

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electroenergética



TRABAJO DE DIPLOMA

Identificación de patrones de comportamiento de armónicos en circuitos de distribución

Autor: Jasiel Rodríguez Bravo

Tutor: MSc. Lester Julio Marrero Rodríguez

Santa Clara

"2017"



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Eléctrica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Autor

Firma del Jefe de Departamento
donde se defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

PENSAMIENTO

Escriba aquí el texto del pensamiento (Opcional)

DEDICATORIA

A mi familia: Mi mama, mi papa, mi hermana, mis abuelos y mi novia por estar junto a mí en los buenos y malos momentos.

AGRADECIMIENTOS

A todos mis familiares y amigos, por su apoyo y confianza.

A mis compañeros, por compartir sus experiencias y su amistad durante estos cinco años

A todos mis profesores, por su conocimiento y dedicación.

TAREA TÉCNICA

1. La revisión bibliográfica acerca de los armónicos y las recomendaciones para su estudio según las normas IEC.
2. La presentación de una metodología basada en el análisis clúster para identificar comportamientos de armónicos relativamente homogéneos en circuitos eléctricos de distribución de Villa Clara.
3. La aplicación de la propuesta a las mediciones disponibles empleando MATLAB.

Firma del Autor

Firma del Tutor

RESUMEN

Durante las últimas décadas se ha producido de manera acelerada la introducción de elementos no lineales en los sectores residencial, comercial e industrial, lo que ha afectado el mantenimiento de la forma de onda sinusoidal de voltaje, alterándose su amplitud y frecuencia. Estos sectores disponen de la energía eléctrica a través de las redes de distribución, por ello es imprescindible el chequeo sistemático de las mismas con el fin de garantizar una calidad de la energía eléctrica dentro de las normas establecidas. La tesis propone una metodología basada en el análisis clúster para identificar patrones de comportamiento de armónicos en circuitos de distribución de Villa Clara. Dicha metodología se aplica a las lecturas de instrumentos de medición ION instalados en las cabeceras de estos circuitos de distribución, posibilitando la conversión de los grandes volúmenes de datos coleccionados en conocimientos útiles, lo que resulta en beneficio para la Unión Eléctrica en su misión de optimizar el proceso de distribución. El resultado principal del trabajo radica en la identificación de comportamientos similares de distorsión armónica aplicando en MATLAB.

Palabras clave: Armónicos, análisis clúster, redes de distribución, MATLAB, ION.

TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
TAREA TÉCNICA	iv
RESUMEN	v
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. Consideraciones generales sobre distorsión armónica en circuitos de distribución.....	4
1.1. Introducción.....	4
1.2. Definición.....	4
1.2.1. Origen de los armónicos.....	5
1.2.2. Mecanismos de generación de armónicos.....	7
1.2.3. Características de la distorsión armónica.....	10
1.2.4. Fuentes generadoras de armónicos.....	10
1.3. Principales efectos causados por los armónicos de corriente y voltaje.....	11
1.3.1. Efectos instantáneos.....	12
1.3.2. Efectos a largo plazo.....	13
1.3.3. Efectos en los filtros pasivos.....	16
1.3.4. Efectos en los equipos electrónicos sensibles.....	16

1.3.5. Efectos en los transformadores.....	17
1.3.6. Efectos en el conductor neutro.....	18
1.3.7. Los armónicos y el efecto pelicular.....	19
1.3.8. Efectos en los condensadores.....	19
CAPÍTULO 2. Técnica estadística utilizada para identificar patrones de comportamiento de armónicos similares en circuitos de distribución. 20	
2.1. Introducción.....	21
2.2. Definición.....	21
2.3. Objetivo del análisis cluster.....	22
2.3.1. Selección de variables del análisis cluster.....	22
2.4. Detección de atípicos.....	22
2.5. Selección de la medida de similitud.....	23
2.5.1 Medidas de correlación.....	23
2.5.2. Medidas de distancia.....	24
2.6. Obtención de conglomerados y valoración de ajuste conjunto.....	25
2.6.1. Procedimiento de obtención de conglomerados jerárquicos.....	25
2.6.2. Procedimiento de obtención de conglomerados no jerárquicos.....	26
2.7. Verificación de la consistencia de la clusterización.....	28
CAPÍTULO 3. Análisis y discusión de la aplicación de la técnica estadística.30	
3.1. Introducción.....	32
3.2. Recopilación de datos.....	32
3.3. Implementación de método utilizando medida de similitud de distancia de euclídea...33	
3.3.1. Implementación del método de Ward.....	35
3.3.2. Índice de consistencia.....	36
3.3.3. Implementación del método de las K-Medias.....	38

3.3.4. Formación de los centroides.....	40
3.4. Método de coeficiente de correlación.....	40
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	45
Conclusiones	45
Recomendaciones	46
ANEXOS	47
Anexo I Mediciones de THD por hora para los ION en Villa Clara.....	47
Anexo II Localización de los ION en el monolineal de Santa Clara 110 – 34.5 kV	49
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

INTRODUCCIÓN

El descubrimiento de la energía eléctrica fue sin duda uno de los grandes hechos que le permitió a la humanidad el paso del oscuro mundo feudal al capitalismo del siglo XIX y de ahí a una sociedad más avanzada en el siglo XX.

Su aplicación en la industria en general, la metalurgia, el transporte, las telecomunicaciones, los electrodomésticos y su uso en la robótica, por solo citar algunas de sus muchas aplicaciones, han hecho que se convierta en un pilar fundamental en el desarrollo de toda nación. No puede un país tener riqueza social sin la producción y uso, para el bienestar de su población, de la energía eléctrica. Por ello, a nivel global se promueven estudios que optimicen el uso de la energía eléctrica y su ahorro, ya que, uno de los problemas de la energía eléctrica es que, una vez producida, resulta muy difícil almacenar y, al transportarse, se pierde cierta cantidad de la misma. [1]

La utilización de la energía eléctrica requiere un suministro de potencia, con frecuencias y tensiones controlables, mientras que su generación y transmisión se realizan a niveles nominalmente constantes. Esta discrepancia necesita un acondicionamiento o conversión de la potencia que, en general, se realiza mediante circuitos no lineales. Estos circuitos están constituidos por materiales semiconductores que distorsionan las ondas de tensión y corriente.

La generación de energía eléctrica, generalmente, se produce a frecuencias de 50 ó 60 Hz y la fuerza electromotriz de los generadores eléctricos puede considerarse prácticamente sinusoidal. Por otra parte, cuando una fuente de tensión sinusoidal se aplica a una carga no lineal, la corriente resultante no es perfectamente sinusoidal. En presencia de la impedancia del sistema, la corriente causa una caída de tensión no sinusoidal y, por tanto, produce una distorsión de la tensión en los terminales de la carga, es decir, esta contiene armónicos. [2]

El análisis de armónicos ha sido sin discusión uno de los aspectos más estudiados desde hace unas décadas hasta el presente. La presencia de armónicos en circuitos eléctricos causa muchos problemas para los ingenieros de sistemas de potencia. El efecto más inmediato de un elevado contenido armónico es el deterioro de las comunicaciones telefónicas, pero también ocurren otros efectos que, aunque no audibles, pueden ser más perjudiciales, tales como el mal funcionamiento de sistemas de control y protección y las sobrecargas de los equipos eléctricos. Frecuentemente, la presencia de contaminación armónica solo se detecta después de ocurrido un hecho, como por ejemplo la destrucción de bancos de condensadores para la corrección del factor de potencia. [3]

Estos aspectos derivan en un impacto económico importante, lo que se traduce en gastos adicionales en materiales y pérdidas energéticas y de productividad, lo que contribuye a la pérdida de competitividad entre las empresas. [4]

En Cuba, a partir del año 2006 con el inicio de la Revolución Energética, el país ha llevado a cabo un intenso programa de desarrollo de la producción, distribución y consumo de los bienes y servicios apoyados en los adelantos tecnológicos actuales. La introducción de nuevos y modernos dispositivos en todos los sectores: industrial, comercial y residencial, amerita sin dudas un estudio del grado de distorsión armónica en los dispositivos del sistema de potencia. Sin embargo, en los últimos años, los trabajos reportados en este sentido solo se concentran en el estudio particular y aislado de algún circuito de distribución, toda vez que el análisis conjunto de un número determinado de ellos resulta muy complejo. O sea, que actualmente no se cuenta con una metodología que permita el reconocimiento de patrones característicos en el comportamiento de armónicos tomando en cuenta varios circuitos de distribución, lo que de determinarse posibilitaría clasificar los mismos de acuerdo a un patrón de comportamiento característico y facilitaría el análisis armónico de los circuitos de distribución en la provincia.

De aquí que se plantee como problema científico:

¿Cómo contribuir a la identificación de patrones de comportamiento de armónicos en circuitos eléctricos de distribución?

Siendo el objetivo general de la investigación:

Identificar patrones de comportamiento de armónicos en circuitos eléctricos de distribución de Villa Clara.

Para dar cumplimiento al objetivo general se precisan como objetivos específicos:

1. Realizar una búsqueda bibliográfica acerca de aspectos generales sobre armónicos, así como sus índices y limitaciones, según las normas IEC.
2. Presentar una metodología basada en el análisis clúster para identificar comportamientos de armónicos relativamente homogéneos en circuitos eléctricos de distribución de Villa Clara.
3. Implementar en MATLAB la metodología y aplicar la misma a las mediciones disponibles de circuitos de distribución.

El trabajo está conformado por introducción, tres capítulos, conclusiones y recomendaciones, bibliografía y anexos. En el primer capítulo se describen las cuestiones teóricas fundamentales en relación a los armónicos y se definen la metodología para su estudio, sus índices y límites según las normas IEC. En el segundo capítulo se muestra la metodología del análisis clúster. Finalmente, en el tercer capítulo se exponen los resultados obtenidos y se efectúa su análisis y discusión.

CAPÍTULO 1. Consideraciones generales sobre distorsión armónica en circuitos de distribución

1.1 Introducción

La generación de energía eléctrica, generalmente, se produce a frecuencias de 50 ó 60 Hz y la fuerza electromotriz de los generadores eléctricos puede considerarse prácticamente sinusoidal. Por otra parte, cuando una fuente de tensión sinusoidal se aplica a una carga no lineal, la corriente resultante no es perfectamente sinusoidal. En presencia de la impedancia del sistema, la corriente causa una caída de tensión no sinusoidal y, por tanto, produce una distorsión de la tensión en los terminales de la carga, es decir, esta contiene armónicos. [2]

En este capítulo se discuten los aspectos básicos sobre la distorsión armónica en circuitos de distribución, la metodología para su estudio y las principales afectaciones que puede causar al sistema.

1.2 Definición de armónicos

En un sistema de potencia ideal, el voltaje que abastece a los equipos de los clientes, y la corriente de carga resultante son perfectas sinusoides. En la práctica, sin embargo, las condiciones nunca son ideales, tan así que estas formas de onda se encuentran frecuentemente muy deformadas. Esta diferencia con la perfecta senoide se expresa comúnmente desde el punto de vista de la distorsión armónica de las formas de onda del voltaje y de la corriente.

La descomposición de esta onda distorsionada tiene como fundamento matemático la teoría descubierta por el francés Jean-Baptiste Joseph Fourier, quien demostró que toda onda continua y periódica, puede ser representada por la suma de una serie de ondas

sinusoidales cuyas frecuencias son un múltiplo de la frecuencia fundamental de la onda. Estas componentes se denominan armónicos cuando este múltiplo toma valores enteros.

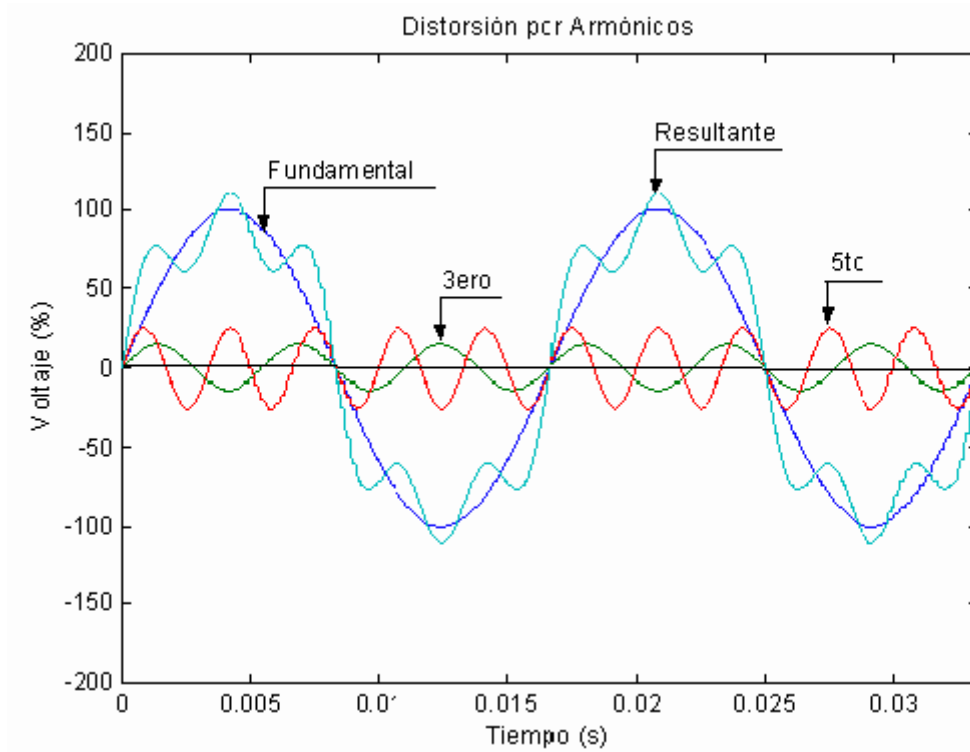


Figura 1.1. Distorsión de la onda creada por el 3er y 5to armónico.

