



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

IDENTIFICACIÓN MODAL MEDIANTE VENTANAS
DESLIZANTES DE CORTO PLAZO: MÉTODOS DE PRONY,
ERA Y MATRIX PENCIL

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

P R E S E N T A :

FÉLIX EDUARDO REYES MALDONADO

ASESOR

DR. ALEJANDRO ZAMORA MÉNDEZ
MORELIA, MICHOACÁN, OCTUBRE 2021



A mi madre Irma Maldonado

Agradecimientos

En primer lugar deseo expresar mi agradecimiento al director de esta tesis, Dr. Alejandro Zamora Méndez, sin usted y sus virtudes, su paciencia y constancia este trabajo no lo hubiese logrado. Sus consejos fueron siempre útiles cuando no salían de mi pensamiento las ideas para escribir lo que hoy he logrado. Usted formó parte importante de esta historia con sus aportes profesionales que lo caracterizan. Muchas gracias por sus múltiples palabras de aliento cuando más las necesité; por estar allí cuando mis horas de trabajo se hacían confusas. Gracias por sus orientaciones.

Asimismo, agradezco a mis maestros, sus palabras fueron sabias, sus conocimientos rigurosos y precisos, a ustedes profesores, les debo mis conocimientos. Donde quiera que vaya, los llevaré conmigo en mí transitar profesional. Gracias por su paciencia, por compartir sus conocimientos de manera profesional e invaluable, por su dedicación perseverancia y tolerancia.

Gracias a mi familia, ustedes han sido siempre el motor que impulsa mis sueños y esperanzas, quienes estuvieron siempre a mi lado en los días y noches más difíciles durante mis horas de estudio. Siempre han sido mis mejores guías de vida.

Gracias a mis amigos y compañeros de viaje, hoy culmina esta maravillosa aventura y no puedo dejar de recordar cuantas tardes y horas de trabajo nos juntamos a lo largo de nuestra formación. Hoy toca cerrar un capítulo maravilloso en esta historia de vida y no puedo dejar de agradecerles por su apoyo y constancia, al estar en las horas más difíciles, por compartir horas de estudio. Gracias por estar siempre allí.

Resumen

En este proyecto de tesis, se evalúan tres algoritmos para la identificación de modos electromecánicos de baja frecuencia en sistemas de potencia; los métodos estudiados son: el método de Prony, ERA (del inglés Eigensystem Realization Algorithm) y Matrix pencil. Estos algoritmos son métodos lineales, por lo cual, para su correcto funcionamiento sólo analizan datos de tipo ringdown, los cuales son la respuesta oscilatoria que presenta un sistema después de una perturbación.

Para esto, primero se implementan los tres métodos de manera básica (una ventana que contiene toda la señal a analizar) en código Matlab y se comprueba su correcto funcionamiento analizando una señal teórica, de la cual se conocen todos los parámetros a identificar (frecuencia y relación de amortiguamiento).

Una vez que se obtienen los resultados correctos del análisis de la señal teórica, se comienza a trabajar en Simulink para analizar la misma señal teórica, pero ahora convirtiendo los métodos básicos en métodos de ventanas deslizantes. Para esto, se tienen que adaptar los 3 métodos que fueron programados en Matlab que son de una sola ventana para convertirse en un método de ventana deslizante corta (de un ciclo de la frecuencia más baja) en Simulink. Posteriormente, se procede a analizar en el sistema de potencia de dos áreas de Kundur, el cual consta de dos áreas de potencia, cuatro generadores y 11 nodos.

Una vez que se ha validado el modelo, se procede a analizar un sistema de potencia más grande, de 10 generadores (New England) para la identificación de sus modos de oscilación.

PALABRAS CLAVE: Señal, Frecuencia, Amortiguamiento, Métodos, Sistema.

Abstract

In this thesis project, the implementation of three algorithms to identify of the low-frequency electromechanical modes in power systems is proposed. The proposed methods are the Prony analysis, Eigensystem Realization Algorithm, and Matrix Pencil. These algorithms are linear methods, thus, for their correct operation they only analyze ringdown data, which are the oscillatory response that a system presents after a disturbance.

For this, firstly, the three methods are programmed in a basic way that is, a window that contains the whole ringdown signal to be analyzed is taking into account, and this is programmed in Matlab code. Then, the correct operation for the proposed methods is checked by analyzing a theoretical signal, of which all the parameters to be identified are known (frequency and damping ratio).

Once the correct results of the theoretical signal analysis are obtained, work begins in Simulink to analyze the same theoretical signal, but now converting the basic methods into sliding window methods. For this, the three methods that were programmed in Matlab code in a single window have to be adapted to become a short-time sliding window method (a cycle of the lowest frequency). This is in the Simulink platform.

Subsequently, we proceed to analyze the power system of the two-areas Kundur system, which consists of two areas, four generators, and 11-buses.

Once the model has been validated, a larger power system with 10 generators (New England) is analyzed for the identification of its oscillation modes.

Contenido

Dedicatoria	3
Agradecimientos	5
Resumen	7
Abstract	9
Contenido	11
Lista de Figuras	13
Lista de Tablas	15
1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Antecedentes	2
1.3. Justificación	3
1.4. Objetivos	4
1.4.1. Objetivos generales	4
1.4.2. Objetivos particulares	4
1.5. Descripción de capítulos	5
2. Fundamentos matemáticos	7
2.1. Algoritmos propuestos	7
2.2. Análisis de Prony	8
2.3. Método de ERA	10
2.4. Método de Matrix Pencil	12
2.5. Implementación de los métodos de Prony, ERA y Matrix Pencil en Matlab para una señal teórica	14
2.5.1. Usando el análisis de Prony	15
2.5.2. Usando el método ERA	17
2.5.3. Usando el método de Matrix Pencil	20
2.6. Resumen	22

3. Sistemas de prueba y resultados	23
3.1. Sistema con señal teórica	24
3.1.1. Ventana deslizante de corto plazo	25
3.1.2. Identificación modal mediante Prony, ERA y MP	26
3.2. Sistema de potencia Kundur de dos áreas	32
3.2.1. Resultados del sistema de dos áreas de Kundur	33
3.2.2. Sistema de dos áreas analizado con el método de Prony	34
3.2.3. Sistema de dos áreas analizado con el método ERA	35
3.2.4. Sistema de dos áreas analizado con el método Matrix Pencil	36
3.2.5. Comparación de los 3 métodos en el sistema de dos áreas de Kundur	37
3.3. Sistema de potencia de 39 nodos de New England	38
3.3.1. Resultados del New England Power System	40
3.3.2. New England power system con el método de Prony	41
3.3.3. New England power system con el método de ERA	43
3.3.4. New England power system con el método de Matrix Pencil	45
3.3.5. Comparación de los tres métodos para el sistema de New England .	46
3.4. Resumen	49
4. Conclusiones	51
4.1. Conclusiones Generales	51
4.2. Trabajos Futuros	52
Referencias	53

Lista de Figuras

2.1. Señal teorica	16
3.1. Implementación en Simulink de la señal teórica y los métodos de Prony, ERA y Matrix Pencil.	24
3.2. Representación gráfica de la ventana deslizante.	25
3.3. Señal teórica con su análisis de Fourier.	27
3.4. Frecuencias y relación de amortiguamientos instantáneos obtenidos por el método de Prony.	28
3.5. Frecuencias y relación de amortiguamientos instantáneos obtenidos por el método de ERA.	29
3.6. Frecuencias y amortiguamientos instantáneos obtenidos por el método de Matrix Pencil.	30
3.7. Frecuencias y amortiguamientos instantáneos para le modo de 1 Hz.	31
3.8. Amortiguamientos instantáneos obtenidos por los 3 métodos para el segundo modo	31
3.9. Sistema de dos áreas de Kundur y los métodos de Prony, ERA y Matrix Pencil.	33
3.10. Potencia eléctrica en el generador 3 y su espectro de Fourier.	34
3.11. Frecuencia y relación de amortiguamiento instantáneos obtenidos por el método de Prony.	35
3.12. Frecuencia y relación de amortiguamiento instantáneos obtenidos por el método de ERA.	36
3.13. Frecuencia y relación de amortiguamiento instantáneos obtenidos por el método de Matrix Pencil.	37
3.14. Frecuencias y relaciones de amortiguamiento obtenidos por los 3 métodos.	38
3.15. Sistema de potencia de New England.	39
3.16. Desviación de velocidad medida en el generador 1 y su espectro de Fourier.	41
3.17. Frecuencia y relación de amortiguamiento instantáneos obtenidos por el método de Prony para el modo interárea.	42

3.18. Frecuencia y relación de amortiguamiento instantáneos obtenidos por el método de Prony para el modo local.	43
3.19. Frecuencia y relación de amortiguamiento instantáneos obtenidos por el método de ERA para el modo interárea.	44
3.20. Frecuencia y relación de amortiguamiento instantáneos obtenidos por el método de ERA para el modo local.	45
3.21. Frecuencia y relación de amortiguamiento instantáneos obtenidos por el método de Matrix Pencil para el modo interárea.	46
3.22. Frecuencia y relación de amortiguamiento instantáneos obtenidos por el método de Matrix Pencil para el modo local.	47
3.23. Frecuencias y relaciones de amortiguamiento instantáneos obtenidos por los métodos de Prony, ERA y Matrix Pencil para el modo interárea.	48
3.24. Frecuencias y relaciones de amortiguamiento instantáneos obtenidos por los métodos de Prony, ERA y Matrix Pencil para el modo local.	49

Lista de Tablas

- 2.1. Muestras de la señal teórica. 15
- 3.1. Análisis de Prony, ERA, y MP para los modos de oscilación del sistema teórico. 30
- 3.2. Comparativa de los resultados de los 3 métodos para el sistema de 2 áreas. 38
- 3.3. Análisis de Prony, ERA y Matrix Pencil para los modos de oscilación del sistema de potencia de New England. 48

Capítulo 1

Introducción

1.1. Planteamiento del problema

Con el rápido desarrollo de las tecnologías avanzadas de la información y la comunicación (TIC's) en los sistemas de potencia modernos, es necesario desarrollar e implementar algoritmos matemáticos más precisos, eficientes, confiables y robustos para el adecuado monitoreo del desempeño de los sistemas de potencia. Es por esto que esta tesis evalúa los tres métodos más importantes para la identificación modal en sistemas de potencia de tal manera que se puedan utilizar para aplicaciones en tiempo real. Estos tres métodos de identificación basados en mediciones son el análisis de Prony, el algoritmo de la realización del eigensistema (ERA, del inglés Eigensystem realization algorithm) y el método de Matrix Pencil (MP).

Para ello, los tres métodos se abordan en un entorno simulado en la plataforma Matlab & Simulink. Además, atribuido al importante equilibrio que debe existir entre los requisitos de la cantidad de datos y el tiempo para determinar las características dinámicas que deben lograrse en tiempo real, esta tesis propone una reducción en la complejidad computacional de tal manera que los métodos evaluados puedan estimar en forma instantánea la relación de amortiguamiento y la frecuencia en una ventana deslizante de corto

plazo. Para esto, los algoritmos se prueban en dos sistemas de potencia con la finalidad de demostrar la efectividad de los métodos para la identificación modal basados en mediciones, los sistemas de prueba son: el sistema Kundur de dos áreas y una representación de orden reducido de la red eléctrica de Nueva Inglaterra (New England).

1.2. Antecedentes

Recientemente, las redes eléctricas inteligentes y la tecnología en la medición de sincrofasores desempeñan un papel fundamental para el análisis y control del sistema eléctrico, donde la unidad de medición fasorial (PMU, del inglés Phasor Measurement Unit) y el sistema de medición de área amplia (WAMS, del inglés Wide-Area Measurement System) se están convirtiendo en las infraestructuras de medición críticas de los sistemas de transmisión y generación [1].

Bajo tales circunstancias, se ha desarrollado una amplia variedad de aplicaciones WAMS prometedoras para el monitoreo y control en línea (online) del sistema, por ejemplo, el modelado de la dinámica de área amplia, estimación de estado de alta resolución, detección de eventos en área amplia, la ubicación de fallas de área amplia, la evaluación de la estabilidad dinámica (DSA, del inglés dynamic stability assessment), el control de la estabilidad en línea, etc. [2]. Además, con las snapshots a gran escala de la dinámica del sistema medidas en forma sincronizada en el WAMS, la identificación modal en línea puede realizarse [3], [4].

Por otro lado, la extracción de la información modal en los sistemas eléctricos se ha centrado principalmente en dos enfoques: métodos basados en modelos y métodos basados en mediciones. El primero se centra en un modelo linealizado del sistema eléctrico en torno a un punto de operación [5], y el segundo ajusta las mediciones a modelos lineales o no lineales [3, 6]. Estas mediciones se evalúan mediante métodos de análisis ringdown lineal (los datos de tipo ringdown son una respuesta oscilatoria producida después de una perturbación, que cuenta con un amortiguamiento positivo o negativo), que utilizan las

estrategias de procesamiento digital de señales para identificar la información modal.

Este proyecto de tesis se centra en la extracción de información modal relacionada con el análisis ringdown a través de los tres métodos principales para la identificación modal en los sistemas de potencia: el análisis de Prony, el método de ERA y el método Matrix Pencil. Estos métodos se han utilizado de forma muy eficaz para extraer información modal de simulaciones de estabilidad transitoria y su aplicación a la estimación de modos del sistema y al diseño de controladores de amortiguamiento ha sido bien documentada en [7].

Debido a esto, uno de los objetivos de este proyecto de tesis es proporcionar una forma posible de monitorear e identificar las oscilaciones electromecánicas en tiempo real, siendo así, el objetivo principal, la implementación y estudio de los métodos mencionados. Para esto, existen algunos trabajos previos como los mencionados en las referencias [8, 9, 10, 11, 12, 13], en las cuales se utilizan diferentes estrategias para las implementaciones en tiempo real, la mayoría de ellas basadas en el análisis de Prony. Por lo tanto, los métodos evaluados en esta tesis se utilizan para capturar la información modal derivada de una respuesta medida en el sistema de potencia, la cual proporciona de manera instantánea la relación de amortiguamiento y las frecuencias de oscilación en un tiempo corto, en comparación con los enfoques tradicionales basados en las técnicas de Prony, ERA y Matrix Pencil. La idea clave es utilizar una ventana deslizante de corta duración, de tal manera que los métodos evaluados se puedan ejecutar para posibles aplicaciones en tiempo real.

1.3. Justificación

La identificación de características modales como la frecuencia y relación de amortiguamiento en señales de oscilación de potencia ha sido y sigue siendo necesaria para monitorear los sistemas de potencia después de que una gran perturbación ocurre, ya que un modo inestable puede conducir a una ruptura total del sistema (apagón masivo o islas eléctricas).

Asimismo, se presta una especial atención al monitoreo de modos oscilatorios

pobremente amortiguados, ya que estos pueden dañar de forma irreversible los ejes de los rotores en los generadores, reduciendo su vida útil y por ende, proporcionando costes de mantenimiento muy elevados [14]. De aquí la importancia del presente proyecto de tesis, ya que la propuesta de algoritmos para la identificación de modos electromecánicos y además, diseñados de tal manera que puedan aplicarse en tiempo real, son imperativos como parte de las aplicaciones en los WAMS y de esta forma garantizar la estabilidad en los sistemas eléctricos de potencia (SEP).

