



Identificación de los Modos de Oscilación de ITAIPU Utilizando el Método de Prony

Manuel Leonardo Sosa Ríos

ITAIPU Binacional

Paraguay

RESUMEN

Los modos de oscilación proveen información directa sobre el estado de la estabilidad de sistemas de potencia. Un modo de oscilación amortiguado negativamente provoca oscilaciones con amplitudes crecientes, que podrían resultar en desconexiones y cortes de carga. Este hecho indica la importancia en determinar de forma precisa los modos de oscilación de un sistema de potencia. Tradicionalmente, los modos de oscilación son obtenidos por medio del cálculo de autovalores, luego de linealizar las ecuaciones diferenciales que representan el modelo y describen la dinámica del sistema, en puntos de operación de interés. Sin embargo, obtener un modelo dinámico, preciso y coherente con el comportamiento real del sistema no es una tarea trivial. En este sentido, para complementar el análisis hecho por medio del cálculo de autovalores, han sido desarrolladas metodologías basadas en mediciones, obtenidas por registradores dinámicos. Estas metodologías requieren menor esfuerzo y tiempo para obtener un modelo dinámico y, por lo tanto, pueden complementar el método de análisis de autovalores en el monitoreo de oscilaciones en sistemas de potencia usando magnitudes reales. Entre estas metodologías, se encuentra el método de Prony, que ha presentado buenos resultados en la utilización de datos oscilatorios, correspondientes a perturbaciones registradas en un sistema dado. Este método consiste en la reconstrucción de una señal oscilatoria medida, con finitas muestras igualmente espaciadas en el tiempo, combinando linealmente términos exponenciales.

En la Central de ITAIPU están instalados registradores dinámicos de larga duración en los sectores de 50Hz y 60Hz, que registran tensión, frecuencia y las potencias activa y reactiva totales generadas en ambos sectores. Los registros dinámicos permiten visualizar las variaciones de estas cantidades, frente a desconexiones de unidades generadoras y a alteraciones en la configuración del sistema interconectado. Considerando estos factores, este trabajo propone una metodología de evaluación del desempeño dinámico de los sectores de 50Hz y 60Hz de ITAIPU frente a perturbaciones, mediante la identificación de los modos de oscilación, utilizando el método de Prony para el cálculo de sus índices, que incluyen la frecuencia de las oscilaciones electromecánicas y el factor de amortiguamiento. También son calculadas las energías de cada modo, lo que permite clasificarlos según su influencia en la oscilación. Además, se presenta cómo pueden ser utilizadas las informaciones proporcionadas por el método de Prony para ajustar estabilizadores de sistemas de potencia.

Los resultados obtenidos son comparados con los indicadores calculados por una metodología padrón (que utiliza variaciones pico a pico sucesivos y el intervalo entre dos picos, lo que hace necesario el registro de al menos dos ciclos para efectuar los cálculos, inconveniente que no presenta el método de Prony) y con las propias mediciones consideradas, verificándose la eficiencia y precisión de la metodología propuesta. La principal contribución de este trabajo es la propuesta de una metodología con mayor exactitud matemática para obtener índices relacionados a oscilaciones electromecánicas, cuyos cálculos son realizados utilizando valores medidos (no simulados), lo que evita un esfuerzo adicional en el modelamiento matemático preciso de los componentes del sistema de potencia.

PALABRAS CLAVES

Método de Prony, Autovalor, Oscilación electromecánica, Estabilidad angular, Modo de oscilación, Registrador dinámico.



XII SEMINARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

1 INTRODUCCIÓN

La alta interconexión de los sistemas de potencia, causado por la creciente demanda de electricidad, reduce la distancia eléctrica entre subestaciones de tal forma que cualquier disturbio, por ejemplo, desconexión de equipos, fallas en circuitos, etc., afecta áreas vecinas con similar intensidad [1]. Ese aumento en la demanda lleva a los sistemas de potencia a operar próximos a sus límites de sobrecarga, estado que propicia la posibilidad de registros de oscilaciones electromecánicas o angulares en generadores, consecuentes de modificaciones súbitas de la topología de la red, variaciones de carga o desconexiones de máquinas.

Las variaciones angulares son caracterizadas por modos de oscilación, que proveen información directa sobre la condición de estabilidad del sistema. Los modos de oscilación poco o negativamente amortiguados pueden resultar en oscilaciones electromecánicas crecientes y, consecuentemente, en desconexiones o cortes de carga. Este hecho indica la importancia de conocer con exactitud y precisión los modos de oscilación [2].

Generalmente, los modos de oscilación son calculados luego de la linealización de las ecuaciones diferenciales y algebraicas, que describen el comportamiento dinámico del sistema y representan el estado de la red [3]. Esta linealización permite el cálculo de los modos de oscilación o autovalores, que representan el estado de estabilidad del modelo matemático del sistema. Sin embargo, obtener un modelo matemático, coherente con el comportamiento real del sistema, no es una tarea fácil. Por ese motivo fueron desarrolladas metodologías basadas en mediciones, obtenidas por registradores. Esas metodologías requieren menor esfuerzo y tiempo para obtener un modelo dinámico y complementan el análisis de estabilidad, realizado con mediciones reales. Entre esas metodologías, se encuentra el método de Prony, que realiza la reconstrucción de una señal oscilatoria medida, obtenida en finitas muestras igualmente espaciadas en el tiempo, y combina linealmente términos exponenciales [2]. Estos cálculos permiten obtener los autovalores de la señal medida, posibilitando caracterizar la condición de estabilidad del sistema de potencia analizado.

