

# Harmonic Distortion Characterization in Groups of Distribution Networks Applying the IEEE Standard 519-2014

L. Marrero, L. García-Santander, L. Hernández-Callejo, P. Bañuelos-Sánchez, and V. Jara

**Abstract**—Recently, it has been produced an accelerated presence of non-linear elements in the residential, commercial and industrial sectors, which has affected the voltage waveform, altering its amplitude and frequency. These sectors obtain the electric energy from distribution networks, so it is essential to check them systematically in order to ensure the power quality according to operational guidelines and national standards. Power quality involves a wide variety of electromagnetic phenomena on the power system, highlighting the harmonics. This paper presents an application based on the k-means clustering to identify similarities in the behavior of the harmonic distortion of voltage and current in distribution networks and its validation and refinement using the rough sets theory. The main result lies in the characterization of those groups of distribution networks by means of their centroids and according to the IEEE Standard 519-2014. To verify the methodology, field measurements of a group of distribution networks in Cuba are analyzed.

**Index Terms**—Clustering techniques, distribution networks, harmonic distortion characterization, IEEE 519-2014, rough sets theory.

## I. INTRODUCCIÓN

Hoy día, la energía es vista no solo como un servicio, sino como un producto, y, como todo producto, se halla cuantificada por características tales como su calidad, precio y accesibilidad [1]. Tanto las compañías de servicios eléctricos como los clientes están cada vez más preocupados por la calidad de la energía [2] y la necesidad de mantenerla dentro de los rangos de operación y las normas nacionales [3] - [4], debido a su impacto económico directo en los sectores industrial y doméstico [5], incluso provocando que el costo total en el uso de energía eléctrica se pueda duplicar [6].

This research has been supported by the project “An ICT platform for sustainable energy ecosystem in smart cities” (ELAC2015/T10-0643).

L. Marrero is with the Department of Electrical Engineering, Universidad de Concepción, Concepción, Chile (e-mail: lmarrero@udec.cl).

L. García-Santander is with the Department of Electrical Engineering, Universidad de Concepción, Concepción, Chile (e-mail: luis.garcia@udec.cl).

L. Hernández-Callejo is with the Department of Agricultural and Forestry Engineering, Universidad de Valladolid, Soria, Spain (e-mail: luis.hernandez.callejo@uva.es).

P. Bañuelos-Sánchez is with the Department of Computation, Electronics and Mechatronics, Universidad de las Américas Puebla, Cholula, Mexico (e-mail: pedro.banuelos@udlap.mx).

V. Jara is with the Department of Energy, Universidad Autónoma Metropolitana, Ciudad de México, Mexico (e-mail: al2183806922@azc.uam.mx).

La calidad de energía eléctrica comprende un amplio rango de fenómenos electromagnéticos, entre los cuales sobresalen las armónicas, definidas como componentes de frecuencia múltiplos enteros de la fundamental del sistema de potencia [7], que afectan comunicaciones telefónicas y sistemas de control y protección, además de incrementar las pérdidas en la red, dañar equipos sensibles, ocasionar calentamientos excesivos en máquinas eléctricas y ser causa de resonancia [8] - [9]. La aparición de armónicos en los sistemas eléctricos se debe fundamentalmente a la presencia de cargas no lineales [10]. En el pasado, la mayor parte de las cargas domésticas y comerciales conectadas al sistema de suministro tenían características lineales [11]. Sin embargo, en los últimos 20 años dispositivos tales como unidades de aires acondicionados con controladores de velocidad, lámparas fluorescentes, computadoras y laptops, convertidos en los electrodomésticos residenciales de mayor explotación, el esperado incremento de cargadores de vehículos eléctricos y dispositivos asociados a energías renovables [12], así como el uso en la industria de convertidores de potencia y controladores de velocidad para motores, ha sido causa principal en el incremento de los niveles de armónicos [13] en sistemas de distribución residencial y sus sistemas de transmisión [14]. La incidencia armónica puede ser cuantificada a través de los índices de distorsión armónica total (THD, siglas en inglés de *Total Harmonic Distortion*) para el caso del voltaje y de distorsión total de la demanda (TDD, siglas en inglés de *Total Demand Distortion*) para el caso de la corriente [15].

En general, los estudios en términos de caracterización armónica se concentran en el análisis individual de alguna red de distribución o una carga industrial no lineal [16] - [18]. Sin embargo, con la actual incorporación masiva de medidores inteligentes, este enfoque tradicional se vuelve poco práctico y obliga al tratamiento de muchas redes al mismo tiempo. Los grandes volúmenes de datos recopilados por los instrumentos se envían a un centro de procesamiento para su análisis e interpretación *offline*, por ello resulta necesaria la implementación de softwares dedicados a este fin. Además, este nuevo enfoque es fundamental al considerar el desarrollo de modelos de sistemas para estudios de simulación armónica. La representación completa del sistema de distribución no resulta práctica, pues requeriría mucho tiempo para desarrollar el modelo y recurso computacional importante para ejecutar las simulaciones [2], por lo tanto, es siempre deseable un modelo de simulación simplificado que represente adecuadamente el

sistema físico.

El presente trabajo propone una metodología basada en el algoritmo de las *k*-medias para identificar similitudes en el comportamiento de la distorsión armónica del voltaje y la corriente en circuitos de distribución y la caracterización de los grupos conformados por medio de sus centroides. Se presenta además la teoría de los conjuntos aproximados (RST, siglas en inglés de *Rough Sets Theory*) para validar y refinar los resultados. La metodología es implementada en MATLAB y para la caracterización de las variables es empleada la norma IEEE 519-2014 [15].

El análisis clúster resulta un método estadístico multivariante para comprender de manera efectiva el comportamiento de parámetros medibles en el sistema de potencia, centrándose sus principales aplicaciones dentro del mismo en la evaluación de la seguridad, la optimización de la operación, el pronóstico de carga y la detección de eventos [19]. Por su parte, mediante el empleo de la RST para valorar los resultados del agrupamiento, es posible realizar una validación no supervisada de este, evaluando la calidad y precisión de los resultados local y globalmente.

