
**ANÁLISIS DE OSCILACIONES SUBSINCRÓNICAS DERIVADAS DE FALLAS
EN SISTEMAS DE 500 KV.
EXPERIENCIAS DE APLICACIÓN DEL MÉTODO DE PRONY**

P. E. ISSOURIBEHHERE*
IITREE-FI-UNLP
Argentina

J. C. BARBERO
IITREE-FI-UNLP
Argentina

F. ISSOURIBEHHERE
IITREE-FI-UNLP
Argentina

J. RODRÍGUEZ
CAMESA S.A.
Argentina

***Resumen** – La compensación serie de líneas de transmisión mejora la estabilidad de la tensión y la estabilidad angular del sistema. Sin embargo, en ciertas condiciones particulares de operación, las frecuencias naturales de la red pueden caer por debajo de la frecuencia natural del sistema.*

Ante eventuales fallas en el sistema, las resonancias eléctricas de frecuencia subsincrónica pueden interactuar con las frecuencias torsionales mecánicas del eje del sistema turbina-generador de las unidades generadoras. Este fenómeno se conoce como Resonancia Subsincrónica (SSR) y puede causar daño por fatiga acumulada en el eje de las unidades.

Actualmente este fenómeno es bien conocido y la técnica tradicional basada en la Transformada Rápida de Fourier (FFT) permite detectar la presencia de componentes subsincrónicas en la corriente circulante por las máquinas, pero no permite cuantificarlas adecuadamente.

En este trabajo se aplica una técnica de análisis, basada en el método de Prony, que permite determinar todos los parámetros de cada componente presente en la señal: amplitud, frecuencia y amortiguamiento.

Se presentan los resultados obtenidos de la aplicación del método de Prony para la determinación de frecuencias subsincrónicas presentes en las corrientes de las unidades de una Central Termoeléctrica, ubicada en las cercanías de una Estación Transformadora de 500 kV, a la cual arriban líneas de transmisión con compensación serie.

Palabras clave: Central Termoeléctrica, Compensación serie, Método de Prony, Resonancia Subsincrónica (SSR), Transformada Rápida de Fourier (FFT).

1 INTRODUCCIÓN

El rotor de una turbina de vapor y el generador asociado tienen una estructura mecánica muy compleja, que consiste en algunas masas predominantes (como los rotores asociados a las diferentes etapas de la turbina, el rotor del generador y el rotor de la excitatriz) conectadas por ejes de rigidez finita.

Por lo tanto, cuando se perturba al generador existen oscilaciones torsionales entre las diferentes secciones del rotor turbina-generador.

Las oscilaciones torsionales en el rango subsincrónico (por debajo de la frecuencia fundamental del sistema) pueden, bajo ciertas condiciones, interactuar con el sistema eléctrico de una forma adversa. Algunos problemas relacionados con las oscilaciones torsionales son:

- Interacciones torsionales con los controles de los sistemas de potencia.
- Resonancia subsincrónica con los capacitores serie de las líneas con compensación serie.
- La fatiga de los materiales debida al efecto de los torques torsionales.

Las turbinas de vapor que se encuentran vinculadas a largas líneas de transmisión con compensación serie pueden verse sometidas a este tipo de inconvenientes, por lo que es necesario contar con un sistema de monitoreo y con un relé de protección.

La Central Termoeléctrica Piedra Buena (CTPB), ubicada a 25 Km de la ET Bahía Blanca se encuentra en una condición como la mencionada previamente. En la Fig. 1 se presenta un diagrama unifilar extraído de [1], que representa el sector sur del SADI (Sistema Argentino de Interconexión) y en el cual se observa el emplazamiento de la CTBB, de los capacitores series y la ubicación de las principales centrales eléctricas.