En la Central de ITAIPU están instalados registradores dinámicos de larga duración en los sectores de 50Hz y 60Hz, que registran tensión, frecuencia y las potencias activa y reactiva totales de ambos sectores. Los registros dinámicos permiten visualizar las variaciones de estas cantidades frente a desconexiones de unidades generadoras y a alteraciones de la configuración del sistema interconectado [4]. Considerando estos factores, este trabajo propone una metodología de evaluación del desempeño dinámico de los sectores de 50Hz y 60Hz de ITAIPU frente a disturbios, mediante el cálculo de los modos de oscilación, utilizando el método de Prony [5], que proporcionan la frecuencia de las oscilaciones y el factor de amortiguamiento. Estos índices son calculados utilizando la señal de potencia activa total, generada en cada sector. Para reducir el impacto de ruidos, inherentes a mediciones, el método de Prony, presentado en este trabajo, utiliza un parámetro denominado factor de decimación, que permite aumentar el intervalo entre muestras, mejorando, de esta forma, la estimación de los modos electromecánicos [2]. También son calculadas las energías de cada modo, lo que permite clasificarlos según su influencia en la oscilación [6]. Además se detalla cómo utilizar esos índices para ajustar estabilizadores de sistemas de potencia [7].

Los resultados obtenidos son comparados con los indicadores calculados por una metodología padrón [4] (que utiliza variaciones pico a pico y el intervalo entre dos picos, lo que hace necesario el registro de al menos dos ciclos sucesivos para efectuar los cálculos, inconveniente que no presenta el método de Prony) y con las propias mediciones utilizadas, verificándose la eficiencia y precisión de la metodología propuesta. La principal contribución del trabajo es la propuesta de una metodología con mayor exactitud matemática para obtener índices relativos a oscilaciones electromecánicas, cuyos cálculos son realizados utilizando valores medidos (no simulados), evitando un esfuerzo adicional en el modelado matemático del sistema de potencia.

2 MÉTODO DE PRONY PARA CÁLCULO DE MODOS DE OSCILACIÓN

El método de Prony puede ser aplicado para estimar modos o autovalores de respuestas oscilatorias [5]. Si un sistema de potencia puede ser descrito por un modelo lineal, sus respuestas homogéneas corresponden a la suma de los componentes sinusoidales, exponencialmente amortiguados (esto es, respuestas oscilatorias) [1]. Las respuestas oscilatorias pueden ser causadas por súbitos cambios de estado del sistema, tales como cortes

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
 25 y 26 de Agosto de 2016

de carga, desconexión de generadores y de líneas de transmisión. Una respuesta oscilatoria típica puede ser descrita por (1) y (2), donde t indica el tiempo. La ecuación (1) representa la respuesta oscilatoria en formato real, donde n_Q es el número total de componentes sinusoidales. Para la l -ésima componente sinusoidal amortiguada, f_l es la frecuencia de la oscilación, σ_l es el factor de amortiguamiento, A_l es la amplitud y θ_l es el ángulo de fase. La ecuación (2) representa la respuesta oscilatoria en formato complejo, donde n_λ es el número total de autovalores, λ_i ($\lambda_i = \sigma_i \pm \mathbf{j} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_i$) es el i -ésimo autovalor y c_i es el residuo del i -ésimo modo.

$$y(t) = \sum_{l=1}^{n_Q} A_l \cdot \exp(\sigma_l \cdot t) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_l \cdot t + \theta_l) \quad (1)$$

$$y(t) = \sum_{i=1}^{n_\lambda} c_i \cdot e^{\lambda_i \cdot t} \quad (2)$$

Mediciones de series temporales pueden ser obtenidas, considerando muestras de respuestas oscilatorias. Asumiendo el intervalo Δt entre muestras, N muestras oscilatorias pueden ser descritas por (3), donde $z_i = e^{\lambda_i \cdot \Delta t}$. Cuando las mediciones son obtenidas, ruidos aleatorios $\varepsilon[k]$ están presentes, adicionándose a las respuestas oscilatorias puras como $\hat{y}[k] = y[k] + \varepsilon[k]$.

$$y[k] = y(k \cdot \Delta t) = \sum_{i=1}^{n_\lambda} c_i \cdot z_i^k \text{ para } k = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

Convencionalmente, el método de Prony utiliza la predicción estándar mostrada en (4), donde los factores a_i son los coeficientes del polinomio característico y n el orden del modelo de predicción. Para reducir la influencia de ruidos y la compensación de señales, generalmente n es mayor que n_λ .