La metodología es aplicada a mediciones de campo obtenidas de instrumentos de medición ION situados dentro del sistema de distribución de 34.5 kV de la ciudad de Santa Clara, Cuba. Las mediciones se efectuaron con intervalos de 15 minutos y corresponden al período comprendido entre el 3 y el 23 de enero (tres semanas) de 2011, siendo esta base de datos suficiente para validar la metodología.

El documento está organizado de la siguiente manera. La Sección II presenta trabajos relacionados en temas de caracterización de la distorsión armónica en sistemas de distribución. La Sección III describe los índices de distorsión armónica de tensión y corriente que se caracterizan. La Sección IV explica las técnicas analíticas de la metodología propuesta. En la Sección V, la metodología es aplicada a las mediciones reales y se muestran los resultados relevantes. Finalmente, la Sección VI concluye el trabajo.

## II. TRABAJOS RELACIONADOS

En [18] se realiza primeramente una clasificación de mediciones de corrientes y tensiones armónicas significativas obtenidas como parte de un programa de monitoreo en distintos puntos dentro de un sistema de distribución de 33/11 kV en Australia. La clasificación está basada en un agrupamiento que usa el método de longitud mínima de mensaje para seleccionar el mejor modelo que describe los datos mediante una métrica de mensaje codificado, y permite evaluar la información operativa subyacente contenida en los grupos conformados. Se introduce además un aprendizaje supervisado para describir los grupos y predecir la aparición de eventos inusuales en futuras mediciones.

Por su parte, en [20] se analizan las características de algunas fuentes de generación distribuida a nivel residencial tales como generadores fotovoltaicos, cogeneración y vehículos eléctricos; y se caracterizan sus emisiones armónicas según límites establecidos en diversas normativas.

Por último, en [21] se aplica un enfoque basado en

componentes simétricas a los datos medidos, de acuerdo con los criterios de medición de la norma IEC 61000-4-7 [22], en una red de baja tensión desbalanceada y con formas de onda distorsionadas. Como resultado, se establecen índices cuantitativos para caracterizar la distorsión armónica del circuito y se muestra la relación de estos con los definidos en dicha norma.

Como se mencionó previamente, ninguno de los casos de estudio para la caracterización de la distorsión armónica comprende más de un circuito de distribución al mismo tiempo, por lo cual un análisis que incluya grupos de estos resulta importante.

## III. ÍNDICES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA

### A. Distorsión Armónica Total (THD)

Matemáticamente, la THD es la norma inducida  $l_2$  para el espacio de Hilbert, donde la serie de Fourier es una base completa, y describe el valor efectivo del contenido de energía de todos los coeficientes de la serie de Fourier, excepto el de la fundamental, relativo a la energía de esta, es decir, es una medida del valor efectivo de las componentes armónicas de una forma de onda distorsionada con relación a la fundamental.

Este índice se puede calcular para voltaje o corriente mediante (1):

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} Q_h^2}}{Q_1} \quad (1)$$

donde  $Q_h$  es el valor RMS de la componente armónica  $h$  de la cantidad  $Q$ , voltaje o corriente.

El índice THD se usa con mayor frecuencia para describir la distorsión armónica de voltaje.

### B. Distorsión Total de la Demanda (TDD)

Los niveles de distorsión de corriente pueden caracterizarse por un valor de THD, pero esto a menudo puede ser engañoso. En cambio, la THD puede ser referida a la componente fundamental de la corriente de demanda máxima en lugar de la fundamental de la muestra, lo que se denomina TDD y se define según (2):

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} I_h^2}}{I_L} \quad (2)$$

donde  $I_L$  es la corriente de demanda máxima a la frecuencia fundamental medida en el punto de acoplamiento común (PCC, siglas en inglés de *Point of Common Coupling*) bajo condiciones de operación normal de la carga. Puede ser calculada como el promedio de las corrientes de demanda máxima de los 12 meses anteriores [2].  $I_h$  es la corriente del componente armónico  $h$ .

Al aplicar [15], se requiere transformar las mediciones de THD de corriente suministradas por los instrumentos en TDD de corriente. Este paso se lleva a cabo para cada fase de acuerdo con (1) y (2). En este estudio,  $Q_1$  se tomó como el promedio de la corriente en las tres fases, producto de que los instrumentos

de medición solo registran este valor promedio en lugar del valor individual para cada fase, e  $I_L$  como el máximo de esta corriente de carga promedio registrada en el PCC para el período de medición.

#### IV. MÉTODOS PARA IDENTIFICAR SIMILITUDES EN EL COMPORTAMIENTO DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA

##### A. Detección e Imputación de Atípicos

Previo a la aplicación del algoritmo de las k-medias, el tratamiento de los valores atípicos (incluidos los ausentes) es un paso importante, teniendo en cuenta la sensibilidad del análisis clúster a estos valores. En el estudio, dada su naturaleza, la detección para los datos de corriente se completó utilizando la perspectiva univariante, tomándose tres desviaciones estándar como valor umbral para el rango de distribución de datos en cada una de las redes. Para la imputación de las lecturas atípicas fue empleado el valor medio.

##### B. Algoritmo de las K-Medias

El principal objetivo del análisis clúster radica en agrupar objetos basándose en las características que estos poseen. Los conglomerados de objetos resultantes muestran altos grados de homogeneidad interna y de heterogeneidad externa [23]. En el trabajo se utilizó el método no jerárquico de las k-medias, que produce una partición de los individuos, las redes en este caso, en un número específico de grupos.

Partiendo de un conjunto de  $N$  observaciones de una variable aleatoria  $X$  d-dimensional  $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ , este algoritmo divide el conjunto de datos en un número  $K$  de clústeres conocido. Considerando a  $\mu_k$ , con  $k = 1, \dots, K$ , como el conjunto de vectores d-dimensionales que representan los centros de los clústeres, los datos son asignados de manera tal que para cada uno la distancia a su respectivo centro, definida en (3), resulta mínima en comparación con las distancias al resto de los centros.

$$J = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K r_{nk} \|x_n - \mu_k\|^2 \quad (3)$$

En (3),  $r_{nk} \in \{0,1\}$  refiere a cuál de los  $K$  clústeres el circuito  $x_n$  es asignado. Suponiendo su asignación al clúster  $k$ , entonces  $r_{nk} = 1$  y  $r_{nj} = 0$  con  $j \neq k$ . El procedimiento es iterativo hasta la convergencia, y cada iteración implica minimizaciones sucesivas de  $J$ , primero con respecto a  $r_{nk}$  manteniendo fijo  $\mu_k$ , y luego con respecto a  $\mu_k$  manteniendo  $r_{nk}$  fijo [24].

