

# Análisis de Estabilidad de Pequeña Señal Utilizando Mediciones Sincrofasoriales PMU

A. F. Quinaluiza †

D. E. Echeverría‡

† *Escuela Politécnica Nacional*

‡ *Centro Nacional de Control de Energía, CENACE*

**Resumen**— Con el acelerado crecimiento de la demanda en los últimos años, las transferencias de potencia a largas distancias entre diferentes empresas de energía han ido aumentando constantemente, razón por la cual la seguridad y confiabilidad de los Sistemas Eléctricos de Potencia -SEP- pueden verse seriamente comprometidas, especialmente por el alto riesgo de violación de los límites de seguridad del sistema eléctrico.

Uno de los desarrollos más importantes e innovadores en el área de monitoreo y control de los SEP está orientado a las Unidades de Medición Fasorial (PMU). Esta tecnología permite realizar el monitoreo de oscilaciones de baja frecuencia del Sistema Nacional Interconectado -S.N.I.- en tiempo real.

En el presente trabajo se utiliza la información de las PMU's, las cuales se encuentran estratégicamente ubicadas en el SNI, para realizar el análisis oscilatorio de baja frecuencia, mediante la aplicación de una de las técnicas de estimación modal conocida como Análisis Prony.

**Palabras claves**— Estabilidad de pequeña señal - Mediciones Sincrofasoriales – PMU – Prony – WAMS.

**Abstract**— Given the accelerated growth in demand over the last few years, long-distance power transfers between different energy companies have been steadily increasing, which means that the safety and reliability of Electric Power Systems (EPS) could become seriously compromised, especially given the high risk of violating the electricity system's security limits.

One of the most important and innovative developments in the area of EPS control and monitoring involves Phasor Measurement Units (PMU). This technology enables real-time monitoring of low-frequency oscillations in the Sistema Nacional Interconectado - SNI (National Interconnected System).

This utilizes data from PMU's that are strategically located throughout the SNI to perform low-frequency oscillation analysis, applying one of the modal parameter estimation techniques known as the Prony Analysis Method.

**Index Terms**— Small-signal stability – Synchrophasor Measurements – PMU – Prony – WAMS.

## 1. INTRODUCCIÓN

La estabilidad de ángulo del rotor de un SEP puede verse interrumpido debido a la pérdida de sincronismo de las máquinas después de haber sido el sistema eléctrico sometido a una perturbación, el problema de estabilidad de ángulo del rotor involucra el estudio de las oscilaciones electromecánicas inherentes a los sistemas de potencia. La metodología que se usa en el presente trabajo para la identificación de modos oscilatorios de baja frecuencia presentes en el SEP se basa en el procedimiento de mediciones sincrofasoriales registradas por los equipos PMU's.

El presente artículo técnico se organiza de la siguiente manera, en la sección 2 se presenta las características de la medición sincrofasorial. La sección 3 presenta las metodologías usadas para la detección de los modos oscilatorios, en la que destaca el método de estimación modal conocido como Análisis Prony. En la sección 4 se simula el sistema de dos áreas y se realiza el análisis Prony de las señales simuladas. La sección 5 presenta lineamientos con respecto a la definición de la ventana de análisis con el fin de obtener resultados confiables de los modos oscilatorios. En la sección 6 se realiza un análisis de un evento registrado en el S.N.I., finalmente en la sección 7 se presenta las conclusiones del trabajo.

## 2. TECNOLOGÍA DE MEDICIÓN SINCROFASORIAL (PMU)

Un fasor constituye la representación analítica de ondas sinusoidales en estado estacionario a frecuencia fundamental. Los voltajes y corrientes de

la red eléctrica son ondas sinusoidales que vienen representadas, de forma genérica, por la siguiente ecuación [1]:

$$x(t) = X_m \cos(\omega t + \phi) \quad (1)$$

Donde  $\omega$  es la frecuencia de la señal en radianes por segundo,  $\phi$  es el ángulo de fase en radianes y  $X_m$  es la amplitud pico de la señal.

El fasor puede ser representado por un número complejo que gira a la velocidad angular  $\omega$ , conocido como su representación fasorial o simplemente fasor, como se observa en la ecuación (2) [1]:

$$x(t) \Leftrightarrow \bar{X} = \left(\frac{X_m}{\sqrt{2}}\right) e^{-j\phi} = \left(\frac{X_m}{\sqrt{2}}\right) (\cos \phi + j \sin \phi) \quad (2)$$

Donde:  $X_m/\sqrt{2}$  es el valor RMS de la señal.

Un sincrofasor o fasor sincronizado se define como “un fasor calculado a partir de datos muestreados usando una señal de tiempo estándar como referencia para la medición”. La referencia angular es una onda coseno de frecuencia nominal, sincronizada con el tiempo UTC (Coordinated Universal Time) a través de GPS [12]

## 2.1. Unidades de Medición Fasorial (PMU)

Las PMU's son dispositivos que permiten estimar los sincrofasores de las ondas sinusoidales de corriente y voltaje alternos, en diferentes barras de un SEP [2], todas las medidas que se obtienen de las PMU's son sincronizadas con un mismo tiempo de referencia, a través del sistema GPS. La Fig. 1 presenta las funciones principales de la PMU.