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivos generales

El objetivo principal de este trabajo de tesis consiste en evaluar los tres principales métodos para la identificación modal en SEPs: Prony, ERA y Matrix Pencil, de tal forma que puedan aplicarse en ventanas deslizantes de corto plazo para posibles aplicaciones en tiempo real. Las ventanas se consideran de corto plazo porque su tamaño depende de la frecuencia más baja esperada por el sistema, las cuales están en el rango de 0.1 a 0.7 Hz. Para esto, los métodos se prueban en dos sistemas de potencia: el sistema Kundur de dos áreas y el sistema de New England de 39 nodos, los cuales se implementan en la plataforma Matlab & Simulink.

1.4.2. Objetivos particulares

- El primer objetivo de este trabajo es programar los tres métodos como métodos de una sola ventana, es decir, como tradicionalmente se utilizan (usando toda la longitud de la señal ringdown a analizar), para esto los métodos se programan en código Matlab mediante archivos *.m y se prueban en una señal teórica conocida para comprobar su correcto funcionamiento.
- El siguiente objetivo es exportar los métodos programados en código de Matlab al

ambiente Simulink y convertirlos en métodos de ventanas deslizantes de corto plazo mediante el bloque *Matlab Function* de Simulink, esto con la finalidad de poder aplicarlos a los sistemas de prueba.

- El primer sistema de prueba al que se le aplican los métodos, es la misma señal teórica que se usa en el código de matlab (primer objetivo particular de esta tesis), con frecuencia y amortiguamiento conocidos. La señal se implementa en Simulink de tal forma que cambie con el tiempo y de esta manera analizarla con los tres métodos evaluados mediante ventanas deslizantes de corto plazo (cercano a un ambiente de tiempo real).
- Una vez que se tienen los métodos funcionando en Simulink, se analiza e identifican los modos del sistema Kundur de dos áreas ante un cambio de carga. Para esto, se tienen que hacer ciertas modificaciones al sistema Kundur demo de Simulink, para que sea estable sin controles y de esta manera poder excitar el modo interárea (en este trabajo de tesis solamente se enfocará en los modos interárea y locales de un SEP). Cabe destacar que los modos interárea son aquellos cuyas oscilaciones van desde los 0.1 Hz hasta los 0.7 Hz, mientras que los modos locales van desde 0.7 Hz hasta 2 Hz [15].
- Posteriormente, se analiza e identifican los modos (local e interárea) del sistema de potencia de 39 nodos de New England.

1.5. Descripción de capítulos

En este Capítulo se presentan los antecedentes y la motivación para realizar el presente tema de investigación. Además, a continuación se describe de manera breve un resumen de cada capítulo.

En el Capítulo 2, se describe la formulación de los tres métodos evaluados, además

se muestra un ejemplo teórico del cual se conocen los parámetros a identificar, para comprobar el correcto funcionamiento de los métodos.

En el Capítulo 3, se presentan los tres sistemas de prueba a analizar: el sistema de prueba teórico, el sistema de potencia de Kundur de dos áreas y el sistema de potencia de 39 nodos de New England. Además, se presentan los resultados de cada sistema, los cuales son implementados en Simulink.

En el Capítulo 4, se presentan las conclusiones y los trabajos futuros que se pueden realizar gracias a este proyecto de tesis.

Capítulo 2

Fundamentos matemáticos

2.1. Algoritmos propuestos

En este Capítulo, se describen los algoritmos Prony, ERA y Matrix Pencil para analizar una sola señal a la vez y con el fin de abordar el monitoreo de área amplia a través del análisis ringdown, y de esta manera aprovechar las respuestas medidas en forma sincronizada en el tiempo de los sistemas de potencia.

Es importante mencionar que para este proyecto de tesis, solamente se enfocará en los modos interárea, que son aquellos cuyas oscilaciones van desde los 0.1 Hz hasta los 0.7 Hz; y los modos locales que van desde 0.7 Hz hasta 2 Hz [15].

Para lo anterior, este trabajo propone tres métodos para la identificación de modos electromecánicos de baja frecuencia en sistemas de potencia. Estos métodos son: el análisis de Prony, la técnica de ERA y el método de Matrix Pencil, los cuales se describen a continuación.

2.2. Análisis de Prony

El análisis de Prony está diseñado para estimar directamente los términos exponenciales de las ecuaciones diferenciales que describen un sistema (en este caso serán las ecuaciones de un sistema eléctrico de potencia), ajustando una función a un registro observado (muestreo de una señal $y(t)$), es decir, el análisis de Prony se describe con respecto a una suma de señales sinusoidales exponencialmente amortiguadas, lo que también se conoce como datos ringdown. Este modelo de señal viene dado por [3]

$$\hat{y}(t) = \sum_{i=1}^n A_i e^{\sigma_i t} \cos(2\pi f_i t + \theta_i), \quad (2.1)$$

donde A_i representa la amplitud, σ_i es el factor de amortiguamiento, f_i corresponde a la frecuencia y θ_i denota la fase de cada componente en $\hat{y}(t)$. El número total de componentes sinusoidales exponencialmente amortiguadas se denota por la letra n .

Por tanto, $n \leq N$ es el subconjunto de modos a determinar. Ahora, en un tiempo de muestra Δt y considerando que $y(t)$ consta de N muestras, el modelo de señal en (2.1) se puede discretizar como

$$\hat{y}(k) = \sum_{i=1}^n B_i z_i^k, \quad (2.2)$$

dónde B_i son los residuos (fasor de las señales mono-componentes) y z_i está definido por

$$z_i = e^{\lambda_i \Delta t} \quad (2.3)$$

A su vez, λ_i corresponde a los valores propios del sistema y z_i a las raíces del modelo polinomial de Prony, el cual está dado por

$$z^n - (a_1 z^{n-1} + a_2 z^{n-2} + \dots + a_{n-1} z^0) = 0, \quad (2.4)$$

donde los coeficientes a_i son calculados a partir del conjunto de vectores de medición, los cuales representan las ventanas de análisis de las señales oscilantes provenientes del sistema de potencia. Por lo tanto, los coeficientes a_i de un modelo de predicción lineal (LPM, del

inglés linear prediction model) de orden N se calculan como

$$\begin{bmatrix} y(n) \\ y(n+1) \\ \vdots \\ y(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y(n-1) & y(n-2) & \cdots & y(0) \\ y(n) & y(n-1) & \cdots & y(1) \\ & \vdots & \vdots & \\ y(N-2) & y(N-3) & \cdots & y(N-n-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

donde la matriz Toeplitz en (2.5) se construye en cada ventana de análisis seleccionando elementos del registro de la señal en (2.1). En este trabajo, solamente se estiman las frecuencias modales y las relaciones de amortiguamiento utilizando una ventana deslizante de corto plazo, con la finalidad de reducir la complejidad computacional y así dar la posibilidad de que se pueda implementar en tiempo real.

Por lo tanto, los parámetros modales de frecuencia y coeficiente de amortiguamiento, simplemente se estiman de la siguiente manera

$$\hat{f}_i = \text{Im} \left(\frac{\lambda_i}{2\pi} \right) \quad (2.6)$$

$$\hat{\zeta}_i(t) = \frac{\hat{\sigma}_i}{\hat{\omega}_i} \quad (2.7)$$

donde $\omega_i = 2\pi\hat{f}_i$, $\hat{\sigma}_i = \text{Re}(\lambda_i)$, y $\lambda_i = \frac{\ln(z_i)}{\Delta t}$, donde λ_i se obtiene de la ecuación (2.3) y los valores z_i se encuentran a partir de las raíces del polinomio de (2.4). Estos constituyen los principales parámetros modales para la identificación de la dinámica oscilatoria de baja frecuencia.

En resumen, el análisis de Prony es un método polinomial, ya que dentro del método se deben encontrar las raíces de un polinomio característico. La solución del problema a través del análisis de Prony se puede realizar con los siguientes pasos:

1. Introducir los datos de muestreo en una matriz de datos Toeplitz. (Una matriz Toeplitz es una matriz de diagonales constantes que se forma con un primer renglón y una columna, ver ecuación (2.5).)

2. Ajustar los datos a un modelo discreto de predicción lineal, como la solución por mínimos cuadrados a través de una matriz pseudo inversa. Así se encuentran los coeficientes característicos del sistema, como se muestra en (2.5).
3. Encontrar las raíces del polinomio característico asociado al modelo del paso 2.
4. Usar las raíces del paso 3 para determinar la frecuencia y amortiguamiento del sistema de acuerdo a (2.6) y (2.7).

Los pasos anteriores se realizan de manera automática mediante una ventana rectangular deslizante de corto plazo.

2.3. Método de ERA

El Eigensystem Realization Algorithm (ERA) [3, 16] es un algoritmo de identificación que permite la identificación modal y la reducción del modelo de sistemas lineales. El ERA se basa en la descomposición de valores singulares de la matriz Hankel \mathbf{H}_0 asociada con el análisis ringdown lineal del sistema.

Representemos la matriz \mathbf{H}_0 como la matriz cuadrada de Hankel de tamaño $N \times N$, que consta de $N - 1$ elementos, y construida a partir del modelo de señal $y(t)$ en (2.1) que abarca N muestras como

$$\mathbf{H}_0 = \begin{bmatrix} y_0 & y_1 & \cdots & y_r \\ y_1 & y_2 & \cdots & y_{r+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_r & y_{r+1} & \cdots & y_{N-1} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Y su matriz Hankel desplazada \mathbf{H}_1 , la cual está dada por

$$\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} y_1 & y_2 & \cdots & y_{r+1} \\ y_2 & y_3 & \cdots & y_{r+2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{r+1} & y_{r+2} & \cdots & y_N \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

donde r es $\frac{N}{2} - 1$. Esta elección de r supone que el número de puntos de datos es suficiente para que $r > n$, donde n es el número total de componentes sinusoidales exponencialmente amortiguadas del sistema, acorde el modelo de señal en (2.1).

Para el proceso de identificación, la descomposición de valores singulares (SVD, del inglés singular value decomposition), permite separar la matriz Hankel \mathbf{H}_0 en dos componentes, una componente n (que contiene los valores singulares distintos de cero en el caso de mediciones sin ruido) y otra componente s (que contiene los valores singulares iguales a cero en el caso de mediciones sin ruido) de valores singulares, por lo que, esto se puede expresar como

$$\mathbf{H}_0 = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_n & \mathbf{U}_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{\Sigma}_n & 0 \\ 0 & \mathbf{\Sigma}_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_n^T \\ \mathbf{V}_s^T \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Por lo tanto, la matriz Hankel \mathbf{H}_0 de alto rango puede aproximarse mediante una matriz n de rango reducido como

$$\mathbf{H}_0 \approx \mathbf{U}_n \mathbf{\Sigma}_n \mathbf{V}_n^T \quad (2.11)$$

Así, la matriz \mathbf{A} del sistema, se puede obtener mediante (2.12) (para obtener más detalles, consulte [16, 17, 18]).

$$\mathbf{A} = \mathbf{\Sigma}_n^{-\frac{1}{2}} \mathbf{U}_n \mathbf{H}_1 \mathbf{V}_n^T \mathbf{\Sigma}_n^{-\frac{1}{2}} \quad (2.12)$$

donde los valores propios de \mathbf{A} son los mismos que los polos z_i del método de Prony, es decir, para este caso, las raíces también corresponden a $z_i = eig(\mathbf{A})$. Por lo tanto, la

estimación de los parámetros modales, frecuencias (\hat{f}_i) y relaciones de amortiguamiento ($\hat{\zeta}_i$) de la señal en (2.1), están también dadas por (2.6) - (2.7), respectivamente para el método de ERA.

En general, la solución al problema mediante el algoritmo de ERA se puede resumir con los siguientes pasos:

1. Formar mediante los datos de muestreo las matrices Hankel \mathbf{H}_0 y \mathbf{H}_1 .
2. Realizar la descomposición en valores singulares, SVD, de la matriz \mathbf{H}_0 y determinar el número de modos relevantes n en el sistema.
3. Calcular la matriz discreta \mathbf{A} del sistema mediante la ecuación (2.12).
4. Calcular los eigenvalores de la matriz \mathbf{A} .
5. Usar los eigenvalores del paso 4 para determinar la frecuencia y relación de amortiguamiento del sistema de acuerdo a (2.6) y (2.7).

2.4. Método de Matrix Pencil

El método de Matrix Pencil [19, 20, 21], produce una matriz cuyas raíces proporcionan los z_i , de la cual se pueden extraer los valores propios. El número de modos significativos n en el sistema se determina a partir de la descomposición de valores singulares de la matriz Hankel \mathbf{H} , la cual viene dada por

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} y(0) & y(1) & \cdots & y(L) \\ y(1) & y(2) & \cdots & y(L+1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \\ y(N-L-1) & y(N-L) & \cdots & y(N-1) \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

donde la variable L se conoce como el parámetro Pencil. A partir de esta matriz Hankel, se forman dos matrices de Hankel desplazadas \mathbf{H}_1 y \mathbf{H}_2 eliminando la última y la primera columna de \mathbf{H} en (2.13), respectivamente. Es decir, $\mathbf{H}_1 = \mathbf{H}(:, 1 : L - 1)$ and $\mathbf{H}_2 = \mathbf{H}(:, 2 : L)$.

Ahora, sustituyendo (2.2) en \mathbf{H}_1 y \mathbf{H}_2 (las cuales se forman a partir de (2.13)), las dos matrices de Hankel desplazadas \mathbf{H}_1 y \mathbf{H}_2 se pueden descomponer de la siguiente manera:

$$\mathbf{H}_1 = \mathbf{Z}_1 \mathbf{R} \mathbf{Z}_2, \quad (2.14)$$

$$\mathbf{H}_2 = \mathbf{Z}_1 \mathbf{R} \mathbf{Z}_0 \mathbf{Z}_2, \quad (2.15)$$

donde

$$\mathbf{Z}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \\ z_1^{N-L-1} & z_2^{N-L-1} & \cdots & z_n^{N-L-1} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$\mathbf{Z}_2 = \begin{bmatrix} 1 & z_1 & \cdots & z_1^{L-1} \\ 1 & z_2 & \cdots & z_2^{L-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \\ 1 & z_n & \cdots & z_n^{L-1} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$\mathbf{Z}_0 = \text{diag}[z_1, z_2, \dots, z_n] \quad (2.18)$$

$$\mathbf{R} = \text{diag}[R_1, R_2, \dots, R_n] \quad (2.19)$$

donde *diag* se refiere a una matriz diagonal.