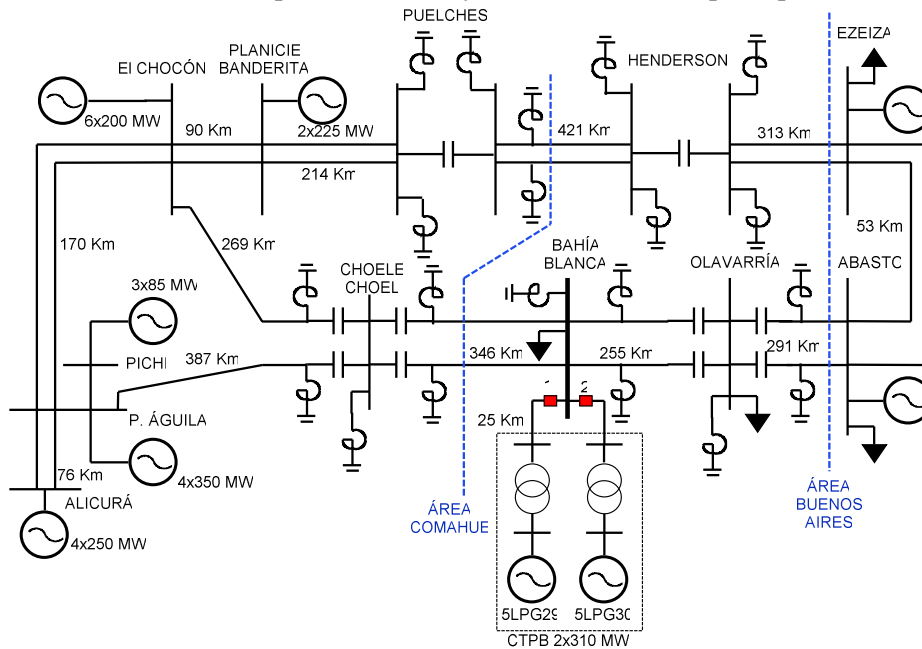


Fig. 1. Porción sur del SADI aledaña a la ET BB y a la central CTPB.

El fenómeno de interacciones torsionales en la Central Termoeléctrica Piedra Buena (CTPB) ha sido estudiado y analizado en detalle en [1]. En dicho trabajo se determinan por ensayos y mediciones las frecuencias torsionales del eje. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla I.

TABLA I. FRECUENCIAS DE RESONANCIA DEL EJE

Fuente de datos	Frecuencias modales del eje (Hz)			
	f_{m1}	f_{m2}	f_{m3}	f_{m4}
Fabricante	13.6	18.3	31.5	61.9
Ensayos de campo	14.0	20.8	34.8	59.8

Para que se ponga de manifiesto el efecto de Interacción Torsional (TI), es necesario la aparición y el sostenimiento en el tiempo de componentes de corriente de frecuencias complementarias a las frecuencias torsionales descritas en la Tabla I. Por lo tanto, para detectar el fenómeno se debe observar la existencia de componentes de corriente de frecuencias 15.2 Hz, 29.2 Hz o 36 Hz con presencia sostenida en el tiempo, es decir muy poco amortiguadas o con un amortiguamiento negativo.

Con el fin de detectar la existencia de estas corrientes se instalaron, a principios de 2010, dos equipos registradores en ET Bahía Blanca. Dichos equipos registradores miden tensiones y corrientes en las líneas que vinculan la ET con las dos unidades generadoras de la CTPB (rectángulos rojos numerados como 1 y 2 en la Fig. 1), con el objetivo de capturar las formas de onda de tensiones y corrientes y determinar la presencia de componentes subsíncronas ante los diversos tipos de fallas (trifásica, bifásica, monofásica) y cualquier otra perturbación presente en el SADI.

El IITREE-FI-UNLP efectúa, desde entonces, la lectura de todos los registros capturados por cada equipo y realiza el análisis de las frecuencias de resonancia subsíncrona (SSR) presentes. La herramienta seleccionada para el análisis de las corrientes y tensiones es el método de Prony.

2 MÉTODO DE PRONY

2.1 Formulación matemática del método

El análisis de Prony [2] es un método para adaptar una combinación lineal de exponenciales a una dada señal $y(t)$ como se describe en (1).

$$y(t) = \sum_{n=1}^N A_n e^{\sigma_n t} \cos(2\pi f_n t + \theta_n) \quad n = 1, 2, 3, \dots, N \quad (1)$$

Cada término de esta expresión tiene cuatro elementos: La magnitud A_n , el factor de amortiguamiento σ_n , la frecuencia f_n , y el ángulo de fase θ_n . Cada componente exponencial con distinta frecuencia es interpretada como un único modo de la señal original. Los cuatro elementos de cada modo pueden ser identificados a partir de la representación en el espacio de estados de las muestras igualmente espaciadas de la señal. El intervalo de tiempo entre muestras es T .

Utilizando el teorema de Euler y definiendo a $t = MT$, las muestras de la señal $y(t)$ pueden escribirse como:

$$y_M = \sum_{n=1}^N B_n \lambda_n^M \quad (2)$$

$$\text{Con:} \quad B_n = \frac{A_n}{2} e^{j\theta_n} \quad (3) \quad \lambda_n = e^{(\sigma_n + j2\pi f_n)T} \quad (4)$$

El análisis de Prony consiste en tres pasos fundamentales. En el primer paso se obtienen los coeficientes de un modelo de predicción lineal (LPM). El modelo de predicción lineal (LPM) de orden N se construye para adaptarse a las muestras igualmente espaciadas de la señal $y(t)$, de longitud M . Normalmente, la longitud M debe ser al menos tres veces mayor que el orden N .

$$y_M = a_1 y_{M-1} + a_2 y_{M-2} + \dots + a_N y_{M-N} \quad (5)$$

La estimación de los coeficientes a_n del modelo de predicción lineal es crucial para la determinación del valor de la amplitud, el amortiguamiento, la frecuencia y la fase inicial de la señal. Es posible realizar una representación matricial escribiendo secuencialmente la predicción lineal de y_M como se presenta en (5). Los coeficientes a_n se obtienen a partir de la matriz mencionada.