Figura 1: Funciones principales de la PMU [2]

La estructura de una PMU genérica se compone de un sistema de adquisición de datos PDC, cuenta con: filtro anti-aliasing, módulo conversor análogo-digital, oscilador de sincronización de fase, microprocesador, y receptor de GPS [3].

## 2.2. Sistemas de Medición Fasorial Jerárquico

La mayoría de datos de los fasores son utilizados en centros alejados de las PMU's por lo que es necesario un sistema de comunicaciones y concentradores de datos (PDC) que permitan el traslado de la información a los centros de control para aprovechar los beneficios del sistema de medición [1], en la arquitectura de transmisión de datos de los fasores los dispositivos que siguen a la PMU en nivel jerárquico son los concentradores de datos (PDC).

Los PDC son dispositivos que se encargan de recibir, filtrar, procesar y almacenar los datos de los fasores provenientes de las PMU's con su respectiva estampa de tiempo y en algunos casos de otros PDC's para crear un conjunto de datos fasoriales de una gran parte del sistema o de todo el sistema [4].

Para la transferencia de datos desde las PMU's hasta los PDC's, se requiere una red apropiada de comunicación, que puede ser de fibra óptica, tecnologías de comunicación telefónica, digital y Ethernet, la transmisión de datos se realiza bajo protocolos de comunicación [5].

## 2.3. Sistema de Medición de área Amplia (WAMS)

Los sistemas WAMS son aquellos que permiten disponer de mediciones distribuidas en el SEP. Se componen principalmente de equipos de medición fasorial (PMU), concentradores de datos (PDC), sistemas de comunicaciones de alta capacidad que permite tomar con gran precisión lecturas sincronizadas de las condiciones de la red en puntos estratégicos del sistema [6]. Las PMU's entregan información en intervalos de milisegundos en comparación con el tradicional sistema SCADA.

Tabla 1: Mediciones PMU vs mediciones SCADA [2]

ATRIBUTOS	SCADA	WAMS-PMU
<b>Resolución</b>	Tasa de actualización 1 muestra cada 2 s - 5 s. (Observación del estado estable)	Tasa de actualización 10 - 60 muestras por seg. (Dinámico/ Observabilidad transitoria)
<b>Mediciones</b>	Solo magnitud.	Magnitud y ángulo de fase.
<b>Datos</b>	No sincronizados	Sincronizados
<b>Función</b>	Supervisión y control local.	Vigilancia y control de áreas amplias.
<b>Comunicación</b>	Tecnología tradicional de comunicación.	Tecnología moderna de comunicación.

### 2.3.1. WAMS en el Ecuador [2]

La Corporación CENACE (Centro Nacional de Control de Energía) ha estado trabajando, desde el año 2010, con iniciativas para la implementación y estructuración del sistema WAMS con el objetivo de monitorear y supervisar en tiempo real las oscilaciones presentes en el S.N.I. Actualmente se encuentran instalados 18 dispositivos PMU's en las principales subestaciones del S.N.I.

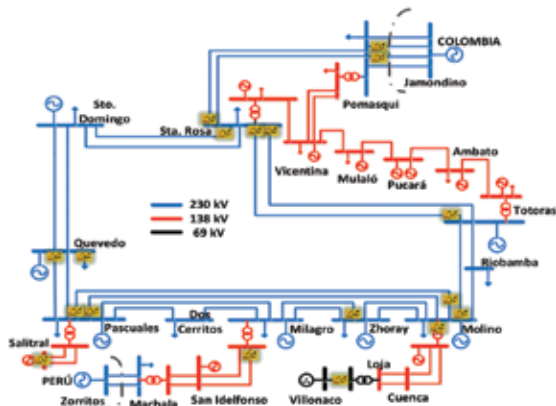


Figura 2: Ubicación física de las PMU's en el S.N.I [7].

### 2.4. Aplicaciones de la PMU [5] [8]

Las PMU's permiten una serie de aplicaciones para incrementar la confiabilidad de la red “basada en mediciones” en lugar de modelos matemáticos del sistema de potencia. A continuación se presenta las principales aplicaciones de los sistemas WAMS:

Supervisión del sistema eléctrico de potencia en “tiempo real”.

Mejora la estimación de estado.

Mejora la confiabilidad de las acciones de control, disminuyendo incertidumbres en la toma de decisiones.

- Supervisión del comportamiento del ángulo, potencia, frecuencia y voltaje de los SEP's.
- Sistemas de protección avanzado de los SEP's.
- Detección más precisa del punto de falla.
- Detección de oscilaciones Inter-áreas.

### 3. METODOLOGÍAS PARA MONITOREO DE OSCILACIONES DE BAJA FRECUENCIA EN TIEMPO REAL UTILIZANDO PMU [9]

Las perturbaciones en los SEP, producen oscilaciones en el sistema que pueden ser identificadas a través del análisis de estabilidad de pequeña señal,

mediante el uso de métodos como: análisis modal o identificación modal.

