t - \Delta t) - g_C v_C(t - \Delta t)$

Tabla C.2: Modelo de la rama RL en serie en el dominio del tiempo: SSM y CCA_{RT}.**Rama en serie RL****SSM**

$$\frac{di_{RL}(t)}{dt} = \frac{1}{L} [-Ri_{RL}(t) + v_{RL}(t)]$$

CCA_{RT}

$$\int_{t-\Delta t}^t \frac{di_{RL}(t)}{dt} dt = \frac{1}{L} [-R \int_{t-\Delta t}^t i_{RL}(t) dt + \int_{t-\Delta t}^t v_{RL}(t) dt]$$

$$i_{RL}(t)|_{t-\Delta t}^t = \frac{1}{L} [-R \int_{t-\Delta t}^t i_{RL}(t) dt + \int_{t-\Delta t}^t v_{RL}(t) dt]$$

Aplicando la regla trapezoidal

$$\int_{t-\Delta t}^t i_{RL}(t) dt \approx \frac{\Delta t}{2} [i_{RL}(t) + i_{RL}(t - \Delta t)]$$

$$\int_{t-\Delta t}^t v_{RL}(t) dt \approx \frac{\Delta t}{2} [v_{RL}(t) + v_{RL}(t - \Delta t)]$$

Sustituyendo:

$$i_{RL}(t) = i_{RL}(t - \Delta t) + \frac{\Delta T}{2L} [-Ri_{RL}(t) - Ri_{RL}(t - \Delta t) + v_{RL}(t) + v_{RL}(t - \Delta t)]$$

Despejando $i_{RL}(t)$:

$$i_{RL}(t) = \frac{\Delta t}{2L + R\Delta t} v_{RL}(t) + \left[\frac{1 + R\frac{\Delta t}{2L}}{1 + R\frac{\Delta t}{2L}} \right] i(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2L + R\Delta t} v_{RL}(t - \Delta t)$$

Rescribiendo:

$$g_{RL} = \frac{\Delta t}{2L + R\Delta t}; \quad g_L = \frac{\Delta t}{2L}; \quad K_{RL} = \frac{1 - Rg_L}{1 + Rg_L}$$

$$i_{RL}(t) = I_{RLH}(t - \Delta t) + g_{RL}v_{RL}(t)$$

$$I_{RLH}(t - \Delta t) = K_{RL}i_{RL}(t - \Delta t) + g_{RL}v_{RL}(t - \Delta t)$$

C.1. Modelo del aerogenerador tipo 4

El sistema de conversión de energía eólica (WECS, por sus siglas en inglés) considerado corresponde a un generador eólico de tipo 4 [Salgado *et al.*, 2018], que emplea un generador síncrono de imanes permanentes (PMSG, por sus siglas en inglés) de accionamiento directo, acoplado a un convertidor back-to-back a escala completa (ver Figura C.1). Este convertidor utiliza convertidores de fuente de voltaje (VSC) tanto en el lado de la máquina como en el lado de la red. La Tabla C.3 resume las ecuaciones principales del WECS, cuya formulación detallada se presenta en [Salgado *et al.*, 2018]