$$\begin{bmatrix} y_N \\ y_{N+1} \\ \vdots \\ y_{M-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{N-1} & y_{N-2} & \dots & y_0 \\ y_N & y_{N-1} & \dots & y_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{M-2} & y_{M-3} & \dots & y_{M-N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_N \end{bmatrix} \quad (6)$$

En el segundo paso, se obtienen las raíces λ_n del polinomio característico (7) asociado con el sistema de predicción lineal. El factor de amortiguamiento σ_n y la frecuencia f_n se calculan a partir de la raíz λ_n con la ecuación (4).

$$\lambda^N - a_1 \lambda^{N-1} - \dots - a_{N-1} \lambda - a_N = (\lambda - \lambda_1)(\lambda - \lambda_2) \dots (\lambda - \lambda_n) \dots (\lambda - \lambda_N) \quad (7)$$

En el último paso, se obtienen las magnitudes A_n y los ángulos de fase θ_n a partir de la siguiente expresión:

$$Y = \Phi B \quad (8)$$

Donde:

$$\mathbf{Y} = [y_0 \quad y_1 \quad \dots \quad y_{M-1}]^T \quad (9) \quad \Phi = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \lambda_1 & \lambda_2 & \dots & \lambda_N \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \lambda_1^{M-1} & \lambda_2^{M-1} & \dots & \lambda_N^{M-1} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{B} = [B_1 \quad B_2 \quad \dots \quad B_N]^T \quad (11)$$

La magnitud A_n y el ángulo de fase θ_n se calculan a partir de la ecuación (3).

2.2 Comparación entre el análisis de Prony y la Transformada de Fourier

Para señales amortiguadas de la forma $e^{\delta t} \cos(2\pi f t)$, la relación entre la magnitud que se obtiene a partir de la Transformada de Fourier de dicha señal y la magnitud de la señal propiamente dicha se define como:

$$k = \frac{e^{\delta T} - 1}{\delta T} \quad (12)$$

Donde T es la duración de la ventana temporal de la FFT y δ es el amortiguamiento.

- Si el amortiguamiento es $\delta = -5$ ($\tau = 0.2$ s) y el ancho de la ventana temporal de la FFT es $T = 1$ s (para lograr una resolución en frecuencia de 1 Hz) la relación es $k = 0.1986$.
- Si el amortiguamiento es $\delta = -5$ ($\tau = 0.2$ s) y el ancho de la ventana temporal de la FFT es $T = 10$ s (para lograr una resolución en frecuencia de 0.1 Hz) la relación es $k = 0.02$.

Estos resultados indican que existe una relación de compromiso en el uso de la FFT como herramienta de análisis de señales amortiguadas. Si se desea aumentar la resolución en frecuencia se debe aumentar el ancho de la ventana temporal, lo que aumenta el error en la estimación de amplitud de las señales oscilatorias amortiguadas. Esta limitación no está presente en el método de Prony, ya que está inherentemente diseñado para estimar amplitud, amortiguamiento y frecuencia de señales oscilatorias amortiguadas. A modo de ejemplo, en la Fig. 2 se presenta el procesamiento de la corriente de una de las máquinas de CTPB, con la FFT y con el método de Prony. En ambos casos se realiza un análisis deslizante ciclo a ciclo, con un ancho de ventana temporal de 1 s para la FFT y de 0.2 ms para el Prony.

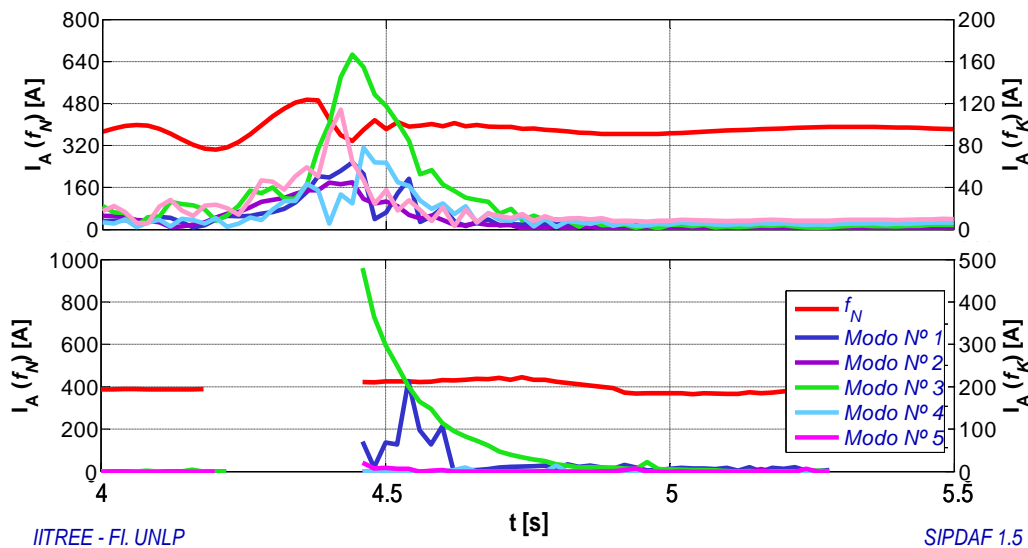


Fig. 2. Comparación de resultados del análisis con FFT (gráfico superior) y con Prony (gráfico inferior).

