

Caracterización de Armónicos en el Sistema Nacional Interconectado, SNI a partir de Información del Sistema de Monitoreo de Área Extendida, WAMS

K. Chugá¹

J. Cepeda²

C. Gallardo¹

¹Escuela Politécnica Nacional, EPN

E-mail: karencitasolead@hotmai.com; cgallard@ing.uc3m.es

²Centro Nacional de Energía, CENACE

E-mail: jcepeda@cenace.org.ec

Resumen

El presente trabajo tiene por objeto hacer una caracterización de los armónicos del Sistema Nacional Interconectado del Ecuador (SNI) usando como datos de entrada señales registradas en unidades de medición sincrofasorial (PMU), y mediante un software realizar un análisis estadístico univariante y multivariante. El análisis estadístico se lo realiza a fin de obtener el comportamiento de los armónicos en el sistema, permitiendo la formación de clusters por períodos y geográficos. Para la formación de los clusters es necesario obtener patrones que contengan las características propias de los datos adquiridos, y en base a similitudes entre ellos realizar las agrupaciones de los datos de armónicos. Entre las técnicas que se propone aplicar está el Análisis de Componentes Principales (minería de datos), debido a la necesidad de procesar la gran cantidad de información disponible causada por los pequeños tiempos de muestreo que presenta un sistema de medición sincrofasorial.

Palabras clave—armónicos, Minería de datos, Análisis de datos multivariantes, PMU, WAMS.

Abstract

The purpose of this document is to make a characterization of the harmonics of the National Interconnected System (SNI) in Ecuador using as input signals the records of Phasor Measurement Units (PMU), and using software to perform univariate and multivariate statistical analysis. Statistical analysis is performed in order to obtain harmonic behavior of the system, allowing the formation of timely and geographic clusters. For the formation of clusters, it is necessary to obtain patterns containing the main features of the acquired data, and based on similarities between them, to perform the corresponding harmonic data clusters. Among the applied techniques, it is the Principal Component Analysis (data mining), since the requirement of processing huge amount of data caused by the small sampling rates of the synchrophasor measurement system.

Index terms—harmonics, data mining, multivariate data analysis, PMU, WAMS.

Recibido: 22-09-2014, Aprobado tras revisión: 21-11-2014.

Forma sugerida de citación: Chugá, K.; Cepeda, J.; Gallardo, C. (2015). "Caracterización de Armónicos en el Sistema Nacional Interconectado, SNI a partir de Información del Sistema de Monitoreo de Área Extendida, WAMS". Revista Técnica "energía". N° 11, Pp. 185-194.

ISSN 1390-5074.

1. INTRODUCCIÓN

La ampliación de la generación y demanda en los sistemas eléctricos de potencia (SEP) modifican la forma en la que están estructurados haciéndolos cada vez más complejos [1]. El aumento de las cargas no lineales debido al desarrollo tecnológico de equipos y dispositivos electrónicos que generan una alta demanda, así como la diversificación de la matriz energética del Ecuador que da prioridad al uso de energías renovables no convencionales (como la eólica), son motivos de la complejidad del sistema de potencia [2], [3]. A pesar que estos cambios generan desarrollo y dan mayor comodidad a las personas, pueden producir serios problemas de calidad de la energía [4]. Al hablar de calidad de la energía se toma en cuenta que las señales de corriente y voltaje se mantengan cerca de la forma de onda sinusoidal pura [5]. Pero asumir que las señales son puramente sinusoidales es ideal porque en realidad las señales eléctricas presentan distorsiones debido a perturbaciones en el sistema. Los problemas de calidad de energía a la larga originan diferentes efectos negativos tanto al equipamiento como a los sistemas, incluso llegando al daño permanente de los mismos [6].

La mayor cantidad de problemas de calidad de la energía se deben principalmente a los armónicos inyectados en el sistema, que alteran las señales de voltaje y corriente entregadas [7]. Los problemas de armónicos generan problemas tanto en distribución, como en transmisión y en generación. Para evaluar esto se toman como referencia normas como la IEC 61000, la IEEE Standard 519-1992 "Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems" [1] y en el Ecuador rige la Regulación No CONELEC 003/08 sobre la "Calidad del Transporte de Electricidad y del Servicio de Transmisión y Conexión en el Sistema Nacional Interconectado" [8]. La evaluación considera chequear los parámetros de calidad de potencia (como contenido armónico de voltaje y corriente) con los valores recomendados por la norma [9]. Por esta razón son importantes las mediciones y el monitoreo de los armónicos, para esto existen diferentes equipos de medición en el mercado como: osciloscopios, analizadores de espectro, analizadores de armónicos o analizadores de onda, analizadores de distorsión, equipos de medición de armónicos digitales, analizador de calidad RPM (Reliable Power Meter) [10] [11], entre otros. Recientemente, la implementación de sistemas de medición sincrofásorial (PMU/WAMS) ofrece la posibilidad de registrar armónicos a nivel de transmisión en tiempo real [12].

El Ecuador cuenta con un sistema de monitoreo de área extendida (WAMS - Wide Area Measurement System) de propiedad de la Corporación Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), el cual

tiene 22 PMUs instalados en diferentes posiciones del Sistema Nacional Interconectado (SNI) y dispone de una aplicación de calidad de la energía administrada por el software WAProtector de ELPROS.

