

Determinación de Modos Oscilatorios Presentes en el Sistema Eléctrico Ecuatoriano Mediante Técnicas Estadísticas

R.E. Cubillo

Operador Nacional de Electricidad - CENACE
E-mail: rcubillo@cenace.org.ec

Resumen

El Operador Nacional de Electricidad – CENACE dispone como parte de las herramientas para el proceso de supervisión de la operación del sistema eléctrico ecuatoriano un sistema de Monitoreo de Área Extendida (WAMS), el cual permite observar en tiempo real información estratégica relacionada con la estabilidad oscilatoria del sistema. Toda esta información proveniente del sistema WAMS maneja un gran volumen de información resultante del muestreo de las variables eléctricas con una resolución 60 muestras por segundo registradas a través de 29 unidades de medición fasorial (PMU) que han sido dispuestas de manera estratégica en ciertas subestaciones del Sistema Nacional Interconectado (SNI). Esta información por una parte permite identificar posibles estados de oscilación en tiempo real y su consecuente aporte a la toma de decisiones a nivel operativo, y por otra parte permite adquirir un conocimiento a través de análisis post mortem mediante un tratamiento estadístico adecuado.

Con este antecedente mediante este trabajo se pretende aplicar ciertos criterios estadísticos utilizados para el análisis de datos bajo un concepto de Big Data; conceptos que permitirán implementar una base para el análisis estadístico con integración de múltiples conjuntos de datos provenientes de otras fuentes como el sistema SCADA, la búsqueda de información considerando al factor tiempo como un parámetro crítico para la toma de decisiones y retroalimentación de la operación, y el uso de grandes volúmenes de información como las obtenidas a través del sistema SCADA y WAMS.

Palabras clave— WAMS, estabilidad oscilatoria, pequeña señal, análisis de datos, cluster, Big Data.

Abstract

The national operator of electricity - CENACE has as part of its tools for the process of monitoring the operation of the Ecuadorian electrical system a Monitoring Wide Area (WAMS), which one allows to observe real-time strategic information related to the oscillatory stability system. All this information from the WAMS system handles a large volume of information resulting from sampling the electrical variables with a resolution 60 samples per second obtained through 29 Phasor Measurement Units (PMUs) that have been placed strategically in certain substations Interconnected National system (SNI). This information identifies some possible states of oscillation in real time and its consequent contribution to decision making at the operational level, and on the other hand can acquire knowledge through post mortem by an appropriate statistical treatment.

With this background through this work is intended to apply certain statistical criteria used for data analysis under a concept of Big Data; concepts that will implement a basis for statistical analysis with integration of multiple data sets from other sources such as the SCADA system, information search considering the time factor as a critical parameter for decision-making and feedback of the operation, and the use of large volumes of information as those obtained through the SCADA system and WAMS.

Index terms— WAMS, oscillatory stability, short term, data analysis, clustering, Big Data.

Recibido: 13-09-2016, Aprobado tras revisión: 09-12-2016

Forma sugerida de citación: Cubillo B. R.; (2017). "Determinación estadística de modos de estabilidad oscilatoria". Revista Técnica "energía". No. 13, Pp. 139-145
ISSN 1390-5074.

1. INTRODUCCIÓN

El estado del arte de la operación de tiempo real de un sistema eléctrico de potencia, se ve complementada a mediante los análisis de eventos y los análisis posoperativos para los diferentes estados del sistema presentados, así tanto en condiciones de operación normal como de emergencia. Bajo este antecedente un análisis posoperativo permite realizar una inferencia operativa sobre posibles escenarios de la operación mediante una determinación de características similares o patrones obtenidos, los cuales pueden ser obtenidos a través de un análisis exploratorio y estadístico de la información resultante y obtenida de los sistemas tecnológicos de uso del operador y en el caso de CENACE como lo son los sistemas SCADA y WAMS.

En el presente artículo se tratará como una primera etapa el análisis de la información obtenida a través del sistema WAMS y su aplicación gestora de información WAProtector disponible en el CENACE, la cual permite obtener y registrar información de la composición modal de señales de potencia de 29 PMUs distribuidas en el sistema ecuatoriano. La información proveniente de las unidades de medición fasorial disponen de información con una resolución de 60 muestras por segundo, lo que continuamente genera un gran volumen continuo de datos que son procesados y almacenados.