En la componente de corriente del modo 3 (curva verde, de frecuencia 21.2 Hz) se observa una estimación muy similar de la frecuencia y del amortiguamiento con ambos métodos. Sin embargo, en la medición de la amplitud el método de Prony estima un valor 3 veces mayor que el resultado que provee la FFT. Esto es debido a que, con la FFT, la magnitud de la señal está promediada por el ancho de la ventana temporal utilizada (1 s).

3 ESTUDIO DE UN CASO REAL

Como caso de estudio se analizaron los registros trifásicos de corrientes y tensiones obtenidos durante una Falla bifásica en 500 kV que se produjo en la línea Choele-Choel Bahía Blanca 2, el día 22-07-2009 a las 07:02 hs.

Configuración pre-falla: Configuración normal con la línea de 500 kV Chocón Oeste – Piedra del Águila 2 fuera de servicio por razones operativas. La transmisión por el corredor Comahue era de 1689 MW.

Descripción cronológica de eventos: A la hora señalada se produjo el desenganche de la línea de 500 kV Choele Choel – Bahía Blanca 2 (5BBCL2) en ambos extremos, señalizando actuación de la protección de

línea con excitación de fases R y S. Conjuntamente se produjo el desenganche de la línea de 500 kV Bahía Blanca – Olavarría 1 (5BBOL1), señalizando actuación de la protección de impedancia del reactor de línea R3L5BB por componente subsincrónica y Transferencia de Disparo Directo (TDD). Por recurso post-falla desconectó el reactor de barras R1B5BB en la ET BB.

Causas: Falla en la línea 5BBCL2 durante intensa nevada en zona de la ET BB.

Pérdida de aporte: No hubo.

Configuración post-falla: Idem configuración pre-falla, con las líneas 5BBCL2, 5BBOL1 y el reactor R1B5BB fuera de servicio.

En las Figuras 3 a 6 se presentan los oscilogramas de las tensiones y corrientes registradas durante la falla.

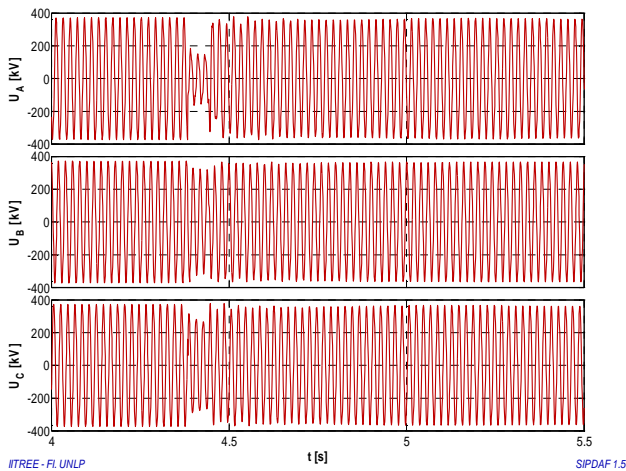


Fig. 3. 22/07/2009 7:02. Tensiones 5LPG29.

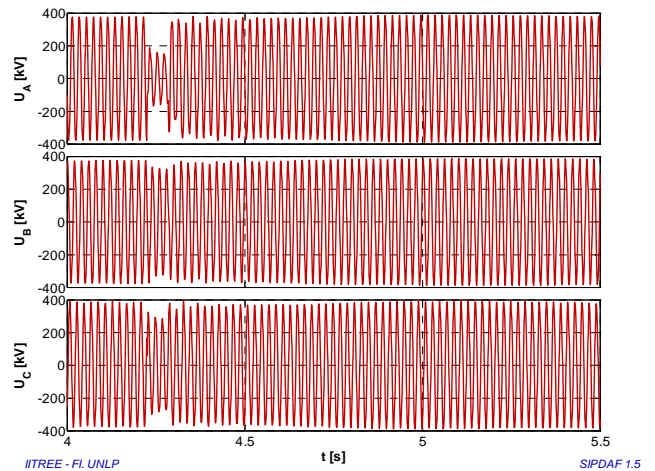


Fig. 4. 22/07/2009 7:02. Tensiones 5LPG30.

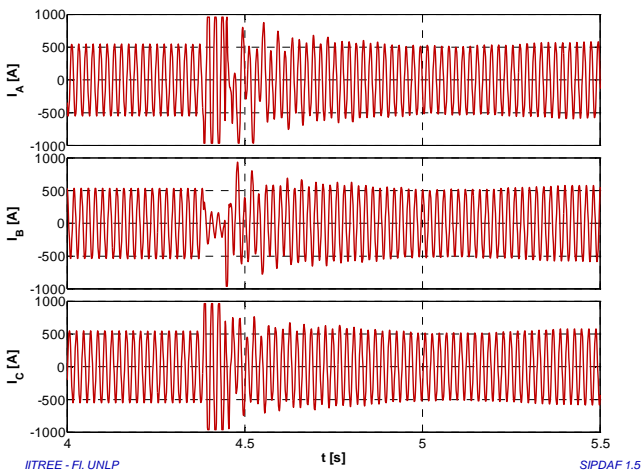


Fig. 5. 22/07/2009 7:02. Corrientes 5LPG29.