Por otro lado, diferentes particiones iniciales pueden conducir a diferentes óptimos locales, aunque con datos bien estructurados es razonable esperar la convergencia hacia el global. Por tanto, es recomendable ejecutar el algoritmo varias veces con diferentes particiones iniciales. En este contexto, el autor de [25] sugiere más de 5000 y se muestra que este enfoque supera a varios otros métodos utilizados en paquetes de software comerciales y competidores [26]. Precisamente, el procedimiento seguido en el estudio fue la implementación de este valor de particiones iniciales aleatorias y la selección de la solución con el menor valor de las sumas de las distancias de

los objetos al centroide dentro del clúster.

##### C. Rough Sets Theory (RST)

Las reglas para seleccionar el número de clústeres son muy subjetivas porque hacen suposiciones sobre la estructura del clúster y solo funcionarán cuando se cumplan estos supuestos [27]. En el trabajo, para evaluar y refinar los resultados del análisis clúster, se utilizan las medidas numéricas de la RST.

La RST consiste básicamente en aproximar cualquier concepto (clúster resultante del proceso de agrupamiento), por un par de conjuntos exactos: la aproximación inferior y la superior. Al par  $(U, A)$ , conformado por el conjunto de atributos  $a_i$  y el conjunto  $U$  llamado universo y descrito por los atributos se le denomina sistema de información. Los objetos (circuitos) que tienen la misma descripción son inseparables. Esta relación de inseparabilidad induce una partición de  $U$  en bloques con estos objetos. Cualquier concepto o clúster  $k$  de  $U$  se puede expresar en términos de estos bloques de forma exacta o aproximada [28].

La extensión de la RST clásica acepta que objetos que no son inseparables, pero sí suficientemente cercanos o similares puedan pertenecer a la misma clase. El objetivo es construir relaciones de similitud  $R'$  a partir de relaciones de inseparabilidad, relajando las condiciones iniciales de esta, siendo  $R'(x_n)$  la clase de similitud de  $x_n$ , es decir  $R'(x_n) = \{x_1, x_2, \dots, x_M \in U: x_m \text{ está relacionado con } x_n \text{ sí y sólo sí } s(x_n, x_m) > \xi\}$ . Así, es posible calcular, para cada red agrupada, el conjunto de redes relacionadas, donde  $s(x_n, x_m)$  retorna un valor de similitud entre  $x_n$  y  $x_m$ , y  $\xi$  es el umbral de similitud considerado. Para el cálculo de este último existen varias expresiones [29]. En el trabajo fue usada la media de las similitudes, ver (4), entre todos los posibles pares de objetos.

$$\xi = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N d(x_i, x_j) \quad (4)$$

donde  $d(x_i, x_j)$  es la distancia Euclidiana entre los circuitos  $x_i$  y  $x_j$ .

A partir de las relaciones de inseparabilidad, se definen los conceptos de aproximación inferior en (5):

$$R'_l(k) = \{x \in k: R'(x) \subseteq k\} \quad (5)$$

y de aproximación superior en (6):

$$R'_s(k) = \bigcup_{x \in k} R'(x) \quad (6)$$

Con el cálculo de (5) y (6), la precisión y calidad de la aproximación para cada clúster puede ser encontrada mediante (7) y (8) respectivamente:

$$\alpha(k) = \frac{|R'_l(k)|}{|R'_s(k)|} \quad (7)$$

$$\gamma(k) = \frac{|R'_l(k)|}{|k|} \quad (8)$$

donde  $|\cdot|$  denota la cardinalidad del conjunto, finito y no vacío.

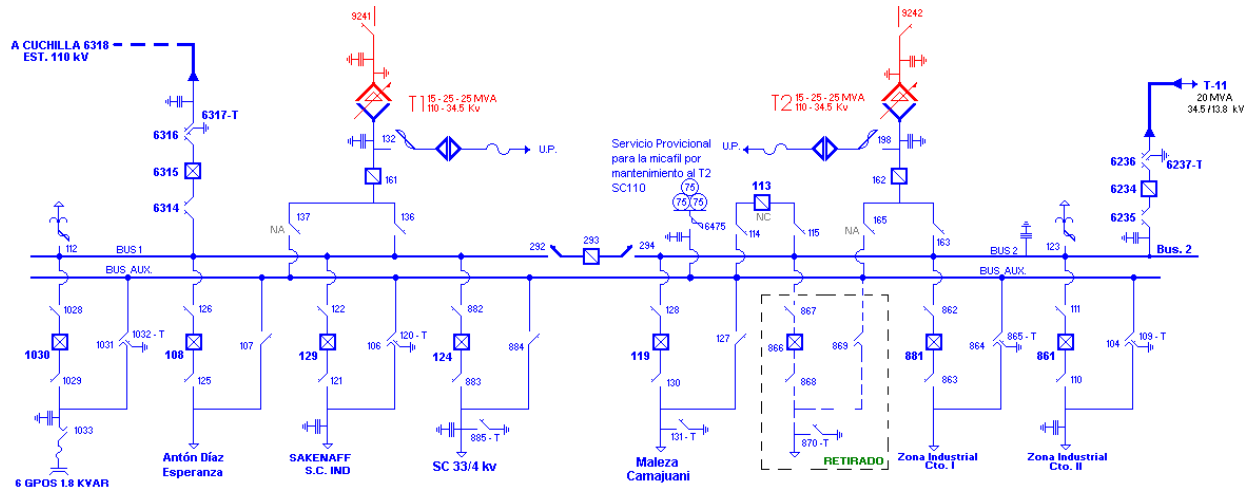


Fig. 1. Diagrama unilineal de la Subestación Santa Clara 110 kV.