1.2.1 Origen de los armónicos

En general, los armónicos son producidos por cargas no lineales, lo cual significa que su impedancia no es constante (está en función de la tensión). Estas cargas no lineales a pesar de ser alimentadas con una tensión sinusoidal absorben una intensidad no sinusoidal, pudiendo estar la corriente desfasada un ángulo ϕ respecto a la tensión. Para simplificar se considera que las cargas no lineales se comportan como fuentes de intensidad que inyectan armónicos en la red.

Las cargas armónicas no lineales más comunes son las que se encuentran en los receptores alimentados por electrónica de potencia tales como: variadores de velocidad, rectificadores, convertidores, etc. Otro tipo de cargas tales como: reactancias saturables, equipos de soldadura, hornos de arco, etc., también inyectan armónicos. El resto de las

cargas tienen un comportamiento lineal y no generan armónicos, inductancias, resistencias y condensadores.

Existen dos categorías generadoras de armónicos. La primera es simplemente las cargas no lineales en las que la corriente que fluye por ellas no es proporcional a la tensión. Como resultado de esto, cuando se aplica una onda sinusoidal de una sola frecuencia, la corriente resultante no es de una sola frecuencia. Transformadores, reguladores y otros equipos conectados al sistema pueden presentar un comportamiento de carga no lineal y ciertos tipos de bancos de transformadores multifase conectados en *estrella-estrella* con cargas desbalanceadas o con problemas en su puesta a tierra. Diodos, elementos semiconductores y transformadores que se saturan son ejemplos de equipos generadores de armónicos, estos elementos se encuentran en muchos aparatos eléctricos modernos. Invariablemente esta categoría de elementos generadores de armónicos, lo harán siempre que estén energizados con una tensión alterna. Estas son las fuentes originales de armónicos que se generan sobre el sistema de potencia.

El segundo tipo de elementos que pueden generar armónicos son aquellos que tienen una impedancia dependiente de la frecuencia. Para entender esto más fácilmente mencionaremos algunos conceptos previos.

Los usuarios residenciales, comerciales e industriales, tienen una gran cantidad de equipos como hornos de microondas, computadoras, sistemas con control robótico, televisión, VCR, estéreos y otros equipos. Todos estos equipos contribuyen con la generación de cantidades variables de armónicos. Aún ventiladores eléctricos y simples motores de inducción trabajando sobrecargados pueden contribuir a la creación de armónicos. Las salidas de armónicos de estos múltiples aparatos pueden sumarse y originar problemas en el sistema de potencia.

Los sistemas de iluminación del tipo lámparas de descarga o lámparas fluorescentes son generadores de armónicos de corriente. Una tasa del 25% del tercer armónico es observada en ciertos casos [1]. La tasa individual del armónico 3ro puede incluso sobrepasar el 100% para ciertas lámparas fluocompactadas modernas [2], y por tanto hay que prestar una atención especial en el cálculo de la sección y la protección del neutro, ya que este conduce la suma de las corrientes de tercera armónica de las tres fases, por lo que puede ser sometido a peligrosos sobrecalentamientos si no es seleccionado adecuadamente.

La impedancia de un reactor saturado está variando con la circulación de corriente a través de ella, resultando en una considerable distorsión de corriente. Este es el caso por ejemplo de transformadores sin carga sometidos a un sobrevoltaje continuo.

Las máquinas rotativas producen armónicos de ranura de rango elevado y de amplitud normalmente despreciable. Las pequeñas máquinas sincrónicas son, sin embargo, generadoras de tensiones armónicas de 3er orden que pueden tener una incidencia sobre:

- El calentamiento permanente (aun sin defecto) de las resistencias de puesta a tierra del neutro de los alternadores.
- El funcionamiento de los relés amperimétricos de protección contra los defectos de aislamiento.

Los armónicos son atenuados de una manera normal a medida que la potencia eléctrica es absorbida. En raros casos pueden contribuir a la potencia real que toma un motor, pero es muy raro y no presentan ningún efecto positivo, en general los armónicos producen calor a medida que circulan por los conductores y aparatos eléctricos. Por otro lado, cuando los armónicos se combinan con armónicos generados por diferentes fuentes, pueden propagarse a diferentes distancias.

1.2.2 Mecanismo de generación de armónicos

Como se mencionó previamente, cuando las cargas no lineales son suministradas por una fuente sinusoidal (generación eléctrica), la corriente armónica inyectada está referida como contribuciones de la carga. Estas corrientes causan caídas de voltaje armónicas en el circuito de suministro y por tanto distorsionan el voltaje en el PCC. Cualquier carga, incluso cargas lineales, conectadas al PCC tendrá corrientes armónicas inyectadas dentro de ella por el voltaje distorsionado del PCC. La figura 1.2 muestra el fenómeno en un circuito típico de distribución. [5]

Para explicar el fenómeno de manera más comprensible, el circuito de la figura anterior puede simplificarse al sustituir el conjunto de cargas lineales y no lineales por equivalentes respectivamente, por ejemplo, las cargas lineales pueden ser sustituidas por una resistencia pura R_l y las no lineales por un convertidor estático, según refleja la figura

1.2. Aquí el circuito es alimentado por el generador G a través de una línea de impedancia ($R_s + jX_s$).

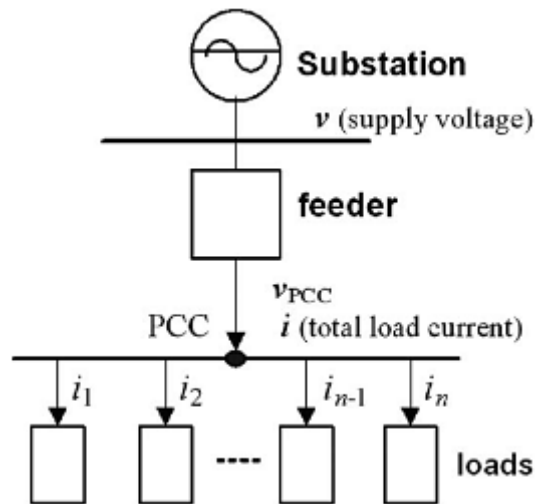


Figura 1.2. Diagrama monolineal de un circuito típico de distribución.

El generador suministra la potencia P_{g1} al PCC. La figura 1.3 (a) muestra que la mayor parte de esta potencia (P_{l1}) es transferida a la carga, mientras que una parte relativamente pequeña de la misma (P_{c1}) es convertida en potencia a diferentes frecuencias en el convertidor estático. Además, hay una pérdida de potencia adicional (P_{s1}) a la frecuencia fundamental en la resistencia del sistema de transmisión (R_{s1}).

La figura 1.3 (b) ilustra el flujo de potencia armónica. Como el voltaje interno del generador se ha asumido como una senoide perfecta, el generador solo suministra potencia a la frecuencia fundamental y, por tanto, es cortocircuitado en este diagrama, es decir la línea y el generador son representados por sus impedancias armónicas ($R_{sh} + jX_{sh}$) y ($R_{gh} + jX_{gh}$), respectivamente. En este diagrama el convertidor estático aparece como una fuente de armónicos de corriente. La pequeña proporción de la potencia fundamental (P_{c1}), transformada en potencia armónica, es consumida, una parte ($P_{sh} + P_{gh}$), en las resistencias del sistema (R_{sh}) y del generador (R_{gh}), y el resto (P_{lh}) en la carga.

Así, la pérdida total de potencia consiste en la componente de frecuencia fundamental (P_{s1}) y la potencia armónica causada por la presencia del convertidor ($P_{sh} + P_{gh} + P_{lh}$).

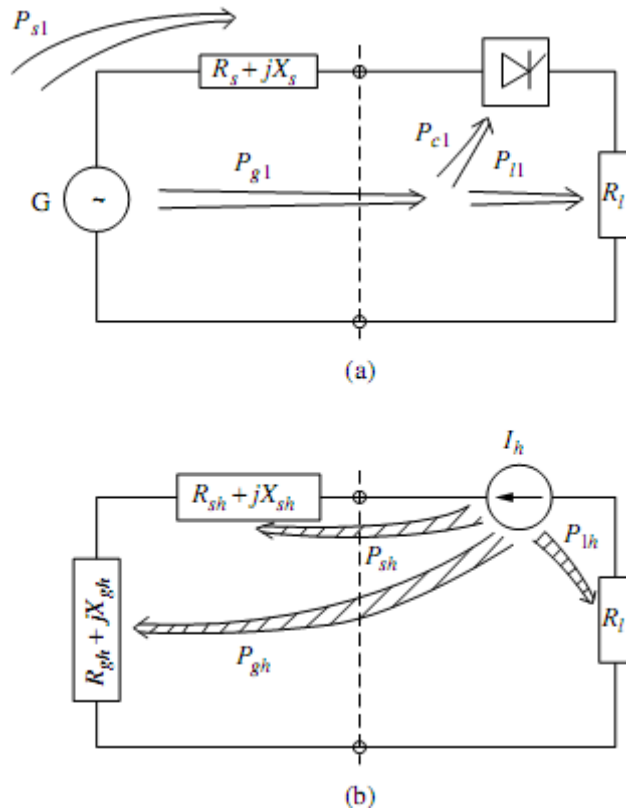


Figura 1.3. Circuito equivalente de la figura 1.2. (a) Flujo de potencia a la frecuencia fundamental. (b) Flujo de potencia armónica.

1.2.3 Características de la distorsión armónica

Cuando la onda de corriente o de tensión medida en cualquier punto de un sistema eléctrico se encuentra distorsionada, con relación a la onda sinusoidal que idealmente deberíamos encontrar, se dice que se trata de una onda contaminada con componentes armónicas.

Para que se considere como distorsión armónica las deformaciones en una señal, se deben de cumplir las siguientes condiciones:

- Que la señal tenga valores definidos dentro del intervalo, lo que implica que la energía contenida es finita.
- Que la señal sea periódica, teniendo la misma forma de onda en cada ciclo de la señal de corriente o voltaje.

- Permanente, cuando la distorsión armónica se presenta en cualquier instante de tiempo, es decir, que no es pasajera.

1.2.4 Fuentes generadoras de armónicos

Las cargas no lineales son aquellas que, al aplicarle cierta onda de tensión, la forma de onda de la corriente no conserva esa misma forma. Estas cargas precisamente son las encargadas, producto de esta característica, de la introducción de armónicos en la red. Estas cargas no lineales pueden clasificarse, básicamente, en tres categorías [6]; a continuación, se presenta una lista con las más importantes.

A- Basadas en arcos y descargas eléctricas:

A1- Lámparas de descarga (fluorescentes, ahorradoras de energía, neón, vapores de sodio y mercurio, etc.)

A2- Soldadores de arco

A3- Hornos de arco

B- Basadas en inductancias saturables:

B1- Transformadores

B2- Motores

B3- Reactancias para limitar los arcos de descarga

C- Electrónicas:

C1- Rectificadores para cargas resistivas e inductivas

C2- Fuentes de alimentación (aparatos eléctricos domésticos y de oficina, variadores de frecuencia, sistemas de alimentación ininterrumpida, lámparas electrónicas, etc.)

C3- Reguladores y recortadores

C4- Cargadores de baterías

C5- Ciclo convertidores

C6- Convertidores continua-alterna sobre la red (energía solar, accionamientos con recuperación de energía, cascadas hipo síncronas, transmisión de energía en corriente continua, etc.)

1.3 Principales efectos causados por los armónicos de corriente y voltaje.

Los armónicos de corriente y voltajes sobrepuestos a la onda fundamental tienen efectos combinados sobre los equipos y dispositivos conectados a las redes de distribución.

Para detectar los posibles problemas de armónicos que pueden existir en las redes e instalaciones es necesario utilizar equipos de medida de verdadero valor eficaz, ya que los equipos de valor promedio sólo proporcionan medidas correctas en el caso de que las ondas sean perfectamente sinusoidales. En el caso en que la onda sea distorsionada, las medidas pueden estar hasta un 40% por debajo del verdadero valor eficaz [7].

