



**Décimo Quinto Encuentro Regional
Ibero-americano del CIGRÉ
Foz de Iguazú-PR, Brasil
19 al 23 de mayo de 2013**



**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA LA
DETECCIÓN DE MODOS DE OSCILACIÓN EN SISTEMAS DE POTENCIA
BASADA EN EL ANÁLISIS DE PRONY**

P.E. Issouribehere*

J.C. Barbero*

F. Issouribehere*

*** IITREE FI-UNLP**

RESUMEN

Se describen las técnicas adoptadas y las consideraciones efectuadas en el desarrollo e implementación de un programa de computadora basado en el método de Prony, para analizar modos de oscilaciones subsincrónicas en sistemas de potencia.

La herramienta informática desarrollada fue contrastada exhaustivamente con simulaciones, con registros obtenidos en laboratorio con generador de forma de onda de tensiones y corrientes, y con presencia de ruido, como así también con registros reales de fallas obtenidos en campo.

En este trabajo se presentan los resultados de las pruebas efectuadas para validar la herramienta y las conclusiones de estos estudios.

PALABRAS-CLAVE

Método de Prony, análisis modal, oscilaciones subsincrónicas, análisis espectral

1. INTRODUCCIÓN

La técnica tradicional utilizada para la detección de oscilaciones en oscilogramas digitalizados de las tensiones y corrientes en un nodo de la red es la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Este método es aplicable en la mayoría de los casos, pero no resulta eficaz para analizar fenómenos transitorios de corta duración, en particular para detectar componentes subsincrónicas en las variables eléctricas registradas en el estudio de interacciones red - máquinas sincrónicas.

El método de Prony permite modelar señales muestreadas como una combinación de sinusoides amortiguadas, minimizando el error cuadrático medio entre la señal real y la señal estimada, determinando todos los parámetros de cada componente presente en las variables registradas: amplitud, frecuencia y amortiguamiento.

En este trabajo se describen las técnicas adoptadas y consideraciones efectuadas para desarrollar e implementar un programa de computadora basado en el método de Prony con el cual se obtuvieron los resultados que fueron presentados en [1].

Se describen los aspectos que se tuvieron en cuenta para reducir la susceptibilidad al ruido presente en las señales que se obtienen en campo con instrumentos de adquisición convencionales, permitiendo procesar directamente los registros obtenidos sin prefiltrado.

La herramienta informática desarrollada fue contrastada exhaustivamente con formas de onda sintetizadas en Matlab, como así también con registros obtenidos en laboratorio con generador de



**Décimo Quinto Encuentro Regional
Ibero-americano del CIGRÉ
Foz de Iguazú-PR, Brasil
19 al 23 de mayo de 2013**



forma de onda de tensiones y corrientes, y además con registros reales de fallas obtenidos en campo. En lo que sigue se describen los detalles de las pruebas realizadas, los aspectos fundamentales tenidos en cuenta en la implementación de la herramienta informática, y los resultados y conclusiones de las verificaciones efectuadas.

2. PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA

Con frecuencia se ha considerado al método de Prony de eficacia muy pobre y ha sido cuestionado por brindar resultados inconsistentes con señales contaminadas por ruido. Sin embargo lo atractivo del método supera estas críticas y continúa siendo aún muy empleado.

Las inconsistencias de los resultados del método de Prony surgen cuando la señal analizada se aparta, aunque sea mínimamente, de una curva lisa y uniforme, como la que se puede obtener como resultado de una simulación. Esto es, cuando se procesa un oscilograma real obtenido mediante un adquisidor efectuando un análisis deslizante ciclo a ciclo para explorar la evolución temporal de modos de oscilación presentes en una o más bandas de frecuencias, los resultados obtenidos en ciclos sucesivos (frecuencia amplitud y amortiguamiento del modo del modo) pueden diferir notablemente de un ciclo al siguiente.

Esto se debe a que dentro de las bandas de frecuencia exploradas se detectan los modos que realmente están presentes en el fenómeno o bien en la dinámica del sistema, pero además aparecen modos espúreos, que contaminan el resultado del análisis, cuya única función es la de ajustar el ruido inherente de la señal.