En general  $0 \leq \alpha(k) \leq \gamma(k) \leq 1$ , y  $\gamma(k) = 0$  si  $\alpha(k) = 0$ , mientras que  $\gamma(k) = 1$  si  $\alpha(k) = 1$ . Si  $\alpha(k) = 1$ ,  $k$  es duro o exacto, mientras que  $\alpha(k) < 1$  indica que  $k$  es aproximado, vago o inexacto.

La calidad del agrupamiento, formulada en (9), describe la inexactitud de los conceptos, expresando la proporción de los objetos que pueden estar correctamente asignados a los grupos en el sistema. Si es uno, el sistema de información según los conceptos definidos es consistente.

$$\Gamma = \frac{\sum_{k=1}^K |R'_I(k)|}{|U|} \quad (9)$$

La precisión del agrupamiento, definida en (10), expresa las posibles asignaciones correctas a grupos y señala la proporción entre la cantidad de objetos que pudieran estar bien agrupados y la cantidad de objetos que pudieran o no pertenecer a los grupos [29].

$$A = \frac{\sum_{k=1}^K |R'_I(k)|}{\sum_{k=1}^K |R'_S(k)|} \quad (10)$$

Finalmente, hay que destacar que la metodología descrita constituye un primer acercamiento en materia de caracterización de la distorsión armónica cuando se presentan conjuntos de redes de distribución.

## V. RESULTADOS DE CASOS DE ESTUDIO

### A. Análisis de la Distorsión Armónica Total (THD), Estudio de Caso en Redes de 34.5 kV de Cuba

El conjunto de datos utilizado proviene de las mediciones de THD por fase en seis redes de distribución de 34.5 kV identificadas por los interruptores 124, 129, 119, 861, 6315 y 6234, donde las dos últimas presentan además generación distribuida. El diagrama unilineal de la Fig. 1 muestra dichos interruptores y corresponde a la Subestación Santa Clara 110 kV. Los interruptores 124, 129 y 6315 pertenecen a un mismo PCC, nombrado Barra 1, y el resto a un segundo PCC nombrado Barra 2. Cada barra es alimentada por un transformador de 25 MVA con una impedancia del 12%.

Según [15], la caracterización de la distorsión armónica debe

realizarse luego de un período de medición de una semana, ya que ello asegura que puedan ser capturadas todas las variaciones cíclicas de la carga.

Teniendo esto en consideración, para cada una de las tres semanas de manera independiente se aplica en primer lugar el algoritmo de las k-medias, y seguido se determinan las medidas de precisión y calidad de la RST, con vistas a caracterizar cada una individualmente.

TABLA I  
MEDIDAS DE PRECISIÓN Y CALIDAD DE LA RST PARA LA THD DE VOLTAJE

	Semana 1 (Umbral = 3.72%)		Semana 2 (Umbral = 3.86%)		Semana 3 (Umbral = 3.61%)	
	$\alpha(k)$	$\gamma(k)$	$\alpha(k)$	$\gamma(k)$	$\alpha(k)$	$\gamma(k)$
6 clústeres						
Clúster 1	0.18	1	0.33	1	0.33	1
Clúster 2	0	0	0.5	1	0	0
Clúster 3	0.31	1	0.17	1	0.36	1
Clúster 4	0.2	1	0.27	1	0.75	1
Clúster 5	0.33	1	0.21	1	0.25	1
Clúster 6	0.43	1	0.17	1	0	0
5 clústeres						
Clúster 1	0.18	1	0.33	1	0.75	1
Clúster 2	0.3	1	0.17	1	0.33	1
Clúster 3	0.43	1	0.33	1	0.2	1
Clúster 4	0.33	1	0.5	1	0.36	1
Clúster 5	0.31	1	0.27	1	0.25	1
4 clústeres						
Clúster 1	0.33	1	0.33	1	0.33	1
Clúster 2	0.31	1	0.33	1	0.25	1
Clúster 3	0.43	1	0.42	1	0.45	1
Clúster 4	0.45	1	0.27	1	0.36	1
3 clústeres						
Clúster 1	0.59	1	0.42	1	0.33	1
Clúster 2	0.45	1	0.27	1	0.57	1
Clúster 3	0.43	1	0.63	1	0.45	1
2 clústeres						
Clúster 1	0.76	1	0.42	1	0.45	1
Clúster 2	0.45	1	0.81	1	0.87	1
	A	$\Gamma$	A	$\Gamma$	A	$\Gamma$
6 clústeres	0.34	1	0.37	1	0.39	0.89
5 clústeres	0.38	1	0.35	1	0.39	1
4 clústeres	0.37	1	0.34	1	0.35	1
3 clústeres	0.51	1	0.46	1	0.45	1
2 clústeres	0.64	1	0.64	1	0.69	1

La ejecución del algoritmo de las k-medias requiere el

conocimiento del número de grupos  $K$  a priori. Puesto que se tiene un total de 18 objetos, que equivalen a las mediciones de las tres fases en cada uno de los seis instrumentos, se consideraron los siguientes cinco valores para  $K$ : desde un tercio del total de objetos, es decir, desde seis, hasta dos. Luego se determinan las medidas de precisión y calidad de la RST para cada grupo, valor de  $K$  y semana. La Tabla I presenta estos resultados.

Las mayores imprecisiones se tienen en las situaciones de seis, cinco y cuatro clústeres durante las tres semanas, mientras que las situaciones de tres y dos grupos tienen una mayor precisión; específicamente, dos grupos representan el mejor resultado para las tres semanas. Esto también se sugiere en base a la alta coincidencia entre las aproximaciones superiores de los grupos en cada una de las peores situaciones. La consistencia en la mayoría de los casos es óptima.

La distribución de los objetos para  $K = 2$  en cada una de las tres semanas arrojó los mismos resultados, lo que denota el comportamiento regular de las cargas no lineales en cada fase de una semana a otra. La Tabla II muestra dicha distribución final, donde se observa además que el segundo clúster contiene más elementos que el primero.