El efecto principal causado por los armónicos consiste en la aparición de voltajes no sinusoidales en diferentes puntos del sistema. Ellos son producidos por la circulación de corrientes distorsionadas a través de las líneas. La circulación de estas corrientes provoca caídas de voltaje deformadas que hacen que a los nodos del sistema no lleguen voltajes puramente sinusoidales. Mientras mayores sean las corrientes armónicas circulantes a través de los alimentadores de un sistema eléctrico de potencia, más distorsionadas serán los voltajes en los nodos del circuito y más agudos los problemas que pueden presentarse por esta causa.

Los voltajes no sinusoidales son causantes de numerosos efectos que perjudican los equipos conectados al sistema. Entre estos efectos se pueden mencionar la reducción de la vida útil del equipamiento de potencia, así como la degradación de su eficiencia y funcionamiento en general.

Los efectos perjudiciales de estos armónicos dependen del tipo de carga encontrada, e incluye:

- Efectos instantáneos.
- Efectos a largo plazo debido al calentamiento.

1.3.1 Efectos instantáneos

Armónicos de voltajes pueden distorsionar los controles usados en los sistemas electrónicos. Ellos pueden por ejemplo afectar las condiciones de conmutación de los tiristores por el desplazamiento del cruce por cero de la onda de voltaje.

Los armónicos pueden causar errores adicionales en los discos de inducción de los metros contadores. Por ejemplo, el error de un metro clase 2 será incrementado un 0.3%, en presencia de una onda de tensión y corriente con una tasa del 5% para el 5o armónico [8].

Las fuerzas electrodinámicas producidas por las corrientes instantáneas asociadas con las corrientes armónicas causan vibraciones y ruido, especialmente en equipos electromagnéticos (transformadores, reactores, entre otros).

Torques mecánicos pulsantes, debido a campos de armónicos rotatorios pueden producir vibraciones en máquinas rotatorias.

Efectos negativos son observados cuando líneas de comunicación y control son distribuidas a lo largo de líneas de distribución eléctricas que conducen corrientes distorsionadas. Parámetros que deben tenerse en cuenta incluyen: la longitud que se encuentran dichas líneas en paralelo, las distancias entre los dos circuitos y las frecuencias armónicas (el acoplamiento aumenta con la frecuencia).

Los armónicos son causantes de numerosos problemas de operación en los sistemas de protección. Entre ellos está la operación incorrecta de fusibles, de interruptores (breakers) y equipos y/o sistemas digitales de protección.

Para el caso de equipos protegidos contra sobre voltajes cuyos sistemas de protección también estén diseñados para operar con voltajes sinusoidales, estos pueden operar incorrectamente ante la aparición de formas de onda no sinusoidales. Esta operación incorrecta puede ir desde la sobreprotección del equipo hasta la desprotección del mismo por la no operación ante una forma de onda que podría dañarlo de forma severa. El caso típico se presenta ante formas de onda que presentan picos agudos. Si el dispositivo de medición está diseñado para responder ante valores RMS de la forma de onda, entonces estos cambios abruptos pudieran pasar sin ser detectados y conllevarían a la desprotección del equipo ante aquellos picos agudos dañinos, que no provoquen un aumento notable de la magnitud medio cuadrática censada. También pudiera ocurrir el caso contrario, el disparo ante valores no dañinos para el equipo protegido. En estos

casos el ajuste de la protección deberá depender de las características de la forma de onda: voltajes pico y RMS, tiempo de crecimiento de la onda, entre otros. Las protecciones convencionales no tienen en cuenta todos estos parámetros y lo que toman como base del proceso de protección, lo hacen sobre la suposición de que la forma de onda es puramente sinusoidal lo cual puede ser aceptado para algunas formas de onda, pero incorrecto para otras que pueden ser dañinas [9].

1.3.2 Efectos a largo plazo

El principal efecto a largo plazo de los armónicos es el calentamiento.

Calentamiento de capacitores:

Las pérdidas causadas por calentamiento son debidas a dos fenómenos: conducción e histéresis en el dieléctrico. Como una primera aproximación, ellas son proporcionales al cuadrado del voltaje aplicado para conducción y a la frecuencia para histéresis. Los capacitores son por consiguiente sensibles a sobrecargas, tanto debido a un excesivo voltaje a la frecuencia fundamental o a la presencia de tensiones armónicas.

Estas pérdidas son definidas por el ángulo de pérdida del capacitor cuya tangente es la razón entre las pérdidas y la energía reactiva producida.

Calentamiento debido a pérdidas adicionales en máquinas y transformadores:

Pérdidas adicionales en el estator (cobre y hierro) y principalmente en el rotor (devanado de amortiguamiento, y circuito magnético) de máquinas, causadas por la diferencia considerable en velocidad entre el campo rotatorio inducido por los armónicos y el rotor.

En los transformadores existirán pérdidas suplementarias debido al efecto pelicular, el cual provoca un incremento de la resistencia del conductor con la frecuencia, también habrá un incremento de las pérdidas por histéresis y las corrientes de Eddy o Foucault (en el circuito magnético).

Calentamiento de cables y equipos:

Las pérdidas son incrementadas en cables que conducen corrientes armónicas, lo que incrementa la temperatura en los mismos. Las causas de las pérdidas adicionales incluyen:

- Un incremento en la resistencia aparente del conductor con la frecuencia, debido al efecto pelicular.
- Un aumento del valor eficaz de la corriente para una misma potencia activa consumida.
- Un incremento de las pérdidas dieléctricas en el aislamiento con la frecuencia, si el cable es sometido a distorsiones de tensión no despreciables.
- El fenómeno relacionado con la proximidad, de envolventes, de pantallas (conductores revestidos) puestas a tierra en ambos extremos, entre otros.

De una forma general todos los equipos (cuadros eléctricos) sometidos a tensiones o atravesados por corrientes armónicas, sufren más pérdidas y deberán ser objeto de una eventual disminución de clase. Por ejemplo, una celda de alimentación de un condensador se dimensiona para una intensidad igual a 1.3 veces la corriente reactiva de compensación. Este sobredimensionamiento no tiene en cuenta sin embargo el aumento del calentamiento debido al efecto pelicular en los conductores.

Muchas de las anomalías que ocasiona la circulación de corrientes de frecuencias que no son propiamente del sistema, a través de él y de los equipos conectados, causando en ocasiones problemas de operación, tanto a la empresa suministradora como al usuario, se deben a las siguientes razones:

1. Las frecuencias del flujo de potencia de tensiones y corrientes sobrepuestas a las ondas de flujo de 50 o 60 ciclos, originan altas tensiones, esfuerzos en los aislamientos, esfuerzos térmicos e incrementan las pérdidas eléctricas.
2. Muchos aparatos eléctricos son diseñados para aceptar y operar correctamente en potencia de 50 o 60 ciclos, pero no responden bien a cantidades significantes de potencia a diferentes frecuencias. Esto puede causar ruido en el equipo eléctrico, problemas mecánicos y en el peor de los casos falla del equipo.
3. Los armónicos generados en un sistema eléctrico pueden crear niveles altos de ruido eléctrico que interfieran con las líneas telefónicas cercanas.
4. La presencia de frecuencias diferentes a la nominal en la tensión y en la corriente, regularmente no son detectables por un monitoreo normal, por mediciones o por el

equipo de control; por lo que su presencia no se nota. Por ejemplo, los medidores residenciales monofásicos no detectan frecuencias mucho más arriba de 6 ciclos. Frecuentemente la primera indicación de la presencia significativa de armónicos es cuando causan problemas de operación o fallas del equipo.

Algunos efectos perjudiciales que ocasionan los armónicos en los aparatos y sistemas de poca corriente:

- El mal funcionamiento de ciertos aparatos que utilizan la tensión como referencia para el control de los semiconductores o como base de tiempos para la sincronización de ciertos equipos.
- Perturbaciones porque se crean campos electromagnéticos. Así, cuando los conductores de baja intensidad o de transmisión de datos están muy próximos a cables de gran potencia por los que circulan corrientes armónicas, pueden, por inducción, ser receptores de corrientes que pueden provocar fallos en el funcionamiento de los elementos conectados a ellos,
- Por último, la circulación de corrientes armónicas por el neutro provoca una caída de tensión en el conductor, así, si el sistema de puesta a tierra del neutro es el TN-C, las masas de los diversos equipos no quedan a la misma tensión, lo que por su propia naturaleza provoca perturbaciones en los intercambios de información entre receptores inteligentes. Además, hay circulación de corrientes por las estructura metálicas de los edificios y, por tanto, creación de campos electromagnéticos perturbadores.

1.3.3 Efectos en los filtros pasivos

En los filtros pasivos también pueden aparecer problemas de sobreesfuerzo del aislamiento por sobretensión o sobre corriente en sus elementos componentes. Como estos filtros son los más empleados en la descontaminación armónica de los sistemas eléctricos debido a su bajo costo económico y facilidad de operación; también se hace necesario tener en cuenta en el diseño de los mismos la presencia de armónicos.

1.3.4 Efectos en los equipos electrónicos sensibles

Existen numerosos equipos modernos que son muy sensibles a los cambios producidos en el voltaje de alimentación de los mismos. Entre ellos están: las computadoras, los

módems, las tarjetas de electrónica compleja (de captación de datos, de comunicaciones, etc.), las cajas registradoras y muchos otros equipos domésticos y de oficina. Estos equipos al estar constituidos por complejas y delicadas configuraciones de elementos de baja potencia, necesitan de una fuente de alimentación muy estable que les provea de un voltaje dc de rizado casi nulo. Para ello necesitan de una fuente primaria de ac y de un bloque rectificador con fuente de voltaje estabilizada. En algunos casos este bloque de alimentación no posee el grado de invulnerabilidad necesario para soportar ciertos grados de distorsión de la onda de voltaje. Por esta razón los delicados circuitos son sometidos a variaciones notables en el lado dc de sus fuentes, afectando el funcionamiento de los mismos. Esta es la causa del re-arranque de computadoras y de la pérdida de control de las cajas registradoras sometidas a voltajes altamente contaminados. Además, los equipos con alto nivel de integración en sus elementos componentes, que estén sometidos a voltajes distorsionados por armónicos durante prolongados períodos de tiempo, pueden presentar daños irreparables. En su gran parte estos daños provocan la inutilidad total del componente integrado del equipo en cuestión.

En el caso de los equipos que necesitan de un potencial de tierra nulo, si están conectados a conductores de neutro por los que circulan corrientes de armónicos, entonces se verán sometidos a voltajes de neutro a tierra ciertamente peligrosos que pueden causarles daños.

Existen además equipos electrónicos que necesitan censar las magnitudes de fase para tener una noción de tiempo con respecto a los comienzos de los períodos de las corrientes y voltajes de alimentación. Normalmente basan su funcionamiento en la detección del cruce por cero de las magnitudes que chequean. Cuando estas están sometidas a los efectos de distorsión de las cargas no lineales, puede darse el caso de que aparezcan cruces por cero de las formas de onda en momentos que no coinciden con el cambio de signo del lóbulo (positivo o negativo) de la onda que se tome de referencia. Estas detecciones incorrectas pueden dar lugar a operaciones erróneas y en algunos casos al no funcionamiento de los equipos que controlan.

1.3.5 Efectos en los transformadores

Aunque los transformadores son dimensionados para la operación con cargas de 60 Hz, cuando estos alimentan cargas no lineales evidencian un incremento notable en sus pérdidas; tanto en las de núcleo como las de cobre.

Corrientes armónicas de frecuencias más altas provocan pérdidas de núcleo incrementadas en proporción al cuadrado de la corriente de carga RMS y en proporción al cuadrado de frecuencia debido al efecto pelicular. El incremento en las pérdidas de cobre se debe a la circulación de corrientes armónicas de secuencia positiva y negativa transportadas en los conductores de fase provenientes de cargas generadoras de armónicos monofásicas y trifásicas, y a la circulación de las corrientes armónicas triples de secuencia cero que son transportadas en los conductores neutros desde las cargas mono lineales generadoras de armónicos.

Los armónicos triples de secuencia cero se suman algebraicamente en el neutro y pasan a través del sistema de distribución hasta que alcanzan un transformador conectado en delta-estrella. Cuando las corrientes de neutro de armónicos triples alcanzan un transformador delta-estrella la misma es reflejada dentro del devanado primario en delta donde circula y causa sobrecalentamiento y fallas en el transformador.

1.3.6 Efecto en el conductor neutro

El diseño de circuitos ramales en el pasado, permitía un conductor neutro común para tres circuitos monofásicos. La lógica dentro de este diseño fue que el conductor neutro cargaría solamente con la corriente de desbalance de las tres cargas monofásicas. Un conductor neutro común parecía adecuado para las cargas y era económicamente eficiente puesto que un ingeniero de diseño balancearía las cargas durante el diseño, y un electricista balancearía las cargas durante su construcción. En muchos ejemplos el conductor neutro se disminuía en tamaño con respecto a los conductores de fase por las mismas razones.