Los modos espúreos resultan dependientes de la ventana de Prony adoptada (la longitud del segmento de señal a procesar para hacer el ajuste) como así también del paso de decimación elegido para el análisis o factor de submuestreo adoptado para reducir el tamaño de los datos a procesar.

Además, tanto el ancho de la ventana temporal como el paso de decimación determinan directamente tanto la eficiencia como la eficacia del proceso.

El ancho de la ventana temporal que hará más eficiente el proceso será la menor longitud de muestras posible, que debe ser compatible con una eficacia aceptable para detectar la frecuencia del modo más bajo que se pretende. Por lo tanto debería abarcar no menos de medio ciclo de dicha frecuencia.

El paso de decimación que hará más eficiente el análisis será aquél que corresponda a un submuestreo tal que determine al menos cuatro puntos del ciclo de la frecuencia más elevada que se pretende detectar. El efecto de un paso de decimación o factor de submuestreo muy grande, se manifestará en el dominio de la frecuencia como *aliasing*, dando lugar a la aparición de modos espúreos.

3. IMPLEMENTACIÓN DE LA HERRAMIENTA INFORMÁTICA

El análisis de Prony se realiza aplicando una ventana temporal de ancho fijo, deslizante ciclo a ciclo (20 ms), detectando la presencia de modos de oscilación dentro de bandas de exploración especificadas por el usuario. El ancho de la ventana de Prony queda determinado por la frecuencia del modo más bajo que se pretende detectar: debe abarcar no menos de medio ciclo de dicha frecuencia.

La robustez del algoritmo se logró dotándolo de la capacidad de identificar las componentes válidas resultantes del análisis de cada ventana de la forma de onda analizada.

Esto se consiguió efectuando para cada segmento de la forma de onda, distintos análisis de Prony con diferentes pasos de decimación. Normalmente hacerlo con dos valores resulta suficiente.

En cada ventana temporal del análisis de Prony, para cada paso de decimación considerado, primero se depuran las componentes resultantes considerando su amortiguamiento: las componentes con amortiguamiento muy grande son descartadas.

Las componentes no descartadas, obtenidas con los distintos pasos de decimación, que se encuentran en una misma banda de exploración especificada, se componen según el siguiente criterio:

- Las magnitudes se determinan por suma la vectorial dividida por el número de componentes encontradas en la banda.
- Las frecuencias se promedian en forma pesada por la amplitud.
- Los amortiguamientos se promedian en forma pesada por la amplitud.

4. VERIFICACIÓN DE LA HERRAMIENTA INFORMÁTICA

Con el objeto de verificar la implementación efectuada, se empleó un criterio ya utilizado por el IITREE-UNLP para ensayar monitores-registradores de frecuencia y de cambio de frecuencia, empleados en el Sistema Interconectado de la Argentina, que consiste en la aplicación de rampas de frecuencia.

Las características configuradas para el algoritmo fueron las siguientes:

Bandas de frecuencias a explorar: $50 \pm 2,2$ Hz; 20 ± 3 Hz y 8 ± 3 Hz.

Ancho de la ventana de análisis: 0,16 s, equivalente a 8 ciclos de 50 Hz y a 0,8 ciclos de 5 Hz (límite inferior de la banda de exploración inferior). En ningún caso se emplea prefiltrado de la señal analizada.

4.1 Prueba con rampas de frecuencia

Se genera una tensión sinusoidal de amplitud constante 100 V (70 V eficaces) con frecuencia f variable según la ley de variación indicada en la Figura 1, con rampas de frecuencia que incluyen pendientes de ± 1 Hz/s y -0.1 Hz/s, cubriendo así todo el rango dinámico de interés práctico.

Cabe destacar que las rampas de frecuencia se lograron con una variación uniforme entre los valores extremos del tramo con pendiente, ciclo a ciclo de funciones coseno (es decir concatenándolas en el máximo positivo).