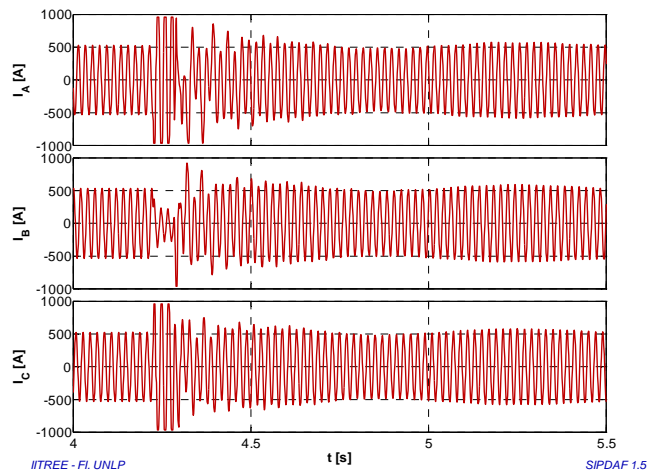


Fig. 6. 22/07/2009 7:02. Corrientes 5LPG30.

A cada una de las tensiones y corrientes medidas se le aplica el algoritmo de Prony deslizante ciclo a ciclo, por medio del cual se pretendió detectar cuatro modos subsincrónicos y la frecuencia de red en las siguientes bandas de exploración: Modo N° 1: 8 ± 3 Hz, Modo N° 2: $15 \pm 1,5$ Hz, Modo N° 3: 20 ± 3 Hz, Modo N° 4: $29 \pm 1,5$ Hz, Modo N° 5: 36 ± 3 Hz y f_N : 50 ± 3 Hz.

En las Figuras 7 a 14 se muestran las trazas de amplitud de los modos subsincrónicos explorados para este evento, y en la Tabla I se muestran las frecuencias y las correspondientes magnitudes expresadas en valores eficaces.

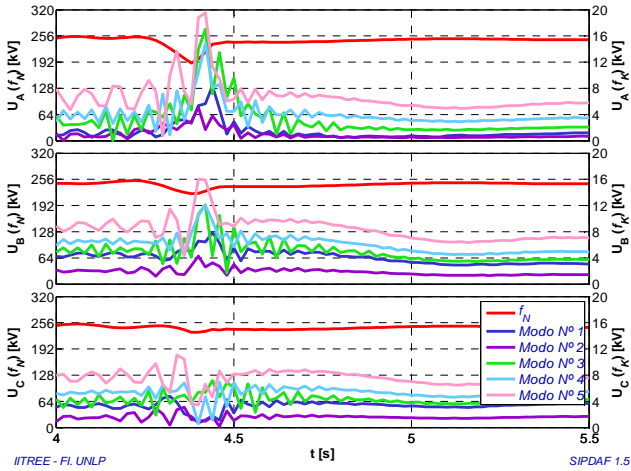


Fig. 7. Tensiones 5LPG29. Método FFT.

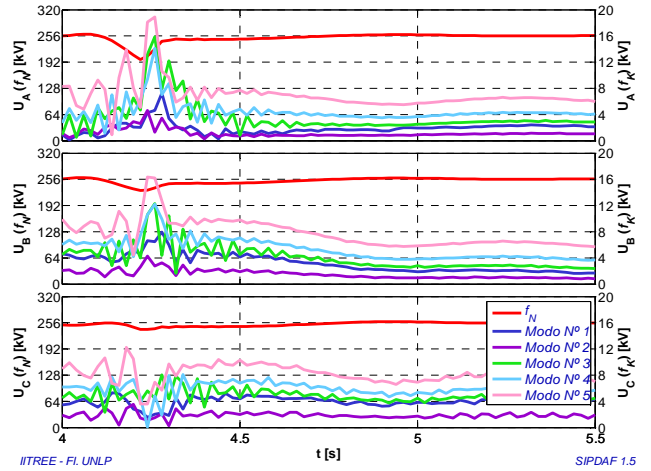


Fig. 8. Tensiones 5LPG30. Método FFT.

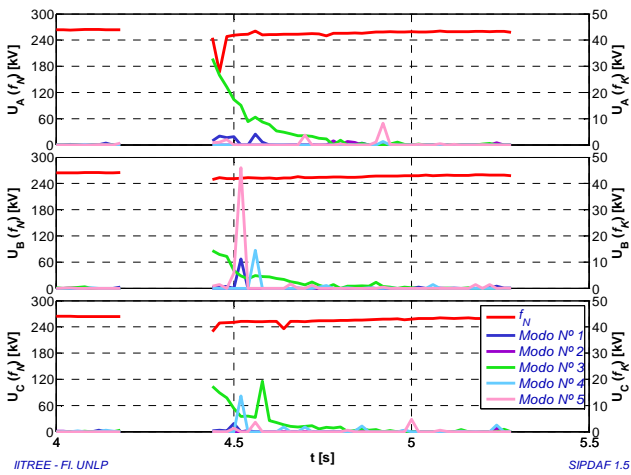


Fig. 9. Tensiones 5LPG29. Método Prony.