TABLA II  
DISTRIBUCIÓN DE LOS OBJETOS EN LOS DOS GRUPOS FINALES PARA LA THD DE VOLTAJE

Clúster 1	Clúster 2
119c, 861a, 861b, 861c, 6234a	124a, 124b, 124c, 129a, 129b, 129c, 6315a, 6315b, 6315c, 119a, 119b, 6234b, 6234c

Las Figs. 2, 3 y 4 presentan el comportamiento de la THD de voltaje a través de los centroides de los dos grupos finales para cada una de las tres semanas respectivamente.

En las tres semanas, ambos centroides muestran un patrón muy similar, algo esperado dado el hecho de que las redes están conectadas en lo que podría considerarse un mismo PCC, sin embargo, el correspondiente al clúster 1 se caracteriza por una distorsión más alta todo el tiempo. Los picos de distorsión alrededor del mediodía y por la noche llevan a pensar en la incidencia de las instalaciones comerciales e industriales en el primer caso y del sector residencial en el segundo.

Los valores más altos de THD no exceden el límite del 5% establecido por [15] para este tipo de redes y considerando niveles de armónicos de corto tiempo (10 minutos). No obstante, el valor a comparar con este límite debe ser el percentil 95, que se expone para ambos centroides en la Tabla III. Estos son los valores que no se superan en el 95% del tiempo de medición (8.4 horas en la semana).

TABLA III  
VALORES DE PROBABILIDAD 95% PARA LA THD DE VOLTAJE

	Semana 1	Semana 2	Semana 3
Clúster 1	2.45	2.69	2.44
Clúster 2	2.33	2.57	2.24

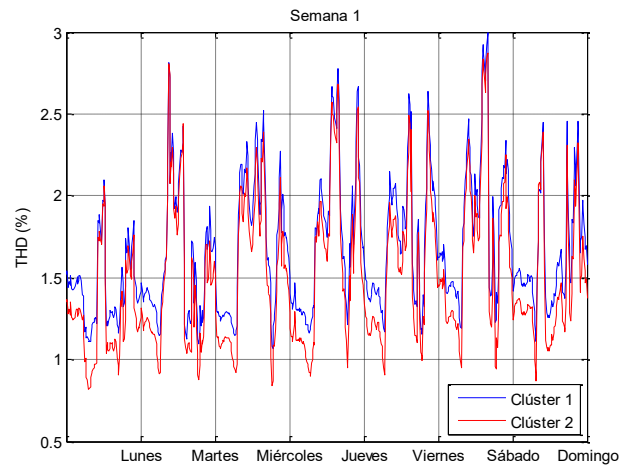


Fig. 2. Centroides de los clústeres finales para la THD de voltaje en la semana 1 (del 3 al 9 de enero).

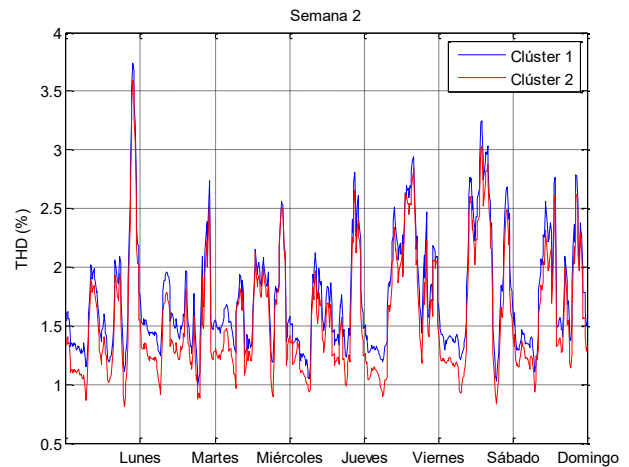


Fig. 3. Centroides de los clústeres finales para la THD de voltaje en la semana 2 (del 10 al 16 de enero).

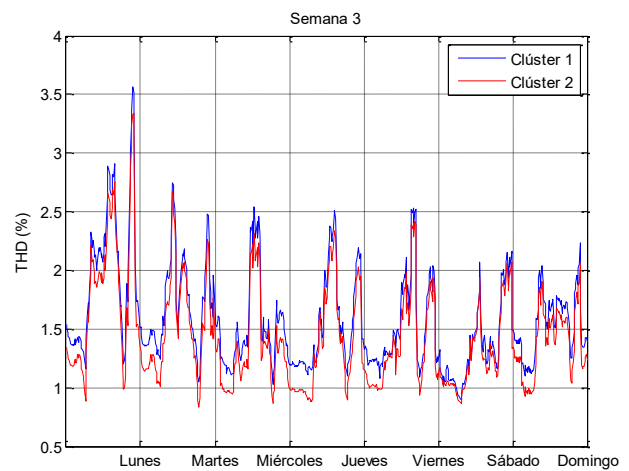


Fig. 4. Centroides de los clústeres finales para la THD de voltaje en la semana 3 (del 17 al 23 de enero).

**B. Análisis de la Distorsión Total de la Demanda (TDD), Estudio de Caso en Redes de 34.5 kV de Cuba**

Para este análisis se consideraron los circuitos 124, 129, 861 y 119, ya que solo tenían datos adicionales para realizar esta caracterización. Similar a la THD de voltaje, se aplica el algoritmo de las k-medias en cada semana considerando igual criterio en la selección de los valores de  $K$ , que, en esta ocasión, conlleva a un rango desde cuatro hasta dos grupos. Las medidas de precisión y calidad para los clústeres en cada caso y semana se ilustran en la Tabla IV.