El sistema WAProtector almacena este gran volumen de información en base de datos con la factibilidad de poder acceder a la misma a través de la herramienta, en ese sentido en este particular se pone más atención a la información de la frecuencia, la razón de amortiguamiento y amplitud de los modos presentados en cada instante de tiempo.

Por otra parte, el manejo de grandes volúmenes de información obedece a que su manipulación y gestión requiere de esfuerzos significativos que hacen muy difícil su proceso mediante el uso de herramientas de análisis tradicionales y bajo la premisa de obtención de resultados con el factor tiempo como parte de ellas.

El concepto de Big Data se identifica con el manejo de información proveniente de diferentes fuentes, análisis de grandes volúmenes de información que puede ser del tipo inclusive no estructurada y en escala la velocidad de tratamiento de la misma, lo que involucra tareas multidisciplinarias con conceptos matemáticos, estadísticos y ciencias de la computación de manera integrada. Y finalmente como aplicación a este entorno se destaca la optimización operacional y mejora en la toma de decisiones encaminando los resultados como parte de un proceso de la ciencia de los datos. Y con el fin de integrar nuevos análisis

relacionados a este tema a partir de este concepto se realiza la preparación de la información y el tratamiento estadístico de datos.

Bajos estos antecedente se pretende a través de este artículo establecer diferentes tratamientos de datos con el fin de llegar a caracterizar las variables del sistema presentes en un escenario de estabilidad oscilatoria, es decir de las señales de frecuencia y amortiguamiento que definan al sistema eléctrico ecuatoriano en un común escenario de oscilaciones naturales de pequeña señal obtenidas a través del sistema WAMS, y mediante el tratamiento de esta información utilizando herramientas estadísticas licenciadas como STATA y open source.

2. MARCO TEORICO

2.1. Estabilidad oscilatoria de pequeña señal

Un análisis de estabilidad oscilatoria de pequeña señal consiste de un estudio basado en el comportamiento de un sistema de potencia frente a perturbaciones pequeñas esto con el fin de determinar la capacidad del sistema mantener un estado de sincronismo. Dentro de estas perturbaciones pequeñas se pueden identificar los cambios naturales [1] en condiciones normales de toma y salida de cargas, entrada y salida de generación, o incluso frente a cambio de programaciones entre enlaces de interconexión internacionales.

Una inestabilidad de pequeña señal puede resultar debido a un incremento en el ángulo de un rotor dando origen a un modo de inestabilidad no oscilatorio, mientras que ante la aparición de oscilaciones en el rotor con amplitud creciente originarán modos de inestabilidad oscilatoria.

Las oscilaciones presentes en los sistemas de potencia generalmente no generan un estado de inestabilidad sin embargo es de vital importancia pretender y observar bajo qué condiciones estas oscilaciones hacen que el sistema pierda o mantenga la estabilidad.

2.1.1 Oscilaciones en sistemas de potencia.

La estabilidad de pequeña señal puede ser identificada en función de la siguiente clasificación [2]

- a) Modos entre áreas: Son oscilaciones que se encuentran identificadas en los rangos de 0.2 y 0.7 Hz. Estas oscilaciones involucran a grupos de máquinas en un área las cuales oscilan de manera coherente frente a otro grupo de generadores perteneciente a otra área, interconectados a través de un enlace débil.

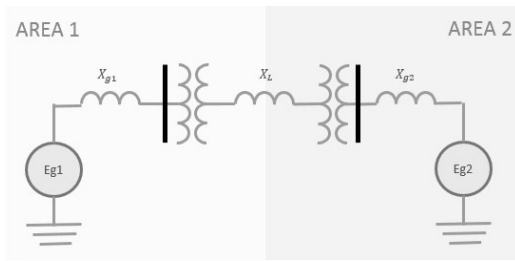


Figura 1: Oscilaciones entre áreas

b) Modos locales: Son oscilaciones que se encuentran identificadas en los rangos entre 0.8 y 1.8 Hz. Estas oscilaciones involucran a oscilaciones provenientes de un generador o una planta, que se encuentra en oscilación contra el sistema.