El desempeño del método de Prony puede ser influenciado por el intervalo entre muestras. Este intervalo puede ser incrementado mediante la decimación de la serie temporal original por un factor d , denominado factor de decimación. La frecuencia de Nyquist resultante, esto es $1/(2 \cdot d \cdot \Delta t)$, debe ser mayor que el ancho de banda de las respuestas oscilatorias [1]. Considerando la decimación, se propone una ecuación de predicción general (5). Cabe resaltar que cuando $d = 1$, las expresiones (4) y (5) son iguales. Considerando N muestras de datos oscilatorios, la ecuación (6) puede ser construida de acuerdo a (5), lo que permitirá estimar los coeficientes a_i . La expresión (6) puede ser representada de forma matricial como $\hat{Y} \cdot \hat{a} = \hat{y}$.

$$\hat{y}[n+k] = \tilde{a}_1 \cdot y[n-1+k] + \tilde{a}_2 \cdot y[n-2+k] + \dots + \tilde{a}_n \cdot y[k] \quad (4)$$

$$\hat{y}[n \cdot d + k] = \hat{a}_1 \cdot y[(n-1) \cdot d + k] + \hat{a}_2 \cdot y[(n-2) \cdot d + k] + \dots + \hat{a}_n \cdot y[k] \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{y}[(n-1) \cdot d + 1] & \hat{y}[(n-2) \cdot d + 1] & \dots & \hat{y}[1] \\ \hat{y}[(n-1) \cdot d + 2] & \hat{y}[(n-2) \cdot d + 2] & \dots & \hat{y}[2] \\ \hat{y}[(n-1) \cdot d + 3] & \hat{y}[(n-2) \cdot d + 3] & \dots & \hat{y}[3] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{y}[N-d] & \hat{y}[N-2 \cdot d] & \dots & \hat{y}[N-n \cdot d] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{a}_1 \\ \hat{a}_2 \\ \vdots \\ \hat{a}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{y}[n \cdot d + 1] \\ \hat{y}[n \cdot d + 2] \\ \hat{y}[n \cdot d + 3] \\ \vdots \\ \hat{y}[N] \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$N - n \cdot d > n \quad d < (N - n) / n \quad (7)$$

Para filtrar ruidos, el número de ecuaciones $N - n \cdot d$ es generalmente escogido siendo mayor que n , como indica (7), para hacer (6) sobre-determinado [1]. En este trabajo es utilizado el método de Moore-Penrose [8], para calcular la pseudo-inversa de la matriz \hat{Y} y resolver (6) como $\hat{a} = \text{pinv}(\hat{Y}) \cdot \hat{y}$, donde la expresión "pinv" indica pseudo-inversa de la matriz. Después de calcular los coeficientes a_i , los modos discretos o autovalores \hat{z}_i pueden ser estimados como las raíces del polinomio característico (8). Considerando el factor

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
 25 y 26 de Agosto de 2016

de decimación d , los modos continuos λ_i son obtenidos utilizando (9). La frecuencia $Frec_i$ y el coeficiente de amortiguamiento ξ_i del i -ésimo modo son calculados utilizando (10) y (11), respectivamente.

$$\hat{z}^n - [\hat{a}_1 \cdot \hat{z}^{n-1} + \hat{a}_2 \cdot \hat{z}^{n-2} + \dots + \hat{a}_n \cdot \hat{z}^0] = 0 \quad (8)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{d \cdot \Delta t} \cdot \ln(\hat{z}_i) \text{ para } i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

$$Frec_i = \frac{\text{imag}(\lambda_i)}{2 \cdot \pi} \quad (10)$$

$$\xi_i = -\cos[\text{ángulo}(\lambda_i)] \quad (11)$$

Una vez que los autovalores discretos \hat{z}_i son identificados, la señal oscilatoria en el dominio del tiempo puede ser reconstruida. Primeramente (12) debe ser resuelto para estimar las amplitudes de oscilación \hat{c}_i . Luego, los componentes oscilatorios pueden ser reconstruidos utilizando (13). Debido a la presencia de ruidos, la señal reconstruida $\hat{y}[k]$ generalmente no se ajusta perfectamente a la señal medida $\tilde{y}[k]$. De esta forma, el error estimado por el método de Prony es definido por $\varepsilon[k] = \tilde{y}[k] - \hat{y}[k]$ para $k = 1, 2, \dots, N$. El error medio cuadrático es calculado por (14).

$$\begin{bmatrix} \hat{z}_1^0 & \hat{z}_2^0 & \dots & \hat{z}_n^0 \\ \hat{z}_1^{1/d} & \hat{z}_2^{1/d} & \dots & \hat{z}_n^{1/d} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{z}_1^{(N-1)/d} & \hat{z}_2^{(N-1)/d} & \dots & \hat{z}_n^{(N-1)/d} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{c}_1 \\ \hat{c}_2 \\ \vdots \\ \hat{c}_n \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \hat{y}[1] \\ \hat{y}[2] \\ \vdots \\ \hat{y}[N] \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{y}[1] \\ \tilde{y}[2] \\ \vdots \\ \tilde{y}[N] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{z}_1^0 & \hat{z}_2^0 & \dots & \hat{z}_n^0 \\ \hat{z}_1^{1/d} & \hat{z}_2^{1/d} & \dots & \hat{z}_n^{1/d} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{z}_1^{(N-1)/d} & \hat{z}_2^{(N-1)/d} & \dots & \hat{z}_n^{(N-1)/d} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{c}_1 \\ \hat{c}_2 \\ \vdots \\ \hat{c}_n \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$Error \text{ promedio} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N (\hat{\varepsilon}[k])^2} \quad (14)$$

La elección de los parámetros n y d influencia en la precisión de la estimación, sin embargo, esta elección no está limitada sólo a sus respectivos valores [2].