Ahora, considerando la siguiente matriz Pencil

$$\mathbf{H}_2 - \lambda \mathbf{H}_1, \quad (2.20)$$

y sustituyendo la descomposición en (2.14) y (2.15) en (2.20), se obtiene

$$\mathbf{H}_2 - \lambda \mathbf{H}_1 = \mathbf{Z}_1 \mathbf{R} (\mathbf{Z}_0 - \lambda \mathbf{I}) \mathbf{Z}_2 \quad (2.21)$$

Por lo tanto, $\lambda = z_i$, $i = 1, 2, \dots, n$, $\mathbf{H}_2 - \lambda \mathbf{H}_1$ tendrá un rango menor que n . Por lo tanto, los parámetros z_i se pueden encontrar como los valores propios generalizados del par de matrices $\{\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2\}$ de

$$\{\mathbf{H}_1^\dagger \mathbf{H}_2 - \lambda \mathbf{I}\} \quad (2.22)$$

donde los valores propios de $\mathbf{H}_1^\dagger \mathbf{H}_2$ son los mismos que los polos z_i del método de Prony, es decir, las raíces son $z_i = \text{eig}(\mathbf{H}_1^\dagger \mathbf{H}_2)$, donde el símbolo \dagger indica que es la matriz pseudo inversa. Por lo tanto, la estimación de los parámetros modales, como las frecuencias (\hat{f}_i) y las relaciones de amortiguamiento ($\hat{\zeta}_i$) de la señal, están dadas por (2.6) - (2.7), respectivamente.

Cabe mencionar que una manera fácil y sencilla de aplicar el algoritmo de Matrix Pencil basado en el método de ERA, se puede resumir en los siguientes pasos:

1. Formar la matriz Hankel \mathbf{H} con las muestras en (2.1). (Esta matriz es igual a la matriz \mathbf{H}_0 del método ERA).
2. Realizar la descomposición SVD de la matriz \mathbf{H} y obtener la matriz \mathbf{V} de eigenvectores derechos.
3. Definir las matrices \mathbf{V}_1 y \mathbf{V}_2 mediante la matriz \mathbf{V} y calcular las matrices \mathbf{Y}_1 y \mathbf{Y}_2 , donde $\mathbf{V}_1 = [v_1 \ v_2 \ \dots \ v_{n-1}]$, $\mathbf{V}_2 = [v_2 \ v_3 \ \dots \ v_n]$, $\mathbf{Y}_1 = \mathbf{V}_1^T \mathbf{V}_1$ y $\mathbf{Y}_2 = \mathbf{V}_2^T \mathbf{V}_1$.
4. Calcular los eigenvalores de la matriz $\text{eig}(\mathbf{Y}_1^T \mathbf{Y}_2)$, los cuales corresponden a las raíces z_i del método de Prony.
5. Usar los eigenvalores del Paso 4 para determinar la frecuencia y relación de amortiguamiento del sistema de acuerdo a (2.6) y (2.7).

2.5. Implementación de los métodos de Prony, ERA y Matrix Pencil en Matlab para una señal teórica

Para implementar y analizar el correcto funcionamiento de los tres métodos, se analiza una señal teórica de la cuál se conocen los parámetros a identificar, para más detalle ver referencia [3]. La señal es la siguiente:

$$y(t) = e^{-0.1t} \cos(2\pi t) + \frac{1}{4} e^{-0.25t} \cos\left(14\pi t + \frac{\pi}{8}\right) \quad (2.23)$$

Se observa que la señal contiene dos modos de oscilación amortiguados, uno con frecuencia de $f_1 = 1$ Hz y el otro con frecuencia de $f_2 = 7$ Hz, y cuyos amortiguamientos están en $\sigma_1 = -0.1$ y $\sigma_2 = -0.25$, respectivamente. Estos factores de amortiguamiento corresponden a una relación de amortiguamiento de $\zeta_1 = 1.5915\%$ y $\zeta_2 = 0.5684\%$, respectivamente. Para este ejemplo, solamente se tomaron en cuenta 113 muestras de la señal, las cuales están separadas por un incremento de tiempo $\Delta t = 1/56 = 0.0179$ s y que corresponde a una tasa de muestreo 8 veces la de la frecuencia más alta, por lo que la frecuencia de muestreo F_s es de 56 Hz.

La Tabla 2.1 muestra los 113 datos para la señal y_k discretizada de (2.23).

Tabla 2.1: Muestras de la señal teórica.

k	y_k
0	1.2310
1	1.0872
2	0.8766
\vdots	\vdots
111	0.9558
112	0.9588

Por otro lado, la Figura 2.1 muestra la señal en el tiempo de (2.23).

2.5.1. Usando el análisis de Prony

Siguiendo los pasos descritos en la Sección 2.2, el análisis de Prony queda de la siguiente manera:

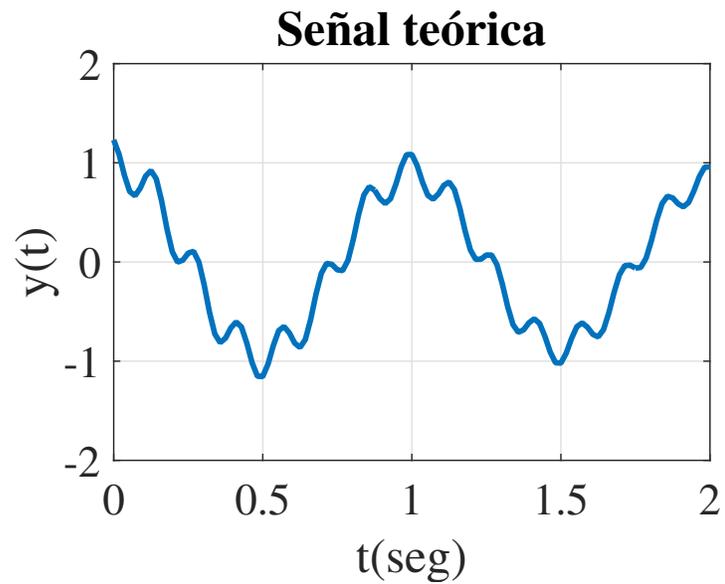


Figura 2.1: Señal teorica

1. Formar la matriz Toeplitz \mathbf{T} mediante los datos muestreados.

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0.7109 & 0.8766 & 1.0872 & 1.2310 \\ 0.6677 & 0.7109 & 0.8766 & 1.0872 \\ 0.7456 & 0.6677 & 0.7109 & 0.8766 \\ 0.8666 & 0.7456 & 0.6677 & 0.7109 \\ 0.9222 & 0.8666 & 0.7456 & 0.6677 \\ 0.8375 & 0.9222 & 0.8666 & 0.7456 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0.6003 & 0.5562 & 0.5874 & 0.6461 \\ 0.7181 & 0.6003 & 0.5562 & 0.5874 \\ 0.8596 & 0.7181 & 0.6003 & 0.5562 \\ 0.9558 & 0.8596 & 0.7181 & 0.6003 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

2. Encontrar los coeficientes característicos del sistema de acuerdo a (2.5).

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} 3.3918 \\ -4.7807 \\ 3.3691 \\ -0.9876 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

3. Encuentra las raíces del polinomio característico.

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} 0.7040 + 0.7040i \\ 0.7040 - 0.7040i \\ 0.9919 + 0.1118i \\ 0.9919 - 0.1118i \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

4. Encontrar los valores de frecuencia y amortiguamiento de acuerdo a (2.6) y (2.7).

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} 1.00 \\ 7.00 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$\boldsymbol{\zeta} = \begin{bmatrix} 1.5913 \\ 0.5684 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Los polos de un sistema siempre se presentan en pares, por consiguiente, se deben despreciar los resultados de frecuencia negativos y sus respectivos amortiguamientos. Se observa que los parámetros identificados corresponden a los valores reales en (2.23).

2.5.2. Usando el método ERA

Siguiendo los pasos descritos en la Sección 2.3, el método de ERA aplicado a la señal en (2.23) se realiza como:

1. Formar las matrices Hankel \mathbf{H}_0 y \mathbf{H}_1 con los datos muestreados en (2.23).

$$\mathbf{H}_0 = \begin{bmatrix} 1.2310 & 1.0872 & 0.8766 & \cdots & 1.0814 & 1.0847 \\ 1.0872 & 0.8766 & 0.7109 & \cdots & 1.0847 & 0.9717 \\ 0.8766 & 0.7109 & 0.6677 & \cdots & 0.9717 & 0.8052 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1.0814 & 1.0847 & 0.9717 & \cdots & 0.7181 & 0.8596 \\ 1.0847 & 0.9717 & 0.8052 & \cdots & 0.8596 & 0.9558 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

$$\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} 1.0872 & 0.8766 & 0.7109 & \cdots & 0.9605 & 1.0814 \\ 0.8766 & 0.7109 & 0.6677 & \cdots & 1.0814 & 1.0847 \\ 0.7109 & 0.6677 & 0.7456 & \cdots & 1.0847 & 0.9717 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0.9605 & 1.0814 & 1.0847 & \cdots & 0.6003 & 0.7181 \\ 1.0814 & 1.0847 & 0.9717 & \cdots & 0.7181 & 0.8596 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

2. Realizar la descomposición SVD de la matriz \mathbf{H}_0 y determinar el número de modos relevantes n del sistema.

$$\Sigma_n = \begin{bmatrix} 25.4705 & & & \\ & 25.3681 & & \\ & & 5.5465 & \\ & & & 5.5184 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

$$\mathbf{U}_n = \begin{bmatrix} -0.1982 & -0.0015 & -0.2073 & -0.0383 \\ -0.1960 & 0.0207 & -0.1162 & -0.1732 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -0.1762 & -0.0415 & -0.0322 & 0.1665 \\ -0.1790 & -0.0215 & -0.1376 & 0.0953 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

$$\mathbf{V}_n^T = \begin{bmatrix} -0.1982 & -0.0015 & -0.2073 & -0.0383 \\ -0.1960 & 0.0207 & -0.1162 & -0.1732 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -0.1762 & -0.0415 & -0.0322 & 0.1665 \\ -0.1790 & -0.0215 & -0.1376 & 0.0953 \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

3. Calcular la matriz \mathbf{A} mediante (2.12).

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0.9902 & -0.1118 & -0.0048 & -0.0004 \\ 0.1118 & 0.9937 & -0.0007 & -0.0001 \\ -0.0048 & 0.0007 & 0.6999 & 0.7040 \\ 0.0004 & -0.0001 & -0.7040 & 0.7080 \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

4. Obtener los eigenvalores de la matriz \mathbf{A} .

$$\mathbf{eig}(\mathbf{A}) = \begin{bmatrix} 0.9919 + 0.1119i \\ 0.9919 - 0.1119i \\ 0.7040 + 0.7040i \\ 0.7040 - 0.7040i \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

se observa que son los mismos que en (2.26) para el método de Prony.

5. Encontrar los valores de frecuencia y amortiguamiento de acuerdo a (2.6) y (2.7).

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} 1.00 \\ 7.00 \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

$$\boldsymbol{\zeta} = \begin{bmatrix} 1.5913 \\ 0.5684 \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

Nuevamente se observa que los valores obtenidos por medio del método de ERA coinciden con los valores reales en (2.23).

2.5.3. Usando el método de Matrix Pencil

Siguiendo los pasos descritos en la Sección 2.4 para llevar a cabo el método de Matrix Pencil, se obtiene lo siguiente:

1. Formar la matriz Hankel \mathbf{H} con las muestras en (2.23).

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1.2310 & 1.0872 & 0.8766 & \cdots & 1.0814 & 1.0847 \\ 1.0872 & 0.8766 & 0.7109 & \cdots & 1.0847 & 0.9717 \\ 0.8766 & 0.7109 & 0.6677 & \cdots & 0.9717 & 0.8052 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1.0814 & 1.0847 & 0.9717 & \cdots & 0.7181 & 0.8596 \\ 1.0847 & 0.9717 & 0.8052 & \cdots & 0.8596 & 0.9558 \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

2. Realizar la descomposición SVD de la matriz \mathbf{H} y obtener la matriz \mathbf{V} de eigenvectores derechos.

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} -0.1924 & 0.0100 & -0.1889 & -0.0577 \\ -0.1911 & -0.0122 & -0.1663 & 0.1029 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -0.1740 & 0.0091 & -0.1456 & 0.0454 \\ -0.1729 & -0.0111 & -0.1280 & 0.0797 \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

3. Definir las matrices \mathbf{V}_1 y \mathbf{V}_2 de \mathbf{V} y, calcular las matrices \mathbf{Y}_1 y \mathbf{Y}_2

$$\mathbf{V}_1 = \begin{bmatrix} -0.1924 & 0.0100 & -0.1889 & -0.0577 \\ -0.1911 & -0.0122 & -0.1663 & 0.1029 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -0.1727 & 0.0292 & -0.0715 & -0.1466 \\ -0.1740 & 0.0091 & -0.1456 & 0.0454 \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

$$\mathbf{V}_2 = \begin{bmatrix} -0.1911 & -0.0122 & -0.1663 & 0.1029 \\ -0.1874 & -0.0342 & -0.0400 & 0.2002 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -0.1740 & 0.0091 & -0.1456 & 0.0454 \\ -0.1729 & -0.0111 & -0.1280 & 0.0797 \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

$$\mathbf{Y}_1 = \begin{bmatrix} 0.9701 & -0.0019 & -0.0221 & 0.0138 \\ -0.0019 & 0.9999 & -0.0014 & 0.0009 \\ -0.0221 & -0.0014 & 0.9836 & 0.0102 \\ 0.0138 & 0.0009 & 0.0102 & 0.9936 \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

$$\mathbf{Y}_2 = \begin{bmatrix} 0.9607 & -0.1099 & -0.0242 & 0.0142 \\ 0.1103 & 0.9934 & -0.0044 & 0.0024 \\ -0.0348 & 0.0063 & 0.6964 & 0.6908 \\ -0.0132 & 0.0019 & -0.6999 & 0.6955 \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

4. Calcular los eigenvalores de la matriz $\mathbf{eig}[\mathbf{Y}_1^T \mathbf{Y}_2]$

$$\mathbf{eig}[\mathbf{Y}_1^T \mathbf{Y}_2] = \begin{bmatrix} 0.9919 + 0.1119i \\ 0.9919 - 0.1119i \\ 0.7040 + 0.7040i \\ 0.7040 - 0.7040i \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

5. Encontrar los valores de frecuencia y amortiguamiento de acuerdo a (2.6) y (2.7).

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} 1.00 \\ 7.00 \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

$$\boldsymbol{\zeta} = \begin{bmatrix} 1.5913 \\ 0.5684 \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

Se observa que con el método de MP, los valores obtenidos tanto de frecuencia como relación de amortiguamiento coinciden con los valores reales en (2.23).

2.6. Resumen

En este Capítulo se presentan los fundamentos matemáticos de los tres métodos evaluados: Prony, ERA y MP. Además, se resumen los tres métodos mediante una serie de pasos, de tal manera que se puedan programar de una forma práctica y sencilla, ya sea en código o en Simulink.

Por último, se muestra la ejecución paso a paso de los métodos, así como la obtención de los parámetros modales con un ejemplo de una señal teórica de prueba. Demostrando así el correcto funcionamiento de los algoritmos, ya que se conocen sus parámetros modales.

Lo anterior también puede ayudar a que los métodos evaluados se puedan implementar fácilmente para aplicaciones en tiempo real.

