

Identification Methodology of Oscillatory Modes in PMU Measurement Ambient Type Data

Metodología de Identificación de Modos Oscilatorios en Datos Tipo Ambiente de Mediciones PMU

O.O. Ramos Contero¹  0000-0002-8472-9370 D.E. Echeverría²  0000-0002-1743-9234
D.G. Colomé¹  0000-0002-2926-5366

¹ Universidad Nacional de San Juan – CONICET, Instituto de Energía Eléctrica, San Juan, Argentina

E-mail: pasha_omar10@hotmail.com, gcolome@jee-unsjconicet.org

² Operador Nacional de Electricidad, CENACE, Ecuador

E-mail: decheverria@cenace.gob.ec

Abstract

The aim of this work is to put forward a methodology to evaluate the oscillatory stability of a power electric system (PES) analyzing the low-frequency oscillatory modes (LFOM) through the processing of synchrophasor measurements Phasor Measurement Units (PMU) of ambient data. The proposed methodology, based on spectral and pseudo-energy analyses and on parametric methods of Canonical Correlation Analysis and Yule-Walker, estimates the LFOM, whose frequency and damping characteristics provide critical information to PES operators to carry out preventive or emergency control actions. The proposed methodology was applied to synthetic measurements for its tuning and to characterize its range and accuracy, and to PMU records of the Ecuadorian power transmission system, successfully identifying the 0.4 Hz inter-area mode of the Ecuador-Colombia interconnection. The contributions of this work are aimed at evaluating the oscillatory stability of the PES through automatic computational tool that processes PMU signals of ambient type data.

Index terms— power systems, oscillatory stability, oscillatory modes, PMU measurement, ambient data, parametric estimation

Resumen

El objetivo de este trabajo es presentar una metodología para evaluar la estabilidad oscilatoria de un sistema eléctrico de potencia (SEP) mediante el análisis de los modos oscilatorios de baja frecuencia (MOBF) a través del procesamiento de mediciones sincrofasoriales (Phasor Measurement Units PMU) de datos tipo ambiente. La metodología propuesta, basada en el análisis espectral y de pseudoenergía y en los métodos paramétricos de Análisis de Correlación Canónica y de Yule – Walker, estima los MOBF, cuyas características de frecuencia y amortiguamiento brindan información crítica a los operadores del SEP para adoptar acciones de control preventivo o de emergencia. La metodología propuesta fue aplicada a mediciones sintéticas para su sintonización y caracterizar su alcance y precisión, y a registros PMU del sistema de transmisión de energía de Ecuador logrando identificar satisfactoriamente el modo interárea de 0,4 Hz propio de la interconexión Ecuador-Colombia. Las contribuciones de este trabajo están encaminadas a evaluar la estabilidad oscilatoria de los SEP a través de una herramienta computacional automática que procese señales PMU de datos tipo ambiente.

Palabras clave— sistemas de potencia, estabilidad oscilatoria, modos oscilatorios, mediciones PMU, datos ambientes, estimación paramétrica.

Recibido: 02-05-2024, Aprobado tras revisión: 11-06-2024

Forma sugerida de citación: Ramos O., Echeverría D., Colomé D. (2024). “Metodología de Identificación de Modos Oscilatorios en Datos Tipo Ambiente de Mediciones PMU”. Revista Técnica “energía”. No. 21, Issue I, Pp. 55-64

ISSN On-line: 2602-8492 - ISSN Impreso: 1390-5074

Doi: <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v21.n1.2024.642>

© 2024 Operador Nacional de Electricidad, CENACE



Esta publicación está bajo una licencia internacional Creative Commons Reconocimiento – No Comercial 4.0



1. INTRODUCCIÓN

Los nuevos desafíos que presentan los sistemas eléctricos de potencia (SEP), como falta de inversión, envejecimiento de equipos, integración de fuentes de energía renovables y restricciones ambientales para la construcción de nuevas centrales y líneas de transmisión, sumados al continuo incremento de la demanda, podrían conducir a que el SEP se aparte de su rango operativo admisible, e incluso ocasionar inestabilidad o apagones. Resulta por ello necesario monitorear su comportamiento dinámico, a fin de mantener la seguridad y estabilidad de operación. El monitoreo de la estabilidad oscilatoria se realiza mediante el análisis de los modos oscilatorios de baja frecuencia (MOBF), cuyas características de frecuencia y amortiguamiento, brindan información crítica a los operadores del SEP para adoptar acciones de control preventivo o de emergencia.

Tradicionalmente, el monitoreo de los MOBF depende de una eficaz modelización de los SEP. Se realiza para verificar las condiciones de estabilidad de pequeña señal (EPS), con el modelo matemático completo del sistema, un análisis modal en estado estacionario [1] o simulaciones ante diferentes perturbaciones. Sin embargo, la precisión de las estimaciones de los MOBF depende de la exactitud y validez del modelo matemático. Ante estas dificultades que presenta el enfoque tradicional, en las últimas décadas se han desarrollado nuevas técnicas de procesamiento de señales y de identificación de sistemas para la estimación de los MOBF a partir de mediciones. Estos métodos no requieren modelar del sistema. En este sentido, los cada vez más difundidos sistemas de medición basados en los sistemas de medición de área amplia (WAMS – Wide Area Monitoring Systems), y en las unidades de medición sincrofasorial (PMU – Synchronized Phasor Measurement Units) conectadas a un concentrador de datos fasoriales (PDC – Phasor Data Concentrator), generan, por su capacidad de proveer información sincronizada a una alta tasa de reporte, una oportunidad tecnológica para la evaluación de la estabilidad oscilatoria a partir del procesamiento de señales.

Los métodos de identificación modal a partir de mediciones se clasifican de acuerdo, a las características de las señales en la ventana de análisis, que corresponden a períodos de grandes perturbaciones (ringdown data) o a períodos con datos tipo ambiente sin grandes perturbaciones (ambient data); y a su formulación matemática como paramétricos o no paramétricos [2]. Para obtener buenos resultados se debe escoger la metodología más adecuada según el tipo de datos a analizar. En este trabajo se presenta una metodología que procesa señales de datos ambiente.

El análisis e identificación de MOBF en señales de datos tipo ambiente revela la presencia de un ruido ambiental de nivel constante en el sistema. La hipótesis

considerada es que este ruido es el resultado de pequeñas variaciones en la carga, que actúan como excitación de baja amplitud para los modos electromecánicos del sistema. Suponiendo que estas variaciones se modelan como ruido blanco en una ventana de análisis, es posible estimar las características modales de los sistemas a partir de las señales de datos tipo ambiente [3].