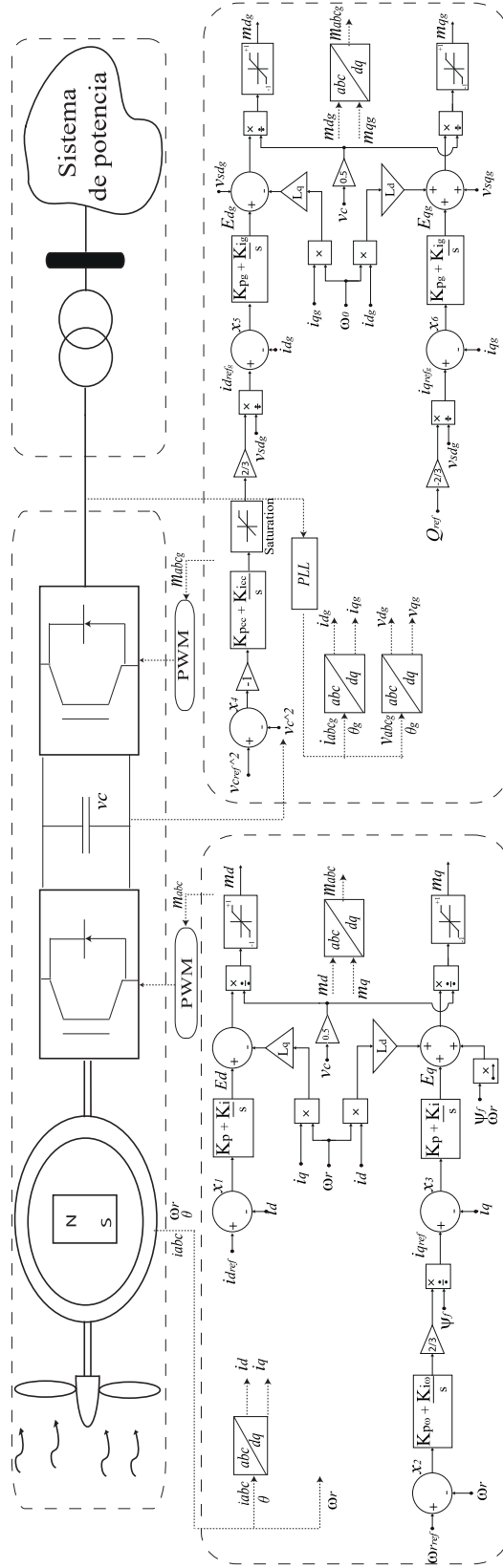


Figura C.1: Esquema de un WECS basado en un aerogenerador tipo 4 conectado al sistema de potencia.

Tabla C.3: Modelo del aerogenerador tipo 4.

Modelo de lado de la maquina PMSG-VSC	Modelo del lado de la red VSC-RED
Ecuaciones: $\frac{d}{dt}i_d = \frac{1}{L_d}(-r_s i_d + \omega_r L_q i_q - v_d + v_{invd})$ $\frac{d}{dt}i_q = \frac{1}{L_q}(-r_s i_q - \omega_r(L_d i_d + \psi_f) - v_q + v_{invq})$ $v_{invd} = \left(\frac{1}{2}\right) v_c \cdot m_d$ $v_{invq} = \left(\frac{1}{2}\right) v_c \cdot m_q$ Descripción de variables: i_d, i_q : corriente del PMSG-VSC en los ejes d y q v_d, v_q : voltaje del estator en los ejes d y q L_d, L_q : inductancias del estator (ejes d y q) r_s : resistencia del estator ω_r : velocidad angular eléctrica del rotor ψ_f : flujo magnético del rotor v_{invd}, v_{invq} : voltage del PMSG-VSC (ejes d y q) m_d, m_q : índice de modulación del PMSG-VSC en los eje d y q	Ecuaciones: $\frac{d}{dt}i_{dg} = -r_g i_{dg} + \omega_0 L_{qg} i_{qg} - v_{sdg} + v_{invdg}$ $\frac{d}{dt}i_{qg} = -r_g i_{qg} - \omega_0 L_{dg} i_{dg} - v_{sqg} + v_{invqg}$ $v_{invdg} = \left(\frac{1}{2}\right) v_c \cdot m_{dg}$ $v_{invqg} = \left(\frac{1}{2}\right) v_c \cdot m_{qg}$ Descripción de variables: i_{dg}, i_{qg} : corriente en los ejes d y q v_{sdg}, v_{sqg} : voltaje de la red L_{dg}, L_{qg} : inductancias del filtro (ejes d y q) r_g : resistencia del filtro ω_0 : velocidad angular de la red v_{invdg}, v_{invqg} : voltaje del VSC-RED (ejes d y q) v_c : voltaje de enlace de corriente continua m_{dg}, m_{qg} : índice de modulación del VSC-RED en los eje d y q
Modelo mecánico del aerogenerador	
Ecuaciones: $\frac{d}{dt}\omega_m = \frac{1}{J}(T_m - B\omega_m - T_e)$ $T_e = \frac{3}{2}P(\psi_f i_q + (L_d - L_q)i_d i_q)$ $P_m = \frac{1}{2}\rho_{air}\pi r^2 C_p(\lambda, \beta)v_{wind}^3$ $T_m = \frac{P_m}{\omega_m}$ Descripción de variables: ω_m : velocidad mecánica del rotor J : coeficiente de inercia B : coeficiente de fricción viscosa	T_m : par mecánico T_e : par electromagnético P_m : potencia mecánica r : radio de la turbina eólica ρ_{air} : densidad del aire C_p : coeficiente de potencia λ : razón de velocidad especifica de los álabes β : ángulo de paso de las palas v_{wind} : velocidad del viento