Capítulo 3

Sistemas de prueba y resultados

Los algoritmos de Prony, ERA y Matrix Pencil detectan e identifican los modos electromecánicos utilizando señales de respuesta medidas en un entorno de tiempo real en sistemas de potencia. Este análisis se realiza a través de una ventana deslizante de corto plazo. Por lo tanto, para verificar la aplicabilidad de los métodos evaluados en este proyecto de tesis, se presentan tres casos de prueba: el primero corresponde a una señal teórica presentada en [3] y llevada a un ambiente en Simulink, el segundo corresponde a la red eléctrica de dos áreas del sistema Kundur y el tercero a la red eléctrica de 39 nodos del sistema IEEE de New England. De aquí, es importante mencionar que tanto el sistema de Kundur como el de New England han sido ampliamente empleados por ser de gran valor para el estudio de oscilaciones interárea en sistemas de potencia reales. Para esto, se realizan simulaciones de estabilidad transitoria mediante la plataforma Matlab & Simulink con el fin de simular diferentes escenarios donde los modos del sistema sean excitados y de esta manera identificar sus parámetros modales usando los métodos evaluados.

Para los métodos evaluados, se implementa una ventana rectangular deslizante con longitudes de 1 s, 3.3 s y 5 s para los sistemas teórico, de Kundur y New England, respectivamente. Además, es importante mencionar que para todos los sistemas se utiliza una frecuencia de muestreo de 60 Hz, esto para obtener las señales a analizar, las cuales,

para los sistemas de potencia de prueba, corresponden a señales de potencia activa y desviaciones de velocidad, respectivamente.

3.1. Sistema con señal teórica

Como se menciona anteriormente, el primer sistema de prueba consiste en la implementación en Simulink de la señal teórica descrita en la ecuación (2.23) y presentada en la referencia [3]. La Figura 3.1 muestra dicha implementación de la señal en Simulink.

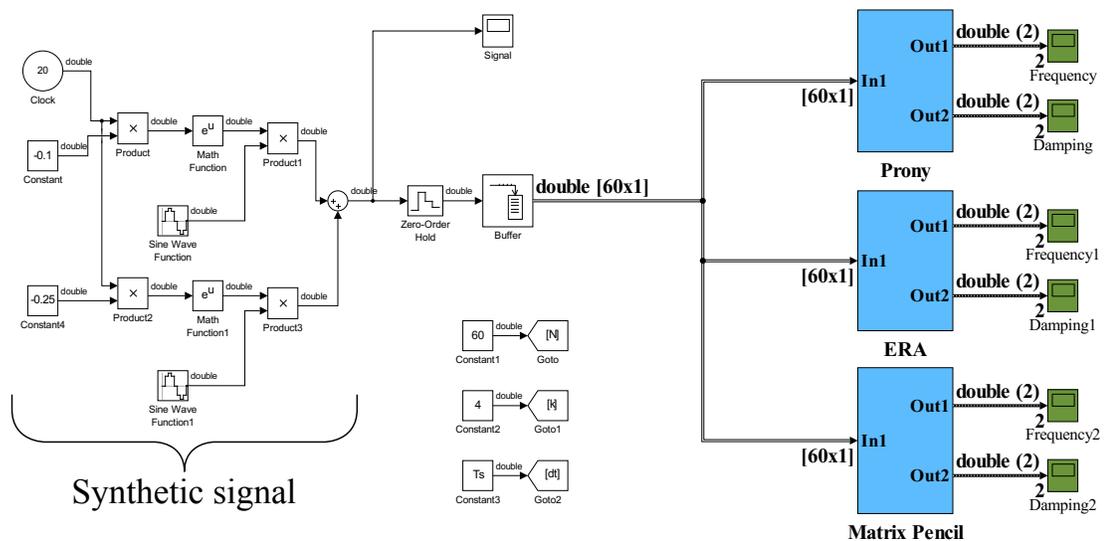


Figura 3.1: Implementación en Simulink de la señal teórica y los métodos de Prony, ERA y Matrix Pencil.

Ya que el objetivo de este proyecto de tesis es aplicar los métodos de Prony, ERA y Matrix Pencil en un ambiente de ventanas deslizantes de corto plazo, es importante definir en qué consiste la ventana deslizante, lo cual se explica a continuación.

3.1.1. Ventana deslizante de corto plazo

El método de ventanas deslizante consiste en analizar la señal en un ambiente similar al de tiempo real. Para esto, se utiliza una ventana rectangular con una cantidad de N muestras fija, donde el número de muestras se obtiene considerando la frecuencia más baja que contiene la señal a analizar, es por esto que las ventanas se consideran de corto plazo, ya que, por ejemplo, si se tuviera la frecuencia más baja de 0.5 Hz, esto correspondería a una ventana cuya longitud es de 120 muestras, equivalente a 2 segundos de retraso. La diferencia en este ambiente, es que las ventanas se van construyendo en “tiempo real” conforme se va obteniendo la señal a analizar en el tiempo. Una vez que la ventana está completa, se hace la primer estimación de los parámetros modales con las técnicas propuestas, posteriormente, la ventana comienza a deslizarse, es decir, se elimina la primer muestra de la ventana original y se toma una muestra nueva, complementando una nueva ventana de N muestras de longitud. Este proceso se representa en la Figura 3.2.

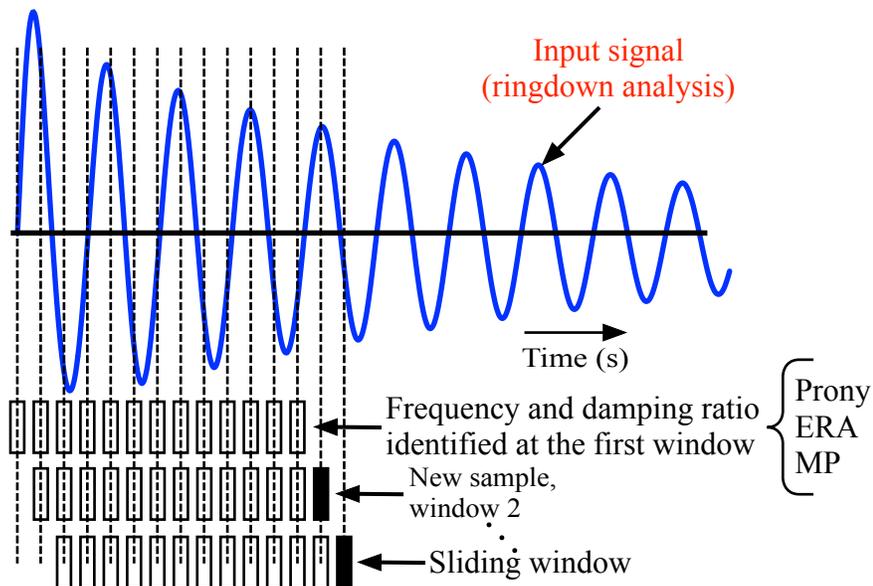


Figura 3.2: Representación gráfica de la ventana deslizante.

Es importante mencionar, que cada vez que se actualiza una ventana, se calculan los parámetros modales con los métodos evaluados, es decir, en cada ventana se estima la frecuencia y relación de amortiguamiento de la señal analizada, tomándose en cuenta que es un análisis ringdown.

De aquí, la importancia de este trabajo de tesis consiste en que al recibir la señal en el tiempo, se hace el cálculo de los parámetros modales a cada instante, conforme se va actualizando la ventana, permitiendo de esta manera, que se pueda realizar un análisis en tiempo real mediante mediciones en los sistemas de potencia.

También, es importante describir en que consiste un análisis ringdown. Así, el análisis de señales tipo “ringdown”, son aquellas oscilaciones que se producen después de algún disturbio y que cuentan con un amortiguamiento (puede ser negativo o positivo), dependiendo del cual pueden desaparecer hasta alcanzar un estado estable después de la perturbación o crecer hasta dejar fuera de servicio a un sistema. En otras palabras, solamente se analiza la parte oscilatoria después del disturbio y hasta que desaparecen las oscilaciones.

3.1.2. Identificación modal mediante Prony, ERA y MP

Continuando con el ejemplo teórico, una vez que se ejecuta el archivo Simulink mostrado en la Figura 3.1, éste simula 20 s de la señal correspondiente a (2.23) e implementada en Simulink como se muestra en la Figura 3.1 y usando una frecuencia de muestreo de 60 Hz, como se menciona al inicio de este Capítulo. De acuerdo a la Sección 2.5, la señal contiene dos modos de oscilación amortiguados, uno con frecuencia de 1 Hz y el otro con frecuencia de 7 Hz.

La Figura 3.3 muestra la señal en el tiempo (arriba) y su correspondiente espectro de Fourier (abajo), donde se corrobora que efectivamente la señal contiene dos modos de oscilación en 1 y 7 Hz.

Este sistema es muy importante ya que se implementan los métodos evaluados

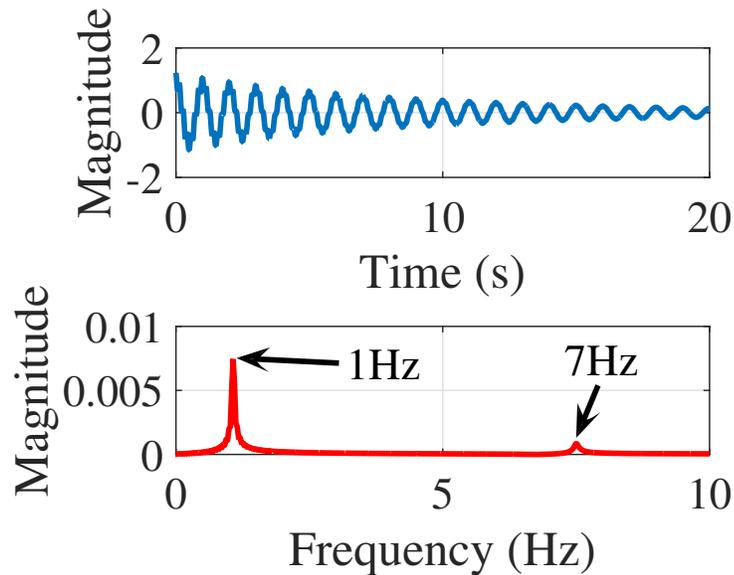


Figura 3.3: Señal teórica con su análisis de Fourier.

pero ahora en la plataforma Simulink, ya como métodos de ventanas deslizantes (ver Figura 3.2), con este sistema se comprueba el correcto funcionamiento de los tres métodos para su aplicación a sistemas de potencia. Además, los modos de la señal cuentan con valores de relación de amortiguamiento de 1.5915 % y 0.5684 % para los modos de 1 y 7 Hz, respectivamente, como se menciona en la Sección 2.5. Esto ayuda a realizar una comparación confiable con los resultados que se obtienen con los algoritmos evaluados.

Sistema teórico de prueba con el método de Prony

En la Figura 3.4 se muestran los resultados de frecuencia (arriba) y de relación de amortiguamiento (abajo). Se observa que el análisis de Prony arroja resultados de frecuencia de 1 y 7 Hz, como se muestra en la gráfica superior de la Figura 3.4, los cuales corresponden a los valores reales del sistema.

Por otro lado, el análisis de Prony también arroja una relación de amortiguamiento instantáneo de 1.5915 % y 0.5684 %, como se muestra en la parte inferior de la Figura 3.4,

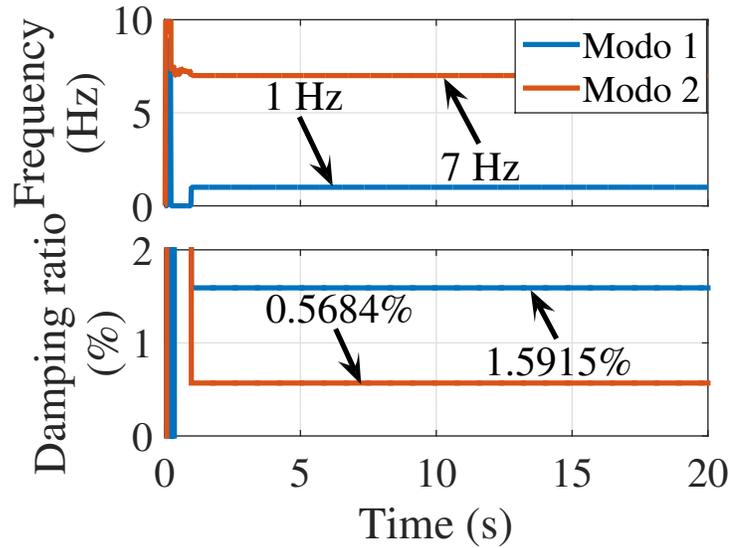


Figura 3.4: Frecuencias y relación de amortiguamientos instantáneos obtenidos por el método de Prony.

para cada modo oscilatorio, respectivamente.

Por lo que los resultados obtenidos por el análisis de Prony, tanto de frecuencia como de amortiguamiento, corresponden a los valores reales presentados en la Sección 2.5.

Sistema teórico de prueba con el método de ERA

Para este caso, se muestra en la Figura 3.5 los resultados de frecuencia (arriba) y de relación de amortiguamiento (abajo), para el método de ERA.

El método de ERA, también arroja resultados de frecuencia de 1 Hz y 7 Hz, como se observa en las gráficas de la Figura 3.5, los cuales corresponden a los valores reales del sistema y también a los obtenidos por el método de Prony. Además, de manera similar al análisis de Prony, el método de ERA también arroja una relación de amortiguamiento instantánea de 1.5915 % y 0.5684 %, como se muestra en la parte de abajo de la Figura 3.5, esto para cada modo oscilatorio, respectivamente. Se observa, que los resultados obtenidos por el método de ERA corresponden a los valores reales presentados en la Sección 2.5.

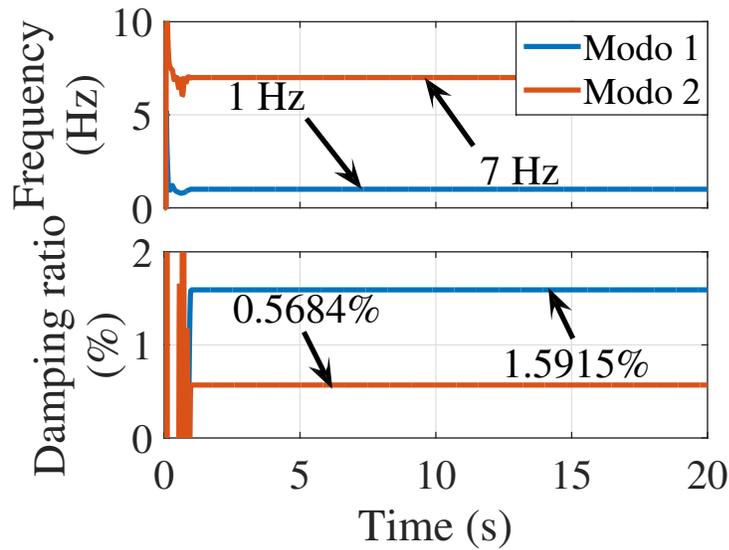


Figura 3.5: Frecuencias y relación de amortiguamientos instantáneos obtenidos por el método de ERA.

