

INGENIERIA

ELECTROMECAÁNICA



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

FACULTAD DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS
RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES

“IMPACTO DE LOS ARMÓNICOS DE CORRIENTE EN LOS
TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN
MONOFÁSICOS”

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE MÁSTER EN
ELECTROMECAÁNICA

AUTORA:

ING. JULIA PATRICIA AGUILAR BETANCOURT

DIRECTOR:

ING. JORGE ENRIQUE CARRIÓN GONZÁLEZ, Mg. Sc.

Loja- Ecuador

CERTIFICACIÓN

**Ing. Jorge Enrique Carrión González, Msc.
DIRECTOR DE TESIS**

CERTIFICO:

Haber dirigido, asesorado, revisado y corregido el presente trabajo de tesis de maestría, en su proceso de investigación cuyo tema versa: **“IMPACTO DE LOS ARMÓNICOS DE CORRIENTE EN LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN MONOFÁSICOS”**, previa la obtención del título de Magister en Electromecánica, realizado por la señora ingeniera Julia Patricia Aguilar Betancourt, la misma que cumple con la reglamentación y políticas de investigación, por lo que autorizo su presentación y posterior sustentación y defensa.

Loja, abril del 2017.

Lo certifico,


**Ing. Jorge Enrique Carrión González, Msc.
DIRECTOR DE TESIS.**

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, (**JULIA PATRICIA AGUILAR BETANCOURT**) declaro ser la autora del presente trabajo de tesis y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos o acciones legales por el contenido de la misma.

Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi tesis en el Repositorio Institucional – Biblioteca Virtual.

Firma:



Cédula: 1103254650

Fecha: 10 de abril de 2017

CARTA DE AUTORIZACIÓN

Yo, (**JULIA PATRICIA AGUILAR BETANCOURT**), declaro ser autora de la tesis titulada **“IMPACTO DE LOS ARMÓNICOS DE CORRIENTE EN LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN MONOFÁSICOS”**, como requisito para optar al grado de (**MÁSTER EN ELECTROMECAÁNICA**), autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que con fines académicos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Digital Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el RDI, en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia de la tesis que realice un tercero.

Por constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los diez días del mes de abril de dos mil diecisiete:

Firma:



Autora:

Julia Patricia Aguilar Betancourt

Cédula:

1103254650

Dirección:

Loja, La Banda José Ruiz entre Vilcabamba y Yangana

Correo electrónico: julita162002@yahoo.es

Teléfono:

072541141

Celular: 0984765776

DATOS COMPLEMENTARIOS

Director de Tesis: Ing. Jorge Enrique Carrión González. Mg. Sc.

Tribunal de grado: Ing. Jorge Patricio Muñoz Vizñay. Mg. Sc.

Ing. Carlos Raúl Barreto Calle. Mg. Sc.

Ing. José Fabricio Cuenca Granda. Mg. Sc.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresarle mi agradecimiento al Director de Tesis, Ing. Jorge Enrique Carrión González por su generosidad al brindarme la oportunidad de recurrir a su capacidad y experiencia científica en un marco de confianza, afecto y amistad, fundamentales para la culminación de este trabajo.

A mi esposo, padres, suegros y hermanos por ser verdaderos ejemplos de unión, responsabilidad, sacrificio y apoyo a la culminación de este proyecto.

De igual forma mi agradecimiento y gratitud para los profesionales que supieron ayudarme de una manera incondicional con sus conocimientos científicos e intelectuales durante mi formación académica.

La autora.

DEDICATORIA

A mis padres por ser mis pilares y ejemplos a seguir, por haberme dado fuerzas y aliento en este trayecto de mi vida.

A mi hermano y hermanas porque sin su ayuda no hubiese podido culminar esta etapa.

A mi querido esposo Ricky por ser la persona leal y estar en cada momento crucial de mi vida.

A mis hijos, por ser las personitas fundamentales en mi vida, por enseñarme el verdadero amor y valor de las cosas y hacerme la mujer más feliz.