Bajo condiciones balanceadas de operación en cargas monofásicas no lineales, el neutro común de los tres circuitos monofásicos es portador de armónicos triples de secuencia cero, los cuales son aditivos en el conductor neutro. Bajo condiciones de desbalance, el neutro común lleva corrientes comprendidas por las corrientes de secuencia positiva procedentes del desbalance del sistema, las corrientes de secuencia negativa procedentes del desbalance del sistema, y las corrientes aditivas de secuencia cero procedentes de los armónicos triples. Un conductor neutro común para tres circuitos ramales monofásicos, puede fácilmente sobrecargarse cuando alimenta, cargas no lineales balanceadas o desbalanceadas.

Las corrientes excesivas en el conductor neutro provocan caídas de voltajes mayores que los normales entre el conductor neutro y tierra en las tomas de 120 volts. Esto puede desestabilizar la operación del equipamiento electrónico sensible, tales como computadoras, que pueden requerir de un receptáculo de tierra aislado.

Las barras de neutro de la pizarra de control representan el primer punto común de conexión de las cargas monofásicas conectadas en delta. Recuérdese que las corrientes armónicas de secuencia positiva y negativa, asumiendo cargas balanceadas, se cancelan en cualquier punto común de conexión. La barra del conductor neutro también puede sobrecargarse debido a los efectos de cancelación de las corrientes armónicas de secuencia positiva y negativa entre los conductores que sirven a diferentes cargas.

Además, las corrientes armónicas triples de secuencia cero fluyen en los conductores neutros, a pesar del balance de las cargas. Las corrientes armónicas triples solamente, pueden sobrecargar las barras de neutro. En la práctica, los conductores neutros de circuitos ramales individuales portan corrientes armónicas de secuencia positiva y negativa provenientes de los desbalances de fase junto a las corrientes de armónicos triples de secuencia generados por la carga. Las barras de neutro que son dimensionadas para llevar el valor completo de la corriente nominal de fase pueden fácilmente sobrecargarse cuando el sistema de distribución de potencia alimenta cargas no lineales.

1.3.7 Los armónicos y el efecto pelicular

El efecto pelicular es el fenómeno donde las corrientes alternas de alta frecuencia tienden a fluir cerca de la superficie más externa de un conductor que fluir cerca de su centro. Esto se debe al hecho de que las concatenaciones de flujo no son de densidad constante a través del conductor, sino que tienden a decrecer cerca de la superficie más exterior, disminuyendo la inductancia e incrementando el flujo de corriente. El resultado neto del efecto pelicular es que el área transversal efectiva del conductor es reducida a medida que la frecuencia es incrementada. Mientras mayor es la frecuencia, menor es el área transversal y mayor es la resistencia ac. Cuando una corriente de carga armónica está fluyendo en un conductor, la resistencia ante corriente alterna equivalente, R_{ac} , para el conductor es elevada, aumentando las pérdidas de cobre $I_2 * R_{ac}$.

Este es el efecto que provoca que numerosos equipos, a diferentes niveles en los sistemas de distribución de potencia, se vean sometidos a sobrecalentamientos

excesivos. A ello contribuye también el incremento de las corrientes debido a la circulación de los armónicos de las diferentes secuencias. Este sobrecalentamiento es el que causa fallas por la pérdida del nivel de aislamiento en motores, transformadores, inductores y alimentadores en general.

1.3.8 Efectos en los condensadores

La impedancia de los condensadores disminuye al aumentar la frecuencia. Por tanto, si la tensión está deformada, por los condensadores que se usan para la corrección del factor de potencia circulan corrientes armónicas relativamente importantes. Por otra parte, la existencia de inductancias en algún punto de la instalación tiene el riesgo de que se produzcan resonancias con los condensadores, lo que puede hacer aumentar mucho la amplitud de los armónicos en los mismos. Este fenómeno de resonancia puede ocasionar que sea perforado el aislamiento de los capacitores, provocando daños severos. Esta perforación puede ocurrir tanto por picos de voltaje como de corriente a través de los mismos aun cuando el diseño básico (a la frecuencia de operación) prevea pocas posibilidades de falla ante los picos de cargas operados y a los niveles de voltaje y de corrientes esperados.

En la práctica, no se recomienda conectar condensadores en instalaciones que tengan una tasa de distorsión armónica superior al 8%.

CAPÍTULO 2. **Análisis clúster**

2.1 Introducción

En el presente capítulo se presenta la técnica estadística multivariante del análisis clúster. Se explica de forma breve la implementación del método de análisis cluster y las ventajas y desventajas que representa el uso del mismo.

2.2 Definición

El análisis clúster es la denominación de un grupo de técnicas multivariantes cuyo principal objetivo es agrupar objetos basándose en las características que poseen. El análisis cluster clasifica objetos de tal forma que cada objeto es muy parecido a los que hay en el conglomerado con respecto a algún criterio de selección predeterminado. Los conglomerados de objetos resultantes deberían mostrar un alto grado de homogeneidad interna y un alto grado de heterogeneidad externa [10]. Por tanto, si la clasificación es acertada, los objetos dentro de los conglomerados estarán muy próximos cuando se represente gráficamente, y los diferentes grupos estarán muy alejados.

2.3 Objetivo del análisis cluster

El objetivo fundamental del análisis cluster es la obtención de un conjunto de objetos en dos o más grupos basándose en su similitud para un conjunto de características especificadas. Al formar grupos homogéneos se pueden conseguir los siguientes objetivos:

1. Descripción de una taxonomía.
2. Simplificación de datos.
3. Identificación de relacion.

2.3.1 Selección de variables del análisis clúster

La selección de las variables a incluir en el valor teórico del análisis clúster debe hacerse con relación a consideraciones teóricas, conceptuales y prácticas. Cualquier aplicación del análisis cluster debe descansar en cierta lógica en función de la cual se seleccionan las variables. La técnica del análisis cluster no tiene un medio para diferenciar las variables relevantes de las irrelevantes solo obtiene los grupos de objetos más consistentes, aunque diferenciados. La inclusión de una variable aumenta la posibilidad de que se creen atípicos sobre estas variables que pueden tener un efecto importante sobre los resultados [10]. Por tanto, uno no debería incluir variables indiscriminadamente sino en su lugar elegir las variables utilizando el objetivo de investigación como criterio de selección.

2.4 Detección de atípicos

En su búsqueda de estructura, el análisis clúster es muy sensible a la inclusión de variables irrelevantes. Los atípicos pueden representar tanto observaciones verdaderas, que no son representativas en general, como una muestra reducida del grupo que provoca una mala representación. En ambos casos, los atípicos distorsionan la verdadera estructura y hacen que los conglomerados deducidos no sean representativos de la verdadera estructura.

Para la detección de estos casos se utiliza la perspectiva univariante que examina la distribución de observaciones, seleccionando como casos atípicos aquellos casos que caigan fuera de los rangos de la distribución. La cuestión principal consiste en el establecimiento de un umbral para la designación como casos atípicos. El enfoque típico convierte en primer lugar los valores de los datos en valores estándar, que tienen una media cero y una desviación estándar de uno [11].

Dado que los valores están estandarizados se puede realizar fácilmente comparaciones entre las variables. Para muestras pequeñas de 80 o incluso menos observaciones las pautas sugeridas identifican como atípicos aquellos casos con valores estándar de 2.5 o superiores. Cuando los tamaños de la muestra son mayores las pautas sugieren que el valor umbral del estandarizado se situé entre 3 y 4, lo cual depende del tamaño de la muestra. El investigador debería esforzarse para identificar solo aquellas observaciones verdaderamente distintivas y designarlas como casos atípicos.

2.5 Selección de medida de similitud

El concepto de similitud es fundamental para el análisis cluster. La similitud entre objetos es una medida de correspondencia o parecido entre objetos que van a ser agrupados. En nuestra discusión del análisis factorial, creamos una matriz de correlación entre las variables que fueron utilizadas para agrupar las variables en factores. En el análisis cluster las características que definen la similitud se especifican en primer lugar. A continuación, se combinan las características en una medida de similitud calculada para todos los pares de objetos, al igual que utilizábamos las correlaciones entre variables en el análisis factorial. De esta forma cualquier objeto puede ser comparado para cualquier objeto a través de una medida de similitud. El procedimiento del análisis cluster procede a continuación a agrupar objetos similares juntos en los conglomerados.

La similitud entre objetos puede medirse de varias formas, pero tres métodos dominan las aplicaciones del análisis cluster: medidas de correlación, medidas de distancia y medidas de asociación. Cada uno de los métodos representa una perspectiva particular de similitud, dependiendo tanto de sus objetivos como del tipo de datos. Tanto las medidas de distancia como las de correlación exigen datos métricos, mientras que las medidas de asociación son para datos no métricos [12].

2.5.1 Medidas de correlación

La medida de similitud entre objeto que probablemente nos viene a la mente en primer lugar es el coeficiente de correlación entre un par de objetos medido sobre varias variables. En efecto, en lugar de hacer la correlación entre dos conjuntos de variables, invertimos la matriz de las X variables de los objetos de tal forma que las columnas representan los objetos y las filas representan variables. Por tanto, el coeficiente de correlación entre las dos columnas de números es la similitud entre los perfiles de los dos objetos. Elevadas correlaciones indican similitud y bajas correlaciones indican falta de ella. Las medidas de correlación representan la similitud mediante la correspondencia de patrones en sus características (X variables) [10].

2.5.2 Medidas de distancia

Las medidas de similitud de distancia que representa la similitud como la proximidad de las observaciones respecto a las otras para las variables del valor teórico del análisis cluster. Las medidas de distancia son en realidad medidas de diferencia donde los valores elevados indican una menor similitud. La distancia se convierte en medida de similitud

utilizando la relación en la que los conglomerados de observaciones se definen de acuerdo a la proximidad de unas observaciones respecto a las otras.

Entre las medidas de similitud de distancia se encuentran:

- 1-Distancia city-block.
- 2-Distancia Mahalanobis.
- 3-Distancia Euclídea.

Entre las más utilizadas se encuentra la distancia euclídea. Para obtenerla suponga dos puntos en dos dimensiones tiene coordenadas $(X_1; Y_1)$ y $(X_2; Y_2)$, respectivamente. La distancia euclídea entre los puntos es la longitud de la hipotenusa de un triángulo rectángulo [13]. Este concepto es fácilmente generalizable para más de dos variables.

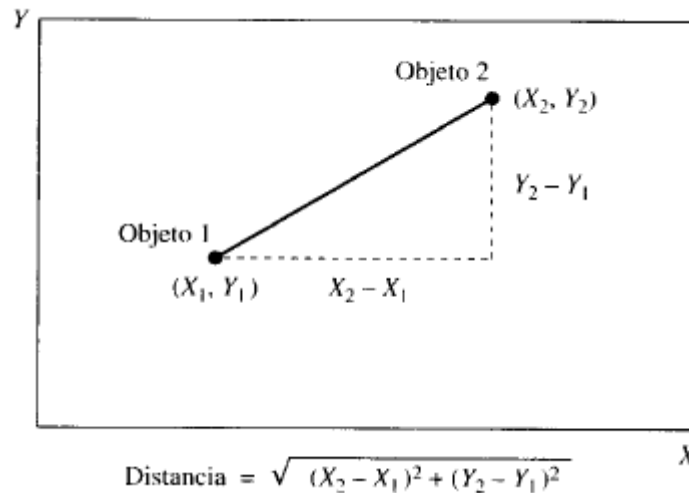


Figura 2.1. Ejemplo de distancia euclídea entre dos objetos medidos sobre dos variables.

2.6 Obtención de conglomerados y valoración de ajuste conjunto.

Con las variables seleccionadas comienza el proceso de partición. El investigador debe seleccionar en primer lugar el algoritmo de aglomeración utilizado en la formación de conglomerados y a continuación tomar la decisión del número de conglomerados que se van a formar. Ambas decisiones tienen implicaciones substanciales no solo sobre los resultados que se obtendrán sino también sobre la interpretación que se puede derivar de los resultados [14].

Los algoritmos de obtención de los conglomerados más utilizados pueden clasificarse en dos categorías principales:

- 1-Jerárquicos.
- 2-No jerárquicos.
- 3-Combinación de ambos.

En el presente texto se explica en detalle el método jerárquico de Ward y el no jerárquico de las K-Medias.

2.6.1 Procedimiento de obtención de conglomerados jerárquicos

Los procedimientos jerárquicos consisten en la construcción de una estructura en forma de árbol. Existen dos tipos de procedimiento de obtención de conglomerados jerárquicos: de aglomeración y divisivos. En los métodos de aglomeración cada objeto o aglomeración empieza dentro de su propio conglomerado, los más cercanos empiezan a combinarse reduciendo el número de conglomerados paso a paso. Eventualmente, todos los individuos se agrupan en un único conglomerado; por esta razón, los procedimientos de aglomeración son denominados a veces como métodos de construcción.