El problema de estabilidad de ángulo del rotor involucra el estudio de las oscilaciones electromecánicas inherentes a los sistemas de potencia, para mantener o restaurar el equilibrio entre el torque eléctrico y el torque mecánico de cada máquina del sistema, la dependencia del tipo de perturbación permite clasificar el problema de estabilidad angular en dos tipos: estabilidad transitoria (Gran Señal) y estabilidad oscilatoria (Pequeña Señal), Gran Señal cuando se analiza cambios grandes en el sistema que pueden ser debido a cortocircuitos, pérdida de una línea o unidad de generación y Pequeña Señal cuando se analiza cambios pequeños en el sistema debido a variaciones entre la carga y generación las cuales producen pequeños cambios en el ángulo del generador, velocidad y potencia.

La estabilidad oscilatoria del sistema de potencia depende de la existencia de las componentes del torque sincronizante y torque de amortiguamiento para cada máquina sincrónica.

$$\Delta T_e = T_s \Delta \delta + T_d \Delta \omega \quad (3)$$

La inestabilidad de pequeña señal puede darse por:

- Incremento monótono del ángulo del rotor debido a la falta de suficiente torque sincronizante  $T_s$  (negativo). Este da origen a un modo de **inestabilidad no oscilatoria**.
- Oscilaciones del rotor de amplitud creciente debido a la falta de suficiente torque de amortiguamiento  $T_d$  (negativo). El mismo que da origen a un modo de **inestabilidad oscilatoria**.

### 3.1. Oscilaciones del Sistema de Potencia

Las oscilaciones son caracterizadas mediante los denominados modos de oscilación que pueden clasificarse en forma general, en los siguientes [9]:

Los *modos inter-área*, los cuales son causados por interacciones entre grandes grupos de generadores oscilando entre ellos, estos modos presentan rangos de frecuencia entre 0,1 a 0,7 Hz. Los *modos locales*, se asocian con oscilaciones entre rotores de un grupo de generadores cercanos unos a otros, estas oscilaciones presentan frecuencias en el rango de 0,7 a 2,0 Hz. Los *modos de control*, se asocian con el control de las unidades de generación y equipos, Los *modos torsionales*, se presentan cuando los controles,

interactúan con la dinámica del sistema eje-turbina-generador de las unidades generadoras. Este tipo de oscilaciones presentan un rango de frecuencias asociadas bastante amplio.

### 3.2. Métodos de Análisis de Oscilaciones de Baja Frecuencia

Los métodos de análisis permiten estimar los modos oscilatorios presentes en el sistema de potencia a partir de métodos basados en modelo del sistema (análisis modal) y métodos basados en mediciones sincrofatorias obtenidas de las Unidades de Medición Fasorial (PMU).

#### 3.2.1 Método basado en modelo del sistema (Análisis Modal) [9]

La técnica matemática conocida como análisis modal, considera que ante pequeñas perturbaciones las ecuaciones diferenciales que representan la dinámica del sistema pueden ser linealizadas alrededor de un punto de operación. Esta herramienta permite luego determinar la frecuencia y el amortiguamiento de los modos oscilatorios a través del cómputo de los valores propios ( $\lambda$ ) de la matriz de estado del sistema.

$$\lambda = \sigma \pm j\omega \quad \lambda = \xi\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\xi^2} \quad (4)$$

Los valores propios complejos se dan en pares conjugados y cada par corresponde a un modo oscilatorio donde la parte real ( $\sigma$ ) es una medida de amortiguamiento del modo y la parte imaginaria ( $\omega$ ) da una medida de la velocidad angular del modo de oscilación, es decir, la frecuencia de oscilación del modo, ( $\omega_n$ ) representa la velocidad angular del modo de oscilación y ( $\xi$ ) razón de amortiguamiento del modo de oscilación, la Fig. 3 presenta una clasificación de los modos de oscilación según la ubicación en el plano complejo.

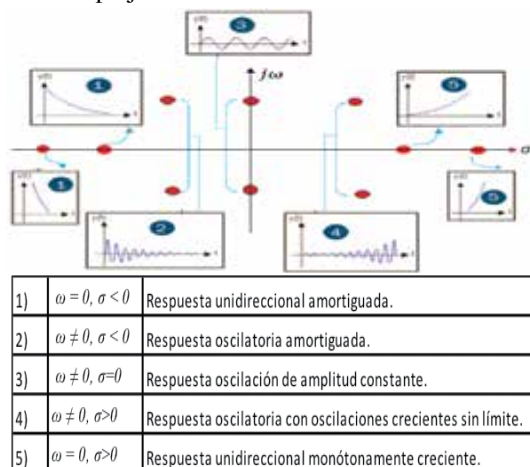


Figura 3: Ubicación de los autovalores en el plano, estabilidad [13].

#### 3.2.2 Métodos de estimación modal basado en mediciones

Dentro de las técnicas más empleadas de identificación modal se encuentran: la Transformada de Fourier, Análisis Prony, Transformada de Hilbert-Huan, Filtro de Kalman, Transformada de Wavelet, entre otras. Estos algoritmos matemáticos permiten la estimación de los modos oscilatorios a partir de mediciones PMU's.