Una de las primeras aplicaciones de un método de análisis de datos tipo ambiente se publicó en [4], haciendo uso de un método basado en subespacios estocásticos. Este método estima los modos oscilatorios, sin embargo, no arroja una buena solución al problema de discriminación de modos reales de modos espurios causados por errores numéricos en su técnica matemática.

En [3] se implementan varios métodos de análisis para estimación de modos correspondientes a métodos de análisis de subespacios de estado, entre ellos Análisis de Correlación Canónica (CCA) y Algoritmos Numéricos para la Identificación del Sistema de Espacio de Estado Subespacial (N4SID), con buenos resultados al usar grandes ventanas de datos. En [5] se analiza el efecto de la longitud de la señal y la presencia de ruido para el análisis de datos ambiente con el método de CCA, donde se determina que el análisis requiere de una longitud de ventana de 600 a 900 s. En [6] se analiza una señal de datos tomando como referencia una ventana que abarca la señal previa y posterior a la ocurrencia de una perturbación, y se la analiza con los métodos de subespacios de estado y CCA. Los resultados muestran que el método de CCA se desempeña bien en ventanas de datos tipo ambiente.

Por otro lado, los primeros resultados de la aplicación del método paramétrico de Yule Walker (YW) para la estimación de modos oscilatorios en mediciones tipo ambiente fueron publicados en [7], desde entonces se han venido realizando modificaciones para la estimación de modos oscilatorios en los SEP. Inicialmente, se desarrolló el método para el análisis de una sola señal [8], y posteriormente se modificó para posibilitar realizar el análisis de múltiples señales [9].

En este trabajo se presenta una metodología que integra los métodos de identificación paramétrica CCA y YW con las técnicas de análisis espectral y de pseudoenergía [10] de la señal de datos tipo ambiente en un procedimiento automático para estimar MOBF muy poco y poco amortiguados.

Este trabajo se organiza en 5 secciones. En la sección 2, se presentan las herramientas matemáticas para el análisis de MOBF. En la sección 3 se describe la metodología propuesta. En la sección 4 se aplica la metodología a señales PMU de frecuencia registradas en el sistema de transmisión de energía de Ecuador operado por el CENACE. Finalmente, en la sección 5 se presentan las conclusiones del trabajo.



2. HERRAMIENTAS MATEMÁTICAS

Se presentan a continuación los métodos de identificación paramétrica implementados para la determinación de MOBF en datos tipo ambiente, así como también conceptos de pseudoenergía utilizados para determinar los MOBF dominantes.

2.1 Métodos de identificación paramétrica en datos ambiente

Los métodos paramétricos para identificar MOBF en datos tipo ambiente parten del modelo lineal en espacio de estado en tiempo discreto con entradas nulas de (1) y (2).

$$x_{k+1} = Ax_k + w_k \quad (1)$$

$$y_k = Cx_k + v_k \quad (2)$$

Donde x_k es el vector de estado ($n \times 1$), A es la matriz de estado ($n \times n$), C es la matriz de salida ($l \times n$), y_k es el vector de salidas ($l \times 1$), w_k ($n \times 1$) y v_k ($l \times 1$) son vectores de ruido del proceso y las medidas.

El método de subespacio de correlación canónica (CCA) [11] a partir del modelo de (1) y (2) considera una secuencia de mediciones en tiempo discreto de la salida para construir las matrices de bloque de Hankel extendidas, las que son procesadas con proyección ortogonal y descomposición en valores singulares para calcular la matriz de observabilidad extendida Γ_i con la que en (3) se calcula la matriz A . Los autovalores de A son las raíces de la ecuación característica en tiempo discreto.

$$A = \underline{\Gamma}_i^+ \bar{\Gamma}_i \quad (3)$$

El análisis de Yule Walker (YW) es el estimador espectral más común de los métodos paramétricos [12]. Su formulación matemática parte de que un proceso aleatorio (respuesta ambiental) puede describirse con precisión mediante un modelo autorregresivo de media móvil (ARMA) de la salida, ec. (4) y (5) con el que se calcula la autocorrelación de la salida, ec.(6).

$$\hat{y}_i(kT) = \sum_{j=1}^n a_j \hat{y}_i(kT - jT) + \sum_{l=1}^p \left(\sum_{j=0}^{\text{mil}} b_{lij} v_l(kT - jT) \right) \quad (4)$$

$$y_i(kT) = \hat{y}_i(kT) + u_i(kT) \quad (5)$$

para $i=1, 2, \dots, n_0$ donde n_0 es el número de muestras, T el período de muestreo, k un entero en tiempo discreto, n el orden del sistema, p el orden de v , mil el orden MA para la salida i y la entrada l , a_j los parámetros AR, y b_{lij} los parámetros MA para las entradas l y salidas i .

$$r_i(q) = E\{y_i(kT)y_i(kT - qT)\} \quad (6)$$

Con $E\{\cdot\}$ operador valor esperado y q operador de desplazamiento en tiempo discreto. Para un número finito

de datos la autocorrelación se aproxima con (7) que expresada en forma matricial en (8) define un sistema de ecuaciones cuya solución son los coeficientes del modelo AR o coeficientes de la ecuación característica en tiempo discreto. a partir de la cual se determinan los MOBF.

$$r_i(q) = - \sum_{j=1}^n a_j r_i(q - j), \quad q > m \quad (7)$$

$$R_i a = -r_i \quad (8)$$

Los métodos CCA y YW son válidos para la identificación de sistemas puramente estocásticos, sin la presencia de entradas externas, condición que cumplen los datos tipo ambiente [11].

2.2 Análisis de Pseudoenergía

Para realizar una correcta selección de los modos, y determinar qué modos son dominantes y cuales son espurios, se ha implementado el análisis de "pseudoenergía" [10]. Al seleccionar las señales a analizar, el objetivo es utilizar señales que tengan una alta observabilidad del modo de interés y una baja observabilidad para otros modos. La observabilidad se mide en términos de pico en el espectro de potencia o energía en la autocorrelación. Como las señales son aleatorias, no se puede calcular directamente la energía de un modo determinado en el dominio del tiempo. Sin embargo, se puede estimar la "pseudoenergía" de un modo determinado dentro de la función de autocorrelación [10]. Para ello se toma la transformada z de (7) y se resuelve para $r_i(q)$ en forma paralela, obteniendo (9).

$$r_i(q) = \sum_{j=1}^n B_{ij} z_j^{q-m-1}, \quad q > m \quad (9)$$

donde z_j es el j ésimo polo en tiempo discreto, y B_{ij} es el residuo para el polo z_j y la salida i .

a pseudoenergía del modo j resulta en (10).

$$E_j = \sum_{j=1}^{n_0} \left(B_{ij}^* B_{ij} \sum_{q=0}^{M-1} [(z_j^q)^* (z_j^q)] \right) \quad (10)$$

Los modos se ordenan según la magnitud de E_j .