Cuando el proceso de obtención de conglomerados procede en dirección opuesta al método de aglomeración en dirección opuesta al método de aglomeración se denomina método divisivo. En los métodos divisivos se empieza con un gran conglomerado que contiene todas las observaciones [14]. En los pasos sucesivos las observaciones más diferentes se dividen y construyen conglomerados más pequeños este proceso continúa hasta que cada observación es un conglomerado en sí mismo.

Ejemplo de ello se muestra en la figura 2.2.

Métodos de encadenamiento disponibles:

- 1-Encadenamiento simple.
- 2-Encadenamiento completo.
- 3-Encadenamiento medio.
- 4-Método del centroide.
- 5-Método Ward.

Método de Ward:

En el Método de Ward la distancia entre los conglomerados es la suma de los cuadrados entre dos conglomerados sumados para todas las variables. En cada paso del procedimiento de aglomeración se minimiza la suma de los cuadrados dentro del conglomerado par todas las particiones obtenidas mediante la combinación de dos conglomerados en un paso previo [15]. Este procedimiento tiende a combinar la producción de conglomerados con aproximadamente el mismo número de observaciones.

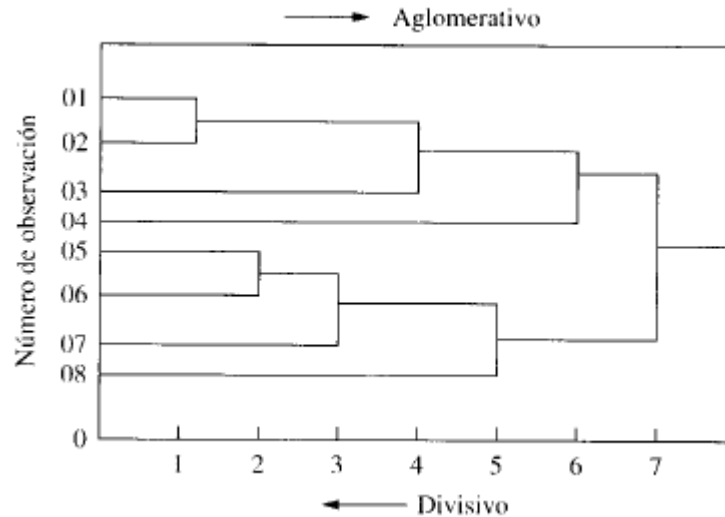


Figura 2.2. Dendrograma ilustrativo de obtención de conglomerados jerárquicos.

2.6.2 Procedimiento no jerárquico de obtención de conglomerados.

En contraste con los métodos jerárquicos, los procedimientos no jerárquicos no implican los procesos de construcción de árboles. En su lugar, asignan los objetos a conglomerados una vez que el número de conglomerados a formar está especificado. Por tanto, la solución de seis conglomerados no es solo una combinación de dos conglomerados desde una solución de siete conglomerados, sino que se basa solo en la búsqueda de la mejor solución de seis conglomerados en un ejemplo simple el proceso opera de la siguiente forma. El primer paso es seleccionar la semilla de conglomerado como centro de conglomerado inicial, y todos los objetos dentro de una distancia umbral previamente especificado se incluyen dentro del conglomerado resultante. Entonces se selecciona otra semilla de conglomerado y la asignación continua hasta que todos los objetos están asignados. Los objetos entonces pueden asignarse si están cercanos a otro conglomerado que no sea el origina. Los procedimientos de aglomeración no jerárquicos se denominan frecuentemente como aglomeración de K-medias, y normalmente utilizan

una de las siguientes aproximaciones para asignar las observaciones individuales de uno de los conglomerados.

- 1-Método de Umbral Secuencia.
- 2-Método de Umbral Paralelo.
- 3-Procedimiento de Optimización.

Método de las K-medias

Método no jerárquico que consiste en formar particiones directamente, es necesario tener definido con anterioridad el número de clústeres que se desean.

Algoritmo de las K Medias.

Fase 1. Batch Update: Reasigna todos los objetos a los centros de clúster más cercanos. Al final los centros de clústeres se recalculan.

Fase 2. Online Update: Reasigna todos los objetos a los centros de clúster más cercanos sólo si reducen el valor de la función que se está minimizando. Al final los centros de clústeres se recalculan.

La Fase 1 es rápida, pero en ocasiones no converge ni tan siquiera a un mínimo local. Se usa ella sola siempre que estemos trabajando con pocos datos.

La Fase 2 es más lenta pero siempre converge a un mínimo local.

La convergencia al mínimo global sólo se puede lograr usando una búsqueda exhaustiva [16].

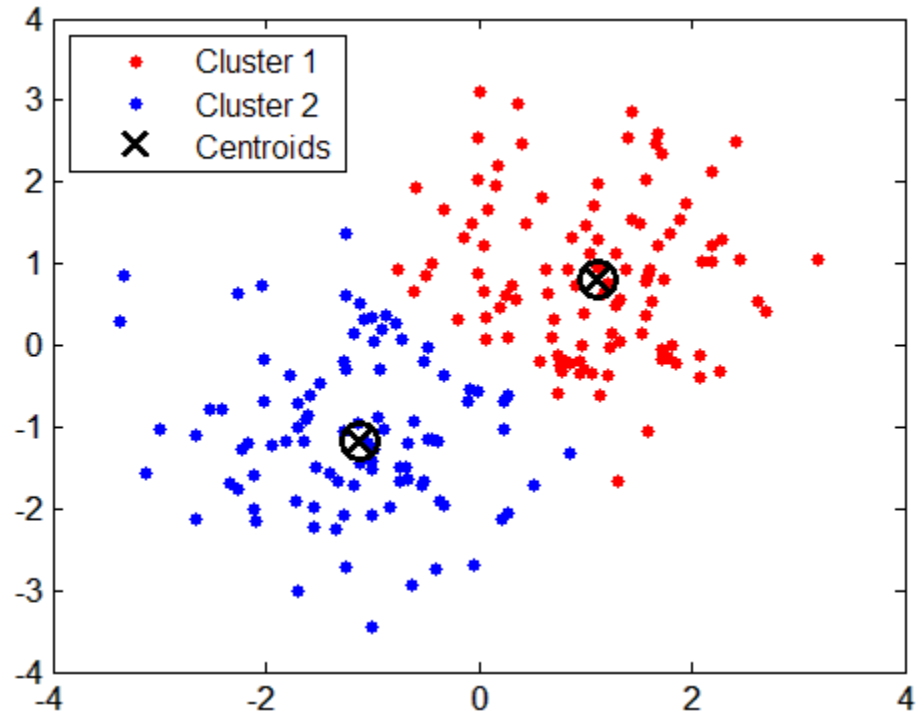


Figura 2.3. Clusterización no jerárquica: K-medias.

2.6.3 Combinación de ambos métodos

Otra aproximación es utilizar ambos métodos para obtener los beneficios de cada uno. En primer lugar, una técnica jerárquica puede establecer el número de conglomerados, los perfiles de los centros de conglomerados y la identificación de cualquier atípico obvio. Una vez que se han eliminado los atípicos las observaciones restantes pueden ser agrupadas mediante método no jerárquico con los centros de conglomerados desde los resultados jerárquicos como los puntos de semilla iniciales. De esta forma, las ventajas de los métodos jerárquicos se complementan con la capacidad de los métodos no jerárquicos para ajustar los resultados permitiendo el cambio de pertenecía a un conglomerado.

2.7 Verificación de la consistencia de la clusterización

Se dice que una unión en una clusterización jerárquica es inconsistente si la altura de dicha unión en el dendrograma es mucho mayor que la altura del enlace previo. En otras palabras, si se están uniendo objetos que son muy disímiles entre sí.

Coefficiente de consistencia de un enlace

$$CC(L) = \frac{H(L) - \mu(H(\tilde{L}))}{\sigma(H(\tilde{L}))}$$

Donde:

L : Enlace al cual se le está calculando la consistencia.

$H(L)$: Altura de la unión L .

$\mu(H(L))$: Media de las alturas de los enlaces que se encuentran por debajo de L .

$\sigma(H(L))$: Desviación estándar de las alturas de los enlaces que se encuentran por debajo de L .

La figura 2.4 ilustra un ejemplo práctico donde se visualizan uniones consistentes e inconsistentes.

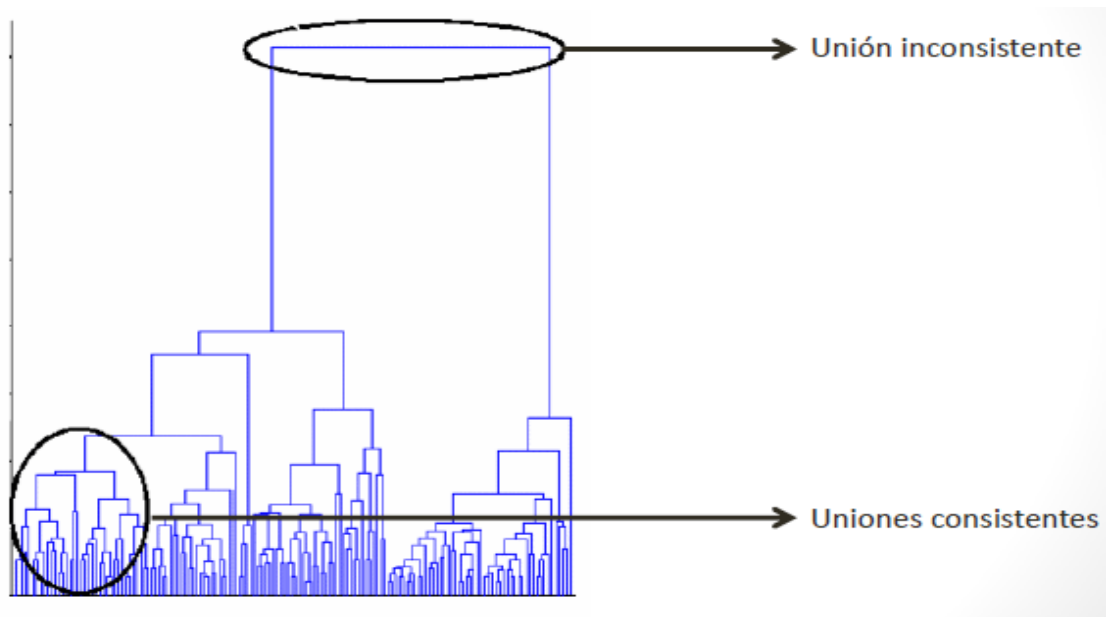
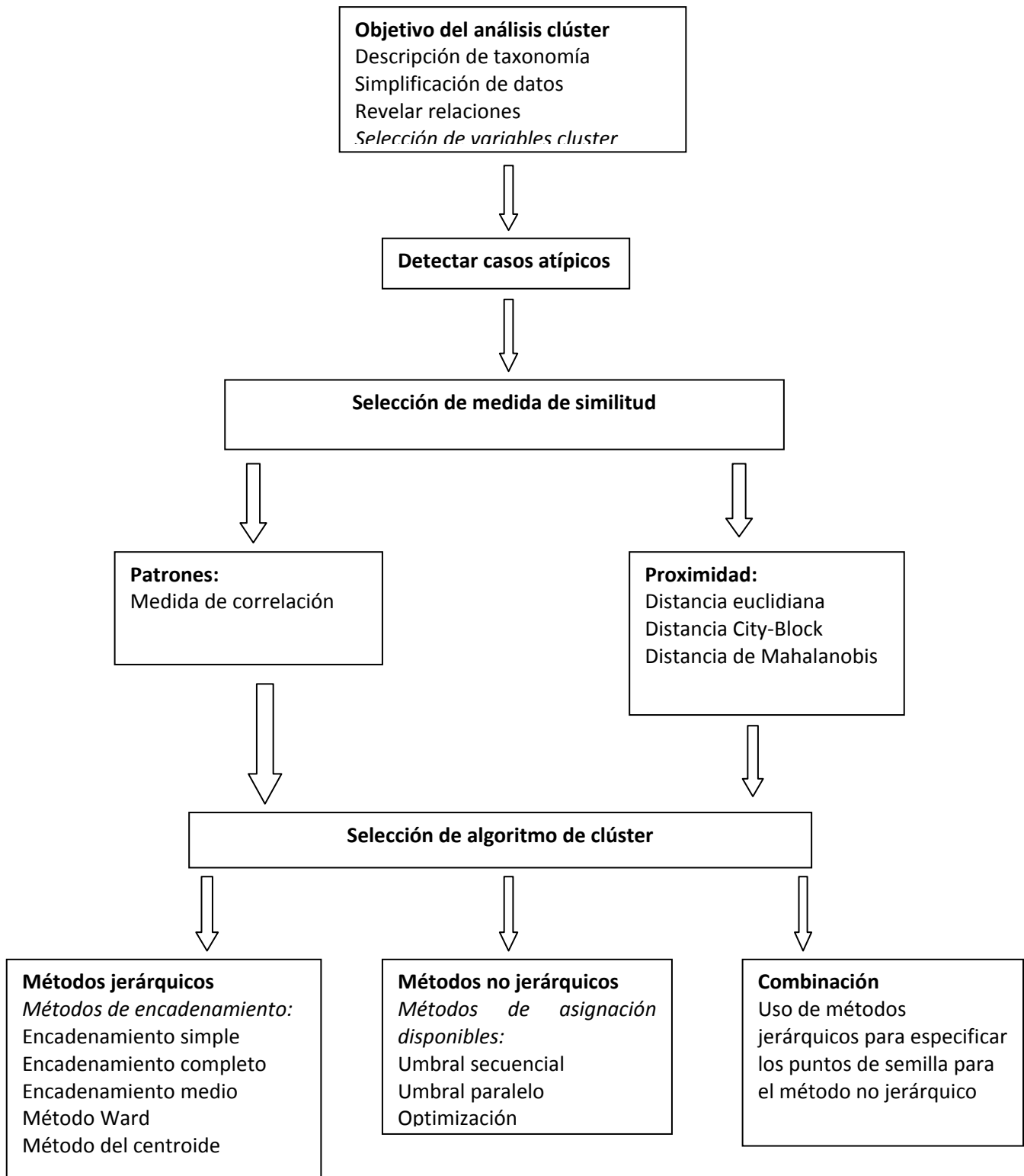


Figura 2.4. Clusterización no jerárquica: K-medias.