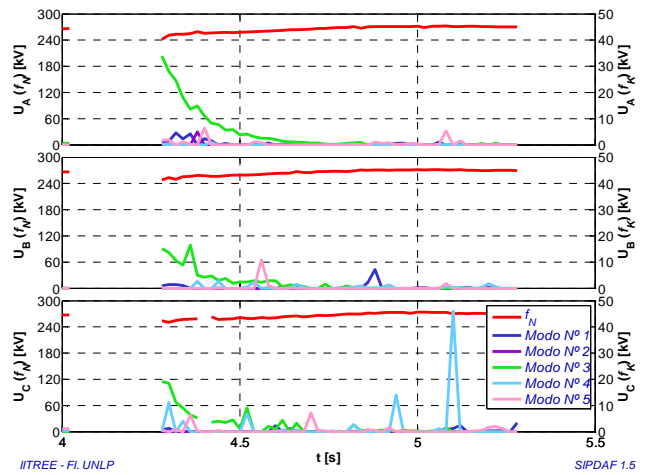


Fig. 10. Tensiones 5LPG30. Método Prony.

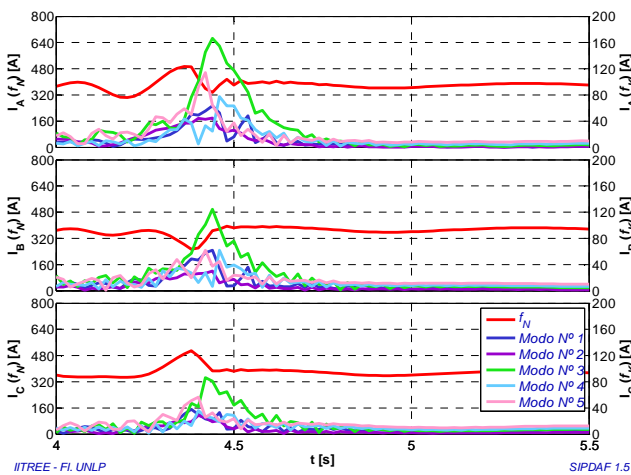


Fig. 11. Corrientes 5LPG29. Método FFT.

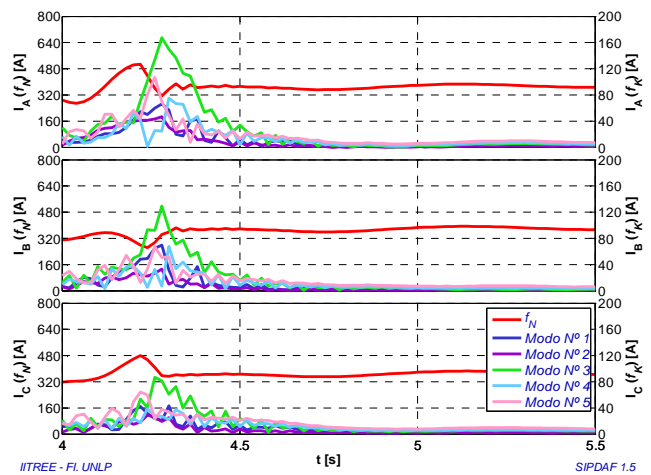


Fig. 12. Corrientes 5LPG30. Método FFT.

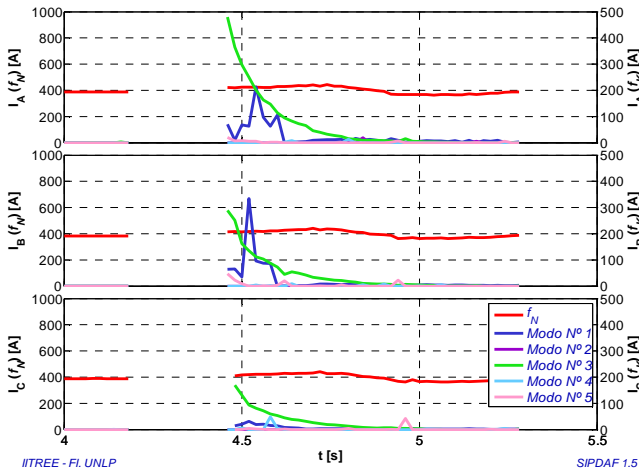


Fig. 13. Corrientes 5LPG29. Método Prony.