3. METODOLOGÍA DE IDENTIFICACIÓN

En la Fig. 1 se presenta la metodología propuesta en este trabajo para procesar mediciones PMU de datos ambiente con el fin de identificar los MOBF muy poco y poco amortiguados. Las señales analizadas son mediciones de la frecuencia y de la diferencia angular de tensión, la cual se obtiene a partir de los fasores de tensión. Se han seleccionado estas dos señales en base al análisis realizado en [13,14] donde se determinó que no se obtienen resultados satisfactorios sobre los MOBF al procesar la magnitud de tensión por su gran sensibilidad a cambios de cargas, tap de transformadores y otros elementos conmutadores.



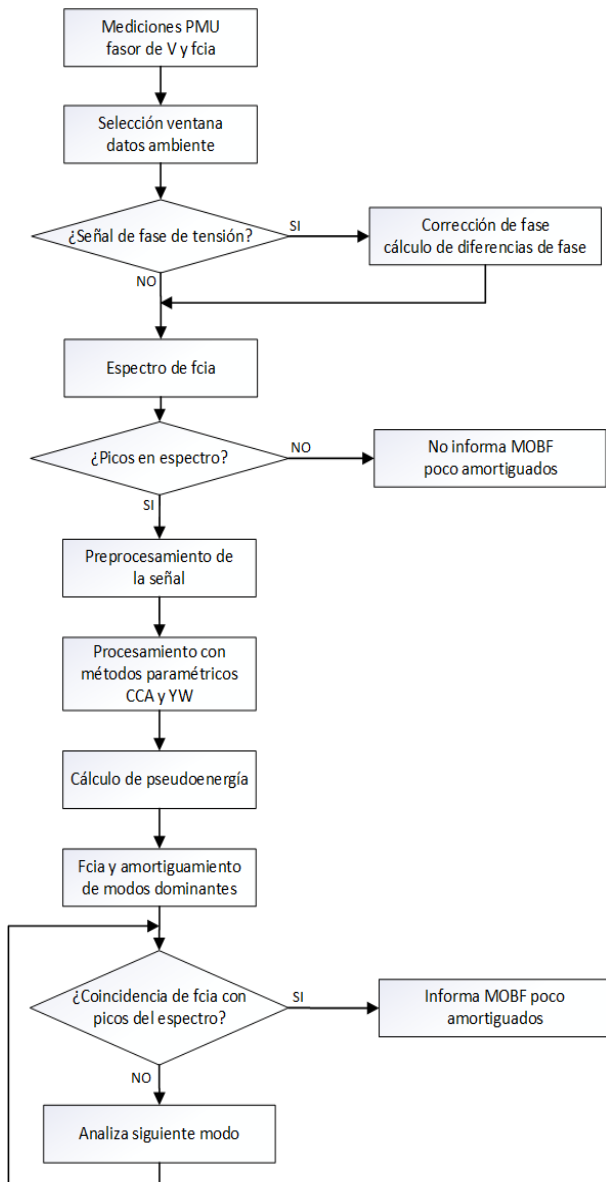


Figura 1: Diagrama de Bloques de la metodología propuesta

En primer lugar, se accede a las mediciones PMU, si la señal corresponde a un fador de tensión, se procede a corregir las escalas de los ángulos de fase contemplando que las PMU calculan ángulos sólo entre -180 y 180 grados [15] y a calcular la diferencia angular de tensión de con respecto a una referencia angular común del sistema.

Luego las señales de diferencia angular y de frecuencia son preprocesadas con el fin de determinar el espectro de frecuencia contenido en la señal y eliminar: ruido de medición, valor medio, tendencia y datos atípicos, con el fin de acondicionar las señales a los requerimientos de los métodos de estimación paramétrica [16].

Si el espectro de frecuencia por la presencia de picos indica la presencia de MOBF poco amortiguados se procesan las señales con los métodos paramétricos de

análisis de CCA y YW para calcular los MOBF representados por su frecuencia y factor de amortiguamiento relativo (ζ). Métodos que han sido sintonizados en [16] ya que cada uno posee parámetros cuyos valores deben ser determinados a partir de un análisis de sensibilidad de desempeño al procesar señales sintéticas. Acto seguido se realiza un análisis de pseudoenergía para determinar qué modos son dominantes y cuales son espurios, desestimando los modos de baja energía.

Finalmente se realiza un análisis integral de los resultados de los métodos paramétricos CCA y YW para los modos de mayor pseudoenergía con los resultados del análisis del espectro de frecuencia con el objetivo de seleccionar los resultados de los MOBF muy poco y poco amortiguados a presentar al usuario de la metodología. En este análisis se contempla el criterio utilizado en centros de control durante la operación en tiempo real para clasificar el estado de operación de acuerdo al valor de amortiguamiento: modos muy poco amortiguados que generan estado de alarma corresponden a modos con $\zeta < 3\%$, modos poco amortiguados que generan estado de alerta corresponden a modos con $3\% \leq \zeta < 5\%$, y modos con $\zeta > 10\%$ corresponden al rango de operación segura.

A continuación, se analizan distintas etapas, funciones y alcance de la metodología.

3.1. Preprocesamiento de Mediciones PMU

Las bases de datos de mediciones son susceptibles de incluir datos que no son propios de las mediciones, o que no están acorde con las mediciones realizadas como son los datos atípicos. Además, los registros de mediciones suelen estar afectados de ruido. Estos datos al ser utilizados en cualquier proceso de análisis ocasionarían resultados erróneos. Por otra parte, el valor medio y la tendencia que si bien son propios de las mediciones también afectan la precisión en la identificación de los MOBF pues los métodos de estimación paramétrica han sido formulados para procesar señales con valor medio nulo y sin tendencia. Es por este motivo que es necesario realizar un tratamiento previo a las señales de datos antes de efectuar el análisis paramétrico que incluya eliminación de datos atípicos o outliers, filtro de ruido y retiro de valor medio y tendencia; utilizando las funciones y su parametrización de [13,14]. En la Fig. 2. se observan las etapas de preprocesamiento de las señales de datos tipo ambiente obtenidas por PMU.