Sistema teórico de prueba con el método de Matrix Pencil

La Figura 3.6 ilustra los resultados de frecuencia (arriba) y de relación de amortiguamiento (abajo) mediante el método de Matrix Pencil, el cual también arroja los resultados correctos de acuerdo a la Sección 2.5.

Comparación entre Prony, ERA y MP para el sistema teórico

La tabla 3.1 compara los resultados obtenidos por los 3 métodos para los dos diferentes modos de oscilación que presenta la señal teórica.

Al tratarse de una señal teórica que resulta ser ideal, se observa que no se presentan diferencias entre los tres métodos, obteniéndose resultados idénticos y en forma instantánea.

La Figura 3.7 ilustra las frecuencias obtenidas por los tres métodos (arriba) para el modo de 1 Hz, así como la relación de amortiguamiento (abajo).

Por otra parte, la Figura 3.8 muestra la frecuencia obtenida por los tres métodos (parte superior) para el modo de 7 Hz, así como la relación de amortiguamiento (parte

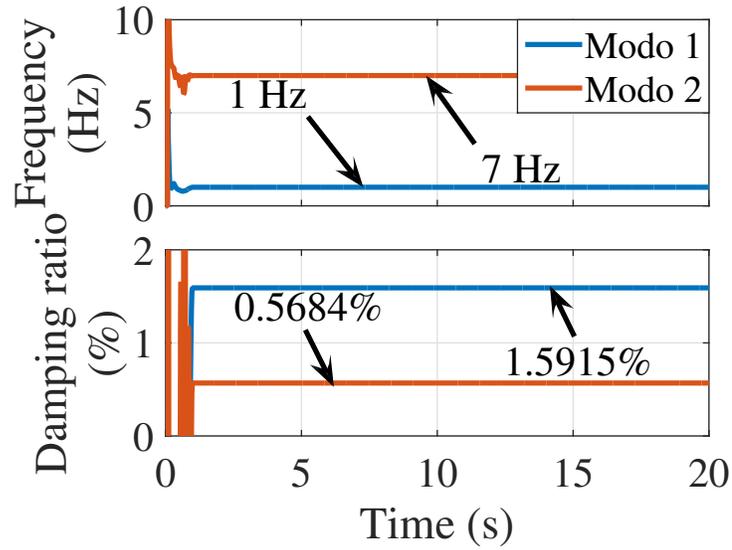


Figura 3.6: Frecuencias y amortiguamientos instantáneos obtenidos por el método de Matrix Pencil.

Tabla 3.1: Análisis de Prony, ERA, y MP para los modos de oscilación del sistema teórico.

Modo de 1 Hz y $\xi = 1.5915\%$		
	Frecuencia. (Hz)	Amortiguamiento (%)
Prony	1	1.5915
ERA	1	1.5915
MP	1	1.5915
Modo de 7 Hz y $\xi = 0.5684\%$		
	Frecuencia. (Hz)	Amortiguamiento (%)
Prony	7	0.5684
ERA	7	0.5684
MP	7	0.5684

inferior).

Se observa que los tres métodos tienen un comportamiento muy similar, obteniendo los resultados esperados de forma instantánea.

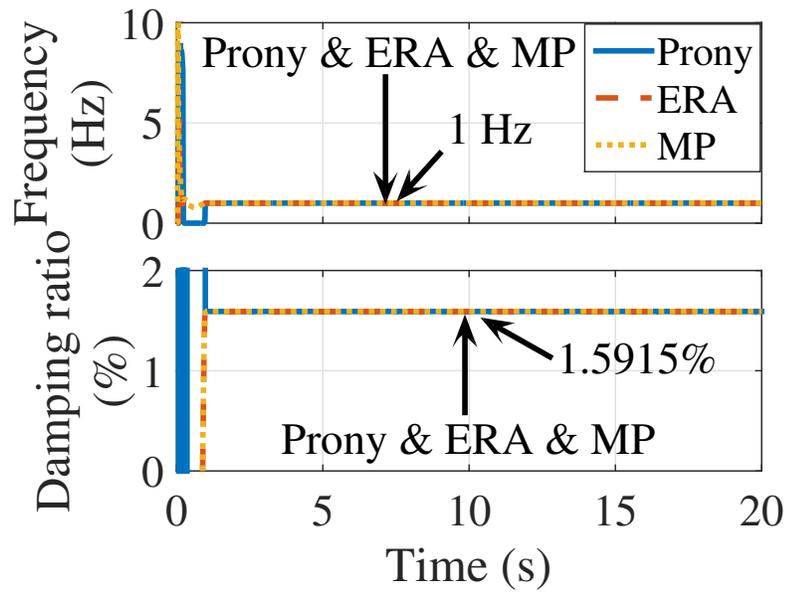


Figura 3.7: Frecuencias y amortiguamientos instantáneos para le modo de 1 Hz.

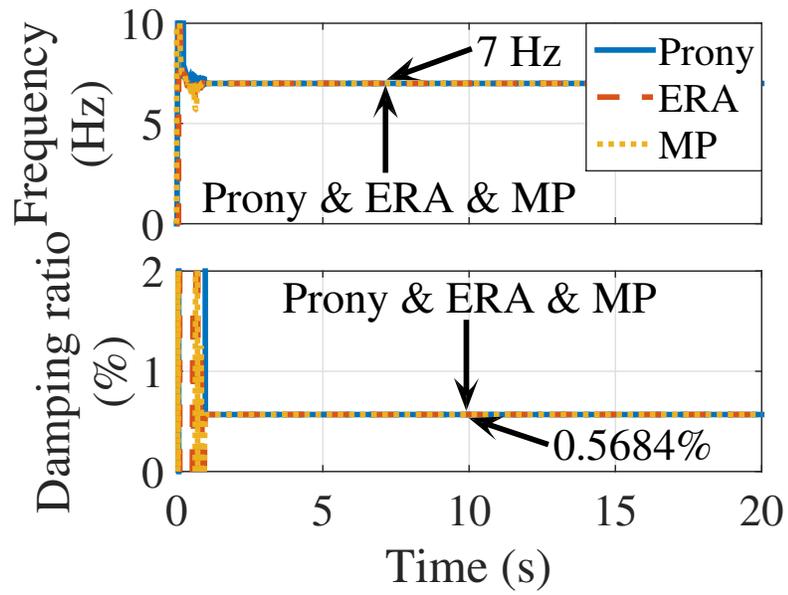


Figura 3.8: Amortiguamientos instantáneos obtenidos por los 3 métodos para el segundo modo

3.2. Sistema de potencia Kundur de dos áreas

Este caso de estudio se lleva a cabo en el conocido sistema de Kundur [15] modelado en Matlab & Simulink. Para representar y analizar el sistema, se utiliza como base el ejemplo demo de Simulink “Performance of Three PSS for Interarea Oscillations”, el cual se encuentra en la ayuda de Matlab.

Este sistema consta de 4 generadores, 11 nodos y 2 áreas totalmente simétricas y unidas entre sí por dos líneas débiles de 230 kV y con una longitud de 220 km cada una. Además, los generadores corresponden a un modelo de cuarto orden que incluyen un sistema de excitación estático simple para las simulaciones transitorias.

Este sistema fue diseñado específicamente en [15] para estudiar las oscilaciones electromecánicas de baja frecuencia en grandes sistemas de potencia interconectados. A pesar de su pequeño tamaño, imita muy de cerca el comportamiento de los sistemas típicos en funcionamiento real. Cada área está equipada con dos generadores de rotor liso, iguales, de 20 kV/900 MVA cada uno. Las máquinas síncronas tienen parámetros idénticos, excepto por sus inercias que son de $H = 6.5$ s para los generadores del área 1 y $H = 6.175$ s para los generadores del área 2. La carga se representa como impedancias constantes y se divide entre las áreas de tal manera que el área 1 está exportando 413 MW al área 2.

Es importante mencionar que, a este sistema se le hicieron algunas modificaciones para facilitar el análisis de interés. Por ejemplo, se eliminan los controles tales como los PSSs (PSS, del inglés power system stabilizer) y gobernadores, se quita la falla trifásica que se aplica entre las dos áreas, y se modifican los parámetros necesarios para que el sistema sea estable ante un cambio de carga y de esta manera tener un evento ringdown para que se pueda analizar con las técnicas aquí propuestas.

Para el caso de estudio en este proyecto, inicialmente se consideran las condiciones de carga nominal. En un tiempo $t = 1$ s, la carga correspondiente al área 2 aumenta en un 10 % en la demanda (solamente para la potencia activa), de manera que se excita el modo interárea. De esta manera, la potencia activa medida en el generador 3 (**Pe3** en la Figura

3.9) se monitorea a través de una ventana deslizante, en la que se pueden aplicar los tres métodos evaluados, esto se puede ver en la Figura 3.9.

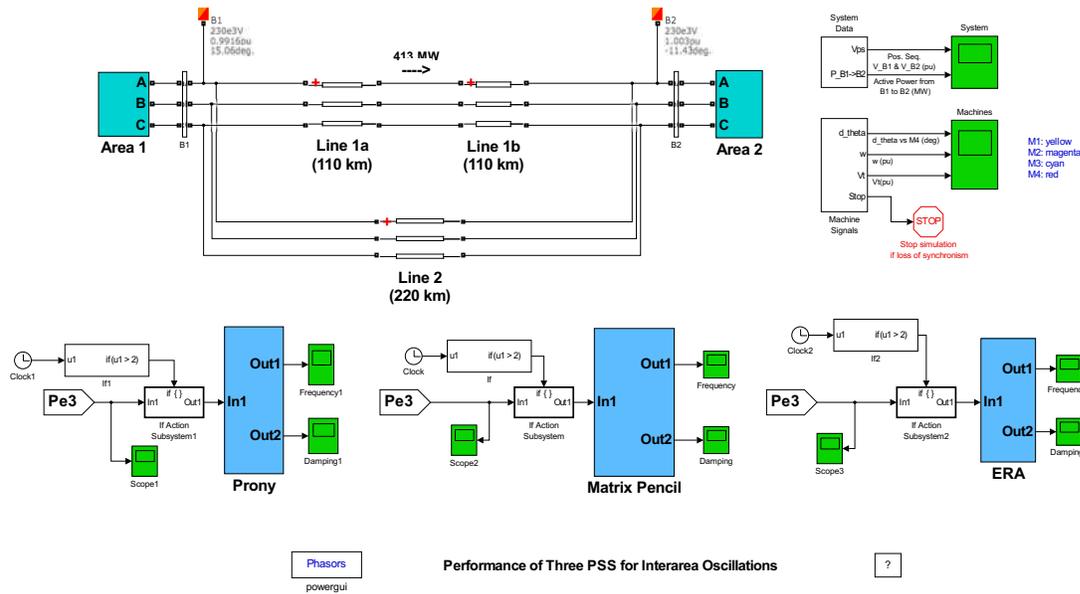


Figura 3.9: Sistema de dos áreas de Kundur y los métodos de Prony, ERA y Matrix Pencil.

3.2.1. Resultados del sistema de dos áreas de Kundur

En este sistema, se analiza la potencia eléctrica en el generador 3, ya que es el generador más cercano al punto en donde se produce el disturbio, que en este caso es la conexión y desconexión del 10% de la carga, simplemente para excitar al sistema y así poder identificar de manera instantánea los parámetros modales en las oscilaciones.

Además, para darnos una idea de qué componentes frecuenciales están presentes en la señal bajo análisis, un análisis de Fourier se aplica a la señal, considerando únicamente la parte ringdown, como se muestra en la Figura 3.10. Con el disturbio provocado, se puede observar que la señal contiene un modo interárea de aproximadamente 0.55 Hz.

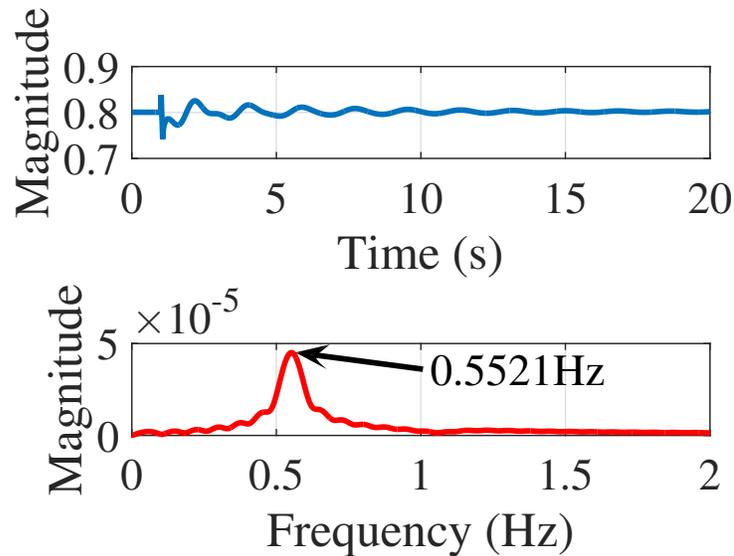


Figura 3.10: Potencia eléctrica en el generador 3 y su espectro de Fourier.

3.2.2. Sistema de dos áreas analizado con el método de Prony

La Figura 3.11 ilustra los resultados en el tiempo obtenidos por el método de Prony, siendo la parte de arriba para la frecuencia y la parte de abajo de la Figura 3.11 para la relación de amortiguamiento. El método de Prony muestra un resultado de frecuencia de 0.5579 Hz (este valor corresponde al valor promedio de la respuesta en el tiempo de la frecuencia). De aquí, se puede observar que el valor de frecuencia obtenido por el método de Prony es muy cercano al valor que se obtiene con el análisis de Fourier presentado en la Figura 3.10 y cuyo valor es alrededor de 0.55 Hz.

Por otra parte, el resultado mostrado por el algoritmo de Prony para la relación de amortiguamiento es de 4.5849%, lo cual indica que se tiene un amortiguamiento de nivel medio. Además, recordar que estos resultados para frecuencia y relación de amortiguamiento, corresponden a los valores promedio de la señal instantánea que se muestra en la Figura 3.11, y en este caso, los resultados muestran solamente un modo interárea en el

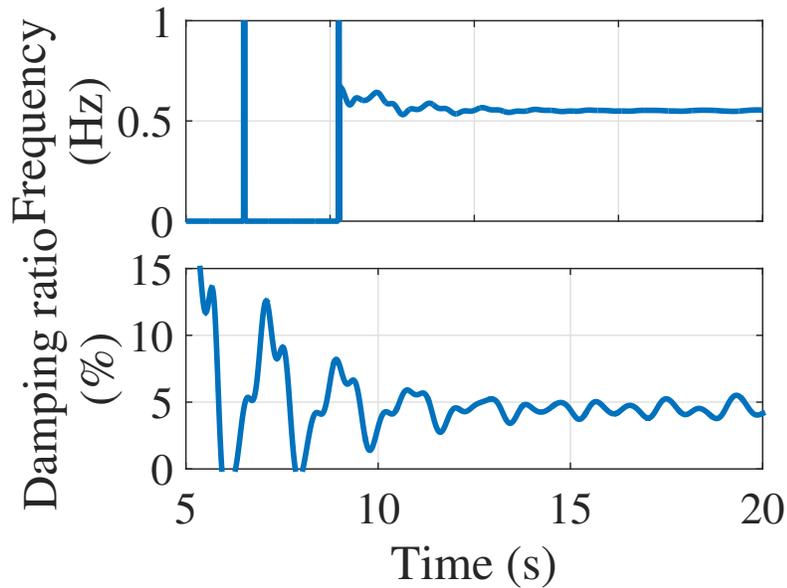


Figura 3.11: Frecuencia y relación de amortiguamiento instantáneos obtenidos por el método de Prony.

sistema.