### 3.3. Metodología de Análisis Prony [10]

Esta técnica descompone la señal de interés en una suma de funciones exponenciales, cada una de las cuales está caracterizada por los siguientes parámetros: amplitud, fase, frecuencia y amortiguamiento. La señal  $y(t)$  consiste de  $N$  muestras  $y(tk)$  que son uniformemente espaciadas por una cantidad  $\Delta t$ .

$$y(t) = \sum_{i=1}^n A_i e^{\sigma_i t} \cos(\omega_i t + \theta_i) \quad (5)$$

Donde  $n \leq N$ , es el subconjunto de modos a ser determinado, los tiempos de muestreo  $t_k$ , por lo tanto la Ecuación 5 puede ser replanteada en forma discreta.

$$y(t) = \sum_{i=1}^n R_i z_i^k \quad k = 0, \dots, n \quad (6)$$

$$z_i = \exp(\lambda_i \Delta t); \quad (7)$$

Donde: los  $Z_i$  son las raíces del polinomio.

#### 3.3.1 Algoritmo de Prony

El algoritmo de análisis Prony para la obtención de las incógnitas requiere de algunos pasos que se detallan a continuación:

**Paso 1.-** Colocar los elementos seleccionados del registro de mediciones  $y(t_k)$  en una matriz de datos Toeplitz, la cual es una matriz con una diagonal constante en la que cada diagonal descendente de izquierda a derecha es constante [14].

**Paso 2.-** Ajustar los datos con un modelo de Predicción Lineal (PL) discreto.

**Paso 3.-** Encontrar las raíces del polinomio característico asociados con el modelo de PL del paso 1, encontrar los coeficientes de predicción que originarán las estimaciones de factor de amortiguamiento y frecuencia sinusoidal de cada término exponencial.

$$z^n - (a_1 z^{n-1} + a_2 z^{n-2} + \dots + a_{n-1} z^0) = 0 \quad (8)$$

**Paso 4.-** Con las raíces encontradas en el paso 3, se obtiene una segunda ecuación lineal, con la cual es posible estimar la amplitud de la exponencial y la fase inicial de la sinusoidal, el objetivo inmediato es encontrar los  $R_i$  y  $z_i$  que produzcan  $\hat{y}(t)$ . En base a este procedimiento se diseña un algoritmo a seguir para el método Prony que se muestra en la Fig. 4.

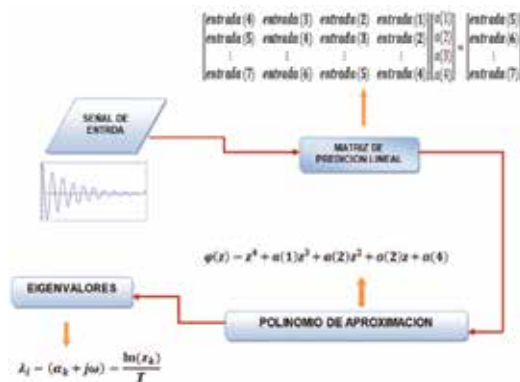


Figura 4: Algoritmo general de Prony [11]

## 4. APLICACIÓN DEL ANÁLISIS PRONY

### 4.1. Sistema de dos Áreas

A continuación se simula el sistema de potencia de prueba de dos áreas en el programa computacional Power Factory de DigSILENT y se aplica el análisis Prony a las señales de potencia, voltaje y frecuencia en los diferentes nodos del sistema, con el objetivo de determinar la señal que brinda mayor observabilidad de los modos inmersos en las señales analizadas.

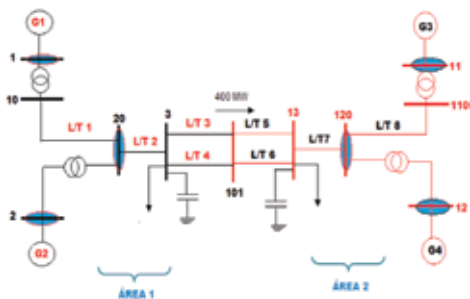


Figura 5: Sistemas de dos aéreas interconectadas en 230 kV [9]

En las Tablas 2, 4 y 6 se observa los resultados de los modos oscilatorios obtenidos mediante el programa Power Factory, mientras que en las Tablas 3, 5 y 7 se observa los modos oscilatorios obtenidos al aplicar el análisis Prony a diferentes señales mediante el uso del programa DSI Toolbox [2]. Se muestran los valores de frecuencia (Hz), amortiguamiento ( $\xi\%$ )

y amplitud (MW) de los modos de baja frecuencia y pobre amortiguamiento.

### 4.1.1 Sistema de dos aéreas sin control de excitación

Nº Modo	Parte Real	Parte Imaginaria	Frecuencia (Hz)	Amortiguamiento ( $\xi\%$ )
10-11	-0,5054	$\pm 6,8524$	1,0905	7,3562
12-13	-0,5289	$\pm 7,1019$	1,1303	7,4273
14-15	-0,0646	$\pm 3,3742$	0,5370	1,9157

Tabla 3: Análisis Prony, modos en la señal de potencia activa.