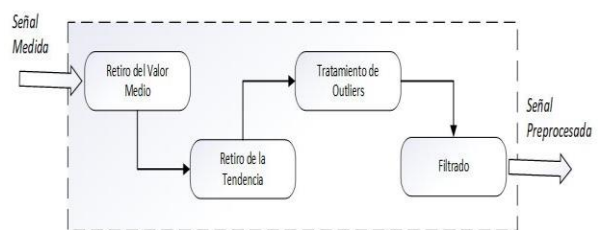


Figura 2: Etapas de Preprocesamiento de la señal

3.2. Parametrización de los Métodos de Identificación

Para obtener buenos resultados en la estimación de los MOBF cuando se analizan señales de datos tipo ambiente es necesario realizar una adecuada parametrización de los métodos de identificación paramétrica CCA y YW. De acuerdo con los resultados obtenidos en los ensayos realizados en [16] con señales sintéticas generadas bajo un ambiente controlado se han parametrizado los valores de orden del sistema, número de filas de la matriz, frecuencia de muestreo y longitud de la ventana de la señal, Tabla 1. Parametrización que se utiliza al aplicar los métodos CCA y YW al procesamiento de datos tipo ambiente de mediciones PMU de distintos sistemas.

Tabla 1: Parametrización de los métodos de análisis CCA y YW

Método	Orden	# filas de la matriz	Frecuencia de muestreo [Hz]	Longitud de la ventana [s]
CCA	20	50	10	600
YW	14	74	10	600

Cada método de estimación calculará tantos modos como el orden del sistema previamente parametrizado, incluyendo modos dominantes y espurios, los cuales deben ser necesariamente clasificados para seleccionar únicamente los de interés. Con este fin se aplica el análisis de pseudoenergía.

3.3. Caracterización y determinación del alcance de los métodos CCA y YW

Con el fin de establecer la caracterización y el alcance de los métodos de identificación paramétrica en la estimación precisa de los MOBF poco amortiguados, en este apartado se analiza y compara el desempeño de ambos métodos CCA y YW al procesar una señal tipo ambiente sintética conocida en la que se varía: el amortiguamiento y la amplitud de un modo interárea o local por vez. La señal sintética generada con el modelo de [16] en un ambiente controlado con valores de amplitud, fase, frecuencia y amortiguamiento conocidos, tiene tres modos oscilatorios: un modo interárea y dos modos locales cercanos, Tabla 2. Esto último para contemplar que algunos métodos de estimación de MOBF tienen dificultades para diferenciar dos modos con frecuencias muy cercanas, situación que suele darse en los sistemas de transmisión.

En la Fig. 3 se presenta la estimación espectral de frecuencia, obtenida al procesar la señal sintética con parámetros conocidos de la Tabla 2. Se observa que existe un pico en los 0.49 Hz y que los modos locales de 0.94 Hz y 1.19 Hz si bien no se muestran como picos importantes en el espectro de frecuencia, sí aparecen diferenciados en la gráfica. Se observa también que la amplitud del espectro está relacionada tanto con la amplitud de la oscilación en la señal como con el amortiguamiento, lo que queda en evidencia en el modo

local de 1,2 Hz que si bien tienen menor amplitud resulta con mayor espectro que el modo de 1Hz por su menor amortiguamiento. El espectro de frecuencia es utilizado en esta metodología, al comienzo para determinar la presencia de MOBF poco amortiguados en la señal y al final para verificar que los métodos de análisis CCA y YW identifican MOBF de las frecuencias dominantes observadas en el análisis espectral.

Tabla 1: Señal sintética con modo interárea y dos modos locales.

# de Señal	Modo	Frecuencia [Hz]	Amort [%]	Amplitud	Fase [°]
1	1	0,5	3	10	0
	2	1,2	10	12	10
	3	1	12	15	5

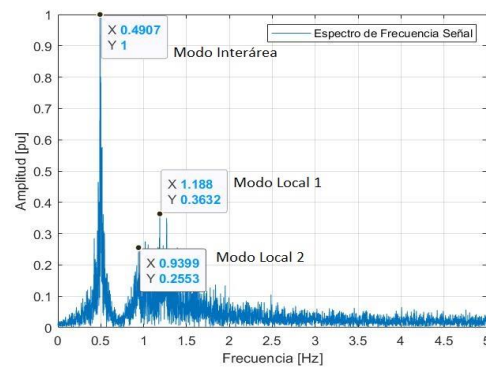


Figura 3: Espectro de Frecuencia de la señal sintética de Tabla 2.

Se varía el valor del amortiguamiento en un rango de -5% a +10 % del modo interárea de 0.5 Hz y en el modo local de 1 Hz. En las Tablas 3 y 4 se presentan los principales resultados de frecuencia y amortiguamiento de los MOBF obtenidos con los métodos CCA y YW. Se presentan en las tablas los resultados de frecuencia y amortiguamiento del modo con mayor pseudoenergía calculado por CCA y YW. Se han remarcado los resultados con un error menor al 1% en la estimación de la frecuencia y con un error menor al 10% en la estimación del amortiguamiento.

Tabla 3. Modo Interárea de 0,5 Hz. Resultados de variación de amortiguamiento, métodos CCA y YW

Amort . Modo [%]	CCA		YW	
	Frecuencia [Hz]	Amort [%]	Frecuencia [Hz]	Amort [%]
-2%	0,4894	87,2900	0,4999	2,0000
-1%	0,4622	88,3190	0,5000	1,0000
0%	0,4999	-0,0652	0,4998	0,1622
1%	0,4984	0,9556	0,4974	0,8686
2%	0,4981	2,0623	0,4961	1,8112
3%	0,4980	3,2382	0,4946	2,8033
4%	0,4978	4,4465	0,4925	3,8120
5%	0,4983	5,4346	0,4900	4,8125
6%	0,4984	6,2746	0,4870	5,7900
7%	0,4933	7,6739	0,4836	6,7349
8%	0,4910	9,3879	0,4799	7,6396
9%	0,4883	10,9380	0,4758	8,4990
10%	0,4846	12,4640	0,4717	9,3115



Se observa en la Tabla 3 que el amortiguamiento de los modos interárea inestables no es correctamente estimado, si bien YW estima el valor absoluto del amortiguamiento correctamente no determina que es negativo. Para los modos estables muy amortiguados ($\zeta > 10\%$) la estimación del amortiguamiento es menos precisa llegando CCA a no identificar el modo por estar éste amortiguado. Para los modos estables con $\zeta \leq 10\%$, se observa que CCA es más preciso en el cálculo de la frecuencia y que YW calcula con precisión, error menor al 10%, el amortiguamiento en prácticamente todo el rango de amortiguamiento positivo analizado. Mientras que CCA estima el amortiguamiento con un error menor al 10% entre 0% y 7%, siendo más preciso que YW para amortiguamientos menores al 4%. De esto se desprende que para la estimación de los modos interárea, que no suelen presentarse muy cercanos entre sí en el plano complejo, es más preciso en frecuencia CCA y que arroja resultados precisos en amortiguamiento para modos poco amortiguados, CCA con $\zeta < 8\%$ y YW con $8\% \leq \zeta \leq 10\%$.