Como fue mencionado, el número de ecuaciones $N - n \cdot d$ es mayor al número de autovalores estimados n , con el objetivo de reducir ruidos y compensar las señales [2]. Por lo tanto, de los modos identificados, algunos modos dominantes representan las características dinámicas reveladas por los datos y otros modos triviales son adicionados intencionalmente para suprimir ruidos [6]. Esto indica la importancia de identificar los modos dominantes, que representan las características dinámicas del sistema y contribuyen significativamente a las oscilaciones. Una manera directa de identificar modos dominantes consiste en ordenarlos de acuerdo a sus niveles de “energía”. Este método puede ser implementado de una forma discreta, dentro de una ventana de tiempo limitada. De acuerdo a (13), la contribución para las respuestas oscilatorias de $[\tilde{y}[1] \ \tilde{y}[2] \ \dots \ \tilde{y}[N]]^T$ del i -ésimo modo consiste en la parte real de $\hat{c}_i \cdot [\hat{z}_i^0 \ \hat{z}_i^{1/d} \ \dots \ \hat{z}_i^{(N-1)/d}]^T$. Considerando el impacto combinado de polos complejos conjugados, la contribución de energía E_i del i -ésimo modo es calculada por (15) y (16) [6]. Basado en esta definición, los modos que poseen significativo nivel de energía son considerados dominantes. Los modos con menos energía son considerados triviales.

$$E_i = \sum_{j=1}^N \left(\text{real}(\hat{c}_i \cdot \hat{z}_i^j) \right)^2 \text{ para modos reales} \quad (15)$$

$$E_i = \sum_{j=1}^N \left(2 \cdot \text{real}(\hat{c}_i \cdot \hat{z}_i^j) \right)^2 \text{ para modos complejos conjugados} \quad (16)$$

2.1 Ejemplo de aplicación

Simulando oscilaciones inter-área, fueron considerados dos pares de modos complejos en este ejemplo; el primero con una frecuencia de oscilación $Frec = 0,25\text{Hz}$ con un coeficiente de amortiguamiento $\xi = 7\%$ y el segundo con $Frec = 0,39\text{Hz}$ y $\xi = 6,5\%$. Los modos teóricos para estos valores, considerando ruido nulo, son $\lambda_{1,2} = -0,1102 \pm \mathbf{j} \cdot 1,5708$ y $\lambda_{3,4} = -0,1596 \pm \mathbf{j} \cdot 2,4504$. Para simular datos provenientes de registradores dinámicos, fueron generados 30 segundos de valores oscilatorios, con una tasa de 60 muestras/segundo. A estos datos se le adiciona ruido blanco gaussiano $\varepsilon(t)$, como indicado en (17). El desvío estándar de $\varepsilon(t)$ es ajustado de tal manera a obtener una relación señal/ruido de aproximadamente 20dB [9].

$$\hat{y}(t) = 2 \cdot e^{-0,1102t} \cdot \cos(1,5708 \cdot t + 1,5 \cdot \pi) + 2 \cdot e^{-0,1596t} \cdot \cos(2,4504 \cdot t + 0,5 \cdot \pi) + \varepsilon(t) \quad (17)$$

Fueron aplicadas las expresiones (6) a (11) a la respuesta oscilatoria (17), considerando $n = 12$ y $n = 24$, en ambos casos con d igual a 1, 5, 10 y 12. Los resultados se muestran en la Figura 1.

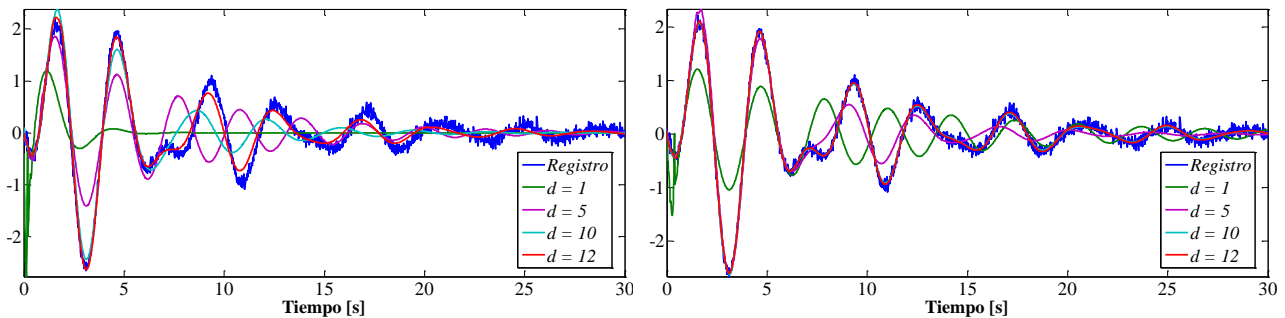


Figura 1.a: Parámetros $n = 12$; $d = 1, 5, 10, 12$

Figura 1.b: Parámetros $n = 24$; $d = 1, 5, 10, 12$

Figura 1: Influencia de parámetros n y d en el desempeño del método de Prony

La Figura 1 muestra los resultados de estimaciones del método de Prony, con d igual a 1, 5, 10 y 12, y considerando el orden del polinomio $n = 12$ y $n = 24$. En la Figura 1.a, con $n = 12$ y $d = 1$, se verifica que la estimación del método de Prony sólo intenta recrear el primer ciclo del registro y luego se mantiene nulo; con $d = 5$ y $d = 10$, el método logra calcular la misma frecuencia del registro en los primeros dos semi-ciclos, sin embargo, con amplitud diferente. Luego de una oscilación en un valor de inter-frecuencia, la estimación pierde exactitud. Con $n = d = 12$ se obtiene una forma de onda semejante al registro, aunque al final de la oscilación, la estimación de Prony pierde precisión. En la Figura 1.b, con $n = 24$, con $d = 1$ y $d = 5$, el método estima adecuadamente la frecuencia del registro en los dos primeros semi-ciclos, sin embargo, con amplitud diferente. En la siguiente oscilación, con frecuencia diferente al primer ciclo, la estimación no logra recrear la frecuencia ni la amplitud del registro. Con $d = 10$ y $d = 12$, el método de Prony recrea la forma de oscilación, obteniendo mínima diferencia con respecto al registro. Considerando los modos que presentaron mayor energía, la Tabla I muestra los valores de $Frec_i$, ξ_i , λ_i y error promedio, en función a n y d utilizados.