La forma de onda se sintetizó en Matlab con una tasa de muestreo de 3,2 kHz (tiempo entre muestras de $312,5 \cdot 10^{-6}$ s).

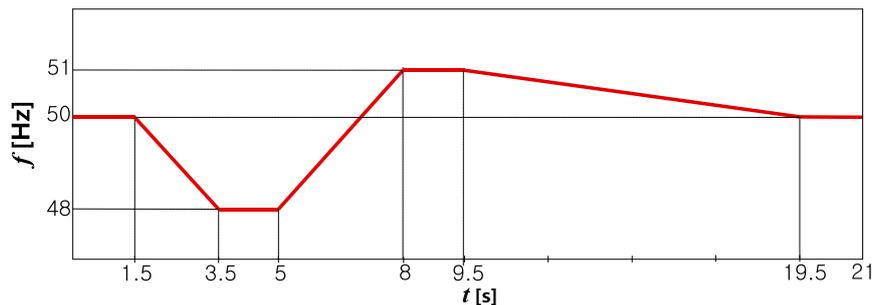


Figura 1. Señal de frecuencia variable para el ensayo de rampas de frecuencia.

4.1.1 Verificación mediante la forma de onda generada en Matlab

Como primera verificación se comparó la eficacia de la herramienta bajo prueba para detectar la evolución temporal de la frecuencia sintetizada en Matlab dentro de la banda dedicada a la exploración de la frecuencia de la red ($50 \pm 2,2$ Hz), con pasos de decimación de 8-12 muestras. En la Figura 2 se muestran los resultados de la detección de la frecuencia presente en la banda de exploración tanto con el método de Prony como con el método de detección de cruces por cero.

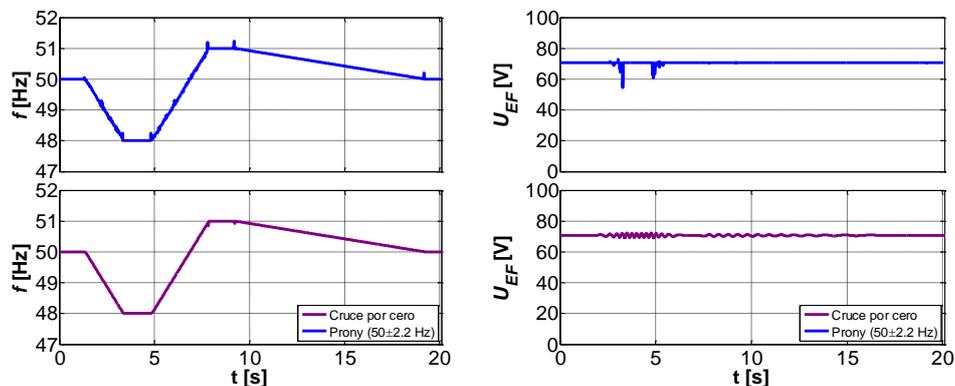


Figura 2. Detección de la evolución de la frecuencia sobre la forma de onda sintetizada en Matlab.

Se encuentra que la detección es correcta en lo que concierne a la evolución temporal tanto de la frecuencia como de la amplitud de la onda bajo análisis.

4.1.2 Verificación mediante la forma de onda adquirida con un registrador

El siguiente paso fue volcar la forma de onda sintetizada en Matlab a una valija Megger MPRT 8430, con la cual se obtuvo una tensión de salida de 100 V de amplitud que fue registrada mediante un registrador Hioki 8855, a una tasa de muestreo de 10 kHz.

Esta prueba tuvo por finalidad verificar la herramienta con un oscilograma obtenido por muestreo mediante un registrador convencional.

En la Figura 3 se muestran los resultados de la detección de la frecuencia presente en la banda de exploración tanto con el método de Prony como con el método de detección de cruces por cero. Los pasos de decimación empleados fueron: 38 – 42 muestras.