Este trabajo presenta una breve descripción de los armónicos, así como una reseña del sistema WAMS del CENACE. Seguidamente, se presenta la metodología empleada para el análisis estadístico de los armónicos en el sistema, basados en la Regulación 003/08 del CONELEC. Finalmente se realiza la caracterización de armónicos con los resultados obtenidos.

2. ARMÓNICOS EN EL SEP

Cuando se habla de desviaciones en las ondas sinusoidales puras de corriente y voltaje, se asocia automáticamente a los armónicos y estos a su vez a las series de Fourier [13]. Un armónico constituye "una componente sinusoidal de una onda periódica o cantidad que posee una frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental" [10]. El matemático y físico francés Jean-Baptiste Joseph Fourier define una de las técnicas para explicar el análisis de las señales sinusoidales, afirmando que "cualquier señal periódica, por compleja que sea, se puede descomponer en una suma de señales senoidales cuya frecuencia es múltiplo de la frecuencia fundamental o de referencia" [14]. La Fig. 1 muestra una onda sinusoidal pura, el armónico cinco y la onda distorsionada resultante.

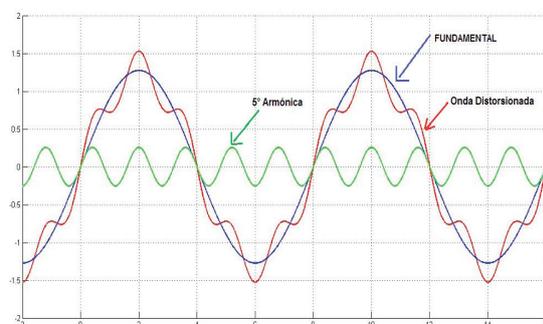


Figura 1: Descomposición armónica

2.1. Series de Fourier

El objetivo de las series de Fourier "es la descomposición de una señal periódica en términos de señales periódicas básicas (senos y cosenos) cuyas frecuencias son múltiplos de la señal original" [15], usando herramientas de procesamiento de señales. Para la reconstrucción de las señales se utiliza un número específico de funciones ortogonales senos y cosenos. La serie de Fourier se muestra en (1).

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos\left(\frac{2\pi kt}{T}\right) + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \sin\left(\frac{2\pi kt}{T}\right) \quad (1)$$

donde las constantes a_k y b_k pueden ser calculadas usando la definición de Transformada Discreta de Fourier (DFT).

2.1.1. Transformada Discreta de Fourier

La mayoría de medidas de los parámetros eléctricos son señales en formas discretas [1]. Por esta razón se necesita una herramienta capaz de calcular la transformada de Fourier $X(f)$ de unas pocas muestras que pertenecen a una señal específica $x(t)$, para intervalos discretos. Dichos intervalos discretos son en el dominio de la frecuencia cuando la señal se muestra en puntos discretos en el dominio del tiempo [16].

Considerando una función periódica $x(t)$ con periodo T_0 y N muestras: $x(kDT)$, $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$, donde DT es el intervalo de muestreo; entonces $T_0 = NDT$. Bajo estas consideraciones, la transformada de Fourier $X(f)$ tiene solo N diferentes valores correspondientes a las frecuencias $f = n/T_0$, donde n está entre 0 y $N/2$ (si N es un número par). La siguiente ecuación representa la definición de DFT considerando N muestras y DT intervalos de muestreo [16].

$$X\left(\frac{n}{T_0}\right) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k\Delta T) e^{-j2\pi kn/N}, n=0, \pm 1, \pm 2, K, \pm \frac{N}{2} \quad (2)$$

DFT es una herramienta útil para el análisis de series espectrales de Fourier [17]. Los coeficientes de la serie de Fourier de una función periódica pueden ser calculados a partir de la DFT de los datos muestreados dividiendo la DFT correspondiente a la frecuencia de interés para N [16]. Desde que cada frecuencia siempre aparece en dos posiciones ($\pm n$), los coeficientes de la serie de Fourier son:

$$c_n = \frac{2}{N} X\left(\frac{n}{T_0}\right) = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k\Delta T) e^{-j2\pi kn/N}, n=0, 1, 2, K, \frac{N}{2} \quad (3)$$

Considerando que el fasor representa una función senoidal pura, es necesario extraer la *componente fundamental de la frecuencia f_0* (coeficiente c_1 de la serie de Fourier) de la señal muestreada [16]. Entonces, la representación del fasor (componente fundamental) es:

$$\bar{X} = \frac{c_1}{\sqrt{2}} = \frac{2}{N\sqrt{2}} X\left(\frac{1}{T_0}\right) = \frac{\sqrt{2}}{N} X(f_0) \quad (4)$$

$$\bar{X} = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k\Delta T) e^{-j2\pi k/N} \quad (5)$$

De la misma forma, se pueden obtener las demás componentes de la señal de frecuencia múltiplo de la fundamental, que se denominan armónicos.