3.2.3. Sistema de dos áreas analizado con el método ERA

De manera similar a lo anterior, los resultados en el tiempo obtenidos por el método de ERA, correspondientes a la frecuencia y a la relación de amortiguamiento, se muestran en la parte de arriba y de abajo de la Figura 3.12, respectivamente. De aquí, se puede ver que el método de ERA arroja un resultado de frecuencia de 0.5499 Hz, donde se puede observar que el valor de frecuencia obtenido por el método de ERA es muy cercano al valor que se obtiene con el análisis de Fourier (0.55 Hz), así como también al método de Prony (0.5579 Hz).

Por otro lado, el resultado obtenido por el algoritmo de ERA para la relación de amortiguamiento corresponde a un 4.5011%, muy similar al obtenido por el método de Prony. Nuevamente, es importante mencionar que estos resultados corresponden a los

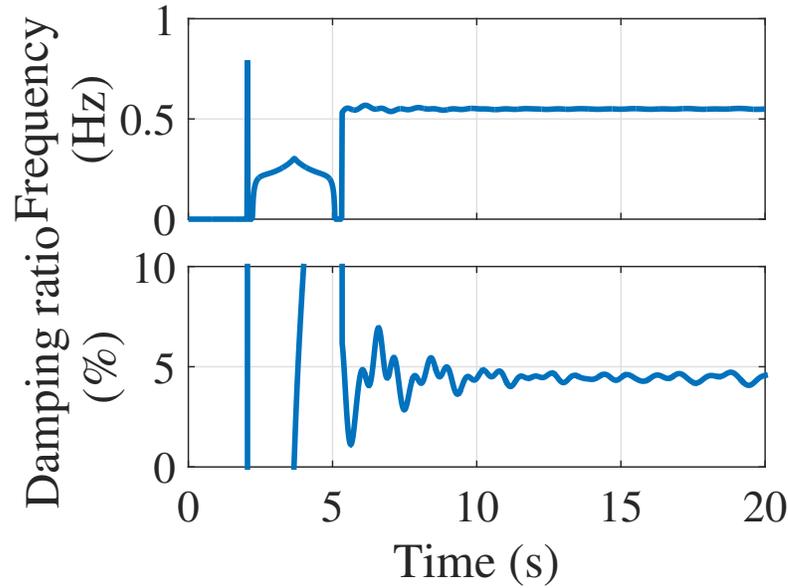


Figura 3.12: Frecuencia y relación de amortiguamiento instantáneos obtenidos por el método de ERA.

valores promedio de las respuestas instantáneas que se muestran en la Figura 3.12, para frecuencia y relación de amortiguamiento, respectivamente.

3.2.4. Sistema de dos áreas analizado con el método Matrix Pencil

Por último, la Figura 3.13 muestra las respuestas en el tiempo de la frecuencia y relación de amortiguamiento obtenidos al aplicar la técnica de MP, siendo la parte superior de la Figura 3.13 para la frecuencia instantánea y la parte inferior de la Figura 3.13, para la relación de amortiguamiento instantáneo. De aquí, el método de MP muestra un resultado de frecuencia alrededor de 0.5500 Hz, donde se puede apreciar que el valor de frecuencia obtenido por el método de Matrix Pencil es muy cercano a los valores que se obtienen con el análisis de Fourier y con los dos métodos anteriores, en especial con el obtenido por el método de ERA.

Por otra parte, el resultado mostrado por el método de Matrix Pencil para la

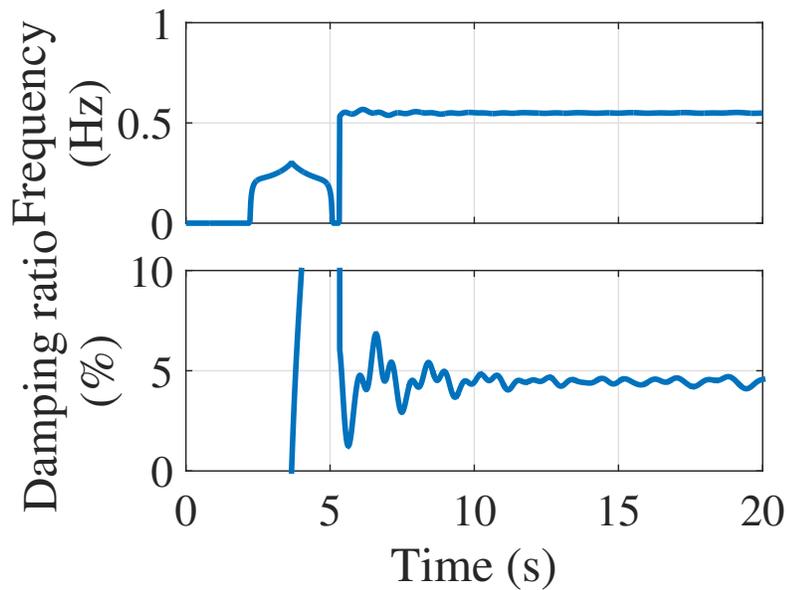


Figura 3.13: Frecuencia y relación de amortiguamiento instantáneos obtenidos por el método de Matrix Pencil.

relación de amortiguamiento es de 4.5024%, muy similar a ERA y Prony. Recordar, que estos resultados son valores promedio de las señales instantáneas de frecuencia y amortiguamiento mostrados en la Figura 3.13.

3.2.5. Comparación de los 3 métodos en el sistema de dos áreas de Kundur

La Tabla 3.2 muestra los valores promedio para la frecuencia y relación de amortiguamiento obtenidos con cada método, Prony, ERA y MP; aplicados a la señal de potencia medida en el sistema de dos áreas de Kundur.

Por otro lado, la Figura 3.14 muestra la comparación en el tiempo para los tres métodos evaluados, donde se puede observar que los resultados obtenidos tanto para la frecuencia y amortiguamiento instantáneos, en general son muy cercanos entre los tres métodos, en especial entre el método de ERA y el método de Matrix Pencil; donde el

Tabla 3.2: Comparativa de los resultados de los 3 métodos para el sistema de 2 áreas.

	Valores instantáneos		Análisis offline	
	Frecuencia (Hz)	Relación de amortiguamiento (%)	Frecuencia (Hz)	Relación de ratio (%)
Prony	0.5579	4.5849	0.5492	4.7184
ERA	0.5499	4.5011	0.5505	4.3968
MP	0.5500	4.5024	0.5505	4.3967

método de Prony presenta un poco de variaciones en los resultados con respecto a los otros dos métodos, pero aún así son valores totalmente aceptables, porque las variaciones son mínimas.

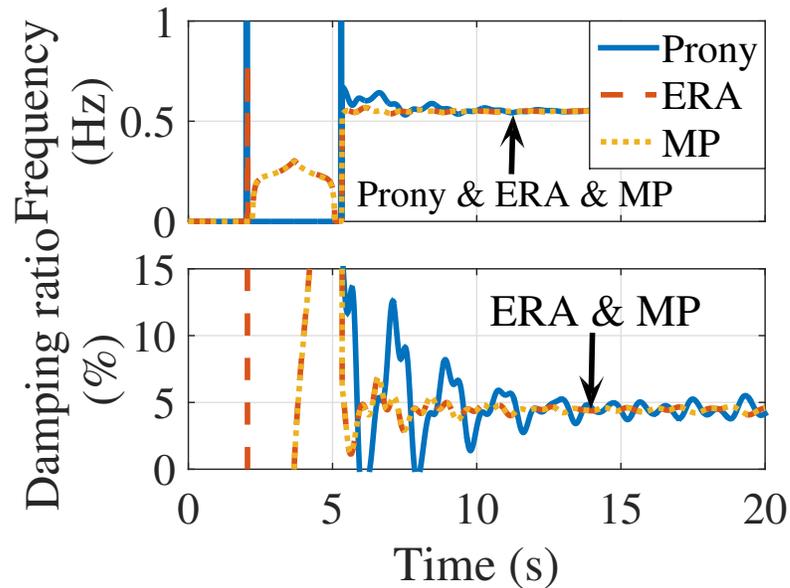


Figura 3.14: Frecuencias y relaciones de amortiguamiento obtenidos por los 3 métodos.

3.3. Sistema de potencia de 39 nodos de New England

En esta Sección, los métodos evaluados de Prony, ERA y MP se prueban en una red eléctrica de referencia muy conocida. Esta red corresponde a la red eléctrica de IEEE

New England de 39 nodos, la cual se compone de 10 generadores síncronos, 39 nodos, 12 transformadores, 34 líneas de transmisión y 19 cargas del sistema de potencia, tal y como se muestra en la Figura 3.15.

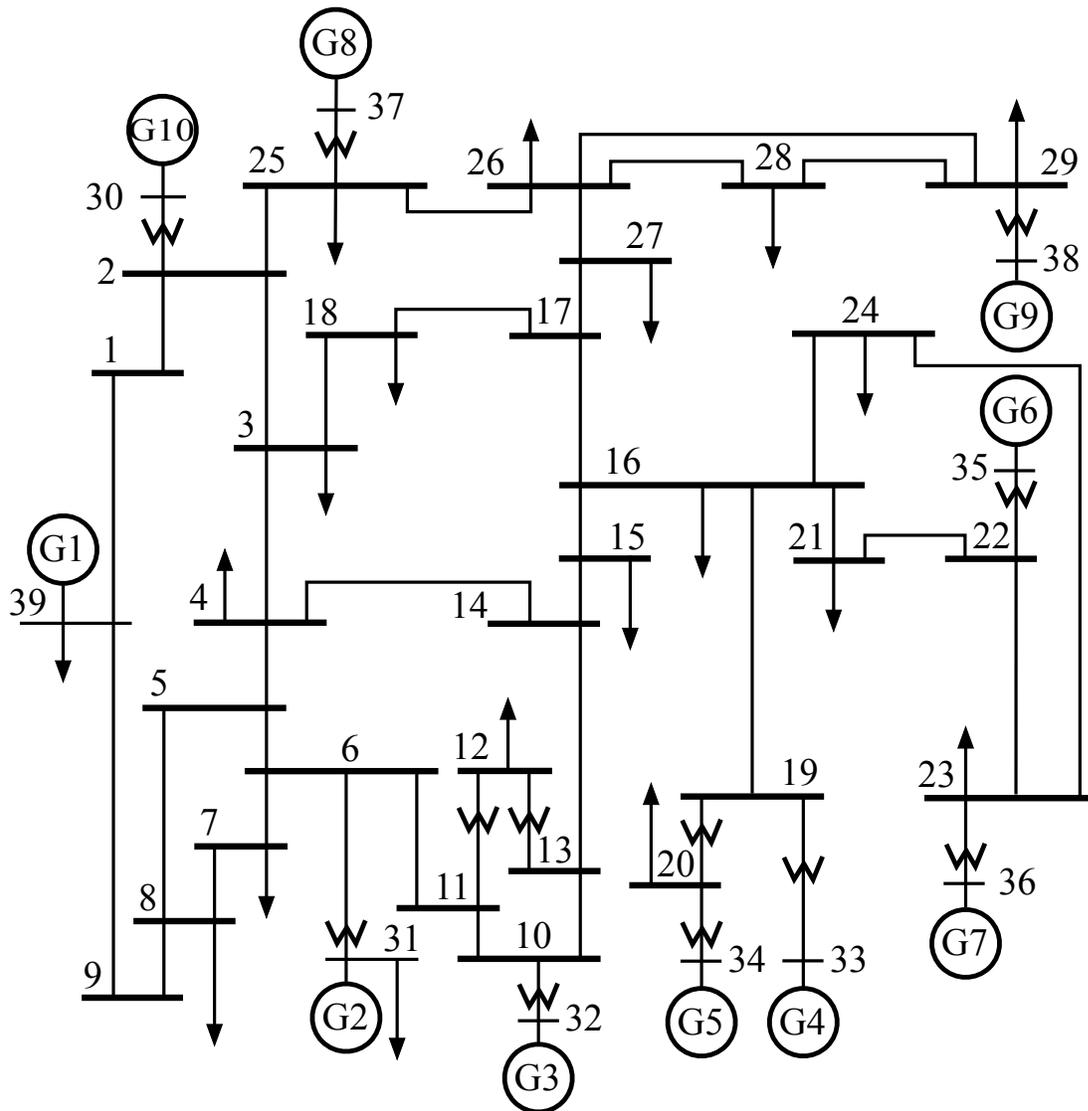


Figura 3.15: Sistema de potencia de New England.

Este sistema de prueba de 39 nodos se ha utilizado ampliamente en la literatura

sobre dinámica de sistemas de potencia, ya que exhibe las propiedades dinámicas de un sistema grande [22]. Los generadores G2 a G10 pertenecen al sistema de Nueva Inglaterra y G1 es un generador equivalente que representa la interconexión con la red eléctrica de Nueva York. Para realizar el análisis ringdown, se aplica una falla trifásica con una duración de 3 ciclos en el nodo 16 (subestación de Medway), con lo cual se excita la dinámica del sistema. Para esto, se coloca un medidor para medir la desviación de la velocidad en el rotor del generador 1 (nodo 39 en la Figura 3.15), de tal manera, que una vez que el sistema ha sido perturbado y comienzan las oscilaciones electromecánicas, el medidor registra y envía la señal a los tres métodos evaluados y de esta manera se realiza el análisis ringdown para obtener la frecuencia y relación de amortiguamiento instantáneos.

3.3.1. Resultados del New England Power System

El sistema de potencia de New England es un sistema que consta de 39 nodos y 10 máquinas. La máquina 1 representa el sistema de potencia de New York y las máquinas 2 a 10 son el sistema de potencia de New England, por lo que el sistema representa la conexión que hay entre New England y New York. Con el análisis de la señal medida del sistema, se encuentran 2 modos de oscilación, un modo local y uno interárea, como se describe a continuación.

Para este sistema, como anteriormente se menciona, la desviación de velocidad medida en el rotor del generador 1 es la que se utiliza para realizar las estimaciones correspondientes de frecuencia y amortiguamiento con los tres métodos evaluados.

Primeramente, para dar una idea de que componentes frecuenciales contiene la señal de interés (parte superior de la Figura 3.16), y así corroborar las respuestas obtenidas por los distintos métodos evaluados en este trabajo de tesis, se utiliza un análisis de Fourier a la señal, cuya respuesta en la frecuencia se muestra en la gráfica de la parte inferior de la Figura 3.16.