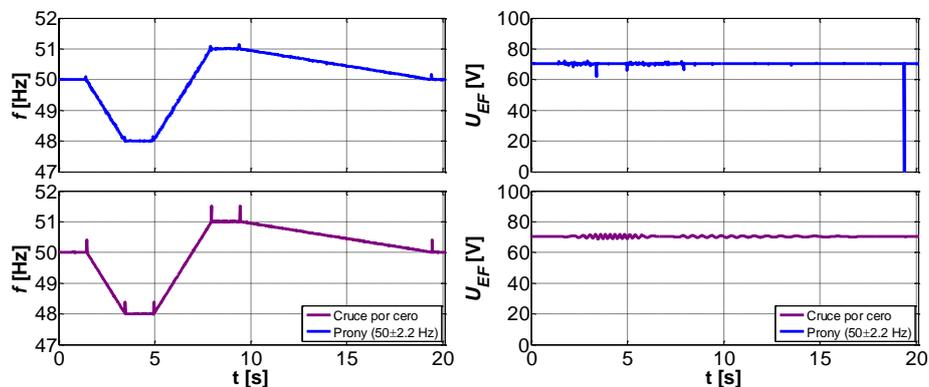


Figura 3. Detección de la evolución de la frecuencia sobre la forma de onda adquirida con registrador Hioki 8855.

En este caso también la detección es correcta en lo que concierne a la evolución temporal tanto de la frecuencia como de la amplitud de la onda bajo análisis, no apreciándose diferencia respecto de la forma de onda sintetizada.

4.2 Prueba con rampas de frecuencia y escalones de amplitud

En este caso la tensión generada es sinusoidal con frecuencia f variable según la ley de variación antes indicada (Figura 1), con una amplitud modulada por escalones como se indica en la Figura 4.

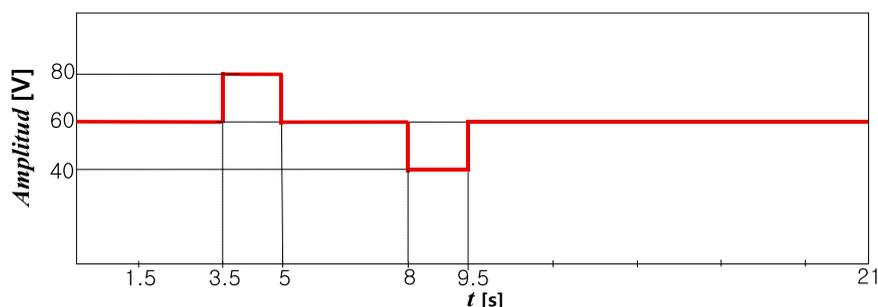


Figura 4. Modulación de amplitud aplicada a la señal de frecuencia variable.

La forma de onda se sintetizó en Matlab con una tasa de muestreo de 3,2 kHz (tiempo entre muestras de $312,5 \cdot 10^{-6}$ s). Las características de la forma de onda sintetizada se muestran en la Figura 5.

4.1.1 Forma de onda sintetizada en Matlab sin ruido

En la Figura 5 se muestra la forma de onda sintetizada y un detalle de la porción señalada en la vista completa. El detalle mostrado sirve para explicar las muescas y picos que se aprecian en las trazas de

amplitud y frecuencia detectadas y esto se debe a que los empalmes entre los distintos tramos de la forma de onda sintetizada se efectúan en los máximos positivos.

Por lo tanto, al producir un escalón de amplitud, se produce una discontinuidad en la forma de onda que repercute sobre las trazas de amplitud y frecuencia detectada como si se tratara de una falla y, en el proceso de deslizamiento de la ventana de análisis de Prony, mientras esta discontinuidad se ubique dentro de la ventana, la detección tanto de la frecuencia como de la amplitud estarán afectadas de error (ver apartado 5).