Tabla 4. Modo Local de 1Hz. Resultados de variación de amortiguamiento, métodos CCA y YW.

Amort. Modo [%]	CCA		YW	
	Frecuencia [Hz]	Amort [%]	Frecuencia [Hz]	Amort [%]
-2%	1,0235	58,9150	0,9998	2,0000
-1%	1,0230	58,9930	1,0000	1,0000
0%	1,0000	-0,0344	1,0000	0,0469
1%	1,0081	1,5730	1,0009	1,2327
2%	1,0649	2,5415	1,0007	2,4675
3%	1,0999	1,4220	0,9983	3,5774
4%	0,9774	6,5127	0,9947	4,5852
5%	0,9686	7,1681	0,9910	5,5331
6%	0,9613	7,6702	0,9880	6,4633
7%	0,9550	8,0952	0,9859	7,4073
8%	0,9497	8,4602	0,9497	8,4602
9%	0,9453	8,7623	0,9848	9,4043
10%	0,9423	8,9884	0,9858	10,4670

Se observa en la Tabla 4 que el amortiguamiento del modo local inestable no es correctamente estimado, si bien YW estima el valor absoluto del amortiguamiento correctamente no determina que es negativo. Para los modos estables, se observa que YW es más preciso en el cálculo de la frecuencia y que calcula con mayor precisión el amortiguamiento en todo el rango de amortiguamiento analizado $\zeta \leq 10\%$. De esto se desprende que para la estimación de los modos locales que suelen presentarse cercanos entre sí en el plano complejo es más preciso YW.

Estos resultados conducen a incluir en la metodología un análisis previo de la evolución creciente de las amplitudes que indique la presencia de un modo inestable, y, en los casos de ausencia de modos inestables, un análisis que contemple la frecuencia y el amortiguamiento del modo estimado. Si la frecuencia corresponde a un interárea se tomarán de CCA sus resultados de frecuencia y de amortiguamiento si este es menor al 8%, y de YW se tomarán sus resultados de

amortiguamiento cuando $8\% \leq \zeta \leq 10\%$. Si la frecuencia corresponde a un modo local se tomarán los resultados de YW tanto en frecuencia como amortiguamiento cuando $\zeta \leq 10\%$.

De acuerdo con los resultados de la caracterización y determinación del alcance de los métodos CCA y YW, se establece que:

- De cada estimación realizada por CCA y YW se toman los modos con mayor pseudoenergía.
- Para los modos inter área con ($\zeta \leq 10\%$) el método de CCA estima con mayor precisión la frecuencia, mientras que para el amortiguamiento: CCA es más preciso cuando es muy poco amortiguado, y tiene resultados aceptables para la estimación de amortiguamientos menores al 8%.
- Para los modos locales con ($\zeta \leq 10\%$) YW estima con mayor precisión la frecuencia y amortiguamiento, mostrando un mejor desempeño que CCA en presencia de modos locales cercanos en el plano complejo.
- Se verifica si la frecuencia de los MOBF identificados coincide con los picos que presenta el análisis espectral.

En la Fig. 4 se incluye el diagrama de flujo del procesamiento integral de los resultados de los análisis de pseudoenergía y del espectro de frecuencia y de los métodos de estimación paramétrica CCA y YW para determinar los MOBF poco amortiguados a presentar al operador.

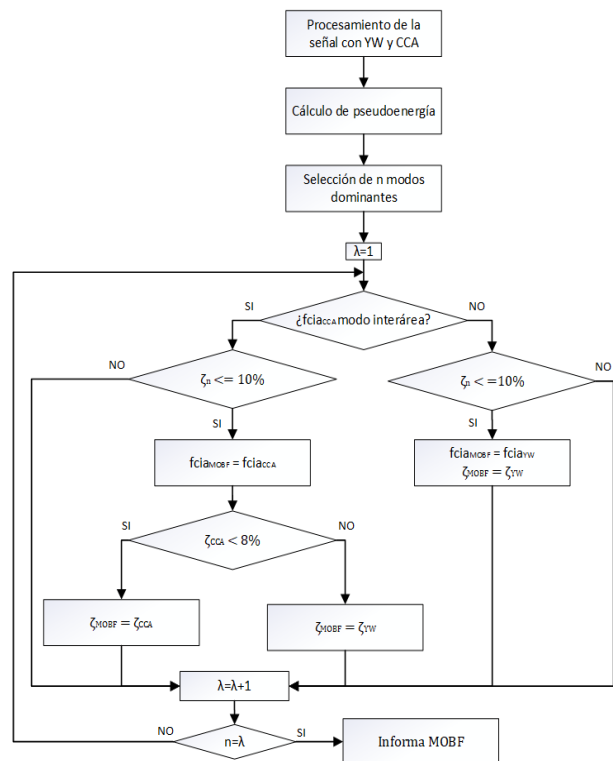


Figura 4: Diagrama de flujo del procesamiento integral de resultados de análisis espectral, pseudoenergía y CCA y YW.



Con el objetivo de establecer el alcance de ambos métodos en la identificación de MOBF poco amortiguados cuando el modo tiene diferentes niveles de amplitud se analiza una señal sintética con un modo interárea de 0,5 Hz con 5% de amortiguamiento de amplitud variable y dos modos locales de 1 Hz y 1,2Hz amortiguamiento y amplitud constantes, Tabla 5. Luego se analiza una señal con un modo local de 1Hz de amplitud variable y poco amortiguado, 4%, y con otro modo local de 1,2Hz y un modo de 0,5Hz con amortiguamiento y amplitud constantes, Tabla 6. En las Tablas 5 y 6 se presentan la frecuencia y el amortiguamiento del modo con mayor pseudoenergía calculado por CCA y YW y se han marcado aquellos resultados con un error menor al 1% en la estimación de frecuencia y al 10% en la estimación del amortiguamiento. Se observa en la Tabla 5 que cuando el modo de 0,5Hz tiene muy baja amplitud no es identificado como dominante por su bajo nivel de pseudoenergía por ambos métodos. Cuando la amplitud supera a 4 el modo de 0,5Hz es identificado satisfactoriamente por CCA. Mientras que YW identifica satisfactoriamente al modo en frecuencia a partir de la amplitud de 3 y en amortiguamiento a partir de una amplitud de 5.

Tabla 5. Modo Inter área de 0,5Hz y 5% de amortiguamiento. Resultados de variación de amplitud, métodos CCA y YW.