C.2. Modelo del sistema de potencia en PSCAD

La Figura C.2 muestra el detalle de la implementación del sistema de prueba IEEE de 30 nodos en el simulador PSCAD/EMTDC, correspondiente al área de estudio considerada en el análisis.

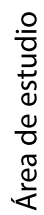


Figura C.2: Esquema del área de estudio del sistema de prueba IEEE de 30 nodos en el simulador PSCAD/EMTDC®

Referencias

- [Abur. y Exposito, 2004] Abur. A., Exposito A.G. *Power system state estimation theory and implementation*. Marcel Dekker Inc, New York, 2004.
- [Abur y Singh, 1993] Abur A., Singh H. “Time domain modeling of external systems for electromagnetic transients programs.” *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 8, No. 2, páginas 671–679, 1993.
- [Acha y Madrigal, 2001] Acha E., Madrigal M. *Power Systems Harmonics*. John Wiley and Sons LTD, 2001.
- [Ahmed *et al.*, 2020] Ahmed S.D., Al-Ismail F.S.M., Shafiullah M., Al-Sulaiman F.A., El-Amin I.M. “Grid Integration Challenges of Wind Energy: A Review.” *IEEE Access*, Vol. 8, páginas 10857–10878, 2020.
- [Annakkage *et al.*, 2012] Annakkage U.D., Nair N.K.C., Liang Y., Gole A.M., Dinavahi V., Gustavsen B., Noda T., Ghasemi H., Monti A., Matar M., Iravani R., Martinez J.A. “Dynamic System Equivalents: A Survey of Available Techniques.” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 27, No. 1, páginas 411–420, 2012.
- [Bagheri *et al.*, 2016] Bagheri A., Mardaneh M., Rajaei A., Rahideh A. “Detection of Grid Voltage Fundamental and Harmonic Components Using Kalman Filter and Generalized Averaging Method.” *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 31, No. 2, páginas 1064–1073, 2016.
- [Bowles, 1970] Bowles J.P. “AC System and Transformer Representation for HV-DC Trans-

- mission Studies.” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-89, No. 7, páginas 1603–1609, 1970.
- [Brameller *et al.*, 1976] Brameller A., Allan R., Hamam Y. *Sparsity: Its practical application to systems analysis*. Pitman Ltd., 1976.
- [Campello *et al.*, 2023] Campello T., Dicler F., Varricchio S., de Barros H., Costa C., Lima A., Taranto G. “Reviewing the large electrical network equivalent methods under development for electromagnetic transient studies in the Brazilian Interconnected power system.” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 151, página 109033, 2023.
- [Chen *et al.*, 2010] Chen C.I., Chang G.W., Hong R.C., Li H.M. “Extended Real Model of Kalman Filter for Time-Varying Harmonics Estimation.” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 25, No. 1, páginas 17–26, 2010.
- [Cheng *et al.*, 2020] Cheng T., Duan T., Dinavahi V. “Parallel-in-Time Object-Oriented Electromagnetic Transient Simulation of Power Systems.” *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*, Vol. 7, páginas 296–306, 2020.
- [Chua y Lin, 1975] Chua L.O., Lin P.M. *Computer-aided analysis of electronic circuits: algorithms and computational techniques*. Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs, New Jerse, 1975.
- [Cisneros-Magaña *et al.*, 2018] Cisneros-Magaña R., Medina A., Dinavahi V., Ramos-Paz A. “Time-Domain Power Quality State Estimation Based on Kalman Filter Using Parallel Computing on Graphics Processing Units.” *IEEE Access*, Vol. 6, páginas 21152–21163, 2018.
- [Cisneros-Magaña *et al.*, 2014] Cisneros-Magaña R., Medina A., Segundo-Ramírez J. “Efficient time domain power quality state estimation using the enhanced numerical differentiation Newton type method.” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 63, página 414–422, 2014.