2.2. Tasa de Distorsión Armónica Total

Al hablar de armónicos y el estudio de los mismos, un término importante, y que algunas normas toman como base para determinar límites adecuados que el sistema puede soportar, es la distorsión armónica total (THD) [13]. Se denomina THD a la medida porcentual del contenido armónico referenciado a la frecuencia fundamental [14].

$$THD\%(I) = 100 * \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (6)$$

$$THD\%(V) = 100 * \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (7)$$

2.3. Fuentes de Armónicos

Con el desarrollo de equipos basados en electrónica de potencia, el incremento tecnológico y sus cargas no lineales, así como el aumento de fuentes de generación varias fuentes generadoras de armónicos han sido conectadas al SEP [5]. Dichas fuentes pueden encontrarse tanto en la red de suministro como en las cargas conectadas a la red. Los dispositivos electromagnéticos de la red (generación, transmisión y distribución) así como las aplicaciones con semiconductores (cargas no lineales) actúan como fuentes de armónicos. Entre las principales fuentes se tienen [1] [11]:

- Transformadores de magnetización no lineal
- Máquinas rotativas
- Dispositivos de arco (hornos de arco)
- Suministro de energía basado en semiconductores
- Inversores de A.C.
- Reactores controlados por tiristores
- Controladores de fase
- Reguladores A.C.

2.4. Efectos de los Armónicos

Diversas de las actividades en los sistemas eléctricos de potencia presentan problemas de armónicos, cosa que no se desea, debido a los efectos dañinos que se genera tanto en la operación como en los equipos de los sistemas de potencia. Varios de los efectos se nombran a continuación [1] [7] [11]:

- Resonancia
- Calentamiento de equipamientos (conductores, condensadores, máquinas eléctricas, equipos de medición y control)
- Pobre amortiguamiento
- Efecto Joule en máquinas eléctricas
- Interferencia en telecomunicaciones
- Efecto skin y pérdidas en líneas de transmisión

- Aceleración del torque en máquinas rotativas
- Incremento en pérdidas del cobre y del núcleo en transformadores
- Error en mediciones

Envejecimiento de equipos (a largo plazo)

2.5. Medición de armónicos

Uno de los procesos importantes para la detección y mitigación de armónicos es la medición, ya que con los datos que se obtienen se puede realizar comparaciones con las normas y conocer si se encuentran dentro de los límites establecidos. En el mercado existen diversos equipos con la capacidad de analizar voltajes y corrientes no sinusoidales [10].

Para la selección de un equipo se deben tener en cuenta las características del mismo de acuerdo a la funcionalidad que se le va a dar, según el campo de aplicación (distribución, transmisión o generación) [11]. Algunos equipos muestran las formas de onda de las señales (como los osciloscopios, analizadores de armónicos, analizadores de espectro, PMUs), otros únicamente indican los valores de armónicos (analizadores de distorsión) y otros utilizan el análisis digital para el cálculo (equipos de medición de armónicos digitales) [10].

En el Ecuador se encuentran instaladas PMUs en el Sistema Nacional Interconectado, las cuales arrojan datos en tiempo real con muestreo de milisegundos.

3. SISTEMA DE MONITOREO DE ÁREA EXTENDIDA

El Sistema de Monitoreo de Área Extendida (WAMS) permiten acceder a las mediciones fasoriales distribuidas a lo largo de la red de transmisión por medio de PMUs adecuadamente localizadas. Para este propósito, además de las PMUs, se requiere algoritmos avanzados de procesamiento de señales, sistemas de comunicación especializados, y una infraestructura dinámica en tiempo real. WAMS están compuestos principalmente por PMUs, concentradores de datos fasoriales (PDC), y sistemas de comunicación [18].

3.1. Unidades de medición sincrofasorial

Las unidades de medición sincrofasorial (PMUs) son dispositivos que permiten estimar sincrofasores (fasores que tienen como referencia angular a una onda coseno de frecuencia nominal, sincronizada con el tiempo UTC -Universal Time Coordinated) de las ondas sinusoidales de corriente y voltaje AC, en diferentes nodos de un SEP. El cálculo del sincrofasor la PMU lo hace mediante algoritmos como la DFT [19].

Al arrojar medidas directas de los fasores de voltaje y corriente en la red, las PMUs, de forma ideal, reemplazan la necesidad esencial de la utilización de los estimadores de estado. El tiempo de muestreo de las PMUs es en intervalos de milisegundos, por

lo que permiten el monitoreo del comportamiento estático y dinámico del SEP. Pueden ser usadas para detectar separaciones del sistema, monitorear congestión, analizar oscilaciones en tiempo real, e incluso desarrollar sistemas de control de lazo cerrado [20]. Adicionalmente, se las puede utilizar para medir armónicos presentes en el sistema de transmisión.

3.2. WAMS en Ecuador

La Corporación CENACE, desde el año 2010, inició la implementación de un proyecto para estructurar un sistema WAMS que facilite el monitoreo y supervisión en tiempo real del Sistema Nacional Interconectado (SNI) a partir de mediciones de las 22 PMUs instaladas actualmente. El objetivo es monitorear las zonas de alta relevancia operativa, la que permite tener la observabilidad del sistema eléctrico. Al tener el comportamiento dinámico del sistema, se consigue evaluar de forma precisa el rendimiento del sistema.

El software WAProtector™ desarrollado por la empresa ELPROS de Eslovenia, es el que obtiene los datos de las PMUs, en tiempo real, mediante la red de comunicaciones intranet estándar y permite la transferencia de datos de diferentes dispositivos. Dicho software es el que la Corporación CENACE adquirió, el cual cuenta con varias aplicaciones para el análisis del sistema de potencia en tiempo real utilizando las mediciones sincrofasoriales, incluido el módulo de calidad de energía.