MODOS	POTENCIA ACTIVA			
	G1	G2	G3	G4
INTER-AREA	$f=0,525$	$f=0,526$	$f=0,527$	$f=0,527$
	$\xi=1,849$	$\xi=1,659$	$\xi=1,892$	$\xi=1,934$
	$A=5,202$	$A=3,776$	$A=20,43$	$A=18,52$
LOCAL 1	$f=1,079$	$f=1,084$	$f=1,082$	$f=1,131$
	$\xi=7,382$	$\xi=7,456$	$\xi=5,142$	$\xi=3,310$
	$A=24,53$	$A=26,36$	$A=1,884$	$A=0,551$
LOCAL 2	$f=1,717$	$f=1,577$	-----	-----
	$\xi=7,188$	$\xi=6,798$	-----	-----
	$A=0,232$	$A=0,449$	-----	-----

### 4.1.2 Sistemas de dos áreas con AVR (Automatic Voltage Regulator)

Tabla 4 : Modos oscilatorios, simulados en Power Factory

Nº Modo	Parte Real	Parte Imaginaria	Frecuencia (Hz)	Amortiguamiento ( $\xi\%$ )
10-11	-0,439	$\pm 6,838$	1,088	6,41
12-13	-0,464	$\pm 7,089$	1,128	6,53
14-15	0,087	$\pm 3,391$	0,539	-2,57

Tabla 5 : Análisis Prony, modos en la señal de voltaje con AVR

MODOS	VOLTAJE			
	G1	G2	G3	G4
INTERAREA	$f=0,531$	$f=0,531$	$f=0,531$	$f=0,525$
	$\xi=-2,478$	$\xi=-2,435$	$\xi=-2,512$	$\xi=-2,383$
	$A=0,037$	$A=0,053$	$A=0,010$	$A=0,012$
LOCAL 1	$f=1,082$	$f=1,08474$	$f=1,349$	$f=1,507$
	$\xi=6,578$	$\xi=2,1617$	$\xi=10,19$	$\xi=17,53$
	$A=0,025$	$A=0,00126$	$A=0,004$	$A=0,004$

### 4.1.3 Sistema de dos aéreas con PSS (Power System Stabilizer)

Tabla 6 : Modos oscilatorios, simulados en Power Factory

Nº Modo	Parte Real	Parte Imaginaria	Frecuencia (Hz)	Amortiguamiento (ξ%)
10-11	-1,4772	±6,2994	1,0026	22,83
12-13	-1,4479	±6,2160	0,9893	22,68
14-15	-0,4926	±1,4478	0,5460	14,21

Tabla 7 : Análisis Prony, modos en la señal de frecuencia con PSS

MODOS	FRECUENCIA			
	G1	G2	G3	G4
INTER-AREA	f=0,519 ξ=12,57 A=0,017	f=0,514 ξ=15,67 A=0,017	f=0,533 ξ=9,308 A=0,027	f=0,538 ξ=9,476 A=0,019
LOCAL 1	f=1,015 ξ=7,118 A=0,002	f=0,999 ξ=18,00 A=0,013	f=1,148 ξ=81,01 A=0,011	-----
LOCAL 2	-----	-----	-----	-----

Al aplicar el análisis Prony a las señales seleccionadas se observa la presencia de tres modos oscilatorios de baja frecuencia inmersos en la señal, un modo Inter-área con una frecuencia alrededor de ( $f=0,53$  Hz), presentes en todas las señales analizadas, y dos modos locales con frecuencias alrededor de ( $f=1,079$  Hz y  $f=1,717$  Hz) presente solo en la señal de potencia activa, mientras que en las señal de voltaje y frecuencia solo se observa la presencia del modo local, esto se debe a que la amplitud que presentan los modos son muy bajos y no aportan a la reconstrucción de la señal en el análisis Prony, por lo tanto se concluye que la señal que brinda mayor información y precisión de los modos oscilatorios de baja frecuencia presentes en el sistema analizado es la señal de potencia activa.

Al analizar el sistema de dos aéreas para diferentes casos como: 1) sin control de excitación, 2) con AVR y 3) con PSS se observa la influencia que tiene cada elemento en el sistema de potencia y como contribuye al efectivo control del amortiguamiento de oscilaciones, para mejorar la estabilidad del sistema ante la presencia de perturbaciones que ocurren en los SEP.

## 5. VENTANA DE ANÁLISIS

La precisión en la estimación de los modos oscilatorios mediante el uso del análisis Prony depende de la selección y longitud de la ventana de tiempo de análisis considerada. Para llevar a cabo el análisis oscilatorio aplicando el método Prony en el S.N.I. se utiliza las mediciones sincrofásicas registradas en las PMU's. La Corporación CENACE adquirió el software WAProtector, este permite adquirir los datos fasoriales de las PMU's

a través de la red de comunicaciones intranet estándar y realizar el monitoreo de las oscilaciones presentes en el SNI en tiempo real.

Se tiene como premisa del análisis realizado en la Sección 4, que la señal de potencia activa brinda mayor observabilidad de los modos, razón por la cual la señal eléctrica de análisis en WAProtector por definición es la potencia activa del vínculo asociado a la PMU.

Con el fin de mostrar la influencia de la longitud de las ventanas se aplica el análisis Prony a la señal de potencia activa registrada en la PMU: QUEV-PASC1-230, instalado en la S/E Quevedo, ante el disparo de la posición Calope de la subestación Quevedo 69 KV, ocurrido el 3 de agosto del 2013 a las 17:29:31. La Fig. 6 se muestra la señal de potencia registrada en la PMU y las ventanas seleccionadas para el análisis.