Con el disturbio provocado (análisis ringdown), el análisis de Fourier detecta dos

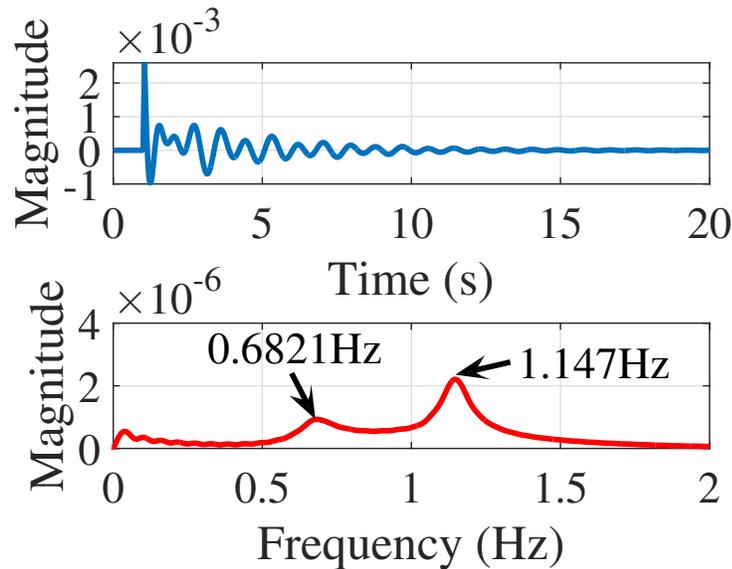


Figura 3.16: Desviación de velocidad medida en el generador 1 y su espectro de Fourier.

modos oscilatorios: un modo interárea de aproximadamente 0.7 Hz y un modo local de aproximadamente 1.1 Hz, de acuerdo a la definición dada en la Sección 2.1 para modos interárea y modos locales, respectivamente.

3.3.2. New England power system con el método de Prony

De manera similar al sistema Kundur de dos áreas, para aplicar los tres métodos al sistema de New England, los tres métodos mostrados en el Figura 3.9 (implementados ya en Simulink) se trasladan al sistema Simulink de New England (no presentado en este documento debido a su gran tamaño, es por esto que únicamente se presenta su diagrama unifilar mostrado en la Figura 3.15). Estos reciben la señal de desviación de velocidad en el tiempo y de esta manera se aplican los métodos mediante ventanas deslizantes de corto plazo, obteniéndose así, las estimaciones de frecuencia y relación de amortiguamiento instantáneos. Así, la Figura 3.17 ilustra los resultados obtenidos por el método de Prony para el modo interárea del sistema de New England. En la gráfica superior se muestra la

frecuencia instantánea y en la gráfica inferior se muestran los resultados de la relación de amortiguamiento instantáneos del sistema.

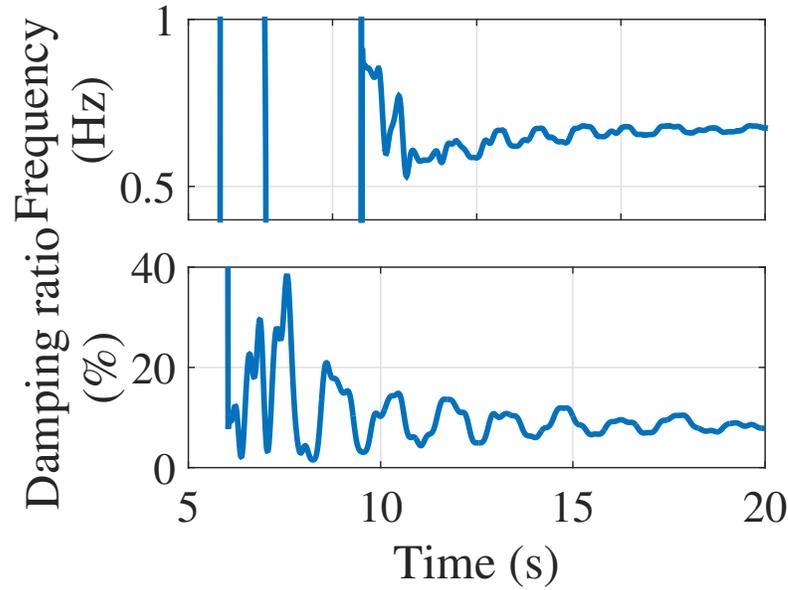


Figura 3.17: Frecuencia y relación de amortiguamiento instantáneos obtenidos por el método de Prony para el modo interárea.

Con el método de Prony, se obtienen resultados de frecuencia de 0.6494 Hz y de relación de amortiguamiento de 9.8085% para el modo interárea, donde los resultados obtenidos son valores promedio de las señales instantáneas que se muestran en la Figura 3.17. Se observa que el valor de frecuencia obtenido por Prony es muy cercano al arrojado por el análisis de Fourier, el cual es de 0.6821 Hz.

Asimismo, en la Figura 3.18 se ilustran los resultados obtenidos por el método para el modo local del sistema.

Los resultados arrojados por el método de Prony para el modo local son de 1.1504 Hz para la frecuencia y 3.9210% para la relación de amortiguamiento. Nuevamente, los resultados presentados corresponden a los valores promedio de las señales instantáneas mostradas en la Figura 3.18. Se observa que el valor de frecuencia obtenido por Prony es

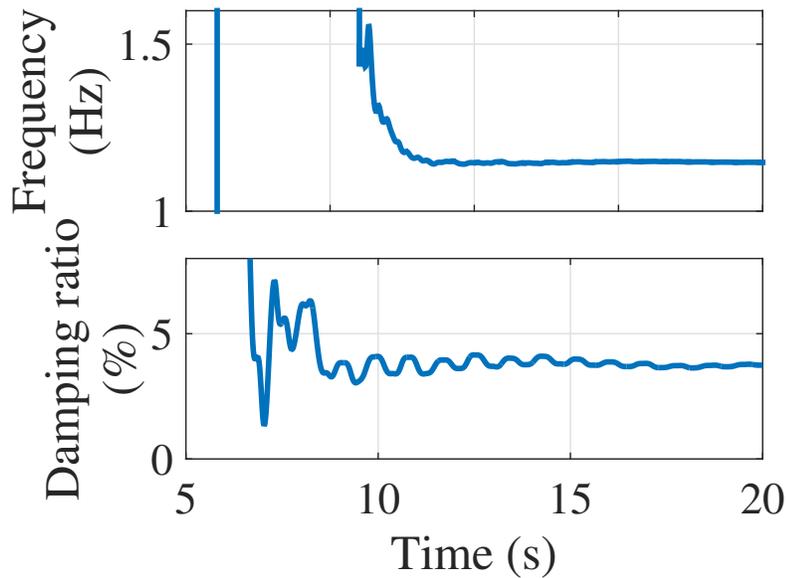


Figura 3.18: Frecuencia y relación de amortiguamiento instantáneos obtenidos por el método de Prony para el modo local.

muy cercano al arrojado por el análisis de Fourier, el cual es de 1.147 Hz.

3.3.3. New England power system con el método de ERA

Los resultados obtenidos por el método de ERA para el modo interárea del sistema de New England se ilustran en la Figura 3.19. En la gráfica superior se observan los resultados de frecuencia y en la gráfica inferior se muestran los resultados de la relación de amortiguamiento del sistema.

Con el método de ERA se obtienen resultados de frecuencia de 0.6643 Hz y de relación de amortiguamiento de 8.6819% para el modo interárea. Los resultados obtenidos son valores promedio de la señal instantánea que se muestran en la Figura 3.19.

Se observa que el valor de frecuencia obtenido por la técnica de ERA es muy cercano a los arrojados por el análisis de Fourier y Prony, los cuales fueron de 0.6821 Hz y 0.6494 Hz, respectivamente. Similarmente para la relación de amortiguamiento, se observa

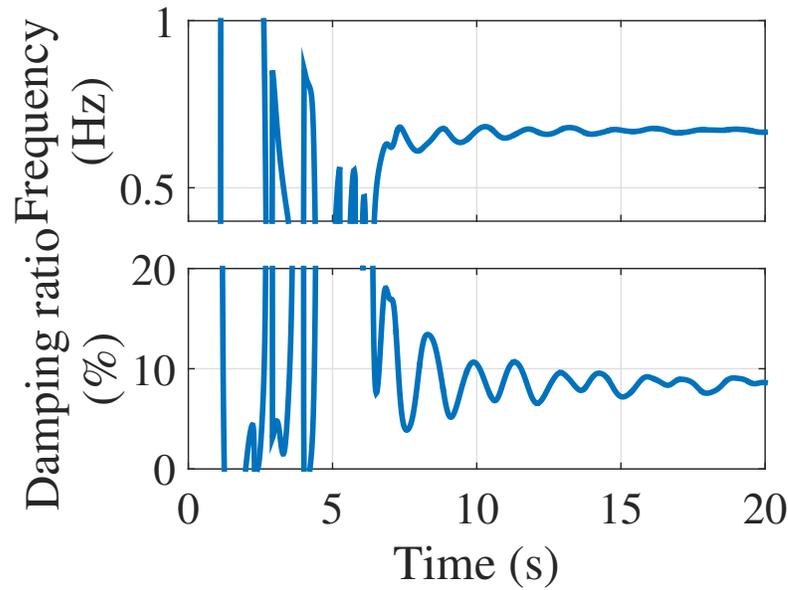


Figura 3.19: Frecuencia y relación de amortiguamiento instantáneos obtenidos por el método de ERA para el modo interárea.

que el resultado obtenido por ERA es similar al obtenido por Prony, el cual corresponde a un valor promedio de 9.8085 %.

Por otro lado, los resultados obtenidos por el método de ERA, pero esta vez para el modo local del sistema, se ilustran en la Figura 3.20.

Los resultados obtenidos por el método de ERA para el modo local son de 1.1472 Hz para la frecuencia y 3.7707 % para la relación de amortiguamiento, donde los resultados presentados son valores promedio de las señales mostradas en la Figura 3.20.

Similar al modo interárea, se observa que el valor de frecuencia para el modo local obtenido por la técnica de ERA, es muy cercano a los arrojados por el análisis de Fourier y Prony, los cuales fueron de 1.147 Hz y 1.1504 Hz, respectivamente. Y para la relación de amortiguamiento del modo local, se observa que el resultado obtenido por ERA es muy similar al obtenido por Prony, el cual corresponde a un valor promedio de 3.9210 % para Prony y 3.7707 % para ERA.

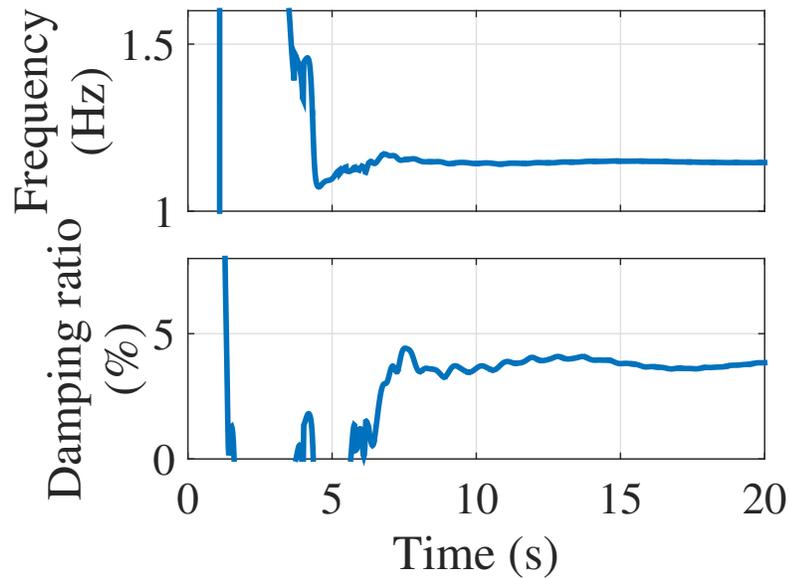


Figura 3.20: Frecuencia y relación de amortiguamiento instantáneos obtenidos por el método de ERA para el modo local.

3.3.4. New England power system con el método de Matrix Pencil

Por último, la Figura 3.21 muestra los resultados obtenidos por el método de Matrix Pencil para el modo interárea del sistema de New England, donde la gráfica de la parte superior de la Figura muestra la frecuencia en el tiempo y la gráfica de la parte inferior muestra los resultados de la relación de amortiguamiento del sistema.

De lo anterior, el método de Matrix Pencil arroja resultados promedio de frecuencia y de relación de amortiguamiento de 0.6644 Hz y 8.6787 %, respectivamente para el modo interárea.

De igual manera, en la Figura 3.22 se muestran los resultados obtenidos por el método de MP para el modo local del sistema.

La gráfica de la parte superior de la Figura 3.22 muestra la frecuencia en el tiempo y la gráfica de la parte inferior muestra los resultados de la relación de amortiguamiento del sistema para el modo local. De aquí, los valores promedios son de 1.1472 Hz y 3.7709 %

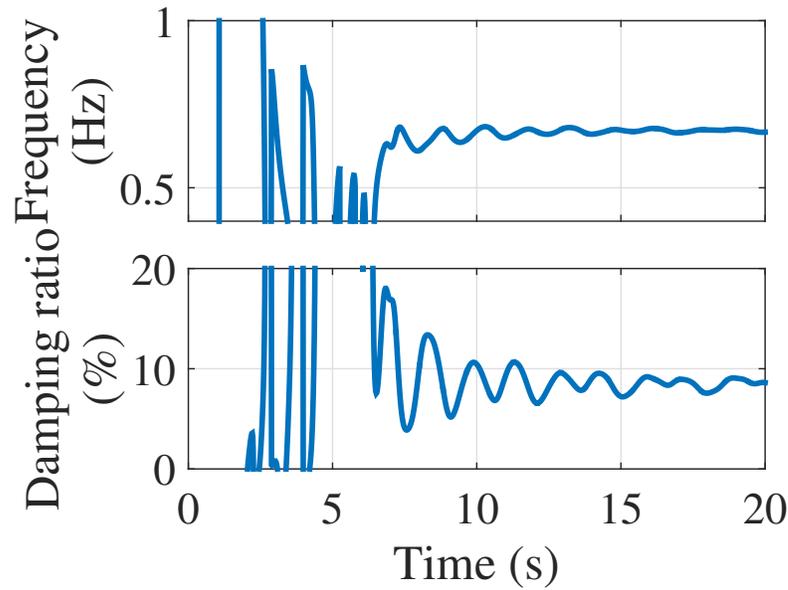


Figura 3.21: Frecuencia y relación de amortiguamiento instantáneos obtenidos por el método de Matrix Pencil para el modo interárea.

para la frecuencia y relación de amortiguamiento, respectivamente. Nuevamente se observa una gran similitud entre los métodos de MP y ERA, además de que los resultados obtenidos para la frecuencia, tanto para el modo interárea y local, son muy similares a los arrojados por el análisis de Fourier, los cuales corresponden a 0.6821 Hz y 1.147 Hz, respectivamente.