En el servidor del software WAProtector se hallan instalados el PDC y las aplicaciones del mismo. El servidor PDC se conecta directamente con los PMUs instalados en las Subestaciones del S.N.I. utilizando el protocolo IEEE C37.118 [21]. El muestreo en la transmisión de información de los PMUs es 60 muestras por segundo. El software cuenta con varias aplicaciones como:

- Estabilidad Estática de Ángulo (Diferencia Angular)
- Estabilidad de Voltaje de Corredores de Transmisión
- Estabilidad Oscilatoria
- Detección de Islas
- Información de Armónicos del Sistema
- Análisis de Información Histórica de Eventos del Sistema.

3.3. Arbiter 1133

El dispositivo Arbiter Model 1133A Power Sentinel es el encargado de enviar la información de las mediciones de calidad de la energía. Los datos medidos son [12]:

- 1) Voltaje de armónicos (1-50) (magnitud y fase)
- 2) Corriente de armónicos (1-50) (magnitud y fase)

- 3) Resumen de armónicos: RMS, THD, RMS-K, THD-T, THD-F, K-factor
- 4) Flicker instantáneo
- 5) Valores de energía

4. METODOLOGÍA PROPUESTA

El presente trabajo propone una metodología basada en técnicas de análisis de datos multivariantes (conjunto de datos que consta de un gran número de variables interrelacionadas), incluyendo Análisis de Componentes Principales (PCA) y análisis de conglomerados (clusters) [22].

El objetivo de este tipo de análisis es el estudio de varias variables de una población; en este caso, se hará el análisis de los datos adquiridos de las PMUs con los cuales se forma una matriz de datos $X_{n \times p}$. Antes de aplicar las herramientas, previamente tiene que ser realizado un análisis descriptivo. Las herramientas tienen por objeto establecer grupos de manera apropiada. Mediante la utilización de patrones que contengan las características de las variables, se forman los grupos teniendo en cuenta las similitudes y homogeneidad de estas [22]. La Fig. 2 representa la metodología propuesta.

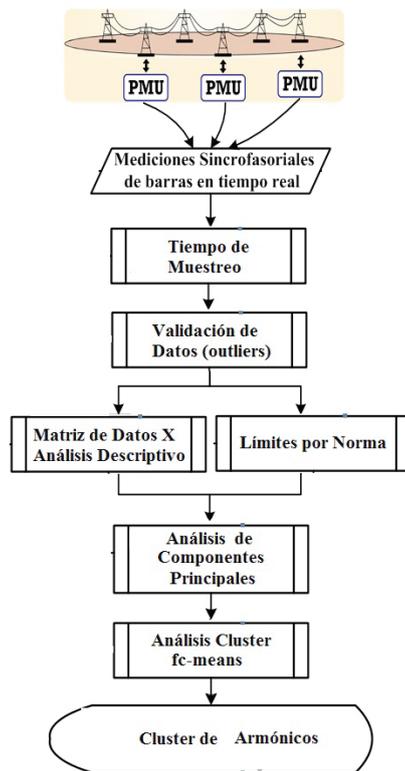


Figura 2: Estructura metodológica

El esquema comienza con la adquisición de datos de las PMU en cada período de actualización. Al tener una gran cantidad de datos adquiridos, mediante un análisis descriptivo y cálculo de errores se procede a elegir un tiempo de muestreo mayor a un segundo (las PMUs arrojan un valor por segundo en cuanto a datos

de calidad de energía). Los datos adquiridos pueden contener datos atípicos (outliers), para el análisis dichos valores son eliminados. Una vez depurada la matriz de datos, se procede al análisis univariante. Todos los análisis se rigen en la normativa vigente [9], la cual indica que se debe adquirir datos de cada diez minutos en un período de siete días.

Para determinar los armónicos más influyentes, se compara cada valor de la matriz de datos con los valores dados por la norma. Con los armónicos que superen el 10% del valor de la norma, se procede al análisis multivariante para la formación de clusters.

La primera herramienta a usar es la de Componentes Principales para reducir la dimensionalidad de los datos a la vez que se obtienen patrones de similitud entre las señales periódicas de armónicos. Se contruye la matriz de datos y se realiza el análisis de clustering, mediante el algoritmo C-means difuso (FCM) con el cual se obtienen los clusters.

5. ANALISIS DE RESULTADOS

5.4. Análisis Descriptivo

La Tabla 1 presenta los coeficientes de variación [22] y los errores relativos al usar 20 segundos como intervalos de muestra en lugar de un segundo. En la tabla únicamente se publica una pequeña muestra del total de datos (basado en [9], se usan intervalos de 10 min por de las variables de un día y 10 de los 50 armónicos adquiridos).

Tabla 1: Análisis univariante

Nº Arm.	Media 1 seg.	Media 20 seg.	Coef. Variación (%)	Error relativo (%)
2	5.017167	5.008712	0.119266	0.168526
3	92.732435	92.805093	0.055382	-0.078353
4	3.871272	3.859499	0.215368	0.304113
5	232.488046	232.522252	0.010403	-0.014713
6	2.683615	2.678944	0.123180	0.174051
7	91.541489	91.512237	0.022599	0.031954
8	2.614225	2.607305	0.187427	0.264711
9	80.993925	80.976081	0.015579	0.022030
10	2.394330	2.391245	0.091174	0.128857
11	33.975843	33.962136	0.028531	0.040341

Si se observan los coeficientes de variación de los datos muestreados cada segundo y cada 20 segundos, se observa que la variabilidad relativa no supera el 0.3% y al considerar el error relativo los errores tampoco superan el 1%, por lo que para el análisis se procede a tomar los valores de cada 20 segundos, sin cometer mayor error ni perdiendo datos importantes.