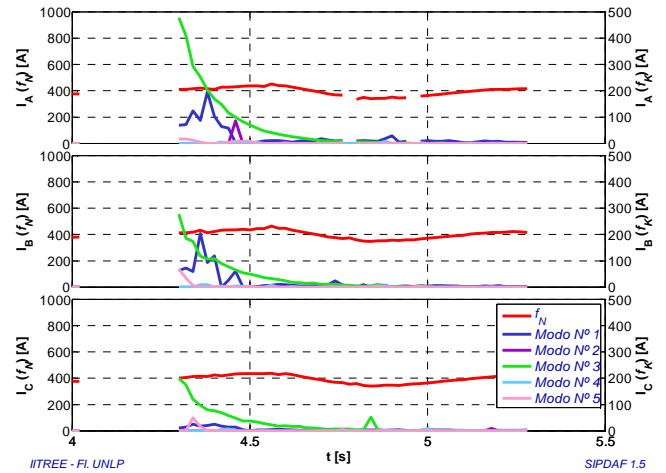


Fig. 14. Corrientes 5LPG30. Método Prony.

La caracterización de cada modo subsincrónico detectado y de la de frecuencia de red, en cada punto del análisis deslizante, se efectúa mediante el promedio pesado de las frecuencias detectadas en cada banda de exploración, y el correspondiente valor eficaz máximo. Los tramos discontinuados en las trazas del Método de Prony corresponden al intervalo en que la falla se encuentra dentro de la ventana de análisis de Prony, donde los resultados no son válidos. La longitud de dicho intervalo es equivalente a la suma de la duración temporal de la ventana de Prony y la duración temporal de la falla. Los resultados arrojados por el análisis de Prony son precisos a partir del inicio de la post-falla.

En la Tabla II se presentan los resultados obtenidos con el procesamiento a partir del método de Prony, que consisten en los valores promedio de las frecuencias detectadas en cada banda de exploración y de sus amplitudes, tanto para las tensiones como para las corrientes.

TABLA II. FRECUENCIA DE RED Y MODOS SUBSINCRÓNICOS EN TENSIONES Y CORRIENTES

Tensiones 5LPG29

	Fase A		Fase B		Fase C	
	f [Hz]	U [kV]	f [Hz]	U [kV]	f [Hz]	U [kV]
f_N	49,93	264,4	49,93	265,0	49,94	264,3
Modo N° 1	7,56	4,2	8,26	11,3	9,47	3,2
Modo N° 2	15,26	1,6	14,61	0,1	15,64	1,5
Modo N° 3	20,50	33,0	21,00	14,4	20,55	19,3
Modo N° 4	28,42	1,4	28,73	14,5	28,96	13,7
Modo N° 5	36,04	8,4	35,48	46,1	35,14	4,8

Corrientes 5LPG29

	Fase A		Fase B		Fase C	
	f [Hz]	I [A]	f [Hz]	I [A]	f [Hz]	I [A]
f_N	49,93	444,5	49,93	441,5	49,93	442,3
Modo N° 1	6,76	213,7	6,68	334,0	6,49	32,1
Modo N° 2	15,03	19,4	15,10	0,1	14,26	0,3
Modo N° 3	21,16	480,1	21,42	288,9	20,91	170,3
Modo N° 4	29,22	13,9	28,93	10,0	29,78	49,7
Modo N° 5	34,76	20,7	35,58	47,9	35,94	43,4

Tensiones 5LPG30

	Fase A		Fase B		Fase C	
	f [Hz]	U [kV]	f [Hz]	U [kV]	f [Hz]	U [kV]
f_N	49,93	272,3	49,93	271,7	49,94	274,0
Modo N° 1	7,88	4,7	8,29	7,3	8,77	3,4
Modo N° 2	14,62	5,1	15,42	0,4	15,07	0,6
Modo N° 3	20,83	33,9	20,68	16,5	20,58	19,1
Modo N° 4	29,17	1,0	28,97	2,8	29,04	46,0
Modo N° 5	35,80	6,5	36,86	10,9	35,81	7,3

Corrientes 5LPG30

	Fase A		Fase B		Fase C	
	f [Hz]	I [A]	f [Hz]	I [A]	f [Hz]	I [A]
f_N	49,90	452,1	49,91	464,1	49,90	438,8
Modo N° 1	6,67	195,4	6,88	203,5	6,54	25,9
Modo N° 2	14,23	86,5	14,92	8,9	15,69	9,4
Modo N° 3	21,21	477,6	21,04	277,3	20,83	199,2
Modo N° 4	29,31	7,5	28,79	9,2	29,11	9,5
Modo N° 5	34,87	17,4	35,12	68,1	35,73	50,0

Se encuentra que el Modo N° 3 es el que prepondera y para este modo se determinó una frecuencia de alrededor de 21.2 Hz. El tiempo de extinción de este modo es inferior a 0,4 s.

Los valores de frecuencia determinados para el único modo preponderante durante los transitorios analizados se encuentran considerablemente apartados de las frecuencias complementarias de los modos torsionales de

las máquinas, siendo las más cercanas 15,2 Hz y 29.2 Hz. Los apartamientos del modo preponderante con respecto a las frecuencias de 15,2 Hz y 29.2 Hz resultaron de 6 Hz y 8 Hz respectivamente.