2.5. Diagrama de etapas del análisis clúster.

CAPÍTULO 3. Análisis y discusión de la aplicación de la técnica estadística

3.1 Introducción

Con el propósito de identificar patrones de comportamiento similares en circuitos de distribución se tomaron diferentes medidas de distorsión armónica total (THD, por sus siglas en inglés) de 17 circuitos de Santa Clara y algunos municipios dadas por los medidores inteligentes tipo ION.

El capítulo muestra en primer lugar, como se llevó a cabo la selección de los datos de THD para la implementación del método estadístico; posteriormente se pasa a implementar el mismo utilizando MATLAB y finalmente se muestran los resultados del mismo.

3.2 Recopilación de datos

Para la implementación del método se tomaron en cuenta diecisiete circuitos de Santa Clara y municipios, se utilizaron los datos de THD obtenidos por medidores inteligentes tipo ION del tipo 7350, 7330, 7650 en el período entre el 2016 y 2017 con el objetivo de descubrir patrones característicos y de comportamiento similar.

El período de medición se estableció cada una hora, puesto que en la provincia los instrumentos tienen una errónea configuración en cuanto a la medición de THD, ya que algunos tienen diferente intervalo de medición.

No se tomaron en cuenta los fines de semana o los días feriados porque la carga tiende a comportarse muy diferente en comparación a los días de trabajo. O sea, solo interesaron las mediciones durante los días laborables.

Para la implementación del método estadístico se tomaron los datos de formato Excel de las tablas 1 y 2 de los anexos y se transformaron en información útil haciendo uso de algoritmos desarrollados en MATLAB.

3.3 Implementación del método utilizando medida de similitud de distancia euclídea

Para la implementación se utilizaron los datos de las tablas 1 y 2 de los anexos, que muestra las mediciones de un día promedio cada una hora.

Distancia euclidiana por cada circuito:

Tabla 3.1. Distancia euclidiana entre los diferentes circuitos.

Columns 1 through 6

0	0.8189	0.8615	2.7107	1.4950	1.1439
0.8189	0	0.4356	2.6803	1.3846	0.4616
0.8615	0.4356	0	2.3819	0.9541	0.8252
2.7107	2.6803	2.3819	0	1.8494	2.8392
1.4950	1.3846	0.9541	1.8494	0	1.7309
1.1439	0.4616	0.8252	2.8392	1.7309	0
1.0146	0.4849	0.9197	3.0457	1.8675	0.3674
0.8128	0.0551	0.3808	2.6404	1.3305	0.4994
0.8879	0.4890	0.1081	2.2837	0.9086	0.8535
2.1585	2.0326	1.8836	1.1853	1.8262	2.0549
2.3873	2.3442	2.1720	1.0699	2.0129	2.3888
2.4787	2.4245	2.2177	0.9350	1.9657	2.4875
2.4225	2.3013	2.1658	1.3132	2.0734	2.3643
2.6447	2.6571	2.3661	0.4952	1.8564	2.8298
2.2619	2.2413	2.0074	0.7526	1.7035	2.3762
2.5856	2.5258	2.3500	1.0322	2.1255	2.6116
2.4246	2.3981	2.1634	0.6225	1.8317	2.5118

Columns 7 through 12

1.0146	0.8128	0.8879	2.1585	2.3873	2.4787
0.4849	0.0551	0.4890	2.0326	2.3442	2.4245
0.9197	0.3808	0.1081	1.8836	2.1720	2.2177
3.0457	2.6404	2.2837	1.1853	1.0699	0.9350
1.8675	1.3305	0.9086	1.8262	2.0129	1.9657
0.3674	0.4994	0.8535	2.0549	2.3888	2.4875
0	0.5396	0.9668	2.2780	2.6010	2.7118
0.5396	0	0.4354	2.0085	2.3181	2.3944
0.9668	0.4354	0	1.7893	2.0774	2.1227
2.2780	2.0085	1.7893	0	0.3888	0.5238
2.6010	2.3181	2.0774	0.3888	0	0.2424
2.7118	2.3944	2.1227	0.5238	0.2424	0
2.5291	2.2803	2.0677	1.0709	1.1483	1.2162
3.0171	2.6180	2.2700	1.1813	1.0396	0.9061
2.5585	2.2082	1.9086	0.7556	0.7298	0.7048
2.7860	2.5005	2.2477	1.0084	0.9645	1.0010
2.7127	2.3651	2.0632	0.6837	0.5468	0.4803

Columns 13 through 17

2.4225	2.6447	2.2619	2.5856	2.4246
2.3013	2.6571	2.2413	2.5258	2.3981
2.1658	2.3661	2.0074	2.3500	2.1634
1.3132	0.4952	0.7526	1.0322	0.6225
2.0734	1.8564	1.7035	2.1255	1.8317
2.3643	2.8298	2.3762	2.6116	2.5118
2.5291	3.0171	2.5585	2.7860	2.7127
2.2803	2.6180	2.2082	2.5005	2.3651
2.0677	2.2700	1.9086	2.2477	2.0632
1.0709	1.1813	0.7556	1.0084	0.6837
1.1483	1.0396	0.7298	0.9645	0.5468
1.2162	0.9061	0.7048	1.0010	0.4803
0	1.1828	0.8086	0.6014	0.9548
1.1828	0	0.5450	0.9832	0.5695
0.8086	0.5450	0	0.7316	0.3603
0.6014	0.9832	0.7316	0	0.6921
0.9548	0.5695	0.3603	0.6921	0

Para formar los clústeres utilizamos el mecanismo de obtención de conglomerados de combinación el cual usa un método jerárquico (Método de Ward) y un método no jerárquico (K-Medias). Con el método jerárquico se obtiene el número de clúster mientras que el método no jerárquico optimiza los datos dentro de los clústeres.

3.3.1 Implementación del método de Ward

Se escoge el método para minimizar las diferencias dentro de los conglomerados y evitar problemas con el encadenamiento de los datos como se muestra en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Método jerárquico de Ward.

2.0000	8.0000	0.0551
3.0000	9.0000	0.1081
11.0000	12.0000	0.2424
15.0000	17.0000	0.3603
6.0000	7.0000	0.3674
4.0000	14.0000	0.4952
10.0000	20.0000	0.5139
13.0000	16.0000	0.6014
18.0000	19.0000	0.6119
21.0000	23.0000	0.7747
1.0000	26.0000	1.0329
22.0000	28.0000	1.1617
25.0000	27.0000	1.4185
24.0000	30.0000	1.5070
5.0000	29.0000	1.7799
31.0000	32.0000	6.3682

En la tabla 3.2 se muestra como se lleva a cabo la formación de los clústeres por un método aglomerativo, las dos primeras columnas son los conglomerados que se unen y la tercera es a la distancia (altura) a la que se unen, muéstrase a continuación en la figura 3.1.

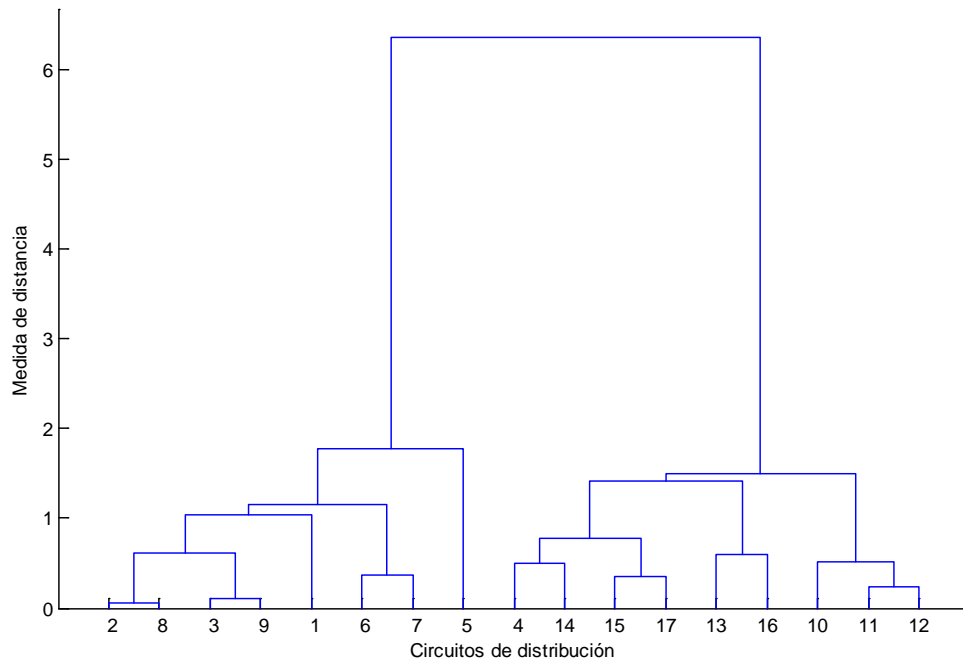


Figura 3.1. Dendrograma que muestra la obtención de conglomerados para la formación de los clústeres.

3.3.2 Índice de consistencia

Luego de obtener la figura 3.1 se calcula el índice de inconsistencia el cual depende de la altura a la que se forman los cluster. O sea, a mayor altura menos consistencia.

Por esta razón se realiza un corte en $I = 2$ para eliminar la última aglomeración y dejar dos cluster principales ya que esta es demasiado inconsistente debido a que tiene 16 enlaces por debajo de ella, una desviación estándar de 1.4986 y un índice de consistencia de 3.5239 una como se muestra en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Índice de inconsistencia

0.0551	0	1.0000	0
0.1081	0	1.0000	0
0.2424	0	1.0000	0
0.3603	0	1.0000	0
0.3674	0	1.0000	0
0.4952	0	1.0000	0
0.3782	0.1920	2.0000	0.7071
0.6014	0	1.0000	0
0.2584	0.3073	3.0000	1.1504
0.5434	0.2114	3.0000	1.0944
0.4520	0.4614	4.0000	1.2589
0.5562	0.4657	6.0000	1.3002
0.7300	0.4137	5.0000	1.6645
0.7392	0.4739	8.0000	1.6203
0.7310	0.6282	7.0000	1.6696
1.0874	1.4986	16.0000	3.5239

La columna uno de la tabla muestra la media de las alturas de los enlaces que se encuentran por debajo del enlace, la columna dos muestra la desviación estándar de las alturas de los enlaces que se encuentran por debajo del enlace, la columna tres muestra la cantidad de enlaces que se encuentran por debajo del enlace y la columna cuatro muestra el coeficiente de consistencia.

Clústeres principales después de realizar un corte en $l=2$:

```
cluster1 =
  4
 10
 11
 12
 13
 14
 15
 16
 17
```

```
cluster2 =  
  
1  
2  
3  
5  
6  
7  
8  
9
```

3.3.3 Implementación del método de las K-Medias

Para implementar este método no jerárquico es necesario haber definido con anterioridad el número de clústeres a formar, ya que se desean solo dos cluster este método forma particiones directamente, los clústeres formados son los siguientes:

```
cluster1 =  
  
4  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
  
cluster2 =  
  
1  
2  
3  
5  
6  
7  
8  
9
```

Como se muestra, los clústeres formados son iguales a los cluster obtenidos con anterioridad por el método de distancia euclidiana, lo que corrobora la similitud entre ambos métodos (jerárquico y no jerárquico) en la figura 3.2 se muestra el comportamiento de ambos clústeres en un día promedio.