A continuación se toma el armónico tres y el armónico cinco de un día de la PMU instalada en la subestación Loja posición Villonaco para realizar el análisis univariante y ver la distribución diaria que cada uno de estos tiene.

La Fig. 3 muestra el histograma de la distribución del armónico tres, la cual tiene una curtosis de -0.504 ; al tener un valor negativo indica una distribución platocúrtica, es decir, una distribución relativamente plana.

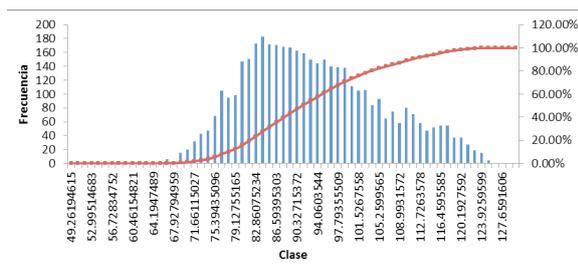


Figura 3: Histograma armónico tres

La Fig. 4 presenta el histograma de la distribución diaria del armónico cinco. La curtosis para este caso es de 0.585 . La curtosis positiva indica que se tiene una distribución leptocúrtica, es decir, se tiene una distribución relativamente elevada.

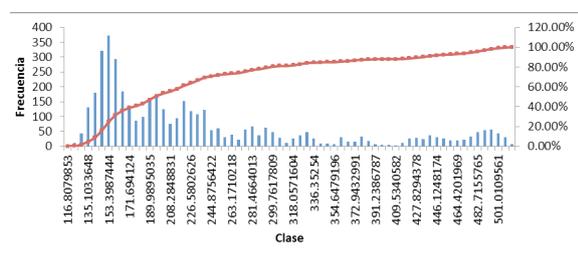


Figura 4: Histograma armónico cinco

Las figuras también muestran el porcentaje acumulado de los valores (curva roja).

5.5. Análisis de armónicos más influyentes

Con la ayuda del software MATLAB y una vez reducida la matriz de datos (tomando en cuenta muestras cada 20 segundos y eliminando las outliers) se procede a comparar los valores adquiridos de las PMUs con el 10% de los valores límites dados en [9]. Para la comparación con los límites de contenido armónico de corrientes según [10] los valores de corriente del armónico I_h deben estar en porcentaje de I_c (promedio de las demandas máximas en el mes). Otra consideración que toma [10] es la relación de cortocircuito SCR en el punto de conexión, y se define como la corriente de cortocircuito trifásico mínima calculada I_{sc} dividido para I_c .

Para obtener I_{sc} en el software DigSILENT PowerFactory se realiza el cálculo de cortocircuitos en las posiciones donde están ubicadas las PMUs. Y el cálculo de I_c se lo realiza con datos proporcionados por el sistema SCADA instalado en el CENACE. Una vez obtenidos los parámetros anteriores se calcula la SCR de cada PMU, con esto y el voltaje de la posición de las PMUs se ubica en la tabla de la norma y se procede a la comparación. Del análisis anterior se obtiene la Tabla 2, donde se marca con una x los armónicos determinados como críticos en la PMU correspondiente.

Tabla 2: Armónicos influyentes

Subestación	Posición	H3	H5	H7	H11	H13	H23	H25
Santa Rosa	Totoras 1		x	x		x	x	x
Santa Rosa	Totoras 2		x	x		x	x	x
Santa Rosa	Santo Domingo 1		x	x	x	x	x	
Santa Rosa	Pomasqui 1	x	x	x	x	x	x	x
Molino	Pascuales 1		x	x	x	x	x	x
Molino	Totoras		x	x	x	x	x	x
Molino	AT 1		x	x	x		x	x
Pomasqui	Jamondino 2	x	x	x	x	x	x	
Pomasqui	Jamondino 3	x	x	x	x	x	x	
Pascuales	Molino 1		x	x	x	x	x	x
Pascuales	Molino 2		x	x	x	x	x	x
Quevedo	Pascuales 1		x	x			x	
Quevedo	ATT 138	x	x	x	x	x	x	x
Salitral	ATR 138	x	x	x	x			
Totoras	Santa Rosa		x	x			x	x
Milagro	San Idelfonso 1		x	x	x	x		
Zhoray	Milagro 2		x	x				
Loja	Villonaco	x	x					
Pascuales	Electroquil 3		x	x	x	x		
Sto. Domingo	Baba		x	x	x		x	
Sto. Domingo	Esmeraldas		x	x	x	x	x	
Montecristi	Jaramijó	x	x					x

La tabla muestra que los armónicos 5 y 7 son los de mayor influencia, por esta razón el siguiente análisis se lo realizará con la utilización de eso armónicos.

5.6. Análisis de conglomerados

El propósito del análisis de conglomerados es caracterizar el comportamiento de los armónicos teniendo en consideración dos parámetros: i) períodos de tiempo de mayor incidencia del armónico, y ii) ubicación geográfica de la incidencia del armónico. El propósito es determinar la zona del SNI en la que un determinado armónico es influyente, así como el período de tiempo en el cual se presenta esta incidencia. Esto permitirá, posteriormente, determinar las principales fuentes de armónicos del SNI.