Amplitud	CCA		YW	
	Frecuencia [Hz]	Amort [%]	Frecuencia [Hz]	Amort [%]
2	0,9268	11,044	0,9316	8,7605
3	0,9184	7,7013	0,4654	9,6291
4	0,4984	5,0172	0,4722	6,8484
5	0,4972	5,1474	0,4771	5,7486
6	0,4970	5,3761	0,4808	5,2590
7	0,4973	5,5051	0,4836	5,0357
8	0,4977	5,6003	0,4860	4,9318
9	0,4979	5,6646	0,4882	4,8690
10	0,4983	5,4346	0,4900	4,8125
11	0,4995	5,2479	0,4915	4,7573
12	0,5002	5,1899	0,4928	4,7095
13	0,5007	5,1998	0,4937	4,6736
14	0,5011	5,2492	0,4945	4,6507
15	0,5013	5,3054	0,4951	4,6397

Se observa en la Tabla 6 que cuando el modo de 1Hz tiene baja amplitud no es identificado como dominante por su bajo nivel de pseudoenergía, pues resulta identificado como dominante el modo local de 1,2Hz. Cuando la amplitud supera a 3 y a 4 el modo de 1Hz es identificado satisfactoriamente en frecuencia por CCA y YW respectivamente. Mientras que la identificación resulta con un error menor al 10% en amortiguamiento para amplitudes mayores a 23 para CCA y a 18 para YW.

En resumen, tanto CCA como YW tienen dificultades para identificar modos interárea y locales poco amortiguados si su amplitud es muy baja. Estos resultados conducen a incluir en la metodología un análisis que contemple la amplitud o energía del modo,

previo al preprocesamiento de la señal, Fig. 1, para decidir o no el análisis CCA y YW. Para ello se realiza un análisis del espectro de frecuencia de la señal, si este presenta máximos destacados en las frecuencias de interés la señal contiene MOBF poco amortiguado. Esto condice con el criterio aplicado en los centros de control donde consideran que modos con amplitudes muy bajas no representan riesgo para el sistema.

Tabla 6: Modo Local de 1Hz y 4% de amortiguamiento. Resultados de variación de amplitud con el método CCA y YW.

Amplitud	CCA		YW	
	Frecuencia [Hz]	Amort [%]	Frecuencia [Hz]	Amort [%]
1	1.2479	3.4707	1.2341	5.7035
2	1.2329	5.5461	1.2354	6.5956
3	0.9889	7.9247	1.2470	8.0146
4	0.9770	5.0345	1.0073	16.655
5	0.9136	6.7796	1.0043	11.549
6	0.9422	5.8853	1.0017	8.9574
7	0.9580	6.0074	0.9999	7.4692
8	0.9651	6.0877	0.9987	6.5421
9	0.9686	6.1074	0.9979	5.9295
10	0.9707	6.1179	0.9972	5.5062
11	0.9722	6.1471	0.9966	5.2034
12	0.9734	6.2069	0.9961	4.9805
13	0.9747	6.2976	0.9956	4.8127
14	0.9761	6.4076	0.9951	4.6843
15	0.9774	6.5127	0.9947	4.5852
16	0.9786	6.5769	0.9943	4.5086
17	0.9796	6.5590	0.9939	4.4500
18	0.9803	6.4241	0.9936	4.4062
19	0.9808	6.1558	0.9933	4.3748
20	0.9813	5.7618	0.9930	4.3540
21	0.9823	5.2680	0.9927	4.3420
22	0.9842	4.7162	0.9925	4.3377
23	0.9873	4.1705	0.9923	4.3399
24	0.9918	3.7272	0.9921	4.3476

4. ESTIMACIÓN DE MODOS OSCILATORIOS EN MEDICIONES PMU

Se procesan con la metodología propuesta mediciones PMU del sistema WAMS del Operador Nacional de Electricidad del Ecuador CENACE con el objetivo de extraer información de los MOBF poco amortiguados. El acceso a los datos del Sistema Nacional Interconectado (S.N.I.) de Ecuador se ha logrado en el marco de un acta de acuerdo entre el CENACE y la Universidad Nacional de San Juan en la cual se establece la confidencialidad de los registros compartidos.

Se tomaron muestras de mediciones de datos ambiente de frecuencia en 5 ventanas de 20 minutos cada una durante 5 horas, ventanas obtenidas cada 1 hora desde las 00:00:00h (hora local de Ecuador) hasta las 04:20:00h del día 16 de septiembre 2021, donde cada ventana a su vez se dividió en subventanas de 10 minutos o 600 s. Es objetivo identificar el modo oscilatorio interárea de aproximadamente 0.35 Hz poco amortiguado propio de la interconexión Ecuador – Colombia, el cual presenta una mayor actividad en períodos de demanda baja y media del S.N.I., es decir cuando el S.N.I. de



Ecuador exporta energía a Colombia a través del enlace de 230 kV. Durante estos períodos, se conoce por [17,18], que la excitación del modo interárea presenta oscilaciones sostenidas con bajo amortiguamiento.

Los datos ambiente disponibles corresponden a la medición PMU de la frecuencia eléctrica registrada en la subestación Pimampiro, provincia de Imbabura en Ecuador. En la Fig. 5, se muestra una ventana de datos ambiente de la señal de frecuencia de 600 s, donde no es sencillo visualizar a simple vista el modo inter área de 0.35 Hz poco amortiguado, es por este motivo que se recurre a aplicar la metodología propuesta en este trabajo. En un primer paso se determina que la señal no presenta modos inestables, Fig. 5, por lo cual se procede a realizar la estimación espectral de frecuencia para la ventana de datos de frecuencia registrados desde 03:10:00h hasta 03:20:00h, Fig. 6. Se observa en la Fig. 6 que existen 4 picos significativos en el espectro de frecuencia de aproximadamente 0.10, 0.40, 1.10 y 1.40 Hz.

En la Tabla 7 se presentan los resultados obtenidos al analizar con los métodos paramétricos de CCA y YW dos ventanas de 10 minutos de la señal de frecuencia de Fig.5. Se presentan cuatro modos estimados, ordenados de acuerdo a su pseudoenergía, donde se han resaltado aquellos que resultan de aplicar la metodología de la Fig. 4. Se observa en la Tabla 7 que con la metodología propuesta se identifican cuatro MOBF poco

amortiguados cuyas frecuencias se corresponden con los 4 picos del espectro de frecuencia de la Fig.6 y son: a) Modo de muy baja frecuencia, 0.10 Hz, con amortiguamiento menor al 10% en la 1er ventana que puede corresponder a un modo global, b) Modo interárea de aproximadamente 0.40 Hz poco amortiguado propio de la interconexión Ecuador-Colombia, c) Dos modos locales de aproximadamente 1.10 Hz y 1.40 Hz con amortiguamiento menor al 10%. Estos modos se corresponden también con los modos identificados en [17] donde se realiza un análisis de estimación de los modos oscilatorios poco amortiguados del S.N.I. de Ecuador ante un evento que se dio el 21 de agosto de 2013 a las 21:11:31 donde se dispararon 550 MW de generación en la central Chivor en el sistema colombiano.