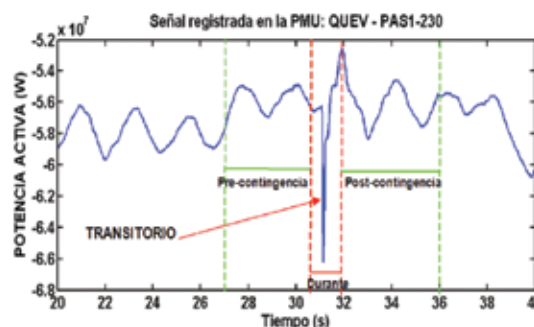


Figura 6 : Potencia activa registrada en la PMU: QUEV\_PASC1\_230

Se aplica el análisis Prony a la señal de potencia activa de interés en diferentes ventanas de tiempo (pre-contingencia, durante la contingencia y post-contingencia) con el fin de determinar los modos oscilatorios inmersos en la señal.

### 5.1. Pre-Contingencia

#### 5.1.1 Análisis Prony. Ventana antes del disturbio, 2 s de análisis (17:29:27- 17:29:29)

Tabla 8: Modos oscilatorios. Ventana 2 s de análisis

Modo	Frecuencia (Hz)	Amortiguamiento (%)	Amplitud (MW)
01	1,705	4,28	---
02	3,083	5,46	---

### 5.1.2 Análisis de Prony. Ventana antes del d isturbio, 4 s de análisis (17:29:27-17:29:31)

Tabla 9: Modos oscilatorios. Ventana 4 s de análisis

Modo	Frecuencia (Hz)	Amortiguamiento (%)	Amplitud (MW)
01	0,469	4,51	0,0443
02	1,616	4,59	0,0340

### 5.2. Ventana Durante el Disturbio (17:29:29-17:29:32)

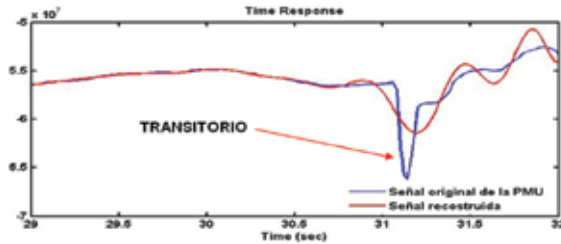


Figura 7 : Análisis Prony. Ventana 3 s durante el disturbio

Tabla 10 : Modos oscilatorios. Ventana 3 s durante el disturbio

Modo	Frecuencia (Hz)	Amortiguamiento (%)	Amplitud (MW)
01	0,1986	-81,54	---
02	1,3961	-24,01	---
03	2,2004	-16,29	---

### 5.3. Post-Contingencia

#### 5.3.1. Análisis Prony. Ventana después del disturbio, 4 s de análisis (17:29:32 - 17:29:36)

Tabla 11: Modos oscilatorios. Ventana 4 s de análisis

Modo	Frecuencia (Hz)	Amortiguamiento (%)	Amplitud (MW)
01	0,453	4,216	0,03
02	1,242	13,12	0,001
03	1,435	-0,565	0,028

#### 5.3.2. Análisis Prony. Ventana después del disturbio, 10 s de análisis (17:29:32-17:29:42)

Tabla 12: Modos oscilatorios. Ventana 10 s de análisis

Modo	Frecuencia (Hz)	Amortiguamiento (%)	Amplitud (MW)
01	0,452	4,505	0,028
02	1,187	7,315	0,019

Se observa en las Tablas 8 y 9 los resultados de los modos oscilatorios presentes en la señal de análisis, para la ventana de tiempo de 2 s los modos de baja frecuencia no pueden ser detectados mediante el análisis Prony, en cambio en las ventanas de 4 s y 10 s se aprecia el modo Inter-área y los modos locales, para la ventana en la que incluye el transitorio se tiene como resultados modos oscilatorios altamente inestables, observados en la Tabla 10.

Las ventanas de análisis que permiten obtener buenos resultados de los modos oscilatorios son las ventanas en donde se analiza al menos dos veces el periodo del modo de interés, para este caso son las ventanas de tiempo de 4 s y 10 s. Además, el resultado de los modos al aplicar el análisis Prony también depende del lugar de elección de la ventana de análisis, de forma que se debe evitar analizar las ventanas cercanas o que contenga el disturbio ya que presentan altas no linealidades en las señales y el análisis de Prony es un método donde los datos se ajusta de forma óptima a un modelo de Predicción Lineal. Las ventanas de tiempo que deben ser analizadas para obtener buenos resultados de los modos es la parte final del transitorio.