En primer lugar se analizarán las características de similitud del comportamiento de la forma de los armónicos por cada día de la semana (patrones de comportamiento diarios). Para esto, se emplea la

metodología de análisis de coherencia eléctrica de señales periódicas propuesta en [23]. El primer paso es estandarizar las señales de armónicos retirando la influencia de las condiciones iniciales y la media de las señales. Seguidamente se calcula una medida de distancia entre cada una de las señales mediante el cálculo de la integral del área entre las señales (d_{ij}). De esta forma, se determina una matriz de Distancias (D) del conjunto de señales para cada uno de los armónicos.

$$D = \begin{bmatrix} 0 & \delta_{12} & \dots & \delta_{1n} \\ \delta_{21} & 0 & \dots & \delta_{2n} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \delta_{n1} & \delta_{n2} & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

A esta matriz de Distancias se le aplica una adaptación de la técnica PCA para matriz de distancias, denominada Análisis de Coordenadas Principales. Esta técnica permite transformar la matriz de distancias en una nueva matriz de datos no correlacionados denominados coordenadas principales. Seguidamente, es posible unir las coordenadas principales de todos los armónicos influyentes en la PMU para formar una matriz de datos que contenga los principales patrones de similitud de cada armónico en la PMU.

$$X_{H_i, H_j, \dots, H_n} = [H_i \ H_j \ \dots \ H_n] \quad (9)$$

Esta matriz es luego sometida a análisis de conglomerados (algoritmo FCM) con el propósito de caracterizar las similitudes de armónicos en cada día de la semana y por PMU. Detalles de la metodología puede ser encontrada en [23].

Al tener una gran cantidad de PMUs en el SNI, no es posible presentar todos los resultados, por lo que se ha escogido aleatoriamente una PMU para presentar los clusters semanales; el PMU seleccionado es Molino AT1. La Fig. 5 muestra la distribución de los clusters en una semana (los siete días) en el espacio vectorial de las tres primeras coordenadas principales. Es posible observar cómo la distribución posicional en el espacio vectorial genera los clusters.

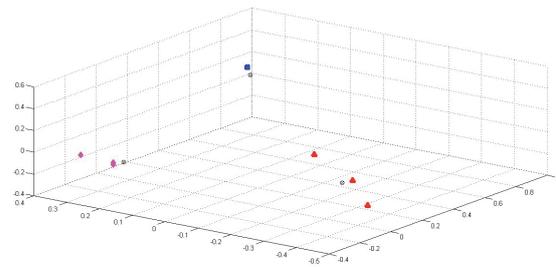


Figura 5: Representación tridimensional de clusters semanales

La representación física de los clusters formados se muestra en las Figs. 6 y 7, donde se muestran los armónicos 5 y 7, respectivamente, y la unión resultante de las señales diarias, representada con el mismo color.

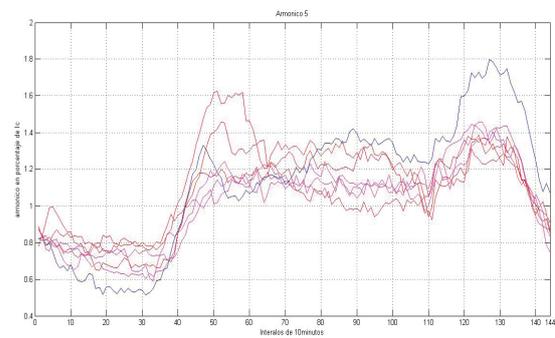


Figura 6: Representación semanal armónico 5

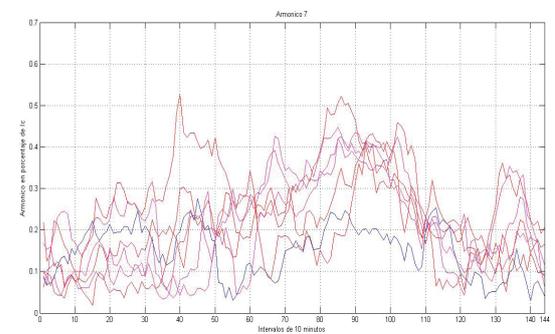


Figura 7: Representación semanal armónico 7

Los días se agrupan de la siguiente manera:

- Lunes
- Martes, miércoles y jueves
- Viernes, sábado y domingo

De esta forma, ha sido posible realizar la caracterización del comportamiento de armónicos en el SNI en función del día de la semana. Para el ejemplo particular, se concluye que el día en que inicia la

semana laboral (lunes) presenta un comportamiento diferente al del resto de días laborales y al del fin de semana. Esto puede ser causado por la intensidad de trabajo en las industrias y comercios en cada día de la semana.

Posteriormente, se aplica una variante a la técnica de análisis de coordenadas principales, en la que en lugar de considerar los armónicos de cada PMU por cada día, se consideran las señales de armónicos de un día para todas las PMU. En este caso, el propósito es realizar una caracterización zonal del comportamiento de los armónicos, mediante la agrupación de las PMUs. La Fig. 8 muestra la distribución de los clusters en el espacio vectorial dado por las tres primeras componentes principales de todas las PMUs en un día de evaluación. En las Figs. 9 y 10 se muestra la distribución de las PMUs (de los armónicos 5 y 7 respectivamente) con la consideración de los clusters de la Fig. 8.