En las Figs. 7 y 8, se presentan los valores de la frecuencia y amortiguamiento del modo interárea obtenidos al analizar la señal de frecuencia en distintas ventanas de tiempo con los métodos de CCA y YW. Como se puede observar en la Fig. 7 en todas las ventanas de tiempo la frecuencia se mantiene alrededor de 0.40Hz y coincide con la frecuencia del modo interárea de bajo amortiguamiento de 0.35Hz identificado en [17,18]. Como se puede observar en la Fig. 8, en la mayor parte de las ventanas el amortiguamiento se mantiene entre un 5% y 10% con el método de CCA.

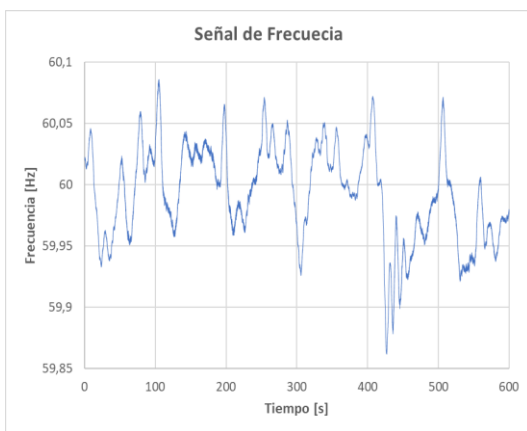


Figura 5: Señal de frecuencia del S.N.I. de Ecuador.

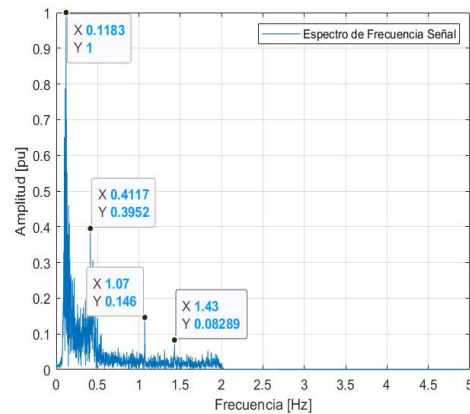


Figura 6. Espectro de Frecuencia de la señal de frecuencia eléctrica del SIN Ecuador

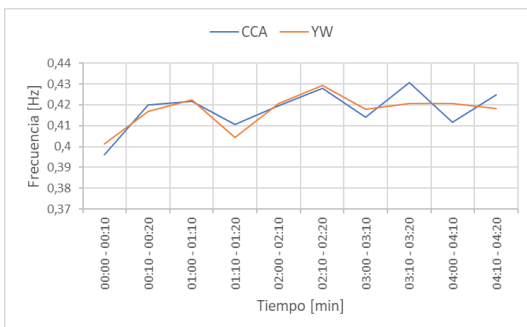


Figura 7: Frecuencia del MOBF identificado en la señal de frecuencia eléctrica

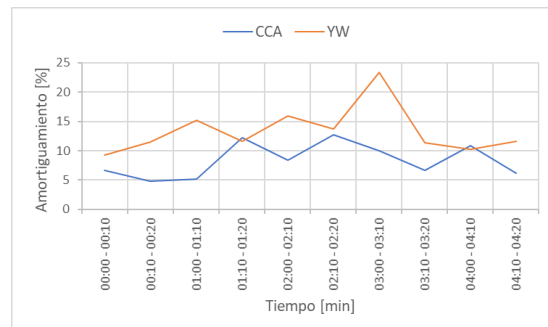


Figura 8: Amortiguamiento del MOBF identificado en la señal de frecuencia eléctrica



Tabla 7: Modos obtenidos al analizar las ventanas de datos ambiente de Ecuador con CCA y YW

Método	CCA			
	0:00 - 0:10		0:10 - 0:20	
Horario	Frec [Hz]	Amort [%]	Frec [Hz]	Amort [%]
1	0,108	5,935	0,113	19,917
2	0,396	6,641	0,419	4,748
3	1,088	11,445	0,585	25,691
4	1,128	2,624	0,871	22,829
Método	YW			
Horario	0:00 - 0:10		0:10 - 0:20	
Modo	Frec [Hz]	Amort [%]	Frec [Hz]	Amort [%]
1	0,109	5,192	0,119	14,704
2	0,401	9,263	0,417	11,547
3	1,039	7,743	1,046	12,338
4	1,472	7,453	1,549	8,872

5. CONCLUSIONES

La metodología propuesta en este trabajo permite estimar con precisión los MOBF muy poco o poco amortiguados, a través de los métodos paramétricos CCA y YW y de los análisis espectral y de pseudoenergía, aplicados a extensas ventanas de datos tipo ambiente que se encuentran disponibles durante la operación normal del sistema, sin necesidad de esperar perturbaciones importantes que den lugar a datos ringdown. La metodología muestra que es posible investigar la estabilidad oscilatoria del SEP a través del procesamiento de mediciones PMU de los sistemas WAMS cada vez más difundidos en las redes eléctricas.

Se ha determinado en este trabajo el alcance de los métodos CCA y YW para estimar MOBF con distinto amortiguamiento y amplitud en la señal; concluyendo que: a) los métodos no logran identificar modos inestables; b) CCA calcula con mayor precisión los modos interárea en frecuencia y en amortiguamiento, cuando son poco amortiguados; c) YW es superior para identificar modos locales muy poco y poco amortiguados, y para calcular el amortiguamiento de modos interárea con $8\% \leq \zeta \leq 10\%$; d) modos con muy baja amplitud poco amortiguados y modos con alto amortiguamiento no llegan a ser identificados; e) es necesario discernir en los resultados los MOBF dominantes y verificar si sus frecuencias se corresponden con los picos del espectro de frecuencia de la señal. Todas estas conclusiones han sido plasmadas, con el fin de estimar con precisión los MOBF, en la definición de los diferentes pasos de la metodología propuesta.