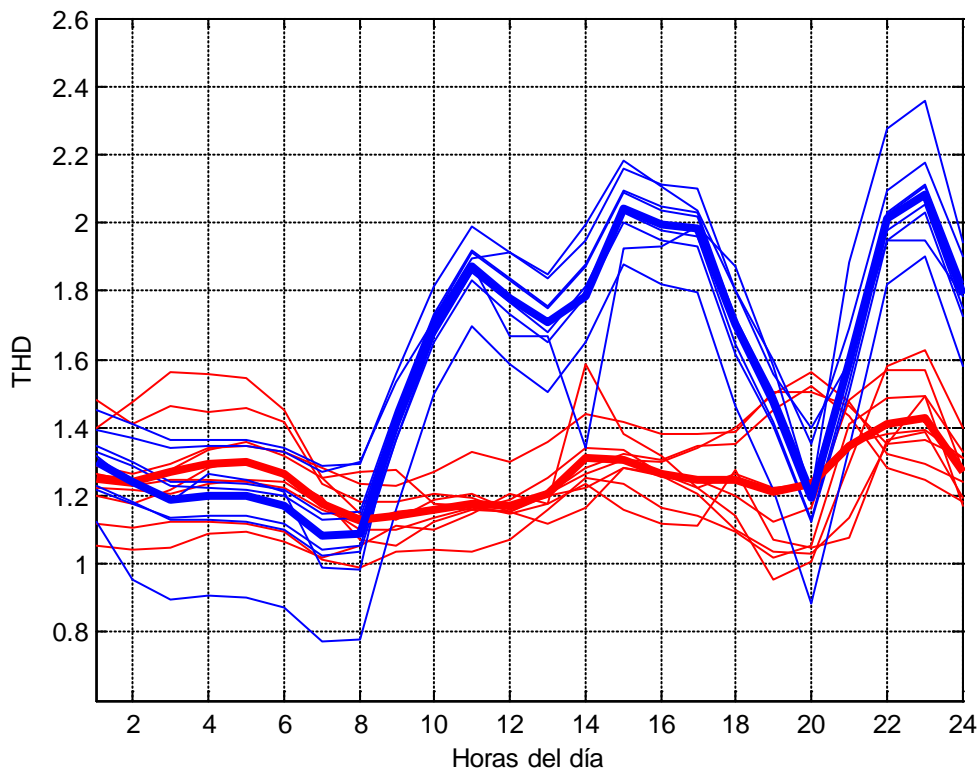


Figura 3.2. Comportamiento de los clústeres en un día promedio.

Como se aprecia en la figura anterior el clúster 1 (rojo) se mantiene prácticamente constante durante el desarrollo del día ya que este no presenta gran incidencia de los armónicos solo se ve un leve aumento a partir del horario de las 20:00 horas debido a la incidencia del alumbrado público y de las viviendas que genera gran cantidad de armónicos en el sistema.

En el clúster 2 (azul) se presentan grandes picos a partir de las 8:00 horas aproximadamente lo que se debe en gran medida a la utilización de equipos generadores de armónicos como transformadores, motores, equipos electrodomésticos y de oficinas entre otros, en el horario de las 20:00 horas ocurre un descenso en los armónicos debido a que en este horario es donde se realizan los alimentos en la mayoría de los hogares y se utilizan mayormente equipos resistivo puro como hornillas y ollas lo que limita la generación de armónicos en este periodo de tiempo. Luego se obtiene otro pico dado mayormente por la incidencia de las luminarias luego en el horario de la madrugada vuelve a caer porque solo permanece generando armónicos el alumbrado y otros equipos que trabajan de forma ininterrumpida.

3.3.4 Formación de centroides

Este método consiste en que la distancia entre dos conglomerados es la distancia entre sus centroides. En este método, cada vez que se agrupan los datos se calcula un nuevo centroide o sea que los centroides de los grupos cambian a partir que se fusionan nuevos conglomerados en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Formación de centroides.

Columns 1 through 6					
1.2511	1.2388	1.2701	1.2943	1.3007	1.2644
1.3000	1.2394	1.1893	1.2021	1.1965	1.1728
Columns 7 through 12					
1.1750	1.1288	1.1400	1.1563	1.1737	1.1696
1.0818	1.0910	1.4118	1.6903	1.8724	1.7798
Columns 13 through 18					
1.2049	1.3097	1.3018	1.2632	1.2463	1.2458
1.7110	1.7845	2.0442	1.9972	1.9821	1.7021
Columns 19 through 24					
1.2088	1.2360	1.3465	1.4097	1.4284	1.2681
1.4714	1.1919	1.5931	2.0140	2.0852	1.7895

3.4 Método de coeficiente de correlación

Las medidas de correlación se basan en el análisis de los patrones de los valores o sea elevadas correlaciones indica mayor nivel de similitud y bajas correlaciones indican falta de ellas para analizar estos patrones se forma la matriz de correlación como se muestra en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Matriz de correlación.

Columns 1 through 6

0	0	0	0	0	0
0.9027	0	0	0	0	0
0.9048	0.9998	0	0	0	0
0.7504	0.7330	0.7347	0	0	0
0.9055	0.9981	0.9980	0.7323	0	0
0.8212	0.9798	0.9792	0.6769	0.9745	0
0.9010	0.9998	0.9995	0.7330	0.9974	0.9801
0.9027	1.0000	0.9998	0.7331	0.9980	0.9801
0.9046	0.9997	0.9998	0.7373	0.9974	0.9786
0.2814	0.2730	0.2803	0.1453	0.2707	0.3141
0.0877	-0.0914	-0.0850	-0.0746	-0.0904	-0.0918
0.1752	0.0774	0.0826	-0.0002	0.0750	0.1065
0.0225	0.0267	0.0189	0.2918	0.0283	-0.0304
0.6555	0.5496	0.5505	0.6752	0.5523	0.4593
0.6254	0.5127	0.5129	0.6578	0.5154	0.4173
-0.0531	-0.1455	-0.1570	0.0548	-0.1343	-0.2319
0.6183	0.4293	0.4284	0.5539	0.4311	0.3422

Columns 7 through 12

0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0.9998	0	0	0	0	0
0.9997	0.9997	0	0	0	0
0.2675	0.2752	0.2719	0	0	0
-0.0964	-0.0898	-0.0918	0.8466	0	0
0.0730	0.0792	0.0755	0.9289	0.9666	0
0.0311	0.0250	0.0303	-0.2662	-0.2018	-0.2065
0.5481	0.5498	0.5515	0.3129	0.2209	0.2759
0.5118	0.5128	0.5149	0.2674	0.2003	0.2455
-0.1403	-0.1483	-0.1454	-0.4433	-0.2158	-0.2794
0.4273	0.4293	0.4287	0.4996	0.5338	0.5493

Columns 13 through 17

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0.5627	0	0	0	0
0.6078	0.9970	0	0	0
0.8377	0.3026	0.3631	0	0
0.4360	0.8604	0.8588	0.3177	0

Para formar los grupos de correlación se definió que los grupos tuvieran al menos un 90% de correlación, los circuitos que no se tomaron en cuenta no poseían un nivel significativo de correlación, como se muestra en la tabla 3.6.

Tabla 3.6. Formación de grupos de correlación.

2	1
3	1
5	1
7	1
8	1
9	1
3	2
5	2
6	2
7	2
8	2
9	2
5	3
6	3
7	3
8	3
9	3
6	5
7	5
8	5
9	5
7	6
8	6
9	6
8	7
9	7
9	8
12	10
12	11
15	14

En la columna 1 y 2 de la tabla 3.7 se representan los circuitos que poseen más del 90% de correlación entre ellos, dando formación a tres grupos principales:

Grupo 1: (1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9)

Grupo 2: (10, 11, 12)

Grupo 3: (14,15)

Seguidamente se muestran gráficos de comportamiento para cada uno de los grupos:

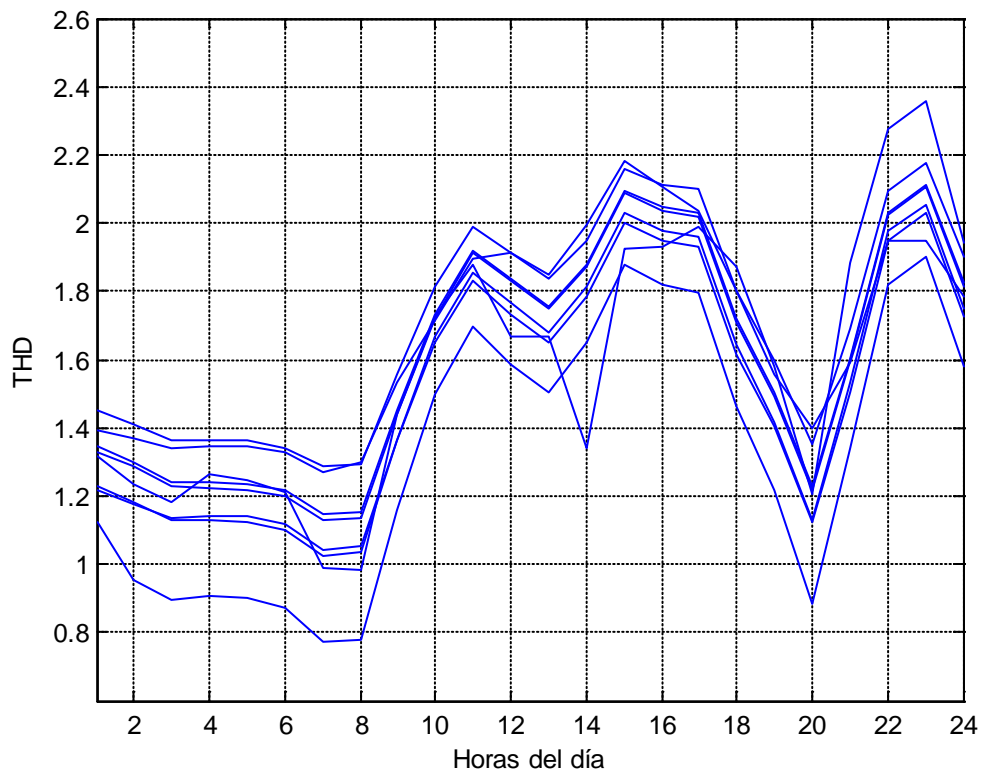


Figura 3.3. Comportamiento del grupo 1 de correlación.

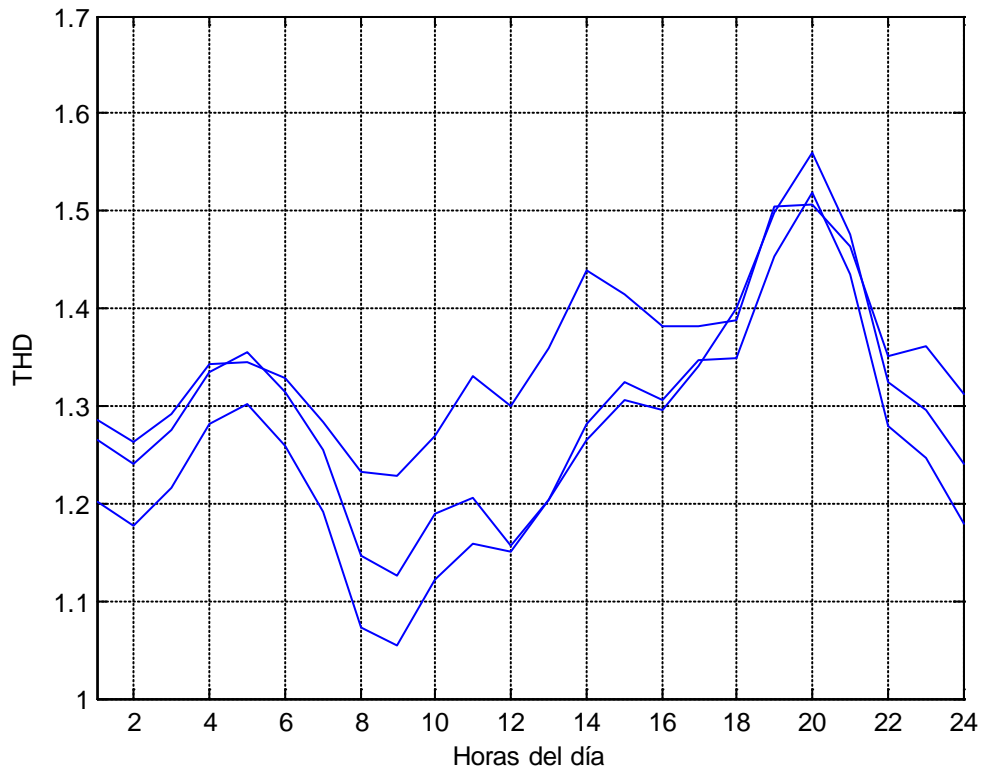


Figura 3.4. Comportamiento del grupo 2 de correlación.