TABLA IV  
MEDIDAS DE PRECISIÓN Y CALIDAD DE LA RST PARA LA TDD DE CORRIENTE

	Semana 1 (Umbral = 10.45%)		Semana 2 (Umbral = 11.01%)		Semana 3 (Umbral = 11.82%)	
	$\alpha(k)$	$\gamma(k)$	$\alpha(k)$	$\gamma(k)$	$\alpha(k)$	$\gamma(k)$
4 clústeres						
Clúster 1	0.33	1	0.33	1	0.5	1
Clúster 2	0.5	1	0.38	1	0.5	1
Clúster 3	0.5	1	0.5	1	0.5	1
Clúster 4	0.38	1	0.5	1	0.5	1
3 clústeres						
Clúster 1	0.33	1	0.67	1	0.5	1
Clúster 2	0.75	1	0.5	1	0.5	1
Clúster 3	0.5	1	0.38	1	1	1
2 clústeres						
Clúster 1	0.75	1	0.75	1	1	1
Clúster 2	0.67	1	0.67	1	1	1
	A	$\Gamma$	A	$\Gamma$	A	$\Gamma$
4 clústeres	0.41	1	0.41	1	0.5	1
3 clústeres	0.52	1	0.52	1	0.67	1
2 clústeres	0.71	1	0.71	1	1	1

Las posibles combinaciones entre grupos se revelan en las situaciones de cuatro y tres grupos, lo que refuerza la selección de dos clústeres como la representación final en las tres semanas, destacando la semana 3, donde ambos grupos son exactos. La consistencia en todos los casos es óptima.

Nuevamente la distribución de los objetos para  $K = 2$  en cada una de las tres semanas resultó la misma, siendo esta la expuesta en la Tabla V. En esta ocasión se presentan seis elementos en cada agrupación.

TABLA V  
DISTRIBUCIÓN DE LOS OBJETOS  
EN LOS DOS GRUPOS FINALES  
PARA LA TDD DE CORRIENTE

Clúster 1	Clúster 2
124a, 124b, 124c,	129a, 129b, 129c,
861a, 861b, 861c	119a, 119b, 119c

Las Figs. 5, 6 y 7 muestran el comportamiento de la TDD durante las semanas a través de los centroides de ambos clústeres finales, donde los circuitos pertenecientes al clúster 1 evidencian una mayor distorsión y los picos más pronunciados están presentes al final de la tarde y las primeras horas de la noche en las tres semanas, lo que denota el efecto del alumbrado residencial, acentuado debido a la temporada invernal.

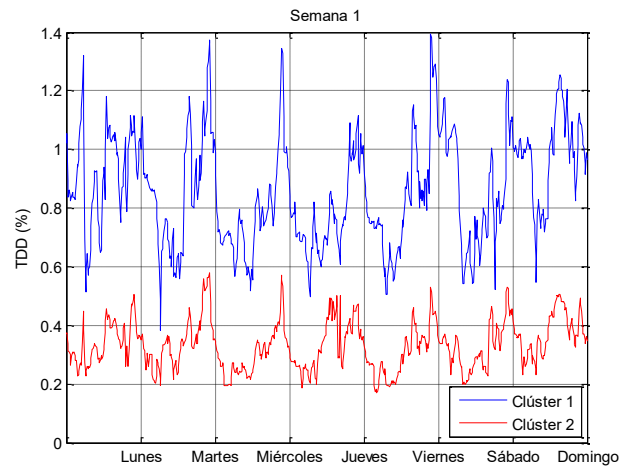


Fig. 5. Centroides de los clústeres finales para la TDD de corriente en la semana 1 (del 3 al 9 de enero).

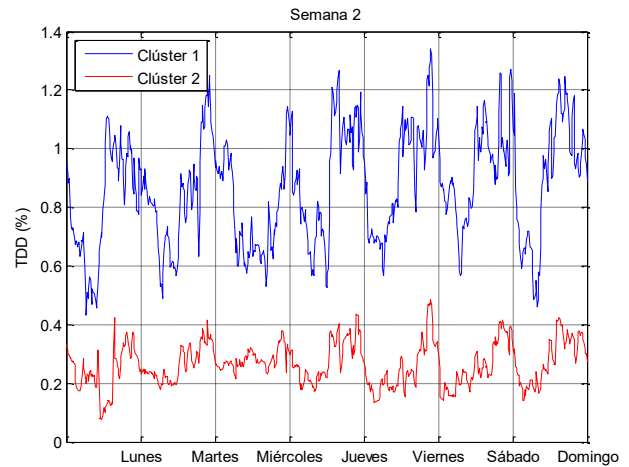


Fig. 6. Centroides de los clústeres finales para la TDD de corriente en la semana 2 (del 10 al 16 de enero).

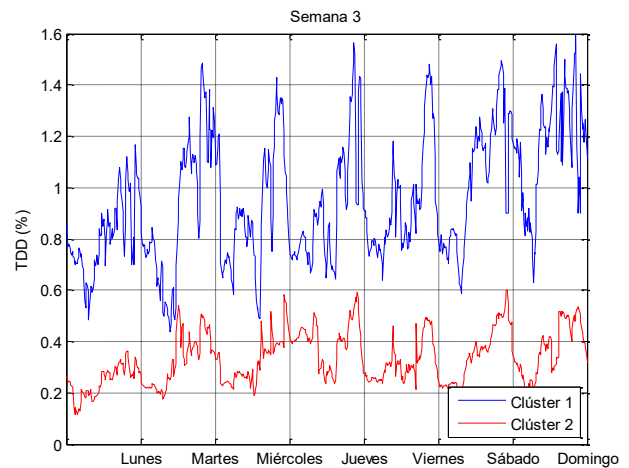


Fig. 7. Centroides de los clústeres finales para la TDD de corriente en la semana 3 (del 17 al 23 de enero).

Para cada centroe se calcula el límite de la TDD recomendado por [15], que depende de la relación entre la

corriente máxima de cortocircuito  $I_{SC}$  e  $I_L$  en el PCC.  $I_{SC}$  es la misma para todos los circuitos, con un valor aproximado de 3500 A, calculado según (11) a 34.5 kV para un transformador de 25 MVA e impedancia del 12%, mientras que  $I_L$  es 362 A para ambos grupos, dado que este valor corresponde a la corriente de carga máxima en la Barra 2 durante el período de prueba, y las redes 861 y 119 están ubicadas indistintamente en los dos grupos. Así,  $I_{SC}/I_L = 9.7$  y el límite para cada centroide es del 5%.

$$I_{SC} = \frac{\text{kVA} \times 100}{\%Z \times \sqrt{3} \times \text{kV}_L} \quad (11)$$

En esta investigación, los picos de distorsión nunca superan el límite máximo de compatibilidad del 5%, sin embargo, el punto de probabilidad 95% debe ser el valor que se compare con este límite. Además, [15] declara que el valor del percentil 99 debe ser inferior a 1.5 veces el límite anterior del 5%, es decir, 7.5%. La Tabla VI presenta estos resultados, donde se observa que no existe infracción de estos límites, por lo que no hubo peligro para los equipos de carga sensibles en el período inspeccionado.