Julia Patricia

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|-------------------------------|
| CERTIFICACIÓN | ¡Error! Marcador no definido. |
| DECLARATORIA DE AUTORÍA | II |
| CARTA DE AUTORIZACIÓN | ¡Error! Marcador no definido. |
| AGRADECIMIENTO | IV |
| DEDICATORIA | V |
| ÍNDICE GENERAL | VI |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | IX |
| ÍNDICE DE TABLAS | IX |
| ABREVIATURAS..... | XI |
| TEMA | - 1 - |
| RESUMEN..... | ¡Error! Marcador no definido. |
| SUMMARY | ¡Error! Marcador no definido. |
| INTRODUCCIÓN..... | - 4 - |
| OBJETIVOS..... | - 6 - |
| CAPÍTULO I..... | - 7 - |
| REVISIÓN DE LITERATURA | - 7 - |
| 1. IMPACTO DE LOS ARMÓNICOS DE CORRIENTE EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN..... | - 7 - |
| 1.2.1 TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN | - 7 - |
| 1.3 ARMÓNICOS | - 8 - |
| 1.3.1 Trayectoria De Los Armónicos..... | - 9 - |
| 1.3.2 Análisis de FOURIER..... | - 10 - |
| 1.3.3 Transformada de FOURIER..... | - 10 - |
| 1.3.4 Distorsión Armónica Total (THD)..... | - 11 - |
| 1.3.4.1 Distorsión Armónica Total de la Corriente THD(I)..... | - 11 - |
| 1.3.5 Efecto de los Armónicos en los Transformadores..... | - 12 - |
| 1.4 ANÁLISIS DE TÉCNICAS ESTADÍSTICAS PARA CLASIFICAR LOS ARMÓNICOS DE CORRIENTE. | - 18 - |
| 1.4.1 ANÁLISIS MULTIVARIANTE..... | - 18 - |
| 1.4.2 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (PCA) | - 19 - |

| | | |
|---------------------------|--|--------|
| 1.4.3 | COORDENADAS PRINCIPALES Y DISTANCIAS..... | - 20 - |
| 1.4.4 | ANÁLISIS DE CORRESPONDENCIAS..... | - 23 - |
| 1.4.5 | ANÁLISIS DE CLUSTERING..... | - 25 - |
| 1.4.5.1 | Método de partición: Algoritmo FUZZY C-MEANS (FCM)..... | - 26 - |
| 1.4.5.2 | Método de partición: Algoritmo K-MEANS | - 27 - |
| 1.4.5.3 | Método jerárquico: El Dendograma..... | - 28 - |
| 1.5 | ANÁLISIS Y AGRUPACIÓN DE LA BASE DE DATOS..... | - 29 - |
| 1.5.1 | ANÁLISIS SEMANAL | - 29 - |
| 1.5.2 | ANÁLISIS DIARIO..... | - 30 - |
| 1.5.3 | ANÁLISIS MENSUAL | - 32 - |
| 1.6 | CONCLUSIÓN DEL CAPÍTULO | - 32 - |
| CAPÍTULO II..... | | - 34 - |
| MATERIALES Y MÉTODOS..... | | - 34 - |
| 2. | MÉTODOS DE CÁLCULO..... | - 34 - |
| 2.1 | CLÚSTER EN MATLAB | - 34 - |
| 2.1.1 | TÉCNICA ESTADÍSTICAS..... | - 34 - |
| 2.1.1.1 | KMEANS | - 34 - |
| 2.1.1.2 | DENDOGRAMA..... | - 36 - |
| 2.1.1.3 | MÉTODO DE WARD..... | - 37 - |
| 2.1.2 | TÉCNICA DIFUSAS..... | - 37 - |
| 2.1.2.1 | FUZZY C-MEANS..... | - 38 - |
| 2.1.3 | ÍNDICES DE VALIDEZ | - 40 - |
| 2.2 | EVALUACIÓN ANALÍTICA DEL TRANSFORMADOR APLICANDO LA NORMA ANSI IEEE C57.110..... | - 41 - |
| 2.2.1 | Introducción | - 41 - |
| 2.2.2 | Métodos para calcular los efectos del transformador ante corrientes no sinusoidales. - | 41 - |
| 2.2.3 | Pérdidas del Transformador | - 42 - |
| 2.2.4 | Efectos de los armónicos en pérdidas con carga | - 43 - |
| 2.2.4.1 | Efectos de los armónicos en las pérdidas I ² R..... | - 43 - |
| 2.2.4.2 | Efectos de los armónicos en las pérdidas por corrientes de Eddy..... | - 43 - |
| 2.2.4.3 | Efectos de los armónicos en otras pérdidas parásitas..... | - 44 - |
| 2.2.4.4 | Factor de armónico para las pérdidas por corrientes de Eddy..... | - 44 - |
| 2.2.4.5 | Factor de armónico para otras pérdidas parásitas. | - 44 - |
| 2.2.4.6 | Evaluación de pérdidas y capacidad de transformadores bajo cargas armónicas.... | - 45 - |
| 2.2.5 | Procedimiento recomendado por la norma IEEE std C57.110 para evaluar la capacidad de carga de un transformador existente. | - 45 - |
| 2.3 | CONCLUSIÓN DEL CAPÍTULO | - 48 - |
| CAPÍTULO III | | - 50 - |