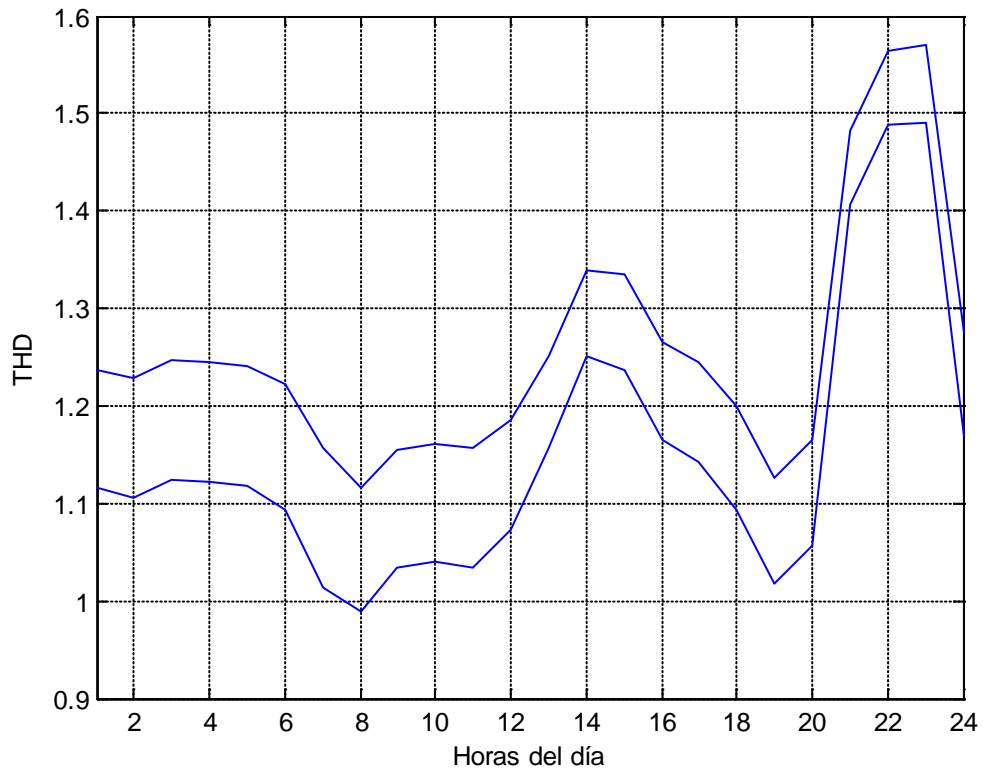


Figura 3.5. Comportamiento del grupo 3 de correlación.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- 1 Los armónicos son componentes de frecuencia múltiplos enteros de la fundamental, los que pueden ser evaluados a través de la THD.
- 2 La metodología del análisis clúster demostró ser muy útil como técnica de reducción de datos, demostrando ser un método objetivo y empírico para desarrollar una tarea ineherentemente humana como es la clasificación.
- 3 Hoy en día se tienen en los circuitos de distribución de 34.5 kV de Santa Clara dos marcados grupos en lo que respecta a patrones de comportamiento de armónicos empleando como medida de similitud la distancia; mientras que existen tres grupos de estos circuitos con más de 90% de correlación entre ellos tomando como medida de similitud precisamente este parámetro.

Recomendaciones

- 1 Efectuar en los dispositivos de medición del tipo ION la correcta configuración según lo establecido por las normas IEC, de manera tal que sea posible aprovechar al máximo todas las potencialidades de estos en la medición de THD, y por tanto las mediciones para la aplicación del análisis clúster sean recopiladas con las mismas particularidades.

- 2 Aplicar la metodología del análisis clúster en otros procesos donde se desee encontrar homogeneidad entre los datos analizados.

ANEXOS

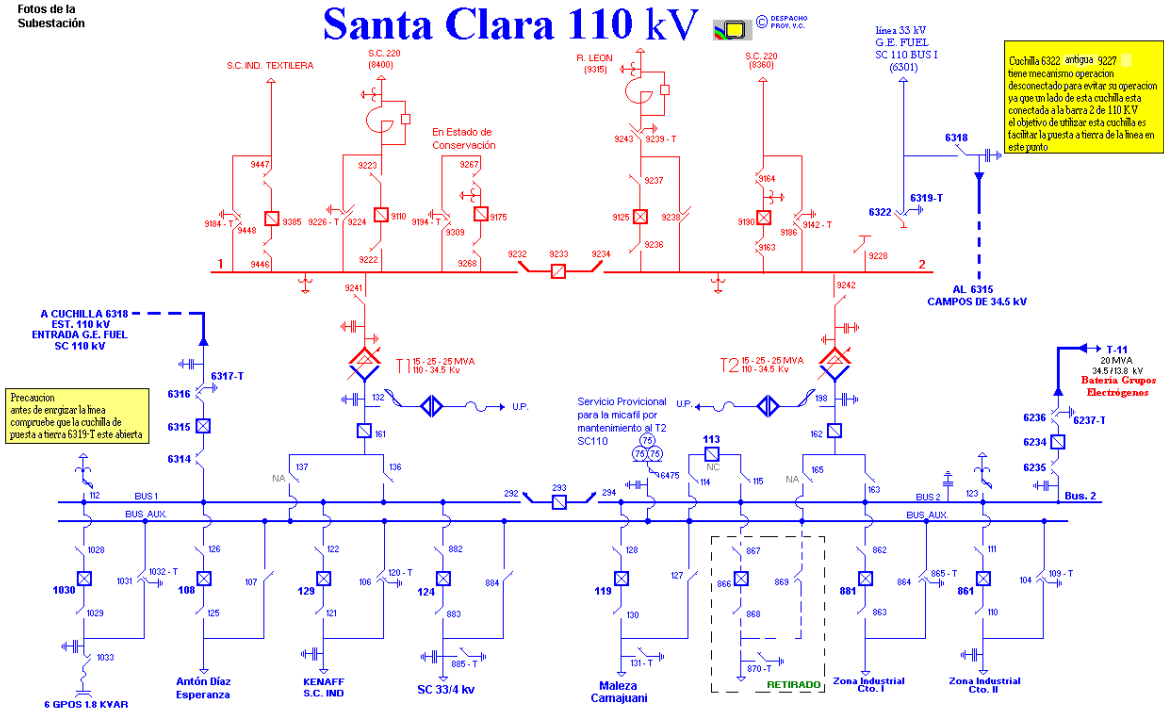
Anexo I Mediciones de THD por hora para los ION en Villa Clara.

ion113	ion119	ion124	ion129	ion161	ion162	ion861	ion6234	ion6315
1,317	1,343	1,228	1,053	1,121	1,395	1,452	1,326	1,218
1,235	1,300	1,182	1,040	0,955	1,372	1,411	1,284	1,177
1,180	1,241	1,128	1,049	0,898	1,342	1,365	1,227	1,135
1,266	1,239	1,129	1,091	0,906	1,343	1,366	1,225	1,142
1,244	1,233	1,125	1,096	0,902	1,347	1,361	1,219	1,141
1,210	1,214	1,100	1,063	0,870	1,330	1,343	1,201	1,115
0,988	1,145	1,025	1,017	0,770	1,271	1,285	1,132	1,040
0,986	1,152	1,034	1,053	0,776	1,302	1,292	1,137	1,050
1,442	1,449	1,361	1,110	1,158	1,530	1,558	1,436	1,360
1,728	1,731	1,669	1,102	1,496	1,714	1,815	1,722	1,648
1,879	1,920	1,856	1,147	1,695	1,898	1,991	1,912	1,828
1,666	1,838	1,764	1,208	1,585	1,910	1,914	1,829	1,732
1,670	1,756	1,680	1,175	1,502	1,847	1,835	1,748	1,650
1,341	1,879	1,812	1,234	1,648	1,992	1,950	1,871	1,783
1,927	2,093	2,032	1,158	1,875	2,180	2,158	2,086	2,002
1,930	2,045	1,978	1,116	1,818	2,108	2,114	2,037	1,948
1,986	2,028	1,959	1,111	1,797	2,038	2,098	2,020	1,930
1,874	1,717	1,641	1,275	1,461	1,800	1,799	1,708	1,617
1,581	1,503	1,417	1,071	1,219	1,557	1,599	1,491	1,403
1,205	1,229	1,131	1,050	0,882	1,397	1,352	1,218	1,122
1,881	1,606	1,533	1,075	1,340	1,592	1,690	1,598	1,506
2,273	2,030	1,977	1,361	1,821	1,948	2,094	2,023	1,946
2,356	2,112	2,054	1,385	1,904	1,947	2,177	2,104	2,028
1,940	1,825	1,747	1,196	1,581	1,781	1,903	1,814	1,724
ion9125	ion9190	ion9385	calabazar	placetas	remedios	sagua	sto dgo	
1,285	1,266	1,202	1,398	1,116	1,238	1,483	1,220	
1,264	1,241	1,177	1,472	1,105	1,228	1,407	1,215	
1,292	1,275	1,216	1,561	1,123	1,247	1,460	1,208	

1,342	1,335	1,281	1,554	1,121	1,245	1,445	1,235
1,346	1,355	1,303	1,545	1,119	1,242	1,454	1,249
1,328	1,313	1,258	1,449	1,093	1,222	1,413	1,239
1,284	1,254	1,191	1,250	1,014	1,157	1,234	1,173
1,233	1,146	1,073	1,267	0,990	1,116	1,182	1,099
1,228	1,126	1,054	1,276	1,033	1,155	1,180	1,099
1,270	1,190	1,121	1,179	1,041	1,162	1,205	1,136
1,331	1,205	1,158	1,171	1,033	1,157	1,195	1,166
1,301	1,157	1,151	1,145	1,073	1,186	1,155	1,151
1,359	1,204	1,204	1,175	1,157	1,251	1,120	1,199
1,439	1,266	1,281	1,585	1,251	1,340	1,167	1,223
1,414	1,306	1,324	1,382	1,236	1,335	1,279	1,283
1,381	1,296	1,307	1,318	1,165	1,265	1,259	1,262
1,381	1,341	1,346	1,222	1,142	1,244	1,205	1,225
1,387	1,400	1,350	1,144	1,093	1,200	1,100	1,264
1,504	1,498	1,453	0,953	1,018	1,126	1,036	1,221
1,506	1,559	1,520	1,004	1,056	1,166	1,028	1,236
1,463	1,475	1,435	1,295	1,408	1,482	1,137	1,349
1,352	1,325	1,279	1,581	1,489	1,565	1,354	1,382
1,361	1,296	1,247	1,625	1,490	1,569	1,491	1,391
1,312	1,241	1,179	1,397	1,170	1,275	1,329	1,313

Anexo II Localización de los ION en el monolineal de Santa Clara 110 – 34.5 kV

Fotos de la Subestación



ION7350_Int1700StoDgo

ION7350_Int1905Placetas

ION7350_Int1950Calabazar

ION7650_Int1200_Sagua110kV

ION7350_Int1380_Remedios

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] O. Gutiérrez (2013, 04/02/2016). ISAGEN y la importancia de la energía eléctrica [online]. Available:

http://www.moir.org.co/IMG/pdf/Importancia_de_la_energia_electrica_revisado.pdf

[2] J. Arrillaga and N. R. Watson, *Power System Harmonics*, 2d ed. Christchurch: John Wiley & Sons, 2003.

[3] 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.

[4] Schneider Electric. *Guía de diseño de instalaciones eléctricas. Detección y filtrado de armónicos*. 2008.

[5] S. Lee, J. W. Park, and G. K. Venayagamoorthy, "New Power Quality Index in a Distribution Power System by Using RMP Model", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 46, no. 3, pp. 1204-1211, May./Jun. 2010.

[6] Boix Aragonés, Oriol. (1996). *Estudio y modelización en régimen permanente de cargas no lineales para el análisis armónico de redes eléctricas*. Tesis Doctoral,

Universidad Politécnica de Cataluña, España, disponible en

<http://www.tdx.cesca.es/TDX-0803104-105619>

[6] Schneider Group Electric.anónimo. (1998), Información Técnica, Generalidades sobre

Armónicos

- [7] Schneider Group .Cahiers techniques, n0152, harmonic in industrial networks
- [8] González Quintero, José Ángel Compensación de potencia Reactiva en Sistemas Contaminados con Armónicos, Tesis en opción al título de Master en Ingeniería Eléctrica. Universidad Central de las Villas. Santa Clara. 1998.
- [9] Hair, J.F.; Anderson, R.E.; Tatham, R.L. y Black, W. (2010). *Multivariate Data Analysis* (7º ed.). Prentice Hall.
- [10] Hair, J. F.; Anderson, R.E.; Tatham, R.L. y Black, W. (1999). *Análisis Multivariante* (5º ed.). Madrid: Prentice Hall.
- [11] Schneider Electric. (2008). Guía de diseño de instalaciones eléctricas. Detección y filtrado de armónicos.
- [12] Métodos de análisis cluster. (n.d.). . Retrieved from <https://www.uv.es>.
- [13] Montanero Fernández, Jesús. (2008). *Análisis Multivariante*. España: Universidad de Extremadura. Retrieved from <https://www.unex.es>
- [14] Introducción al análisis cluster. (n.d.). . Retrieved from <https://www.uam.es>.
- [15] Terrádez Gurrea, M. (n.d.). Análisis de conglomerados. Retrieved from <http://www.uoc.edu>
- [16] Universidad de Granada. (2017). Métodos de análisis multivariante: análisis clúster. Retrieved from <http://www.ugr.es>