3.3.5. Comparación de los tres métodos para el sistema de New England

La Figura 3.23 muestra los resultados de frecuencia (gráfica superior) y relación de amortiguamiento (gráfica inferior) correspondientes al modo interárea obtenidos por los tres métodos, se observa que el método de Prony puede variar un poco en los resultados comparado con los otros dos métodos.

Por otra parte, la comparación de los resultados para el modo local obtenidos por los tres métodos se ilustran en la Figura 3.24, donde en el gráfico de la parte superior de la Figura se ilustran las frecuencias instantáneas obtenidas por los métodos, mientras que

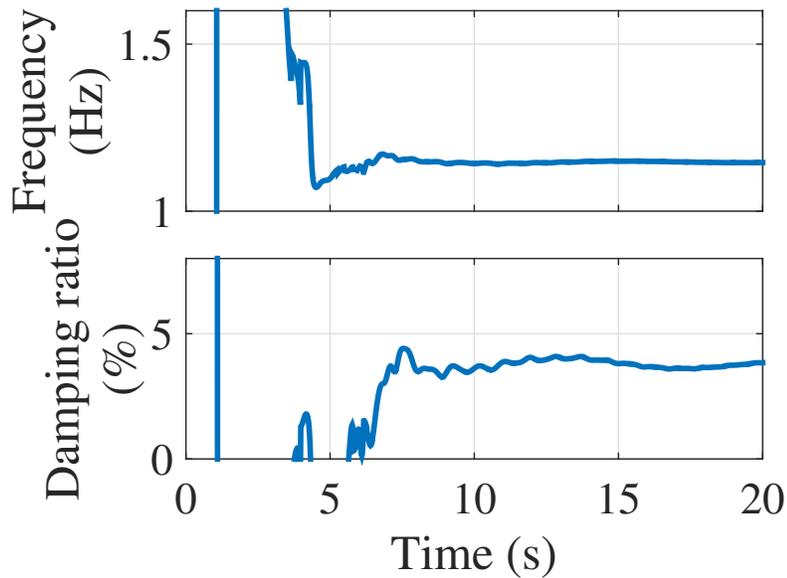


Figura 3.22: Frecuencia y relación de amortiguamiento instantáneos obtenidos por el método de Matrix Pencil para el modo local.

en el gráfico de la parte inferior se aprecian las relaciones de amortiguamiento que arrojan los métodos.

De lo anterior, la Tabla 3.3 muestra los valores promedio para las frecuencias y relaciones de amortiguamiento obtenidos con cada uno de los métodos: Prony, ERA y MP, tanto para el modo interárea como el modo local. Los valores mostrados en la Tabla 3.3 son valores promedio de las señales obtenidas por los tres métodos, es decir, las señales estimadas de frecuencia y relación de amortiguamiento en el tiempo mostradas en las Figuras 3.23 y 3.24.

Con los valores mostrados en la Tabla 3.3 se puede apreciar que los tres métodos obtienen valores muy cercanos entre sí, además, que también son muy parecidos a los resultados de frecuencia obtenidos por el análisis de Fourier.

Además, la Tabla 3.3 muestra que el modo interárea tiene una relación de amortiguamiento cercana al 10 %, indicando un nivel bien amortiguado en el modo. Para el caso

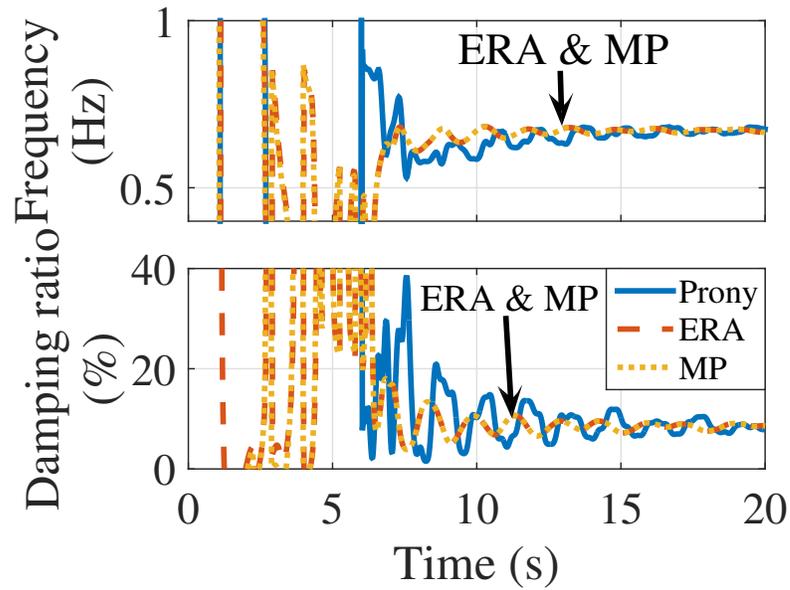


Figura 3.23: Frecuencias y relaciones de amortiguamiento instantáneos obtenidos por los métodos de Prony, ERA y Matrix Pencil para el modo interárea.

Tabla 3.3: Análisis de Prony, ERA y Matrix Pencil para los modos de oscilación del sistema de potencia de New England.

Modo Interárea				
	Valores instantáneos		Análisis offline	
	Frecuencia (Hz)	Relación de amortiguamiento (%)	Frecuencia (Hz)	Relación de amortiguamiento (%)
Prony	0.6494	9.8085	0.6590	8.9747
ERA	0.6643	8.6819	0.6608	8.5354
MP	0.6644	8.6787	0.6608	8.5353
Modo local				
	Valores instantáneos		Análisis offline	
	Frecuencia (Hz)	Relación de amortiguamiento (%)	Frecuencia (Hz)	Relación de amortiguamiento (%)
Prony	1.1504	3.9210	1.1480	3.8341
ERA	1.1472	3.7707	1.1442	3.9118
MP	1.1472	3.7709	1.1442	3.9118

del modo local, la Tabla 3.3 ilustra un coeficiente de amortiguamiento cercano al 4%, lo cual indica un modo con un nivel medio de amortiguamiento.

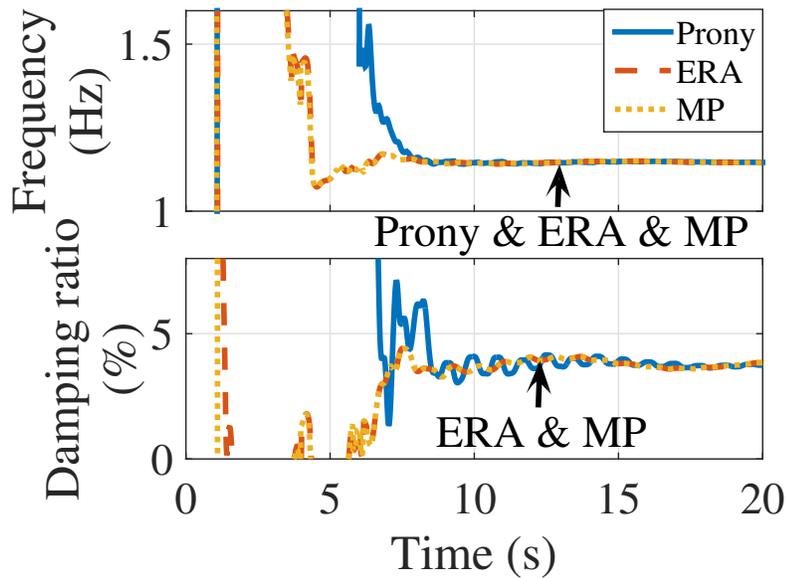


Figura 3.24: Frecuencias y relaciones de amortiguamiento instantáneos obtenidos por los métodos de Prony, ERA y Matrix Pencil para el modo local.

Por otro lado, en el gráfico de la parte superior de la Figura 3.16, se observa que el modo de mayor energía corresponde al modo local. Por esta razón, las estimaciones de frecuencia y relación de amortiguamiento varían ampliamente para el modo interárea, ya que su energía es muy baja comparada con la del modo local. Además, esto también se debe en gran parte al nivel bien amortiguado que tiene el modo interárea, lo cual hace que éste desaparezca más rápido.

3.4. Resumen

En este Capítulo se presentan los sistemas de prueba con los que se comprueba la efectividad y confiabilidad de los tres métodos evaluados en este proyecto de tesis: análisis de Prony, método de ERA y la técnica de Matrix Pencil. Los tres métodos muestran resultados correctos, pero se puede observar que los métodos de ERA y Matrix Pencil son más eficaces, en el sentido de ser menos sensibles al ruido, por lo que presentan menos

oscilaciones en los resultados. El primer sistema en presentarse, es el de la señal teórica, con el cual se implementan los métodos en ventanas deslizantes en Simulink. Asimismo, con el sistema teórico se comprueba el correcto funcionamiento e implementación de los métodos como métodos de ventanas deslizantes.

Posteriormente, se analizan y se comparan los resultados de los sistemas de potencia de prueba de dos áreas y el sistema de New England. Obteniéndose muy buenos resultados.

Capítulo 4

Conclusiones

4.1. Conclusiones Generales

Este proyecto de tesis ha demostrado una posible forma de simulación en tiempo real de los tres principales algoritmos de identificación modal basados en mediciones para capturar dinámicas de baja frecuencia en sistemas de potencia, las técnicas evaluadas son: el análisis de Prony, el método de ERA y la técnica de Matrix Pencil.

Mediante el uso de señales medidas de respuesta ringdown, los tres métodos se pueden aplicar en una ventana deslizante de corto plazo, lo que permite su implementación en una plataforma integrada de bajo costo. Además, los resultados de la simulación muestran que los métodos evaluados han proporcionado con éxito las estimaciones modales instantáneas (frecuencia y relación de amortiguamiento). Los tres algoritmos funcionan de muy buena manera, pero durante su evaluación, fue notorio que el método de Prony es más sensible al ruido y que los métodos de ERA y Matrix Pencil son mejores en el sentido de que las estimaciones fueron más suaves.

4.2. Trabajos Futuros

Como posibles trabajos futuros se tienen los siguientes:

1. La implementación de los tres métodos propuestos en sistemas embebidos tales como arduino, raspberry pi, Galileo, etc.
2. La implementación de los tres métodos propuestos en plataformas de tiempo real y hardware in the loop (HIL) tales como OPAL RT, RTDS y Typhoon, para aplicaciones en tiempo real de WAMS.
3. Aplicación de técnicas de aprendizaje de máquina y clustering para una identificación más eficiente de modos locales e interáreas en un SEP.

Referencias

- [1] S. Nuthalapati, *Power System Grid Operation Using Synchrophasor Technology*. Springer International Publishing, 2019.
- [2] I. Kamwa, ed., *Monitoring and Control using Synchrophasors in Power Systems with Renewables*. Energy Engineering, Institution of Engineering and Technology, 2020.
- [3] J. Sanchez-Gasca and D. Trudnowski, “Identification of electromechanical modes in power system,” tech. rep., IEEE Task Force on Identification of Electromechanical Modes of the Power System Stability, Power & Energy Society, June 2012.
- [4] A. Zamora, V. M. Venkatasubramanian, J. A. de la O Serna, J. M. Ramirez, and M. Paternina, “Multi-dimensional ringdown modal analysis by filtering,” *Electric Power Systems Research*, vol. 143, pp. 748–759, 2017.
- [5] J. Rommes, N. Martins, and F. Freitas, “Computing rightmost eigenvalues for small-signal stability assessment of large-scale power systems,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, pp. 929–938, May 2010.
- [6] R. Cardenas-Javier, V. Gonzalez-Sanchez, M. Paternina, A. Zamora, V. Torres, D. Dotta, *et al.*, “A matlab and powerfactory-based wams simulator,” in *2019 North American Power Symposium (NAPS)*, pp. 1–6, IEEE, 2019.
- [7] J. Sanchez-Gasca, “Toward the automated computation of electromechanical modes from transient simulations,” in *IEEE PES General Meeting*, pp. 1–7, 2010.

-
- [8] P. Korba, M. Larsson, and C. Rehtanz, “Detecting electromechanical oscillations in power systems,” Dec. 12 2006. US Patent 7,149,637.
- [9] D. Lauria and C. Pisani, “On hilbert transform methods for low frequency oscillations detection,” *IET Gen., Trans. Distrib.*, vol. 8, pp. 1061–1074(13), June 2014.
- [10] Y. Zhang, P. Markham, T. Xia, L. Chen, Y. Ye, Z. Wu, Z. Yuan, L. Wang, J. Bank, J. Burgett, R. W. Conners, and Y. Liu, “Wide-area frequency monitoring network (fnet) architecture and applications,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 1, pp. 159–167, Sept 2010.
- [11] V. Venkatasubramanian and J. R. Carroll, “Oscillation monitoring system.”
- [12] C. A. O. nez and M. A. Ríos, “Electromechanical modes identification based on sliding-window data from a wide-area monitoring system,” *Electric Power Components and Systems*, vol. 41, no. 13, pp. 1264–1279, 2013.
- [13] A. Zamora, A. Avalos, J. A. la O de Serna, J. H. Chow, and M. R. A. Paternina, “Real-time simulation of the prony filter for identifying low frequency oscillations in short-time,” in *2018 IEEE PES Transmission Distribution Conference and Exhibition - Latin America (T D-LA)*, pp. 1–5, 2018.
- [14] Z. Tashman, H. Khalilinia, and V. Venkatasubramanian, “Multi-dimensional fourier ringdown analysis for power systems using synchrophasors,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, pp. 731–741, March 2014.
- [15] P. Kundur, *Power system stability and control*. McGraw-hill, Inc., New York, 1994.
- [16] J.-N. Juang and R. S. Pappa, “An eigensystem realization algorithm for modal parameter identification and model reduction,” *Journal of guidance, control, and dynamics*, vol. 8, no. 5, pp. 620–627, 1985.

-
- [17] J. S. Bay, *Fundamentals of linear state space systems*, ch. System Realizations, pp. 393–397. WCB/McGraw-Hill: Boston, 1999.
- [18] R. A. D. Callafon, B. Moaveni, J. P. Conte, X. He, and E. Udd, “General realization algorithm for modal identification of linear dynamic systems,” *J. Eng. Mechan.*, vol. 134, no. 9, pp. 712–722, 2008.
- [19] A. Almunif, L. Fan, and Z. Miao, “A tutorial on data-driven eigenvalue identification: Prony analysis, matrix pencil, and eigensystem realization algorithm,” *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 30, no. 4, p. e12283, 2020.
- [20] N. Yilmazer, J. Koh, and T. Sarkar, “Utilization of a unitary transform for efficient computation in the matrix pencil method to find the direction of arrival,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 54, no. 1, pp. 175–181, 2006.
- [21] T. K. Sarkar, S. Park, J. Koh, and S. M. Rao, “Application of the matrix pencil method for estimating the sem (singularity expansion method) poles of source-free transient responses from multiple look directions,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 48, no. 4, pp. 612–618, 2000.
- [22] “Phase ii: frequency domain analysis of low-frequency oscillations in large electric power systems. volume 1: Basic concepts, mathematical models and computing methods,” *Elect. Power Res. Inst.*, April 1982.