## 6. DETECCIÓN DE MODOS OSCILATORIOS EN EL SNI

A continuación se presenta un ejemplo de análisis de estabilidad oscilatoria utilizando la información de los PMU's. Para determinar los modos oscilatorios poco amortiguados en el S.N.I., ante la ocurrencia de un evento, se aplica el análisis Prony a la señal de potencia activa registrada en la PMU: POMA\_JAM3\_230 instalada en la S/E Pomasqui, luego del disparo de 550 MW de generación en la central Chivor en el sistema colombiano, ocurrido 21 de agosto del 2013 a las 21:11:31. En la Fig. 9 se presenta la señal registrada por la PMU

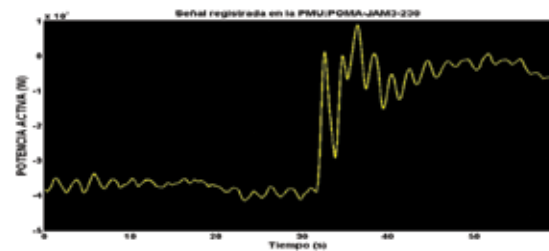


Figura 8 : Señal de potencia activa registrada en la PMU: POMA\_JAM3\_230

Al presentarse un disturbio en los sistemas ecuatoriano o colombiano, este afecta directamente a los dos sistemas de potencia, por ejemplo en el caso de perder generación en el sistema colombiano, el efecto general es una disminución en el valor frecuencia sobre el

valor nominal de 60 Hz, debido al desbalance entre carga-generación. Este desbalance produce la actuación instantánea de todos los generadores del sistema que tratan de encontrar nuevos estados de operación estable, produciendo oscilaciones de potencia ocasionadas por los intercambios de energía entre las máquinas.

Las oscilaciones generadas por causa del evento pueden traer problemas de inestabilidad oscilatoria por lo cual es indispensable conocer los modos poco amortiguados que pueden volver al sistema inestable.

### 6.1. Ventana después del disturbio, 4 s de análisis (21:11:33 - 21:11:37)

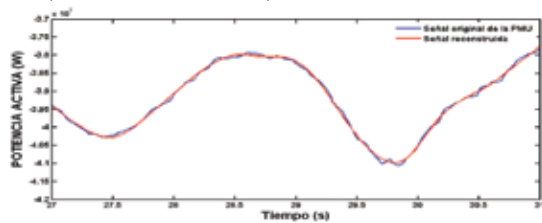


Figura 9 : Análisis Prony. Ventana 4 s de análisis

Tabla 13 : Modos oscilatorios. Ventana 4 s de análisis (21:11:27 - 21:11:31)

Modo	Frecuencia (Hz)	Amortiguamiento (%)	Amplitud (MW)
01	0,414	-5,507	0,212
02	1,711	-6,021	0,020
03	1,418	4,104	---

### 6.2. Ventana después del disturbio, 4 s de análisis (21:11:33 - 21:11:37)

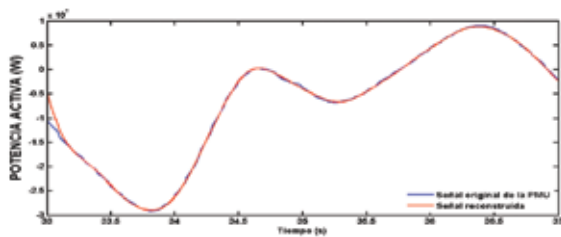


Figura 10 : Análisis Prony. Ventana 4 s de análisis

Tabla 14 : Modos oscilatorios. Ventana 4 s de análisis (21:11:33 - 21:11:37).

Modo	Frecuencia (Hz)	Amortiguamiento (%)	Amplitud (MW)
01	0,5469	-2,077	0,3
02	1,7606	3,339	0,2
03	2,2948	2,963	---

En la Fig. 8 se observa el comportamiento dinámico de la señal durante el evento, esta presenta oscilaciones crecientes con poco amortiguamiento que podrían llevar al sistema a la inestabilidad.

Los resultados obtenidos al aplicar el análisis Prony a la señal analizada se puede apreciar en la Tabla 13 y 14 donde se observa la presencia de tres modos un Inter-área y dos locales para cada caso, el modo Inter-área presenta amortiguamiento negativo ( $\xi=-5,507\%$  a  $\xi=-2,007\%$ ) símbolo de inestabilidad en el sistema, mientras el modo local varía su amortiguamiento ( $\xi=-6,021\%$  a  $\xi=3,339\%$ ), también se observa que los modos inmersos en la señal tiende a amortiguarse con el tiempo. Debido a la magnitud del evento el sistema no puede mantener el balance entre carga-generación por lo que trae consecuencias en el SNI como:

- Actuación del primer paso de alivio de carga por baja frecuencia.
- Baja frecuencia en el SNI
- La importación de Ecuador a Colombia varió de 150,16 MW a 15,96 MW. Se tenía programado una importación de 152 MW

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos al aplicar el análisis Prony a los eventos registrados por las PMU's muestran que el método usado permite estimar con precisión los modos de las oscilaciones de baja frecuencia, sin embargo, para estimar los modos oscilatorios mediante el análisis Prony se debe tomar en cuenta varios aspectos como: selección de la señal para el análisis, longitud de la ventana de análisis, se debe evitar tomar ventanas de tiempo cercanas o que contengan el transitorio, ya que presentan modos altamente inestables debido a que los transitorios causados por disturbios provocan distorsiones muy fuertes en la señal, la ventana de tiempo que debe ser analizada para obtener buenos resultados de los modos es la parte final del transitorio ya que no presentan distorsiones fuertes o pronunciadas.