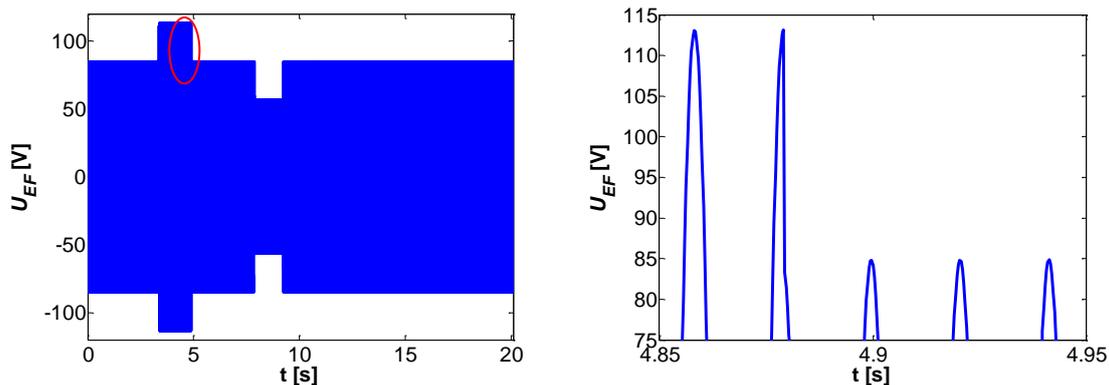


Figura 5. Señal de frecuencia variable y amplitud variable sintetizada en Matlab.

En la Figura 6 se muestran los resultados de la detección de la frecuencia presente en la banda de exploración tanto con el método de Prony como con el método de detección de cruces por cero. Los pasos de decimación empleados fueron de 8-12 muestras.

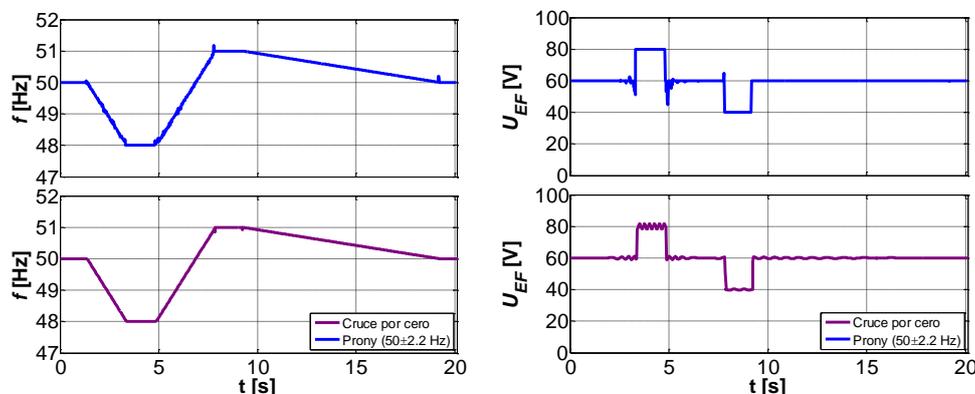


Figura 6. Detección de la evolución de la frecuencia y la amplitud de la forma de onda de frecuencia variable y amplitud variable sintetizada en Matlab.

La detección es correcta en lo que concierne a la evolución temporal tanto de la frecuencia como de la amplitud de la onda bajo análisis, no apreciándose diferencia respecto de la forma de onda sintetizada.

4.1.1 Forma de onda sintetizada en Matlab con presencia de ruido

En la Figura 7 se muestra la forma de onda sintetizada y un detalle de la porción señalada en la vista completa. La forma de onda sintetizada es la misma de la Figura 5 a la que se le adiciona una magnitud aleatoria de $\pm 0,06$ pu. El detalle mostrado permite apreciar el efecto sobre el oscilograma a analizar.