- [Cisneros-Magaña *et al.*, 2022] Cisneros-Magaña R., Medina-Rios A., Fuerte-Esquivel C.R., Segundo-Ramírez J. “Harmonic state estimation based on discrete exponential expansion, singular value decomposition and a variable measurement model.” *Energy*, Vol. 249, No. 15, página 123712, 2022.
- [Farzanehrafat y Watson, 2013] Farzanehrafat A., Watson N.R. “Power Quality State Estimator for Smart Distribution Grids.” *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 28, No. 3, páginas 2183–2191, 2013.
- [Gavrilovic y QueDo, 1984] Gavrilovic M.M., QueDo V. “An Iterative Pole-Removal Method for Synthesis of Power System Equivalent Networks.” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-103, No. 8, páginas 2065–2070, 1984.
- [Girgis *et al.*, 1990] Girgis A., Qiu J., McManis R. “A time-domain approach for distribution and transmission network modeling.” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 5, No. 1, páginas 365–371, 1990.
- [Girgis *et al.*, 1993] Girgis A., Quaintance W., Qiu J., Makram E. “A time-domain three-phase power system impedance modeling approach for harmonic filter analysis.” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 8, No. 2, páginas 504–510, 1993.
- [Godínez-Delgado y Medina-Rios, 2021] Godínez-Delgado J.C., Medina-Rios A. “Comparative Analysis of State-Space and Companion-Circuit Methodologies for the Periodic Steady-State Solution in Time-Domain of Nonlinear Electric Networks.” *IEEE Access*, Vol. 9, páginas 71712–71724, 2021.
- [Godínez-Delgado *et al.*, 2020] Godínez-Delgado J.C., Medina-Rios A., Tapia-Sánchez R. “A Time-Domain Companion-Circuit Newton-Based Methodology Applied to the Harmonic Analysis of Electrical Networks With PV Systems.” *IEEE Access*, Vol. 8, páginas 129108–129122, 2020.
- [Grainger y Stevenson, 1994] Grainger J., Stevenson W.D. *Power system analysis*. Mc. Graw-Hill International, 1994.

- [Gustavsen, 2002] Gustavsen B. “Computer code for rational approximation of frequency dependent admittance matrices.” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 17, No. 4, páginas 1093–1098, 2002.
- [Gustavsen, 2006] Gustavsen B. “Improving the pole relocating properties of vector fitting.” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 21, No. 3, páginas 1587–1592, 2006.
- [Gustavsen, 2008] Gustavsen B. “Fast Passivity Enforcement for Pole-Residue Models by Perturbation of Residue Matrix Eigenvalues.” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 23, No. 4, páginas 2278–2285, 2008.
- [Gustavsen, 2021] Gustavsen B. “Passivity Enforcement by Residue Perturbation via Constrained Non-Negative Least Squares.” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 36, No. 5, páginas 2758–2767, 2021.
- [Gustavsen y De Silva, 2013] Gustavsen B., De Silva H.M.J. “Inclusion of Rational Models in an Electromagnetic Transients Program: Y-Parameters, Z-Parameters, S-Parameters, Transfer Functions.” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 28, No. 2, páginas 1164–1174, 2013.
- [Gustavsen y Semlyen, 1999] Gustavsen B., Semlyen A. “Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting.” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 14, No. 3, páginas 1052–1061, 1999.
- [Hingorani y Burberry, 1970] Hingorani N.G., Burberry M.F. “Simulation of AC System Impedance in HVDC System Studies.” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-89, No. 5, páginas 820–828, 1970.
- [Hong y Park, 1995] Hong J.H., Park J.K. “A time-domain approach to transmission network equivalents via Prony analysis for electromagnetic transients analysis.” *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10, No. 4, páginas 1789–1797, 1995.
- [Hu *et al.*, 2017] Hu Y., Wu W., Gole A.M., Zhang B. “A Guaranteed and Efficient Method to Enforce Passivity of Frequency-Dependent Network Equivalents.” *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 32, No. 3, páginas 2455–2463, 2017.