| | |
|---|--------|
| RESULTADOS | - 50 - |
| 3.1 MÉTODO ANALÍTICO PARA EL ANÁLISIS CLÚSTER DE LOS THDI PRESENTES EN LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN MONOFÁSICOS | - 50 - |
| 3.1.1 ANÁLISIS CLÚSTER..... | - 51 - |
| 3.1.2 CONFORMACIÓN DE CLÚSTER USANDO MATLAB | - 54 - |
| 3.1.2.1 EVALUACIÓN POR LA TÉCNICA DEL DENDOGRAMA..... | - 54 - |
| 3.1.2.2 EVALUACIÓN POR LA TÉCNICA KMEANS | - 57 - |
| 3.1.2.3 EVALUACIÓN POR LA TÉCNICA FUZZY C-MEANS | - 62 - |
| 3.2 EVALUACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES APLICANDO LA NORMA ANSI IEEE C57.110..... | - 67 - |
| DISCUSIÓN..... | - 84 - |
| CONCLUSIONES | - 85 - |
| RECOMENDACIONES | - 87 - |
| REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA..... | - 88 - |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|--------|
| <i>Figura 1.</i> Muestra una onda senoidal de 60 Hz y 2ª, 3ª, 4ª y 5ª armónicas | - 9 - |
| <i>Figura 2.</i> Trayectoria de las armónicas en un sistema inductivo | - 9 - |
| <i>Figura 3.</i> Efecto de los capacitores en las trayectorias de las armónicas | - 10 - |
| <i>Figura 4.</i> Metodología caracterización semanal | - 29 - |
| <i>Figura 5.</i> Metodología caracterización diaria | - 31 - |
| <i>Figura 6.</i> Metodología caracterización mensual | - 32 - |
| <i>Figura 7.</i> Representación gráfica Dendograma (junio 2014/10kVA/H1) | - 54 - |
| <i>Figura 8.</i> Curva promedio (K-MEANS). (junio 2014/10kVA/H1) | - 61 - |
| <i>Figura 9.</i> Curvas promedio de los clústeres (FUZZY C-MEANS). (junio 2014/10kVA/H1) | - 66 - |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|--------|
| Tabla 1 Transformadores con factor K disponibles comercialmente | - 17 - |
| Tabla 2 Resumen de fortalezas y debilidades de cada técnica de agrupamiento | - 39 - |
| Tabla 3 Parámetros Reportados en el certificado de Pruebas | - 46 - |
| Tabla 4 Espectro armónico para transformadores sumergidos en aceite | - 47 - |
| Tabla 5 Cálculo de pérdidas para transformadores sumergidos en aceite | - 47 - |
| Tabla 6 Cantidad de datos procesados en los años 2013-2014-2015 | - 51 - |
| Tabla 7 Procesamiento de datos THDI mensual medidos en Amperios..... | - 52 - |
| Tabla 8 Valores base THDI mensual medidos en Amperios | - 53 - |
| Tabla 9 Valores por unidad THDI mensual | - 53 - |
| Tabla 10 Distancia entre centros (SQUAREFORM), (Junio 2014/10kVA/H1) | - 55 - |
| Tabla 11 Enlace entre valores del Dendograma (LINKAGE) y evaluación del clúster por el método de WARD. (Junio 2014/10kVA/H1) | - 55 - |
| Tabla 12 Calidad del clúster (COPHENET). (Junio 2014/10kVA/H1) | - 55 - |
| Tabla 13 Inconsistencia en el dendograma. (Junio 2014/10kVA/H1)..... | - 56 - |
| Tabla 14 Agrupación de Clúster (DENDOGRAMA). (Junio 2014/10kVA/H1)..... | - 56 - |
| Tabla 15 Conformación de clúster (DENDOGRAMA). (Junio 2014/10kVA/H1).... | - 57 - |
| Tabla 16 Agrupamiento de la menor suma (Replicates). (Junio 2014/10kVA/H1) .. | - 58 - |
| Tabla 17 Agrupación Clúster (K-MEANS). (Junio 2014/10kVA/H1) | - 58 - |
| Tabla 18 Conformación de clúster (K-MEANS). (Junio 2014/10kVA/H1)..... | - 58 - |
| Tabla 19 Centros de clúster (K-MEANS). (Junio 2014/10kVA/H1) | - 58 - |
| Tabla 20 Agrupación de Clúster día por K-MEANS. (Junio 2014/10kVA/H1)..... | - 59 - |
| Tabla 21 Centros clúster (FUZZY K-MEANS). (Junio 2014/10kVA/H1)..... | - 63 - |
| Tabla 22 Matriz de Pertenencia (U). (Junio 2014/10kVA/H1) | - 63 - |
| Tabla 23 Agrupación Clúster por la matriz de pertenencia (FUZZY C-MEANS). (Junio 2014/10kVA/H1) | - 64 - |
| Tabla 24 Comportamiento armónico por unidad FUZZY C-MEANS. (Junio 2014/10kVA/H1) | - 64 - |
| Tabla 25 Comportamiento armónico característico por FUZZY C-MEANS. (Junio 2014/10kVA/H1) | - 65 - |
| Tabla 26 Espectro armónico en Amperios. (Junio 2014/10kVA). | - 67 - |
| Tabla 27 Parámetros del transformador de 10 kVA | - 67 - |
| Tabla 28 Pérdidas parásitas totales por corriente de Eddy..... | - 68 - |
| Tabla 29 Pérdidas nominales por corrientes parásitas en los devanados..... | - 69 - |