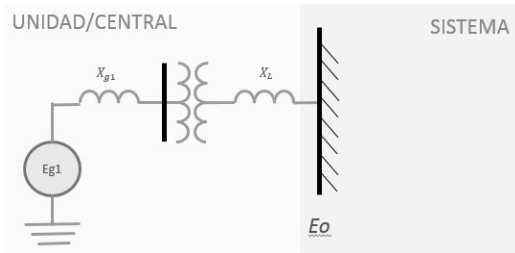


Figura 2: Oscilaciones locales

c) Modos entre máquinas: Son oscilaciones que se encuentran identificadas en los rangos entre 1.5 y 3 Hz. Estas oscilaciones son el resultado de las interacciones entre los controladores de las unidades y no están asociadas a los límites de estabilidad debido a la transferencia de potencia. Sin embargo, la presencia de este tipo de oscilaciones también puede presentarse en centrales de generación eléctricamente cercanas.

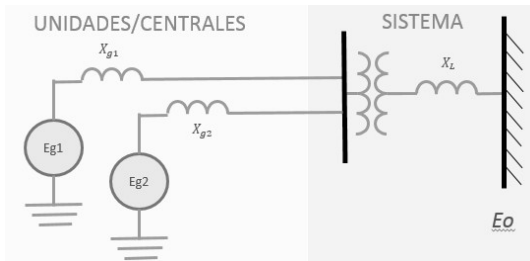


Figura 3: Oscilaciones entre máquinas

d) Modos de control: Son oscilaciones que se encuentran identificadas con valores de frecuencias mayores a los 4 Hz. Estas oscilaciones son atribuibles a problemas en los propios sistemas de control, reguladores de voltaje, reguladores de velocidad y de control de voltaje.

- e) Modos de muy baja frecuencia: Son oscilaciones que se encuentran identificadas en los rangos entre 0.01 y 0.1 Hz. Estas oscilaciones también son consideradas como modos de control y generalmente aparecen en sistemas altamente hidráulicos, debido a problemas en la sintonización en los controladores de velocidad en las unidades de generación hidráulica.
- f) Modos de torsión: Su rango de frecuencia está identificada en los rangos de 10 y 46 Hz, y son el resultado de inestabilidad por interacciones de elementos de potencia en la red como compensadores serie, controles de sistemas HVDC (alto voltaje de)

Los auto valores de una matriz del sistema disponen la información sobre las frecuencias de oscilación en un determinado punto de operación y a través de esta el estudio de pequeña señal.

Un análisis modal [3] permite determinar las oscilaciones de un sistema eléctrico de potencia, obteniéndose como resultado los modos de oscilación y sus correspondientes frecuencias modales definidas mediante la frecuencia y la razón de amortiguamiento de una oscilación a través de las siguientes expresiones.

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} \quad (1)$$

$$\zeta_i = \frac{-\sigma_i}{\sqrt{\sigma_i^2 + \omega_i^2}} \quad (2)$$

Donde:

- f_i frecuencia de oscilación
- ζ_i razón de amortiguamiento
- i corresponde al i -ésimo modo

2.2. Técnicas de análisis de datos con la conceptualización de Big Data

Conceptualmente Big Data hace referencia al almacenamiento, tratamiento y análisis de grandes cantidades de datos con el fin de extraer conocimiento de esta información y que responde a las siguientes características:

- **Volumen:** Resolución de adquisición de la información de 60 muestras por segundo proveniente de 29 PMUs ubicadas en el SNI.
- **Variedad:** Información proveniente de 29 nodos con contenido de información no necesariamente inter – relacionada de tipo no estructurada o metadatos.

- **Velocidad:** Análisis de datos y obtención de resultados donde el parámetro tiempo resulta ser crítico.