- [Kundur, 1994] Kundur P. *Power system stability and control*. McGraw-Hill, 1994.
- [Liang *et al.*, 2011] Liang Y., Lin X., Gole A.M., Yu M. “Improved Coherency-Based Wide-Band Equivalents for Real-Time Digital Simulators.” *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 26, No. 3, páginas 1410–1417, 2011.
- [Lin *et al.*, 2009] Lin X., Gole A.M., Yu M. “A Wide-Band Multi-Port System Equivalent for Real-Time Digital Power System Simulators.” *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 24, No. 1, páginas 237–249, 2009.
- [Liu *et al.*, 2020] Liu H., Hu F., Su J., Wei X., Qin R. “Comparisons on Kalman-Filter-Based Dynamic State Estimation Algorithms of Power Systems.” *IEEE Access*, Vol. 8, páginas 51035–51043, 2020.
- [Medina *et al.*, 1990] Medina A., Arrillaga J., Watson N.R. “Derivation of Multi-Harmonic Equivalent Models of Power Networks.” *IEEE-ICHPS IV Fourth International Conference on Harmonics in Power Systems*, 1990.
- [Medina y Cisneros-Magaña, 2012] Medina A., Cisneros-Magaña R. “Time-domain harmonic state estimation based on the Kalman filter Poincare map and extrapolation to the limit cycle.” *IET Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 6, No. 12, páginas 1209–1217, 2012.
- [Medina y Ramos-Paz, 2005] Medina A., Ramos-Paz A. “Driving point impedance computation applying parallel processing techniques.” *Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on Mathematical Methods and Computational Techniques In Electrical Engineering*, 2005.
- [Medina *et al.*, 2020] Medina E., Ramirez A., Morales J., Sheshyekani K. “Passivity Enforcement of FDNEs via Perturbation of Singularity Test Matrix.” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 35, No. 4, páginas 1648–1655, 2020.
- [Molina-Moreno *et al.*, 2017] Molina-Moreno A.M., Cisneros-Magaña R., Anaya-Lara O. “Time domain harmonic state estimation in unbalanced power networks based on op-

- timal number of meters and the principle of half-wave symmetry.” *IET Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 11, No. 15, páginas 3871–3880, 2017.
- [Molina-Moreno *et al.*, 2020] Molina-Moreno I., A. Medina R.C.M., O A.L., Salazar-Torres J. “Enhanced harmonic state estimation in unbalanced three-phase electrical grids based on the Kalman filter and physical scale-down implementation.” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 113, página 106243, 2020.
- [Morched y Brandwajn, 1983] Morched A.S., Brandwajn V. “Transmission Network Equivalents for Electromagnetic Transients Studies.” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-102, No. 9, páginas 2984–2994, 1983.
- [Naredo *et al.*, 2007] Naredo L., Ramirez A., Ametani A., Gutierrez A., Mansoldo A., Gole A., Lima A., Morched A., Gustavsen B., Wilcox D., Uribe F., Moreira F., de Leon F., Martinez J., Guardado L., Davila M., Ritual M., Nagaoka N., Watson N., Gomez P., Moreno P., Iravani R., Carneiro S., Noda T., Dinavahi V., Ortiz V., Neves W. “ z -Transform-Based Methods for Electromagnetic Transient Simulations.” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 22, No. 3, páginas 1799–1805, 2007.
- [Ogata, 1995] Ogata K. *Discrete-time control systems*. Prentice-Hall International Inc, New Jersey, 1995.
- [PSCAD, 2025] PSCAD. “Frequency-Dependent Network Equivalent (FDNE).” *Ultimo acceso: Agosto*, [https:// www.pscad.com /webhelp/ MasterLibraryModels/ Passive/ FD-NE/ Frequency-DependentNetworkEquivalent\(FDNE\).htm](https://www.pscad.com/webhelp/MasterLibraryModels/Passive/FDNE/Frequency-DependentNetworkEquivalent(FDNE).htm), 2025.
- [Qi *et al.*, 2018] Qi J., Sun K., Wang J., Liu H. “Dynamic State Estimation for Multi-Machine Power System by Unscented Kalman Filter With Enhanced Numerical Stability.” *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 9, No. 2, páginas 1184–1196, 2018.
- [Qiu *et al.*, 1993] Qiu J., Chen H., Girgis A. “Dynamic modeling and parameter estimation of a radial and loop type distribution system network.” *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 8, No. 2, páginas 483–490, 1993.