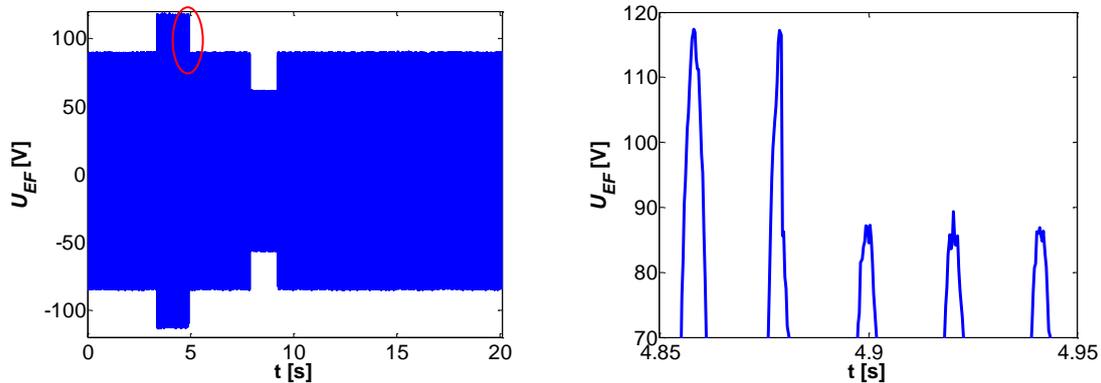


Figura 7. Señal de frecuencia variable y amplitud variable sintetizada en Matlab.

En la Figura 8 se muestran los resultados de la detección de la frecuencia presente en la banda de exploración tanto con el método de Prony como con el método de detección de cruces por cero. Los pasos de decimación empleados fueron de 8-12 muestras.

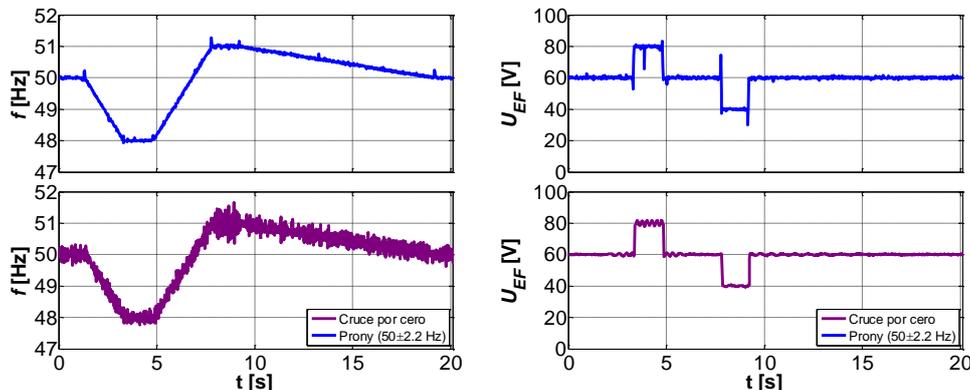


Figura 8. Señal de frecuencia variable y amplitud variable sintetizada en Matlab.

Con el método de Prony, la detección de la frecuencia variando dentro de la banda de exploración se logra muy bien, al igual que la detección de la amplitud, con los mismos efectos producidos por las discontinuidades en la señal de prueba que se observaron anteriormente.

Como cabía esperar, la determinación de la frecuencia por detección de los cruces por cero, resulta seriamente afectado por el ruido.

4.2 Prueba con rampas de frecuencia de red y frecuencias subsincrónicas

Se genera forma de onda de tensión constituida por las siguientes tres componentes:

- una tensión sinusoidal de amplitud constante 100 V (70 V eficaces) con frecuencia f variable entre los valores 50 Hz, 48 Hz y 51 Hz, según la ley de variación indicada en la Figura 1
- una tensión sinusoidal de amplitud constante 5 V (3,5 V eficaces) con frecuencia f variable entre los valores 20 Hz, 18 Hz y 22 Hz, según la ley de variación indicada en la Figura 9.
- una tensión sinusoidal de amplitud constante 5 V (3,5 V eficaces) con frecuencia f variable entre los valores 8 Hz, 6 Hz y 10 Hz, según la ley de variación indicada en la Figura 9.

La forma de onda se sintetizó en Matlab con una tasa de muestreo de 3,2 kHz (tiempo entre muestras de $312,5 \cdot 10^{-6}$ s).