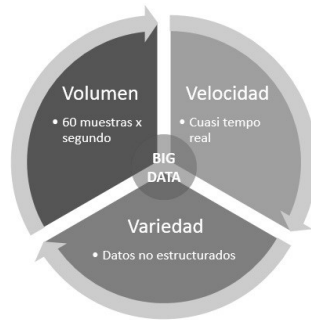


Figura 4: 3 Vs de Big Data

2.2.1 Conceptos generales

- Dataset: Son los conjuntos de datos que mantienen ciertos atributos o propiedades relacionadas y que pueden ser obtenidos de una o varias fuentes de información, siendo esta información previamente o no estructurada.
- Análisis de datos: Corresponden a las diferentes técnicas estadísticas de amplia variedad que permiten durante un proceso la inspección, limpieza y transformación de datos con el fin de obtener conocimiento o destacar cierta información encontrada, para la determinación de conclusiones y la toma de decisiones obtenidas a través de estos análisis.

c) Cluster:

Dada una muestra X formada por n individuos sobre los que se mide p variables, en cada objeto n . Siendo x_{ij} el valor de la variable x_j en el i -ésimo objeto con $i = 1, 2, \dots, p$

Este conjunto de valores numéricos puede ser ordenado en la siguiente matriz.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{1j} & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & x_{2j} & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & x_{ij} & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & x_{nj} & x_{np} \end{bmatrix}$$

Dado este conjunto de n observaciones caracterizados por la información de p variables se plantea de manera que ciertos individuos son pertenecientes a un grupo identificado como un *cluster*

2.2.2 Análisis Clúster

El análisis clúster consiste de una metodología de análisis de datos basado en un procedimiento

estadístico que podría ser univariante (sobre observaciones) o multivariante (sobre diferentes variables) bajo un conjunto de datos que corresponden a una muestra con información esperada de tipo:

- Homogénea respecto a las variables utilizadas para su formación.
- De agrupación de información cifrada de manera general desconocida a priori dentro de un conjunto de p variables y n individuos
- De información con grupos lo más distintos posibles unos de otros, a través de un criterio de similitud con la capacidad de relación de semejanza.

a) Clúster de *k-medias*

Es un método de clasificación el cual n observaciones se agrupan en k grupos los cuales se asignan mediante la determinación de la distancia a un valor medio más cercano, en este tipo de clúster se utilizan algoritmos expectation - maximization de distribución gaussianas.

- Métodos de cálculo de las distancias.

- Distancia euclídea.

$$D = \sqrt{\sum (x_{ip} - x_{jp})^2} \quad (3)$$

- Distancia euclídea al cuadrado.

$$D = \sum (x_{ip} - x_{jp})^2 \quad (4)$$

- Distancia de Minkowski.

$$M = [\sum (x_{ip} - x_{jp})^2]^{\frac{1}{n}} \quad (5)$$

b) Clúster Visual

Una agrupación visual permite durante en el proceso de creación de categorías basadas en la agrupación de los valores contiguos de las variables y observaciones existentes con el fin de dar lugar a un número limitado de categorías a priori, esta metodología permite utilizar la agrupación visual para:

- Crear variables categóricas a partir de variables de escala continuas.
- Colapsar un número elevado de categorías ordinales en un conjunto menor de categorías.
- Crear un mapeo referencial de la información a través de la información cruda.

2.2.3 Tratamiento de la información estadística

Con el fin de dar un adecuado tratamiento de la información debido a un gran volumen de los datos obtenidos a partir de las diferentes fuentes generalmente no contemplan un formato o estructura que permita ser procesada de manera directa, tomando las siguientes consideraciones:

- 1) Ejecución de tareas para un adecuado tratamiento inicial de la información, mediante análisis y *técnicas de detección* y de filtrado de datos a típicos o datos perdidos.
- 2) Almacenamiento y registro de la información en medios o archivos para tratamiento adecuado.

Bajo la conceptualización de Big Data la información de las unidades de medición fasorial se establece una arquitectura de información no estructurada (noSQL); de la siguiente manera.

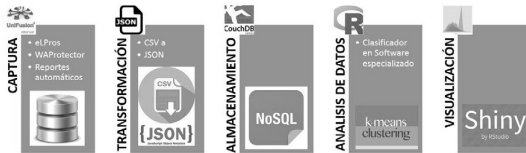


Figura 5: Esquema de tratamiento de la información

Esta arquitectura permite que la información requerida sea almacenada de tal forma de garantizar tiempos menores en el procesamiento y análisis de la información debido al gran volumen de datos obtenidos del sistema WAMs.