- [Salgado *et al.*, 2018] Salgado N., Campos-Gaona D., Anaya O., Medina A., Tapia-Sánchez R., Rodríguez J. “THD reduction in wind energy system using type-4 wind turbine/PMSG applying the active front-end converter parallel operation.” *Energies*, 2018.
- [Schweppe, 1970] Schweppe F.C. “Power System Static-State Estimation, Part III: Implementation.” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-89, No. 1, páginas 130–135, 1970.
- [Schweppe y Rom, 1970] Schweppe F.C., Rom D.B. “Power System Static-State Estimation, Part II: Approximate Model.” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-89, No. 1, páginas 125–130, 1970.
- [Schweppe y Wildes, 1970] Schweppe F.C., Wildes J. “Power System Static-State Estimation, Part I: Exact Model.” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-89, No. 1, páginas 120–125, 1970.
- [Shah *et al.*, 2021] Shah C., Vasquez-Plaza J.D., Campo-Ossa D.D., Patarroyo-Montenegro J.F., Guruwacharya N., Bhujel N., Trevizan R.D., Rengifo F.A., Shirazi M., Tonkoski R., Wies R., Hansen T.M., Cicilio P. “Review of Dynamic and Transient Modeling of Power Electronic Converters for Converter Dominated Power Systems.” *IEEE Access*, Vol. 9, páginas 82094–82117, 2021.
- [Simon, 2006] Simon D. *Optimal state estimation Kalman, H_∞ and non linear approaches*. MJohn Wiley Sons, Hoboken, 2006.
- [Singh y Abur, 1995] Singh H., Abur A. “Multi-port equivalencing of external systems for simulation of switching transients.” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 10, No. 1, páginas 374–382, 1995.
- [Sowa y Zychma, 2022] Sowa P., Zychma D. “Dynamic Equivalents in Power System Studies: A Review.” *Energies*, Vol. 15, No. 4, 2022.
- [Stagg y El-Abiad, 1968] Stagg G.W., El-Abiad A.H. *Computer Methods in power system analysis*. McGraw-Hill Kogakusha, Ltd., 1968.

- [Subedi *et al.*, 2021] Subedi S., Rauniyar M., Ishaq S., Hansen T.M., Tonkoski R., Shirazi M., Wies R., Cicilio P. “Review of Methods to Accelerate Electromagnetic Transient Simulation of Power Systems.” *IEEE Access*, Vol. 9, páginas 89714–89731, 2021.
- [Talocia y Gustavsen, 2016] Talocia S.G., Gustavsen B. *Passive macromodeling theory and applications*. John Wiley and Sons, Inc, 2016.
- [Tapia-Tinoco, 2017] Tapia-Tinoco J. “Análisis teórico-experimental e implementación en tiempo real de estimación de estado bajo condiciones de distorsión armónica en redes eléctricas.” *Tesis de Maestría, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, UMich*, 2017.
- [Thakallapelli *et al.*, 2019] Thakallapelli A., Ghosh S., Kamalasadan S. “Development and Applicability of Online Passivity Enforced Wide-Band Multi-Port Equivalents For Hybrid Transient Simulation.” *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 34, No. 3, páginas 2302–2311, 2019.
- [Ubolli y Gustavsen, 2011] Ubolli A., Gustavsen B. “Comparison of Methods for Rational Approximation of Simulated Time-Domain Responses: ARMA, ZD-VF, and TD-VF.” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 26, No. 1, páginas 279–288, 2011.
- [Ubolli y Gustavsen, 2012] Ubolli A., Gustavsen B. “Multiport Frequency-Dependent Network Equivalencing Based on Simulated Time-Domain Responses.” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 27, No. 2, páginas 648–657, 2012.
- [Wang *et al.*, 2024] Wang C., Zheng W., Wang Z., Dan Y., Ju P. “Partition-based Network Equivalent Method for Power System Subsynchronous Oscillation Analysis.” *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, Vol. 12, No. 1, páginas 313–320, 2024.
- [Watson y Arrillaga, 2007] Watson N., Arrillaga J. *Power Systems Electromagnetic Transients Simulaion*. IET Power and Energy Series 39, 2007.
- [Watson y Arrillaga, 1988] Watson N.R., Arrillaga J. “Frequency-dependent AC system equivalents for harmonic studies and transient convertor simulation.” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 3, No. 3, páginas 1196–1203, 1988.