La Tabla I muestra que el error promedio se reduce a medida que n y d se incrementan. Este hecho concuerda con [1], que expresa que el desvío absoluto de la mediana, calculado con el método estadístico de Monte Carlo, se reduce a medida que n y d aumentan de valor. También fueron calculados los autovalores, considerando todos los valores de n y d de la Tabla I, en la ausencia de ruidos, obteniéndose error promedio nulo en todos los casos, lo que indica la precisión del método de Prony en el cálculo de modos de oscilación.

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
 25 y 26 de Agosto de 2016

Tabla I: Resultados del método de Prony

d	$n = 12$			Error Promedio	$n = 24$			Error Promedio
	$Frec_i$ [Hz]	ξ_i [%]	$\hat{\lambda}_i$		$Frec_i$ [Hz]	ξ_i [%]	$\hat{\lambda}_i$	
1	0,3050	37,45	$-0,774 \pm j \cdot 1,917$	0,6232	0,3164	5,58	$-0,111 \pm j \cdot 1,988$	0,5363
	7,5930	17,97	$-8,716 \pm j \cdot 47,708$		8,2876	22,03	$-11,759 \pm j \cdot 52,073$	
5	0,3254	7,4	$-0,152 \pm j \cdot 2,045$	0,4886	0,2630	10,73	$-0,178 \pm j \cdot 1,653$	0,2056
	0,0	100	$-2,490$		0,3992	10,22	$-0,258 \pm j \cdot 2,508$	
10	0,2725	13,06	$-0,226 \pm j \cdot 1,712$	0,2836	0,2499	7,24	$-0,114 \pm j \cdot 1,570$	0,0693
	0,4027	15,0	$-0,384 \pm j \cdot 2,530$		0,3903	6,77	$-0,166 \pm j \cdot 2,452$	
12	0,2547	8,87	$-0,142 \pm j \cdot 1,601$	0,1197	0,2497	7,15	$-0,113 \pm j \cdot 1,569$	0,0685
	0,3947	8,35	$-0,208 \pm j \cdot 2,480$		0,3902	6,56	$-0,161 \pm j \cdot 2,452$	

3 CÁLCULO DE LOS MODOS DE OSCILACIÓN DE ITAIPU

En esta sección son considerados históricos del registrador dinámico de ITAIPU, correspondientes a oscilaciones de potencia activa de los sectores de 50Hz y 60Hz, resultantes de disturbios, indicados por la fecha del evento. Las señales son obtenidas por transductores, que agregan un atraso a los registros. Por lo tanto, los registros serán compensados matemáticamente [4].

3.1 Sector de 50Hz

La Figura 2.a muestra un registro de oscilaciones de potencia resultantes de la desconexión de las unidades generadoras U03, U10, U11, U12, U15 y U18 y de la abertura de la interconexiones ITAIPU/ANDE e ITAIPU/Furnas 50Hz y 60Hz. En las estimaciones fue considerado un modelo de orden $n = 60$. Luego, estos modos fueron ordenados, obteniéndose $n = 25$ modos. Se verifica que ambas estimaciones del método de Prony se ajustan adecuadamente al registro. Con los modos calculados luego del ordenamiento, se obtuvo un valor promedio de frecuencia de 1,38Hz. La metodología presentada en [4] obtuvo un valor de 1,54Hz.

La Figura 2.b muestra un registro causado por la abertura de la interconexión ITAIPU/ANDE en la SE-MD 220kV. A causa del evento, la unidad generadora U02 fue separada de forma automática para el sistema ANDE. Con ese registro fue utilizado un modelo del orden $n = 60$ que, luego de ordenados, resultaron en $n = 36$ modos. En ambos casos, las estimaciones obtenidas por el método de Prony fueron semejantes al registro. Los modos obtenidos después del ordenamiento, arrojaron un valor promedio de $Frec_i$ de 1,67Hz, mientras que la metodología [4] obtuvo una frecuencia natural de oscilación igual a 1,85Hz.