Con la disponibilidad de la información de CouchDB el tratamiento de la misma se realiza mediante la utilización de R y las funciones de este paquete estadístico en la presentación de resultados.

3. RESULTADOS

3.1. Resultados del análisis de clúster

Como primera etapa del análisis de datos con el fin de conocer el comportamiento de las variables de frecuencia y amortiguamiento se realizó en primera instancia un análisis de clúster mediante gráficos sobre la data cruda.

Para ello se consideró una muestra de 432,764 observaciones correspondientes a la información de la semana comprendida entre el 1 de agosto al 7 de agosto del 2016.

Para posteriormente aplicar un clúster de k-medias con la información del parámetro k obtenido a través del análisis visual de esta manera obteniéndose:

3.1.1 Resultado de clúster gráfico

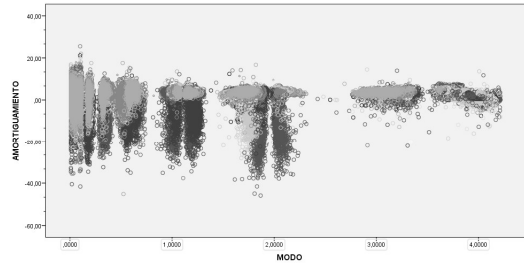


Figura 6: Clúster gráfico sobre toda la información de la muestra

Esta primera aproximación permitió identificar la conformación visual de 10 clúster, que corresponde al parámetro k para el análisis de clúster mediante k-medias.

3.1.2 Resultados de clúster k-medias

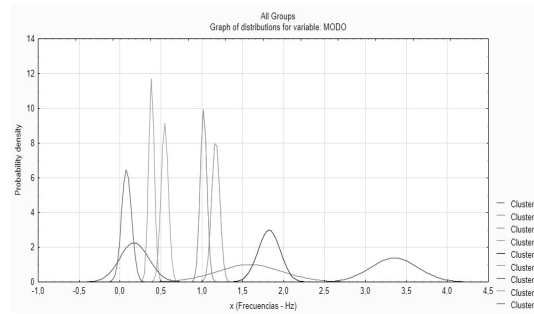


Figura 7: Gráfico de densidad de probabilidad de modos significativos

Mediante el análisis clúster de k-medias, el cual fue desarrollado mediante la técnica de cálculo de distancias euclídeas con un parámetro de $k = 9$, se obtuvo que los modos más significativos presentes en el periodo de corresponden son acuerdo a la siguiente tabla de resultados, con su correspondiente probabilidad.

Tabla 1: Densidad de distribución normal de modos significativos

Clúster	Identificación del modo		
1	0.173869	0.176715	interarea (*)
2	1.021607	0.039945	local
3	1.584195	0.401130	entre maquinas
4	1.168694	0.048467	local
5	1.822311	0.133868	entre máquinas(*)
6	0.544967	0.043489	entre área
7	3.352751	0.289291	Control (*)
8	0.384855	0.033961	entre área
9	0.081655	0.061510	control mbf

De los resultados de la gráfica de densidad de probabilidad se determina que los modos de mayor

probabilidad de incidencia dentro del sistema eléctrico ecuatoriano son los modos:

Tabla 2: Probabilidad de incidencia de modos significativos

Cluster	frecuencia	Probabilidad	modo
8	0.38	11.7 %	Entre áreas
6	0.54	9.2 %	
2	1.02	10.0%	local
4	1.16	8.0 %	

3.1.3 Representación espacial de modos

Dentro de las técnicas de clúster gráfico adicionalmente se pueden realizar un análisis exploratorio con el fin de evidenciar por otra parte la incidencia de los registros de las amplitudes presentes en los modos en las diferentes PMU, lo que permitiría caracterizar este comportamiento de los modos en conjunto con el amortiguamiento y la amplitud.