- [Zhang *et al.*, 2017] Zhang X., Flueck A.J., Abhyankar S. “Implicitly Coupled Electromechanical and Electromagnetic Transient Analysis Using a Frequency-Dependent Network Equivalent.” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 32, No. 3, páginas 1262–1269, 2017.
- [Zhao *et al.*, 2019] Zhao J., Gómez-Expósito A., Netto M., Mili L., Abur A., Terzija V., Kamwa I., Pal B., Singh A.K., Qi J., Huang Z., Meliopoulos A.P.S. “Power System Dynamic State Estimation: Motivations, Definitions, Methodologies, and Future Work.” *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 34, No. 4, páginas 3188–3198, 2019.
- [Zhao *et al.*, 2021] Zhao J., Netto M., Huang Z., Yu S.S., Gómez-Expósito A., Wang S., Kamwa I., Akhlaghi S., Mili L., Terzija V., Meliopoulos A.P.S., Pal B., Singh A.K., Abur A., Bi T., Rouhani A. “Roles of Dynamic State Estimation in Power System Modeling, Monitoring and Operation.” *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 36, No. 3, páginas 2462–2472, 2021.
- [Zimmerman y Murillo-Sánchez, 2024] Zimmerman R.D., Murillo-Sánchez C.E. “MATPOWER.” , No. Ultimo acceso: Septiembre 2024, <https://matpower.org>, 2024.

Juan Manuel Verduzco Durán

ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN DINÁMICA DE SISTEMAS DE POTENCIA CON FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA MEDIA...



Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:471052650

Fecha de entrega

1 jul 2025, 8:22 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

1 jul 2025, 8:27 a.m. GMT-6

Nombre de archivo

ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN DINÁMICA DE SISTEMAS DE POTENCIA CON FUENTES RENOVABLES D....pdf

Tamaño de archivo

9.4 MB

145 Páginas

40.766 Palabras

203.500 Caracteres

22% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Fuentes principales

- 21%  Fuentes de Internet
- 11%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA OPCIÓN EN SISTEMAS ELÉCTRICOS	
Título del trabajo	ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN DINÁMICA DE SISTEMAS DE POTENCIA CON FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA MEDIANTE MODELOS DE ORDEN REDUCIDO Y ESTIMACIÓN DE ESTADO ARMÓNICO	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	JUAN MANUEL VERDUZCO DURÁN	juan.verduzco@umich.mx
Director	J. AURELIO MEDINA RÍOS	aurelio.medina@umich.mx
Codirector		
Coordinador del programa	JUAN ANZUREZ MARÍN	juan.anzurez@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	SI	Se utilizó como herramienta de gramática.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	SI	Se utilizó como herramienta para traducir documentos.
Traducción a otra lengua	SI	Se utilizó como herramienta de gramática y traducción al inglés.
Revisión y corrección de estilo	NO	
Análisis de datos	NO	
Búsqueda y organización de información	NO	
Formateo de las referencias bibliográficas	NO	
Generación de contenido multimedia	NO	
Otro	NO	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	JUAN MANUEL VERDUZCO DURÁN 
Lugar y fecha	MORELIA, MICHOACÁN, 30 DE JUNIO DE 2025