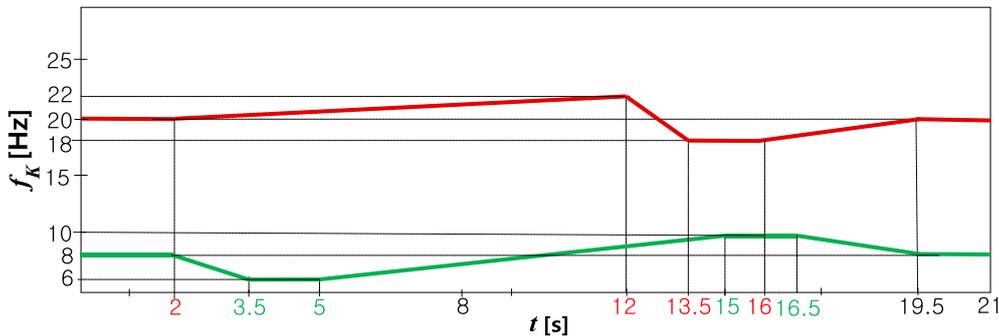


Figura 9. Señal de frecuencia variable para la prueba con rampas de frecuencia de red y frecuencias subsincrónicas.

En la Figura 10 se muestran los resultados de la detección de los modos encontrados en las respectivas bandas de exploración con el método de Prony, y la determinación de la frecuencia que se obtiene con el método de detección de cruces por cero. Los pasos de decimación empleados fueron de 8-12 muestras.

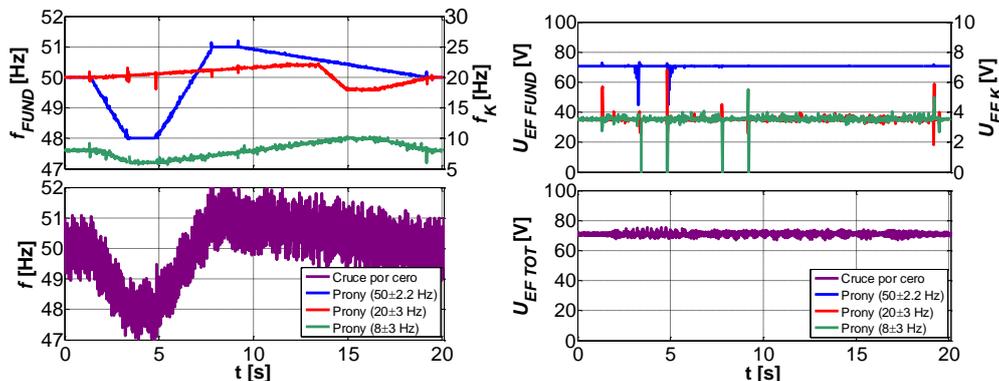


Figura 10. Señal de frecuencia variable con dos componentes de oscilación subsincrónica.

Se observa que el método de Prony con el criterio de detección de las frecuencias realmente presentes en la dinámica del sistema que se indicó resulta efectivo para determinar la evolución temporal de la frecuencia de red tanto como de frecuencias subsincrónicas.

Como cabía esperar, el método de cruces por cero resulta extremadamente afectado por la presencia de las componentes subsincrónicas.

5. ANÁLISIS DE REGISTROS REALES

Anteriormente se hizo mención al efecto causado por la aparición de discontinuidades en la forma de onda dentro de la ventana de análisis de Prony, las cuales dan lugar a errores en el ajuste tanto en la frecuencia como en la amplitud de los modos detectados.

El mismo efecto aparece cuando se analiza un registro en el cual se ha producido un evento transitorio debido a una falla. Por lo tanto, el método de Prony arroja resultados incorrectos en la traza de la evolución temporal de la frecuencia y de la amplitud de los modos detectados en todo el intervalo en que la falla cae dentro de la ventana de ajuste.

Por tal razón, una premisa de diseño fue no realizar el análisis de Prony durante la falla. Esto fue así no solamente porque el análisis de Prony arroja resultados incorrectos durante la falla, sino además porque la falla es una condición transitoria de muy breve duración durante la cual el análisis modal carece de sentido. Por ello se dedicó un esfuerzo muy importante a la definición de un criterio confiable para detectar con precisión la zona abarcada por la falla.