TABLA VI

	VALORES DE PROBABILIDAD 95% Y 99% PARA LA TDD DE CORRIENTE					
	Semana 1		Semana 2		Semana 3	
	95%	99%	95%	99%	95%	99%
Clúster 1	1.17	1.32	1.17	1.26	1.40	1.50
Clúster 2	0.48	0.53	0.38	0.43	0.51	0.56

## VI. CONCLUSIONES

El trabajo presenta una metodología que contribuye a caracterizar la distorsión armónica del voltaje y la corriente en grupos de circuitos de distribución. El enfoque se basa en el uso del algoritmo de las k-medias y la RST. Mediante el primero, es posible identificar similitudes en el comportamiento de la THD de voltaje y la TDD de corriente en los circuitos, mientras que la RST representa un mecanismo de validación para cada clúster en particular, así como para los resultados globales del agrupamiento, al producir refinamiento a partir de una apropiada fusión entre grupos. Por tanto, es posible realizar una caracterización de los grupos finales a través de sus centroides de acuerdo con la norma IEEE 519-2014.

La implementación de la metodología en redes de distribución de 34.5 kV de Cuba durante un período de tres semanas reveló que dos clústeres bien definidos logran la mejor representación tanto para la THD de voltaje como para la TDD de corriente. Este resultado es confiable basado en los valores de precisión y calidad proporcionados por la RST. Ningún grupo final excedió los límites de distorsión armónica de voltaje y corriente, por lo que no se produjo peligro para los equipos de carga sensibles en el período de prueba. Asimismo, en cada uno de los grupos conformados se mantuvieron los mismos circuitos, lo que refleja un comportamiento regular de las cargas no lineales durante el período.

Los resultados obtenidos resultan relevantes a la hora de estudiar el comportamiento de la distorsión armónica en los circuitos de distribución a lo largo del tiempo. En este sentido,

un seguimiento al comportamiento de los patrones y contenido de los grupos puede revelar la presencia de cargas no lineales de carácter intermitente en grupos de circuitos, cuya presencia pudiera significar peligro para el equipamiento sensible, e inducir a la posterior implementación de medidas de mitigación.

La principal contribución del trabajo, por tanto, radica en el logro de una combinación entre el algoritmo de las k-medias como técnica útil de clasificación de datos y las medidas numéricas de la RST, lo que garantiza el cumplimiento satisfactorio del objetivo propuesto y facilita la caracterización de la distorsión armónica en sistemas de distribución modernos, así como el desarrollo de modelos de sistemas para estudios de simulación armónica.

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido apoyada por el proyecto “An ICT platform for sustainable energy ecosystem in smart cities” (ELAC2015/T10-0643).

## REFERENCIAS

- [1] A. A. P. Biscaro, R. A. F. Pereira, M. Kezunovic, and J. R. S. Mantovani, “Integrated fault location and power-quality analysis in electric power distribution systems,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 31, no. 2, pp. 428-436, Apr. 2016.
- [2] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, and H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, 2nd ed. McGraw - Hill, 2004.
- [3] X. Liang, and C. Andalib -Bin- Karim, “Harmonics and mitigation techniques through advanced control in grid-connected renewable energy sources: a review,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54, no. 4, pp. 3100-3111, Jul/Aug. 2018.
- [4] S. Elphick, V. Gosbell, V. Smith, S. Perera, P. Ciufu, and G. Drury, “Methods for harmonic analysis and reporting in future grid applications,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 32, no. 2, pp. 989-995, Apr. 2017.
- [5] B. Singh, and S. R. Arya, “Back-propagation control algorithm for power quality improvement using DSTATCOM,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 3, pp. 1204-1212, Mar. 2014.
- [6] D. Carta, C. Muscas, P. A. Pegoraro, and S. Sulis, “Identification and estimation of harmonic sources based on compressive sensing,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 68, no. 1, pp. 95-104, Jan. 2019.
- [7] J. Arrillaga, and N. R. Watson, *Power System Harmonics*, 2nd ed. John Wiley & Sons, 2003.
- [8] C. M. Orallo, I. Carugati, S. Maestri, P. G. Donato, D. Carrica, and M. Benedetti, “Harmonics measurement with a modulated sliding discrete Fourier transform algorithm,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 63, no. 4, pp. 781-793, Apr. 2014.
- [9] P. Salmerón, R. S. Herrera, A. Pérez, and J. Prieto, “New distortion and unbalance indices based on power quality analyzer measurements,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 24, no. 2, pp. 501-507, Apr. 2009.
- [10] S. Lee, J. W. Park, and G. K. Venayagamoorthy, “New power quality index in a distribution power system by using RPM model,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 46, no. 3, pp. 1204-1211, May/Jun. 2010.
- [11] S. Jazebi, M. M. Hadji, and R. A. Naghizadeh, “Distribution network reconfiguration in the presence of harmonics loads: optimization techniques and analysis,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1929-1937, Jul. 2014.
- [12] K. D. McBee, and M. G. Simões, “Evaluating the long-term impact of a continuously increasing harmonic demand on feeder-level voltage distortion,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, no. 3, pp. 2142-2149, Jun. 2014.
- [13] D. Kumar, and F. Zare, “Harmonic analysis of grid connected power electronic systems in low voltage distribution networks,” *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electron.*, vol. 4, no. 1, pp. 70-79, Mar. 2016.
- [14] Y. Wang, J. Yong, Y. Sun, W. Xu, and D. Wong, “Characteristics of harmonic distortions in residential distribution systems,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 32, no. 3, pp. 1495-1504, Jun. 2017.