Una futura posible integración de la metodología propuesta con métodos de identificación de MOBF orientados a datos ringdown en un esquema, donde la transformada Wavelet discreta (TWD) identifique el tipo de datos, hará posible el procesamiento automático y continuo de las señales [19]. Si la TWD no detecta perturbaciones en la señal se construye una ventana de 600 s de datos ambiente y se aplica la metodología

propuesta. Si la TWD detecta perturbaciones se construye una ventana de datos ringdown de corta duración y se aplica por ejemplo el método Prony [14]. Si además se consideran los reducidos tiempos de cálculo (unos pocos segundos para la TWD y para los métodos de identificación paramétricos [16,19]), será posible su implementación en centros de control, para advertir al operador del SEP sobre MOBF potencialmente peligrosos para la estabilidad del SEP por su muy bajo amortiguamiento, y así decidir acciones de control preventivo o correctivo, como la reducción de transferencia de potencia en líneas de interconexión.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD), institución que financió el programa de estudios de posgrado del Ing. Ramos Contero, sin su apoyo este trabajo de investigación no hubiera podido realizarse. Los autores también agradecen al CENACE – Ecuador por facilitar las señales PMU de datos tipo ambiente para su análisis.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] P. Kundur, O. Malik, "Power System Stability and Control, Mac Graw Hill, 2022.
- [2] R. Bialecki, "Identificação em tempo real de Oscilações Eletromecânicas utilizando Sincrofasores," M.S. thesis, Dept. Ingeniería Eléctrica, Universidad Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2014.
- [3] L. Dosiek, N. Zhou, J. W. Pierre, Z. Huang, and D. J. Trudnowski, "Mode shape estimation algorithms under ambient conditions: A comparative review," IEEE Trans. Power Syst., vol. 28, no. 2, pp. 779–787, 2013.
- [4] J. Ni, C. Shen, and F. Liu, "Estimation of the electromechanical characteristics of power systems based on a revised stochastic subspace method," Sci. China Technol. Sci., vol. 55, no. 6, pp. 1677–1687, 2012.
- [5] H. R. Ali, "Inter-Area power oscillation identification using synchronized ambient and ringdown data," Proc. - 2013 Int. Conf. Inf. Technol. Electr. Eng., 2013.
- [6] I. C. Decker, A. S. Silva, M. N. Agostini, F. B. Prioste, B. T. Mayer, and D. Dotta, "Experience and applications of phasor measurements to the Brazilian interconnected power systemz," Eur. Trans. Electr. Power, pp. 1557–1573, 2011.
- [7] J. W. Pierre, "Initial results in electromechanical mode identification from ambient data," IEEE Trans. Power Syst., no. 3, pp. 1245–1251, 1997.
- [8] M. Anderson, N. Zhou, J. Pierre, and R. Wies, "Bootstrap-based confidence interval estimates for electromechanical modes from multiple output analysis of measured ambient data," IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meet., 2005.
- [9] L. Dosiek, D. J. Trudnowski, and J. W. Pierre, "Model order sensitivity in ARMA-based electromechanical mode estimation algorithms under ambient power

- system conditions,” IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet., 2018.
- [10] P. D. Welch, “The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra,” *Digit. Signal Process.*, No. 2, pp. 532–574, 1975.
- [11] R. Bialecki, “Identificação em tempo real de Oscilações Eletromecânicas utilizando Sincrofasores,” M.S. Thesis, Dept. Ingeniería Eléctrica, Univ. Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2014.
- [12] J. Guo, H. Liu, D. Zhou, J. Chai, Y. Zhang and Y. Liu, “Real-time power system electromechanical mode estimation implementation and visualization utilizing synchrophasor data”, 2016 IEEE/PES T&D, 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/TDC.2016.7519893..
- [13] D. J. Viscarra and D. G. Colomé, “Determination of oscillatory modes in the SADI from the analysis of PMU measurements in Low Voltage”, presented at the XIII CLAGTEE, Santiago de Chile, 20-23 Oct 2019.
- [14] D. J. Viscarra and D. G. Colomé, “Distributed Parametric Identification of Low Frequency Oscillatory Modes in Multiple PMU”, presented at the IEEE T&D LA, Montevideo, Uruguay, 29 Set - 1 Oct. 2020.
- [15] Anderson. J et al., “Phase Angle Calculations: Considerations and Use Cases,” *NASPI Eng. Anal. Task Team Tech. Pap.*, vol. 6, no. September, pp. 1–36, 2016, [Online]. Available: https://www.naspi.org/sites/default/files/reference_documents/naspi_2016_tr_006_phase_angle_calculations_final.pdf.
- [16] O. Ramos and D. G. Colomé, “Determination of oscillatory modes in the SADI from the analysis of PMU measurements of ambient data in Low Voltage”, *Rev. Técnica “Energía”*, vol 18, No 1, pp 48-58, 2021. doi: <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v18.n1.2021.467>
- [17] A. F. Quinaluiza and D. E. Echeverría, “Análisis de Estabilidad de Pequeña Señal Utilizando Mediciones Sincrofasoriales PMU,” *Rev. Técnica “Energía,”* vol. 10, no. 1, pp. 123–132, 2014, doi: 10.37116/revistaenergia.v10.n1.2014.107.
- [18] J. C. Cepeda and A. B. D. La Torre, “Monitoreo de las oscilaciones de baja frecuencia del Sistema Nacional Interconectado a partir de los registros en tiempo real,” *Rev. Técnica “Energía,”* vol. 10, No. 1, pp. 181–190, 2014, doi: 10.37116/revistaenergia.v10.n1.2014.114.
- [19] O. Ramos, C. Juarez, D. Viscarra, D.G. Colomé, “Identificación Paramétrica de Modos Oscilatorios Poco Amortiguados o Inestables en Registros De Mediciones PMU”, presented at the XIX ERIAC Encontro Regional Ibero-Americano do CIGRE, Foz do Iguazú, Brasil, 21-25 mayo 2023.



investigación corresponden al análisis de estabilidad de pequeña señal de Sistemas Eléctricos de Potencia.



Actualmente es directora de tesis de posgrado, y de proyectos de investigación y transferencia de tecnología. Sus principales campos de investigación son: modelado, simulación, supervisión, estabilidad y control de sistemas eléctricos de potencia.



Actualmente trabaja en el Operador Nacional de Electricidad CENACE de Ecuador y ocupa el cargo de Gerente Nacional de Desarrollo Técnico. Sus áreas de interés son: Estabilidad de Sistemas de Potencia en Tiempo Real, Sistemas de medición sincrofasoriales PMU’s y Control de Emergencia de Sistemas de Potencia.

Omar Ramos Contero.- Nació en Ecuador en 1991. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador en el año 2017. Actualmente se encuentra a la espera de realizar la defensa de tesis de maestría en la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ), Argentina. Sus áreas de

Delia Graciela Colomé. - es Doctora en Ingeniería Eléctrica, egresada de la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ), Argentina, 2009. Profesora y Consultora del Instituto de Energía Eléctrica (IEE), UNSJ - CONICET. Coordinadora de la carrera de Ingeniería Eléctrica (2011-2018) y directora del Departamento de

Diego Ernesto Echeverría Jurado.- Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Escuela Politécnica Nacional de Quito, en 2006. En el año 2021, obtuvo el título de Doctor en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Nacional de San Juan, Argentina. Actualmente