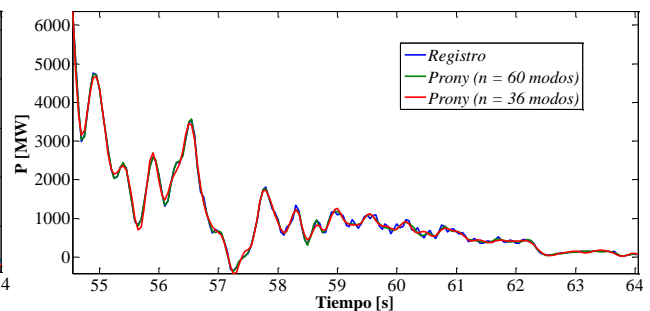
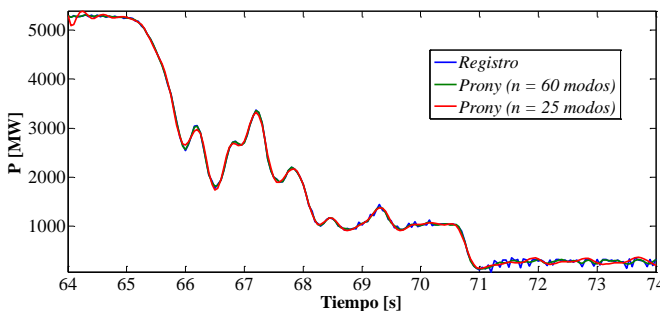

 Figura 2.a: Evento del 11.3.1999 ($n = 60$; $d = 2$)

 Figura 2.b: Evento del 10.11.2009 ($n = 60$; $d = 2$)

Figura 2: Método de Prony aplicado a registros dinámicos del sector de 50Hz de ITAIPU

3.2 Sector de 60Hz

La Figura 3.a muestra el registro dinámico causado por la desconexión automática de la línea de transmisión Foz do Iguacú-Ivaiporã 3. También muestra las estimaciones obtenidas por el método de Prony, considerando $n = 44$ y $n = 30$ modos, obtenidos después del ordenamiento. Estos modos indicaron un valor promedio de frecuencia de 1,11Hz, sin embargo, la metodología [4] obtuvo un valor de 0,98Hz.

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

La Figura 3.b muestra oscilaciones causadas por la desconexión automática de las unidades generadoras U10, U11, U12, U15 y U17, motivadas por la actuación del Esquema de Control de Emergencia del tronco 765kV. Con ese registro, fue utilizado un polinomio del orden $n = 62$ modos, que fueron ordenados de acuerdo a (15) y (16), resultando en $n = 36$ modos. En ambos casos, las estimaciones del método de Prony proporcionan curvas semejantes al registro. Los modos con mayor energía, presentaron un valor promedio de $Frec_i$ de 0,99Hz, mientras que la metodología [4] presentó un valor de frecuencia natural de 1,11Hz.

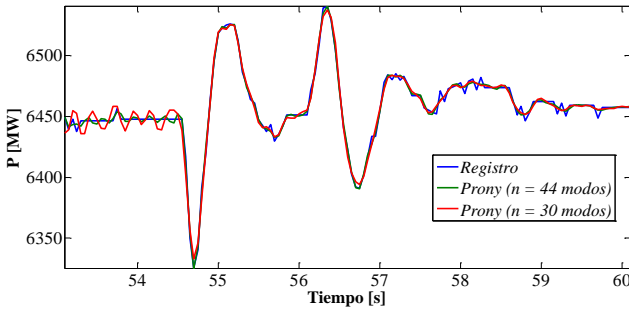


Figura 3.a: Evento del 14.7.2015 ($n = 44$; $d = 2$)

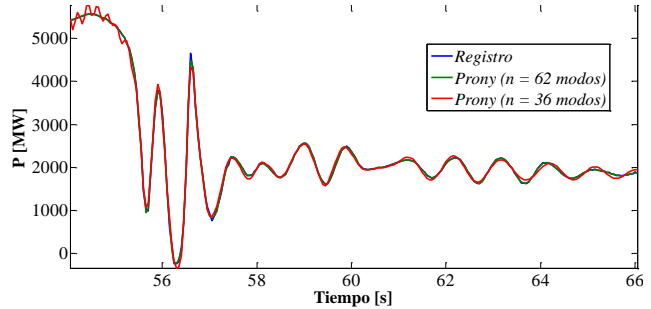


Figura 3.b: Evento del 19.2.1999 ($n = 62$; $d = 2$)

Figura 3: Método de Prony aplicado a registros dinámicos del sector de 60Hz de ITAIPU

4 MÉTODO DE PRONY PARA AJUSTE DE ESTABILIZADORES DE SISTEMAS POTENCIA

Los registros oscilatorios indican el comportamiento dinámico de un sistema real ante una perturbación. Por lo tanto, el cálculo de los autovalores críticos, a partir de esos registros, es de suma importancia para realizar un correcto ajuste de controladores que, a su vez, permiten mejorar el desempeño dinámico del sistema ante disturbios. Este objetivo se puede lograr aplicando el método de Prony a registros dinámicos.

En este trabajo será realizado el ajuste del estabilizador de sistemas de potencia (ESP), sin embargo, el método de Prony puede ser utilizado para ajustar cualquier otro equipo que provea una señal estabilizadora al sistema de potencia [10]. La función del ESP es proveer una señal adicional al regulador automático de tensión (RAT), con el objetivo de aumentar la estabilidad transitoria del sistema, mientras que el RAT busca mantener constante la tensión terminal del generador. Ambos dispositivos se encuentran instalados en el sistema de excitación de generadores. Los modelos del RAT y del ESP utilizados, se muestran en la Figura 4.