- [15] *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*, IEEE Standard 519-2014, 2014.
- [16] E. Uz-Logoglu, O. Salor, and M. Ermis, "Online characterization of interharmonics and harmonics of AC electric arc furnaces by multiple synchronous reference frame analysis," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 52, no. 3, pp. 2673-2683, May/June 2016.
- [17] O. Salor, B. Gültekin, S. Buhan, B. Boyrazoglu, T. Inan, T. Atalik, A. Açık, A. Terciyanlı, O. Ünsar, E. Altıntaş, Y. Akkaya, E. Özdemirci, I. Çadırı, and M. Ermis, "Electrical power quality of iron and steel industry in Turkey," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 46, no. 1, pp. 60-80, Jan/Feb. 2010.
- [18] A. Asheibi, D. Stirling, and D. Sutanto, "Analyzing harmonic monitoring data using supervised and unsupervised learning," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 24, no. 1, pp. 293-301, Jan. 2009.
- [19] J. Yang, Y. Yang, J. Chen, L. Fu, and Z. He, "Determining the harmonic contributions of multiply harmonic sources using data clustering analysis," in *Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST), 2015 Int. Symposium on*, IEEE, 2015, pp. 405-411.
- [20] A. B. Nassif, H. Yazdanpanahi, and R. Torquato, "Harmonic Characterization of Modern Residential Distributed Energy Resources," in *2018 IEEE Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering (CCECE)*, IEEE, 2018, pp. 1-4.
- [21] G. Chicco, R. Porumb, P. Postolache, and C. Toader, "Characterization of Unbalanced and Distorted Distribution Systems from Experimental Data," in *Melecon 2010-2010 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*, IEEE, 2010, pp. 154-159.
- [22] *Electromagnetic Compatibility - Part 4: Testing and Measurements Techniques - Section 7: General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurement and Instrumentation, for Power Supply Systems and Equipment Connected Thereto*, IEC 61000-4-7, 2002.
- [23] J. F. Hair, W. C. Black, B. J. Babin, and R. E. Anderson, *Multivariate Data Analysis*, 7th ed. Pearson, 2014.
- [24] B. S. Everitt, S. Landau, M. Leese, and D. Stahl, *Cluster analysis*, 5th ed. Wiley, 2011.
- [25] D. Steinley, "Local optima in K-means clustering: what you don't know may hurt you," *Psychological Methods*, vol. 8, no. 3, pp. 294-304, Sep. 2003.
- [26] D. Steinley, and M. J. Brusco, "Initializing K-means batch clustering: a critical evaluation of several techniques," *Journal of Classification*, vol. 24, no. 1, pp. 99-121, Jun. 2007.
- [27] C. M. Bishop, *Pattern Recognition and Machine Learning*, Springer Science + Business Media, LLC, 2006.
- [28] J. Komorowski, Z. Pawlak, and L. Polkowski, *In Rough-Fuzzy Hybridization: A New Trend in Decision Making*, Springer - Verlag, 1999.
- [29] L. Arco, "Agrupamiento basado en la intermediación diferencial y su valoración utilizando la teoría de los conjuntos aproximados," Ph.D. dissertation, Univ. Central de Las Villas, Cuba, 2008.



**Lester Marrero Rodríguez** was born in Villa Clara, Cuba. He received the B.Sc. and M.Sc. degrees in electrical engineering from Universidad Central de Las Villas, Villa Clara, Cuba, in 2011 and 2016, respectively. He is currently a Ph.D. student in the Department of Electrical Engineering at Universidad de Concepción, Chile. His research activities are centered in analysis and optimization of distribution systems, load forecasting, smart grids, smart metering, and power quality.



**Luis García-Santander** was born in Concepción, Chile. He received the B.S. degree in electrical engineering from Universidad de Concepción, Chile, and the Ph.D. degree in electrical engineering from l'École Supérieure d'Électricité (Supélec) - University of Paris VI, Paris, France, in 2003. Since 2003 he is an Associate

Professor in the Department of Electrical Engineering at Universidad de Concepción, Chile. His areas of interest are the optimization of electrical systems, energy management and efficiency, smart grids and renewable energies.



**Luis Hernández-Callejo** was born in Spain. He received the B.S. degree in electrical engineering from Universidad de Valladolid, Soria, Spain, in 1996, the B.S. degree in computer engineering and the M.Sc. degree in communication, network and content management from European Higher Education from UNED University, in 2004 and 2011, respectively, and the Ph.D. degree in telecommunications engineering from Universidad de Valladolid, in 2014. He was responsible for communications systems in CEDER-CIEMAT and he was Project Coordinator for Smart Grid/Smart Metering/Microgrid in CEDER-CIEMAT. Currently, he is a Professor/Researcher with the Department of Agricultural and Forestry Engineering, School of Forestry, Agronomic and Bioenergy Industry Engineering, Campus Duques de Soria, Universidad de Valladolid. His areas of interest are renewable energies, microgrids, smart grids, smart metering and artificial intelligence.



**Pedro Bañuelos-Sánchez** was born in Mexico. He received the Ph.D. degree in electrical engineering from the l'École Supérieure d'Électricité (Supélec) - Université Paris VI, Paris, France, in 2001. He is presently a Full Professor in the Department of Computation, Electronics and Mechatronics, Universidad de las Américas Puebla, Mexico. He has been Associate Researcher, Visiting Researcher, and Visiting Professor in different universities as the Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) and Université Picardie Jules Verne, in France; and Appalachian State University and Johns Hopkins University, in U.S. His research interests include high-frequency power conversion, power factor correction techniques, high-frequency magnetics, power converters applied to photovoltaic and wind energy, modeling and control of converters, and smart grids. He has conducted or co-conducted 12 research projects. He holds two Mexican patents and one U. S. patent and has published three books on power electronics area. During 2008-2009, he served as the Secretary of the Mexican Power Electronics Society (SOMEPE). Dr. Bañuelos-Sánchez received the 2003 and 2004 University Excellence in Teaching Award from Universidad de las Américas Puebla.



**Victor Jara González** was born in Sancti Spiritus, Cuba. He received the B.Sc. degree in electrical engineering from Universidad Central de Las Villas, Villa Clara, Cuba, in 2015. He is currently a M.Sc. student in the Department of Energy at Universidad Autónoma Metropolitana, Ciudad de México, Mexico. His main research of interest focuses on grounding systems, electromagnetism and power quality.