Dado que la aplicación se implementó para registros trifásicos de tensiones y corrientes, la falla se detecta sobre la forma de onda de la corriente. El criterio consistió en la definición de dos niveles

umbral: uno para decidir el inicio de la falla y el otro para decidir el final de la falla.

En Figura 11 y Figura 12 se muestran los oscilogramas de una fase de tensión fase-neutro en barras de 500 kV y la correspondiente corriente, obtenidos al producirse una falla trifásica. En las mismas figuras se muestran los análisis correspondientes efectuados con la herramienta implementada. Los registros fueron obtenidos con una tasa de muestreo de 12,8 kHz (256 muestras por ciclo de 50 Hz). Los pasos de decimación considerados fueron 29 y 30 muestras y la longitud de la ventana de análisis 0,2 s. Se exploraron cinco modos subsincrónicos y la frecuencia de red en las siguientes bandas de exploración:

Modo N° 1: 8 Hz ± 3 Hz

Modo N° 3: 20,5 Hz ± 4 Hz

Modo N° 5: 36 Hz ± 3 Hz

Modo N° 2: 14 Hz ± 2 Hz

Modo N° 4: 29 Hz ± 3 Hz

f_N : 50 Hz ± 3 Hz

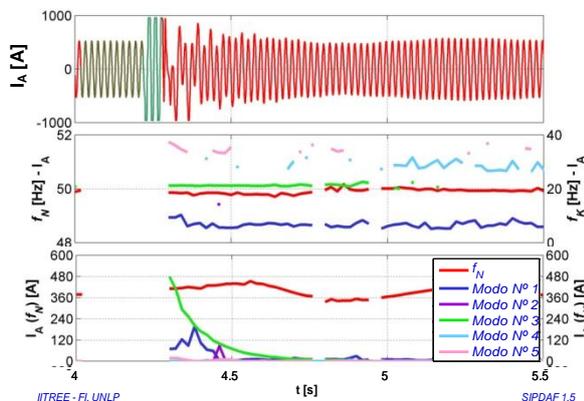


Figura 12. Análisis posfalla de un registro real de corriente en barras de 500 kV.

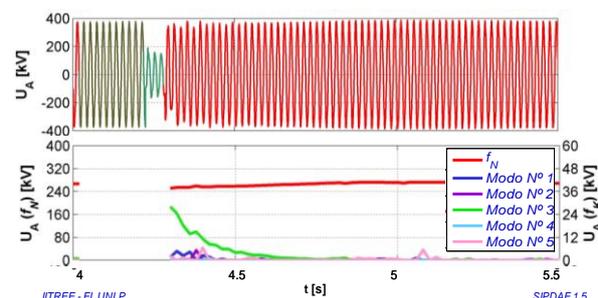


Figura 11. Análisis posfalla de un registro real de tensión en barras de 500 kV.

En los oscilogramas se indican en 4 colores diferentes las distintas zonas que interesan para el análisis de Prony efectuado:

- En verde olivo se muestra la región previa a la falla que se encuentra a menos de una ventana de análisis del inicio detectado de la falla.
- En verde oscuro está la zona comprendida entre el inicio y el final de la falla detectados.
- En rojo se encuentra la región donde el análisis de Prony arroja resultados válidos.

6. CONCLUSIÓN

La novedad de esta implementación reside en el hecho de no efectuar prefiltrado de la señal a analizar. El descarte de los modos espúreos se efectúa a partir del propio análisis de Prony realizado con diferentes pasos de decimación.

La herramienta de análisis ya se ha aplicado a centenares de registros trifásicos de tensiones y corrientes adquiridos en una ET de 500 kV, con la finalidad de evaluar la presencia de fenómenos de resonancia subsincrónica, y ha demostrado ser robusta y absolutamente confiable.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] “Análisis de oscilaciones subsincrónicas derivadas de fallas en sistemas de 500 kV. Experiencias de aplicación del método de Prony”. P. E. Issouribehere J. C. Barbero, F. Issouribehere y J. Rodríguez. XIV ERIAC. Ciudad del Este, Paraguay. Mayo, 2011. Trabajo C4.04.