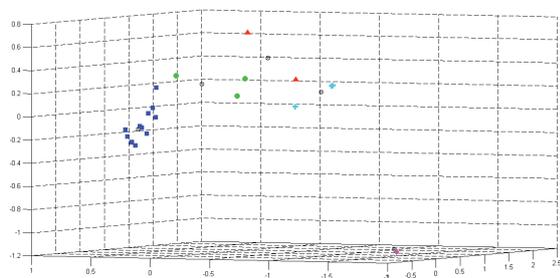


Figura 8: Representación tridimensional clusters zonales

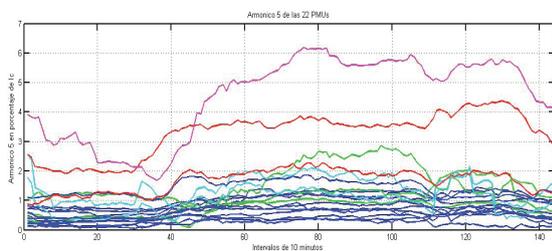


Figura 9: Representación armónico 5 de 22 PMUs

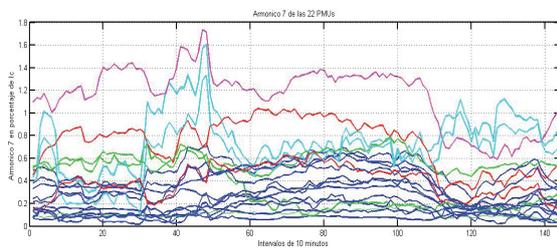


Figura 10: Representación armónico 7 de 22 PMUs

La agrupación resultante de PMUs se presenta en la Tabla 3. La cual muestra el nombre de las PMUs y de acuerdo al número que lleven forman un grupo.

Tabla 3: Clusters de PMUs

Subestación	Posición	N° grupo
Quevedo	Pascuales 1	1
Santa Rosa	Pomasqui 1	1
Salitral	ATR 138	2
Loja	Villonaco	3
Milagro	San Idelfonso 1	3
Molino	Pascuales 1	3
Molino	Totoras	3
Molino	AT1	3
Pascuales	Molino 2	3
Pascuales	Electroquil 3	3
Santa Rosa	Totoras 1	3
Santa Rosa	Totoras 2	3
Sto. Domingo	Baba	3
Sto. Domingo	Esmeraldas	3
Totoras	Santa Rosa	3
Zhoray	Milagro 2	3
Montecristi	Jaramijò	4
Pascuales	Molino 1	4
Quevedo	ATT 138	4
Pomasqui	Jamondino 2	5
Pomasqui	Jamondino 3	5
Santa Rosa	Santo Domingo 1	5

Debido a que los clusters determinados se basan únicamente en la caracterización del comportamiento de las señales de armónicos y no toman en consideración la conectividad eléctrica entre las subestaciones, es posible la generación de grupos que no forman zonas geográficas. En este sentido, es necesario hacer un análisis adicional de los resultados. En este sentido, ha sido posible definir 3 zonas geográficas con características de comportamiento de armónicos similares, las cuales se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4: Zonas Geográficas de influencia de armónicos

Zona Geográfica	Nombre	Subestaciones
Zona 1	Norte	Pomasqui, Santa Rosa
Zona 2	Occidental	Quevedo, Montecristi, Pascuales
Zona 3	Sur-Occidental	Totoras, Molino, Zhoray, Milagro, Pascuales, Loja, Sto. Domingo, Esmeraldas

Con los análisis realizados, ha sido posible caracterizar, por un lado los días de la semana en los que los armónicos presentan características similares, y por otro lado la zona geográfica en la que la característica armónica presenta similitudes. Estos resultados servirán para posteriormente determinar cuáles son las principales fuentes de armónicos del SNI.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El empleo de dispositivos tecnológicos modernos, como los sistemas de monitoreo de área extendida (WAMS), ofrece una nueva perspectiva para el análisis de la calidad de energía de un SEP. Bajo este enfoque, el reto de la ingeniería eléctrica se vislumbra ser el análisis de gran cantidad de datos registrados en tiempo real. En este sentido, la aplicación de técnicas de minería de datos promete ser la alternativa más viable.

El presente trabajo propone una nueva metodología de análisis multivariante con el propósito de caracterizar el comportamiento de armónicos en el SNI. El propósito de la metodología es caracterizar los armónicos dependiendo del período en el cual los armónicos influyen en el sistema (tomando en consideración los límites establecidos en la normativa vigente), así como de la zona geográfica de incidencia del armónico. Con este propósito se ha usado la técnica de coordenadas principales (variante de componentes principales) en combinación con un algoritmo de análisis de conglomerados basado en el c-means difuso.

Los resultados muestran un buen desempeño en la determinación de los días de la semana con características de comportamiento de armónicos, así como en la formación de zonas geográficas con similitud de armónicos.