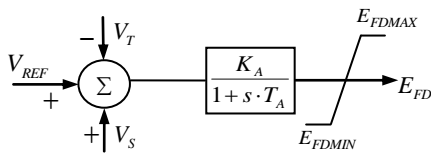


Figura 4.a: Modelo del RAT

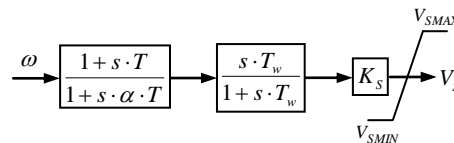


Figura 4.b: Modelo del ESP

Figura 4: Diagrama de bloques de los controladores

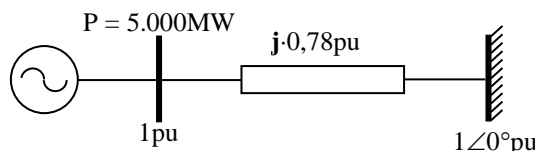


Figura 5: Sistema generador-barra infinita

Para realizar el ajuste del ESP, será considerado un sistema de potencia en el que un generador se encuentra conectado a una barra infinita, mediante una línea de transmisión, en el punto operación indicado en la Figura 5. En el sistema de excitación del generador, se encuentra instalado el RAT mostrado en la Figura 4.a, cuyo ajuste de ganancia es $K_A = 200pu$ y de constante de tiempo $T_A = 0,1s$. Con este sistema, será realizado el ajuste del ESP, utilizando el método de posicionamiento parcial de pares de polos complejos conjugados [7].

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
 25 y 26 de Agosto de 2016

Para utilizar este método, será calculada una función de transferencia que considera como entrada un escalón de 0,1pu en la tensión de referencia V_{REF} del RAT y como salida las variaciones en la velocidad angular del generador $\Delta\omega$, considerando el ESP desconectado. El método de Prony será aplicado sobre esta salida, para calcular los autovalores críticos, que caracterizan la respuesta dinámica del sistema. Las variaciones $\Delta\omega$, así como su estimación, calculada por el método de Prony con y sin ruidos, se muestran en la Figura 6.

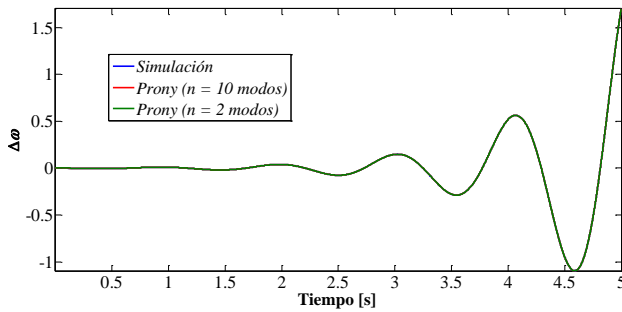


Figura 6.a: Variaciones $\Delta\omega$ sin ruido

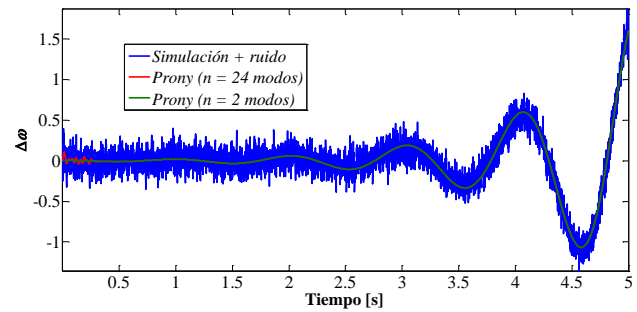


Figura 6.b: Variaciones $\Delta\omega$ con ruido

Figura 6: Estimación de Prony considerando la influencia de ruidos

La Figura 6.a muestra las variaciones $\Delta\omega$ y las estimaciones del método de Prony considerando $n = 10$ y $d = 5$. Sobre esos diez modos, fue aplicado el método de ordenamiento descrito por (15) y (16), obteniéndose dos modos, que presentaron mayor influencia en las oscilaciones, representada por $n = 2$. En ambos casos, las curvas obtenidas por el método de Prony son casi idénticas a la simulación. Los dos modos obtenidos son $\lambda_{1,2} = 1,28 \pm j \cdot 6,024$, que poseen valores de $Frec = 0,9588\text{Hz}$ y de $\xi = -20,78\%$. En la Figura 6.b, considerando la presencia de ruidos, fue realizado el mismo procedimiento descrito en la Figura 6.a, sin embargo, con $n = 24$ y $d = 12$, resultando los modos $\lambda_{1,2} = 1,273 \pm j \cdot 6,031$, que registraron valores de $Frec = 0,9599\text{Hz}$ y $\xi = -20,65\%$. También fueron obtenidos los autovalores de la matriz de estado del sistema de potencia, obteniéndose $\lambda_{1,2} = 1,2796 \pm j \cdot 6,0239$, con valores de $Frec = 0,9587\text{Hz}$ y $\xi = -20,78\%$. Comparando estos últimos modos, con aquéllos obtenidos por el método de Prony, sin ruidos, se verifica que el error es casi nulo. Sin embargo, con la presencia de ruidos, el error fue del orden de 0,5% y 0,1%, para las partes real e imaginaria, respectivamente. Este hecho indica la precisión del método de Prony para calcular autovalores, aún en la presencia de ruidos, inherentes en los procesos de medición.

Con los modos determinados por el método de Prony, será utilizado el método de posicionamiento parcial de pares de polos complejos conjugados [7], para realizar el ajuste del ESP, mostrado en la Figura 4.b, sin embargo, esta metodología puede ser fácilmente adaptada para otros modelos de ESP. Luego de aplicar la metodología, fueron obtenidos los resultados mostrados en la Tabla II.