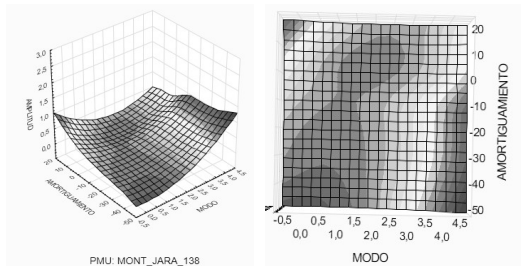


Figura 8: Detección de modo de control de alta incidencia en el PMU MONT_JARA_138

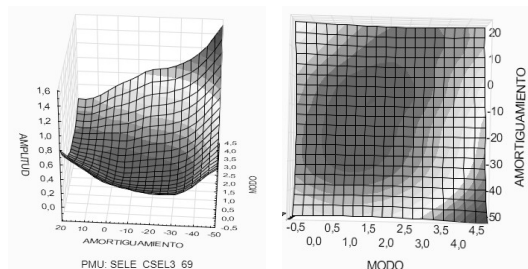


Figura 9: Detección de modo de control de alta incidencia en el PMU SELE_CSEL_69

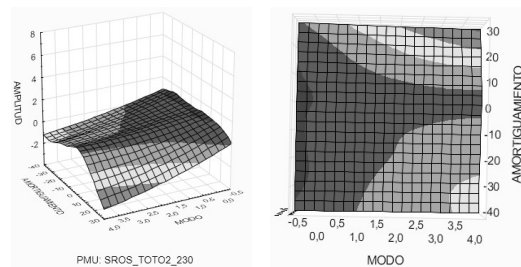


Figura 10: Detección de modos entre área de alta incidencia en el PMU SROS_TOT2_230

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los sistemas tecnológicos de apoyo en la operación de tiempo real, proveen de una gran cantidad información la cual requiere de ser explotada para determinar mediante análisis fuera de línea posibles problemas en los sistemas de potencia y constituyen un aporte esencial en el análisis posoperativo.

Mediante técnicas estadísticas adecuadas con capacidad de manejo ágil y de gran volumen se puede establecer mecanismos para inferir posibles estados anómalos que puede ser determinantes en la toma de decisiones durante la operación de tiempo real e inclusive la planificación de la generación.

Las diferentes técnicas de clúster proveen un medio estadístico de tratamiento de la información, y en sistemas que proveen grandes volúmenes de información denominadas de Big Data por el requerimiento de la velocidad de procesamiento y la variedad de información de diferentes fuentes, constituyen un primer paso para la caracterización de estados operativos del sistema en base a las variables eléctricas de entrada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] P. M. Anderson, A. A. Fouad, Power System Control and Stability, IEEE Press, 1994
- [2] Bikash Pal, Balarko Chaudhuri, Robust control in power systems. New York; Springer, c2005 Power Electronics and Power systems series
- [3] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw – Hil, 1994.R.
- [4] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, et al, "Definition and classification of power system stability", IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability: Terms and Definitions. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, Pages: 1387-1401, August 2004.
- [5] Kaufman, L., & Rousseeuw, P. J. "Finding Groups in Data. An Introduction to Cluster Analysis" John Wiley & Sons Inc, 2005
- [5] Cepeda J. "Evaluación de la Vulnerabilidad del Sistema Eléctrico de Potencia en Tiempo Real usando Tecnología de Medición Sincrofasorial", Tesis de Grado para obtener el título de Doctor en Ingeniería Eléctrica, Instituto de Energía Eléctrica, Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina, Diciembre 2013.

- [6] J. Cepeda, J. Rueda, G. Colomé, I. Erlich, “Data-mining-based Approach for Predicting the Power System Post-contingency Dynamic Vulnerability Status”, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, Volume 25, Issue 10, pg. 2515-2546, October 2015.



Raúl Cubillo Betancourt. Nació en Quito, Ecuador en 1975. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Escuela Politécnica Nacional en el 2001; Egresado de la Maestría en estadística Aplicada de la Escuela Politécnica Nacional,

funcionario de CENACE a partir del año 2001, actualmente se desempeña como Subgerente de Análisis de la Operación, en la Gerencia Nacional de Operaciones del Operador nacional de Electricidad CENACE.