Al estimar los modos inmersos en las señales analizadas se tiene como resultado modos con diferente frecuencia y amortiguamiento, esto se debe a que los valores de cada modo son dependientes del tipo de disturbio que se presente en el sistema de potencia, por lo que a diferentes disturbios se excitan diferentes componentes modales.

En el sistema de prueba de dos áreas se observa que el AVR presenta lazos de control con ganancias muy altas, estas ganancias se ajustan con el objetivo de mejorar los límites de estabilidad luego de fallas transitorias pero ante pequeñas perturbaciones contribuye de forma negativa al amortiguamiento de oscilaciones dando como resultado un sistema inestable con amortiguamiento negativo ( $\xi=-2,57\%$ ), mientras que los PSS aporta con amortiguamiento positivo ( $\xi=14,2\%$ ) a las oscilaciones que se presentan en el sistema, por lo tanto la combinación de los AVR y PSS



contribuyen de forma efectiva al amortiguamiento de las oscilaciones de baja frecuencia.

La implementación de las WAMS en los sistemas eléctricos de potencia ayuda a la toma de medidas preventivas y de control inmediatas ante riesgos de inestabilidad que se producen en el sistema, las medidas sincronizadas en el tiempo obtenidas de las PMU's permite observar la dinámica del sistema, la tasa de actualización de datos de las PMU's es de 10-60 muestras por segundo en comparación con el tradicional SCADA cuya tasa de actualización de datos es 1 muestra cada 2 a 5 s.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Phadke A.G; Thorp, J.S, Synchronized Phasor Measurements and Their Applications. 1st Edition. M.A. Pai, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana. Illinois, Alex Stankovic, Northeastern University, Boston, Massachusetts. U.S.A., 2008.
- [2] Colomé Delia, Sistemas de Medición WAMS. Curso de perfeccionamiento para profesionales de la Corporación CENACE, 10 al 12 de abril del 2013.
- [3] Borda Carlos; Díaz, Hernando; Olarde, Andrés, Identificación de Parámetros de Líneas de Transmisión y Transformadores. Universidad Nacional de Colombia, Primera edición, 16 de abril del 2010.
- [4] Lozano Carlo; Castro, Ferley; Ramirez, Sindy, Unidades de Medición Fasorial PMU, Noviembre, 2011.
- [5] Araque G.J; Barba, R, Unidades de Medición Fasorial – PMU. Corporación Centro Nacional de Control de Energía CENACE.
- [6] Ohrn Marina; Sen, Amitava, Convergencia en la Sala de Control. Integración de Sistemas de Trasmisión Distribución y Gestión de Interrupciones, Revista ABB, 2005.
- [7] Cepeda J, Echeverría. D, Argüello. G, Tecnología de Medición Sincrofasorial en el Desarrollo de una Red de Transmisión Inteligente. Corporación Centro Nacional de Control de Energía – CENACE, información confidencial.
- [8] Cárdenas Jorge; Menéndez, David. Extensión del uso de los Sincrofasores para Facilitar la Integración de las EE.RR en el Sistema Eléctrico. GE imagination at Word, FUTURED, 24 de marzo del 2011.
- [9] P Kundur. Power System Stability and Control. 1st Edition, the EPRI Power System Engineering Series, McGraw-Hill Inc., New York NY, U.S.A., 1994.
- [10] Power System Dynamic Performance Committee, Identification of Electromechanical Modes in Power Systems, IEEE Task Force Report, Special Publication TP462, June 2012.
- [11] García Salvador. Implementación de un Medidor con Microcontrolador para la Detección de Oscilaciones de Baja Frecuencia. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Sección de Estudios de Posgrado e Investigaciones, México, Diciembre, 2011.
- [12] IEEE Power Engineering Society, “IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems”, IEEE Std. C37.118-2005, March 2006.
- [13] CENACE Análisis de Estabilidad de Pequeña Señal. Periodo Noviembre 2012-Abril 2013, informe final Noviembre 2012, información confidencial.
- [14] [http://es.wikipedia.org/wiki/Matriz\\_de\\_Toeplitz](http://es.wikipedia.org/wiki/Matriz_de_Toeplitz).



Ángela Fernanda Quinaluiza Pillajo, Nació en Machachi, el 1 de marzo. Sus estudios secundarios los realizó en Instituto Técnico Superior Aloasí. Obteniendo el título de Bachiller Técnico Industrial con especialidad Electricidad. Sus estudios superiores los realizó en la Escuela Politécnica Nacional en la Carrera de Ingeniería Eléctrica



Diego E. Echeverría Jurado nació en 1982 en la ciudad de Puyo, Ecuador. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Escuela Politécnica Nacional de Quito, en 2006. Desde 2008, ha estado realizando sus estudios de Doctorado en Ingeniería Eléctrica en el Instituto de Energía Eléctrica (IEE), de la Universidad Nacional de San Juan, Argentina como parte de una beca de 4 años financiada a través del Programa Regional del Servicio de Intercambio Alemán (DAAD, por sus siglas en alemán). Actualmente trabaja en el Centro Nacional de Control de Energía CENACE del Ecuador en la Dirección de Operación. Sus áreas de interés son: Estabilidad de Sistemas de Potencia en Tiempo Real, Sistemas de medición sincrofásicos PMU's y Control de Emergencia de Sistemas de Potencia.