Trabajos futuros se concentrarán en la determinación de períodos del día con mayor incidencia de armónicos, así como en la determinación de las posibles fuentes de armónicos del SNI.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. Chattopadhyay, M. Mitra and S. Sengupta, "Electric Power Quality", Springer Science & Business Media, 28/3/2011.
- [2] M. Alzamora, "Programa Digital para el Análisis de Propagación de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia", Tesis previa a la obtención del Título de Ingeniería Eléctrica, feb. 1995.
- [3] CONELEC, "Plan Maestro de Electrificación 2009-2020", pp. 194.
- [4] V. J. Gosbell, T. J. Browne and S. Perera, "Harmonic allocation using IEC/TR 61000-3-6 at the distribution/transmission interface," Harmonics and Quality of Power, 2008. ICHQP 2008. 13th International Conference on.
- [5] A. Domijan, G.T. Heydt, A.P.S. Meliopoulos, S.S. Venkata and S. West, "Directions of research on electric power quality", Power Delivery, IEEE Transactions on (Volume: 8 , Issue: 1).
- [6] Universidad Nacional de Mar del Plata, "Medición de la Calidad de la Energía", disponible en: http://www3.fi.mdp.edu.ar/electrica/archivos/medicion_calidad_energia.pdf
- [7] F. Forniels, "Armónicos: Efectos, Diagnóstico y Soluciones", XV Jornadas de Conferencias de Ingeniería Electrónica del Campus de Terrassa, Universitat Politècnica de Catalunya, 2009.
- [8] R. Chancusig, "Procedimientos para el control de la calidad del servicio y la medición de la calidad de la potencia en una subestación del sistema nacional de transmisión según la regulación No. CONELEC 003/08", Tesis previa a la obtención del Título de Ingeniería Eléctrica, agosto 2008.
- [9] Regulación No CONELEC 003/08 sobre la "Calidad del Transporte de Electricidad y del Servicio de Transmisión y Conexión en el Sistema Nacional Interconectado" Res. 033/08; 28 de febrero del 2008.
- [10] IEEE Standard 519-1992 "Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems"
- [11] G. Salazar, "Curso de Calidad de la Energía", Escuela Politécnica Nacional, 2012-B.
- [12] Manual de WAProtector V 2.0.0. Power System Wide Area Monitoring, Protection and Control.
- [13] A. Rash, "Harmonics-what are they, how to measure them and how to solve the problem (in connection with standards IEEE 1159-1995 and IEEE 519-1992)", Nineteenth Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel, 1996.
- [14] "Los armónicos y calidad de la energía eléctrica" Revisado el 26 de marzo del 2013. Disponible en: http://www.rtrenergia.es/rtr/ficheros/armonicos_2012.pdf

- [15] G. Treviño, S. Salinas, E. Uresti “Matemáticas Avanzadas para Ingeniería: Series de Fourier”, Departamento de Matemáticas, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.
- [16] A. Phadke, and J. Thorp, Synchronized Phasor Measurements and Their Applications, Virginia Polytechnic Institute and State University, Springer Science + Business Media, 2008, ISBN 978-0-387-76535-8.
- [17] D. Gilliam, “Mathematics 5342 Discrete Fourier Transform”, Texas Tech University, Department of Mathematics, Lubbock, TX 79409, [Online] Available: <http://texas.math.ttu.edu/~gilliam>.
- [18] C. Juárez, and D. Colomé, “Tendencias en la Supervisión en Tiempo Real de la Estabilidad de Pequeña Señal de Sistemas de Potencia”, XIII ERIAC, Puerto Iguazú, Argentina, mayo de 2009.
- [19] Cimadevilla R. (2009). “Fundamentos de la Medición de Sincrofasores”. XIII ERIAC, Puerto Iguazú, Argentina.
- [20] Savulescu S. C., et al. (2009). “Real-Time Stability Assessment in Modern Power System Control Centers”, IEEE Press Series on Power Engineering, Mohamed E. El-Hawary, Series Editor, a John Wiley & Sons, Inc..
- [21] IEEE Power Engineering Society (2011). “IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems”, IEEE Std. C37.118.1-2011.
- [22] D. Peña, “Análisis de Datos Multivariantes”, 23 de enero de 2002.
- [23] J. Cepeda, “Evaluación de la Vulnerabilidad del Sistema Eléctrico de Potencia en Tiempo Real usando Tecnología de Medición Sincrofásorial”, 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, ISBN: 978-987-33-4328-5.



Karen Soledad Chugá Ortiz.-

Nació en 1990 en la ciudad de Tulcán, Ecuador. Sus estudios secundarios los realizó en el Instituto Tecnológico Tulcán obteniendo el título de Bachiller en Ciencias especialización

Físico-Matemáticas. Sus estudios superiores los realizó en la Escuela Politécnica Nacional en la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica carrera Ingeniería Eléctrica.



Jaime Cristóbal Cepeda.-

Recibió el título de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional en 2005 y el de Doctor en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Nacional de San Juan en 2013. Entre 2005 y

2009 trabajó en Schlumberder y en el CONELEC. Colaboró como investigador en el Instituto de Energía Eléctrica, Universidad Nacional de San Juan, Argentina y en el Instituto de Sistemas Eléctricos de Potencia, Universidad Duisburg-Essen, Alemania entre 2009 y 2013. Actualmente se desempeña como jefe de investigación y Desarrollo del CENACE. Sus áreas de interés incluyen la evaluación de vulnerabilidad en tiempo real y el desarrollo de Smart Grids.



Carlos Fabián Gallardo.-

Es Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional de Quito, graduado en el año 2000. Recibió los títulos de Magister y Doctor en Ingeniería Eléctrica Electrónica y Automática de la

Universidad Carlos III de Madrid, España en 2009. Actualmente trabaja como profesor titular a tiempo completo en la Escuela Politécnica Nacional, donde se desempeña además como Coordinador de la Carrera de Ingeniería Eléctrica. Sus áreas de interés incluyen el análisis de estabilidad oscilatoria, análisis modal, control de oscilaciones y la incorporación de fuentes de energía renovable no convencional en los sistemas de potencia.