Tabla II: Ajustes del ESP utilizando los métodos de Prony y de posicionamiento parcial de polos

#	ω [rad/s]	ξ [%]	K_S [pu]	T [s]	$\alpha \cdot T$ [s]
1	6,024	15	8,6752	0,3033	0,0888
2		18,5	9,6005	0,2869	0,0928
3	10	15	11,0847	0,1980	0,0494
4	30		13,5850	0,1281	0,0085
5	100		14,0522	0,1178	0,00082964

La Tabla II muestra cinco valores de ajuste del ESP, considerando diferentes frecuencias angulares ω y amortiguamientos ξ . Las respuestas a un escalón 0,1pu en la tensión de referencia V_{REF} del RAT, considerando cada uno de estos ajustes, resultaron en un sistema estable. A esas respuestas fue aplicado nuevamente el método de Prony, verificándose exactamente los amortiguamientos ξ considerados en la Tabla II para el ajuste del ESP, siendo la frecuencia del modo dominante, en cada ajuste, igual a 6,024rad/s.

5 CONCLUSIONES

Este trabajo presentó una metodología denominada método de Prony, utilizada para calcular modos de oscilación. La metodología fue aplicada a los registros dinámicos de los sectores de 50Hz y 60Hz ITAIPU. Fue verificada la influencia de los parámetros de n y d , que a medida que fueron incrementados, el error entre el registro y la estimación se reducía, permitiendo filtrar ruidos, inherentes en los procesos de medición, y obtener modos de oscilación. Los registros analizados corresponden a oscilaciones de potencia activa de ambos sectores, sin embargo, la metodología puede ser adaptada para utilizar otros tipos de señales.

Los modos de oscilación o autovalores permiten calcular la frecuencia de las oscilaciones. Este valor de frecuencia fue calculado en cada registro analizado y comparado con el valor de frecuencia natural, obtenido por la metodología presentada en [4]. En los registros con mayor presencia de componentes exponenciales (sector de 50Hz), hubo diferencia del orden de 0,18Hz, sin embargo, en los registros con mayor presencia de componentes sinusoidales (sector de 60Hz), la diferencia de frecuencia fue del orden de 0,13Hz. La mayor diferencia se debe a que la metodología [4] utiliza picos consecutivos para calcular la frecuencia de oscilación, intentando eliminar la influencia de los componentes exponenciales. Sin embargo, el método de Prony utiliza una sumatoria de componentes exponenciales, logrando una estimación casi exacta del registro.

El trabajo también presentó cómo utilizar las informaciones proporcionadas por el método de Prony para ajustar ESP. Se verificó la precisión de la metodología utilizada que, aún en la presencia de ruidos, logró obtener los modos próximos a los autovalores teóricos. Con los modos calculados, fue utilizado el método de posicionamiento parcial de pares de polos complejos conjugados, obteniéndose varios ajustes, con diferentes valores de frecuencia y amortiguamiento. Esos valores de amortiguamiento fueron precisamente corroborados por el método de Prony, así como la frecuencia de corte, en que fue ajustado el ESP. Este procedimiento indicó al método de Prony como una excelente herramienta en el cálculo de modos de oscilación a partir de registros dinámicos.

BIBLIOGRAFIA

- [1] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. Palo Alto, CA: McGraw Hill, Inc., 1994.
- [2] N. Zhou, J.W. Pierre, and D.J. Trudnowski, "Some considerations in using Prony analysis to estimate electromechanical modes", Power and Energy Society General Meeting (PES), pp. 1-5, 21-25 Jul. 2013.
- [3] N. Zhou, Z. Huang, F. Tuffner, J. Pierre, and J. Shuangshuang, "Automatic implementation of Prony analysis for electromechanical mode identification from phasor measurements", Power and Energy Society General Meeting (PES), pp. 1-8, 25-29, Jul. 2010.
- [4] C.G. Da Silva, R. J, et al., "Verificação do Desempenho Dinâmico da Usina de Itaipu através de Indicadores," X Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica – SEPOPE, 21-25 May. 2006.
- [5] J.F. Hauer, C.J. Demeure, and L.L. Scharf, "Initial results in Prony analysis of power system response signals," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 5, no. 1, Feb. 1990, pp. 80-89.
- [6] N. Zhou, J.W. Pierre, and D.J. Trudnowski, "A stepwise regression method for estimating dominant electromechanical modes," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 27, no. 2, May 2012, pp. 1051-1059.
- [7] C.H. Costa Guimarães, G.N. Taranto, S. Gomes Jr. e N. Martins, "Projeto de estabilizadores de sistemas de potência por posicionamento parcial de par de pólos complexos conjugados," XIII Congresso Brasileiro de Automática - CBA, Florianópolis, Set. 2000.
- [8] P. Courrieu, "Fast computation of Moore-Penrose inverse matrices", Neural Information Processing - Letters and Reviews, vol. 8, no. 2, Aug. 2005, pp. 25-29.
- [9] Viswanathan, M., (2015, June). "How to generate AWGN noise in Matlab/Octave (without using in-built awgn function)" [Online]. Disponible: www.gaussianwaves.com.
- [10] D.J. Trudnowski, J.R. Smith, T.A. Short, and D.A. Pierre, "An application of Prony methods in PSS design for multimachine systems," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 6, no. 1, Feb 1991, pp. 118-126.