Procediendo de manera similar, se realiza el procesamiento sobre la potencia entregada por cada una de las unidades. Este análisis realizado sobre la potencia eléctrica es particularmente útil, ya que la forma de onda de la potencia eléctrica es igual en p.u. a la forma de onda del torque electromecánico.

En este caso, se hace un seguimiento de las frecuencias torsionales del eje y no de sus frecuencias complementarias. Adicionalmente, se realiza un seguimiento de la frecuencia de oscilación electromecánica, que se nota claramente en la traza de potencia eléctrica. Es decir, se consideran las siguientes bandas de exploración: Modo N° 1: $2,1 \pm 2$ Hz, Modo N° 2: 14 ± 2 Hz, Modo N° 3: 21 ± 2 Hz, Modo N° 4: 29 ± 2 Hz y Modo N° 5: 35 ± 2 Hz. Los resultados de este procesamiento se muestran en Figuras 15 y 16 y en Tabla III.

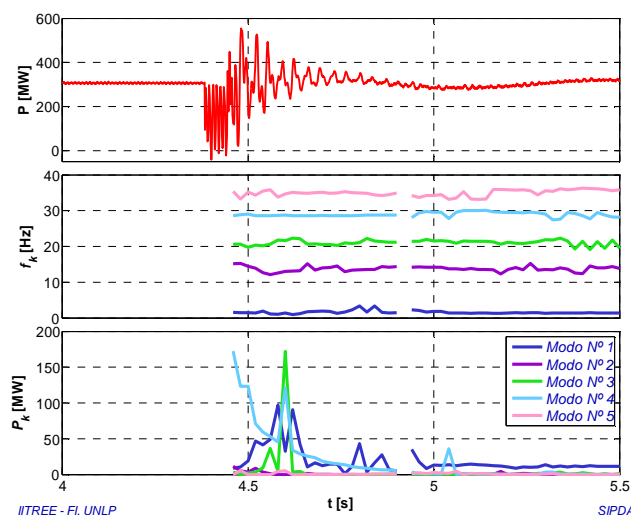


Fig. 15. Potencia 5LPG29. Inicio de post-falla: 4,46 s

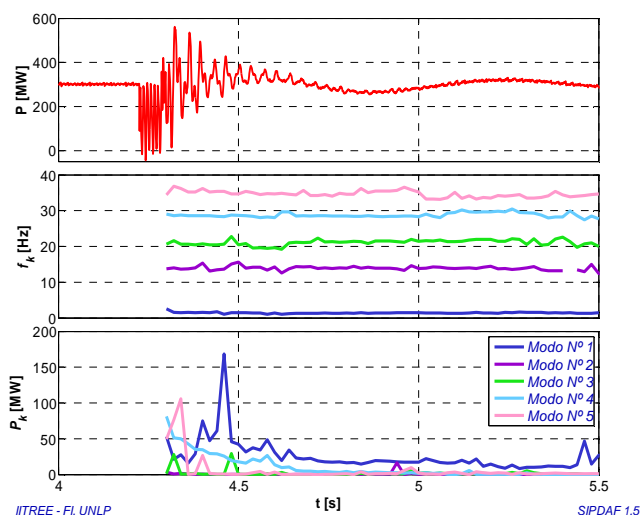


Fig. 16. Potencia 5LPG30. Inicio de post-falla 4,3 s

TABLA III. MODOS SUBSINCRÓNICOS DETECTADOS EN LA POTENCIA TRIFÁSICA

Componente	5LPG29		5LPG30	
	f [Hz]	P [MW]	f [Hz]	P [MW]
Modo N° 1	1,46	168,5	1,63	97,0
Modo N° 2	13,89	16,7	13,80	11,6
Modo N° 3	21,10	29,5	21,12	172,3
Modo N° 4	28,76	81,5	28,98	172,5
Modo N° 5	34,67	106,2	35,00	6,1

De los resultados obtenidos se encuentra, para la potencia de la máquina 29 una componente de alrededor de 29 Hz (cuya complementaria de 21 Hz se observa claramente en la corriente). Dicha componente de tiene una amplitud de 170 MW (0.55 p.u.) y se atenúa completamente en 0.4 segundos.

4 CONCLUSIONES

La herramienta de análisis desarrollada, basada en el método de Prony deslizante, demuestra ser extremadamente útil para detectar la presencia de componentes subsincrónicas en la tensión, en la corriente y en la potencia eléctrica. Y además, lo que es aún más importante, permite medir con precisión dichas componentes subsincrónicas como así también conocer su evolución temporal.

5 REFERENCIAS

- [1] "SSR Studies in Argentina for the Bahía Blanca Generating Plant". International Power System Transients Conference, Seattle, USA, 23 al 27 de junio de 1997. Autores: J. A. Nizovoy, J. L. Alonso, A. C. Alvarez, L. M. Bouyssede.
- [2] "Time-Varying Waveforms Distortions in Power Systems". Paulo F. Ribeiro. John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-71402-7.