| | |
|---|------|
| Tabla 30 Cálculo de los factores de pérdidas armónicas Fase A | 69 - |
| Tabla 31 Factores armónicos Fase A..... | 70 - |
| Tabla 32 Cálculos de pérdidas por armónicos en el transformador 10 kVA Fase A | - 72 |
| | - |
| Tabla 33 Resultados finales de las pérdidas de los armónicos Fase A | 72 - |
| Tabla 34 Cálculo de los factores de pérdidas armónicas Fase B..... | 72 - |
| Tabla 35 Factores armónicos Fase B | 73 - |
| Tabla 36 Cálculos de pérdidas por armónicos en el transformador 10 kVA. Fase B.- | 73 - |
| Tabla 37 Resultados finales de las pérdidas de los armónicos Fase B | 73 - |
| Tabla 38 Pérdidas en el transformador de 10 kVA..... | 75 - |
| Tabla 39 Parámetros del transformador de 15 kVA | 75 - |
| Tabla 40 Las pérdidas parásitas y pérdidas óhmicas en condiciones normales | 75 - |
| Tabla 41 Pérdidas nominales por corrientes parásitas en los devanados..... | 76 - |
| Tabla 42 Cálculo de los factores de pérdidas armónicas Fase A | 76 - |
| Tabla 43 Factores armónicos..... | 76 - |
| Tabla 44 Cálculos de pérdidas por armónicos en el transformador de 15 kVA..... | 76 - |
| Tabla 45 Resultados finales de las pérdidas de los armónicos..... | 77 - |
| Tabla 46 Pérdidas en el transformador de 15 kVA..... | 78 - |
| Tabla 47 Parámetros del transformador de 25 kVA | 78 - |
| Tabla 48 Pérdidas parásitas totales por corriente de Eddy y pérdidas óhmicas totales en condiciones normales..... | 78 - |
| Tabla 49 Pérdidas nominales por corrientes parásitas en los devanados..... | 78 - |
| Tabla 50 Cálculo de los factores de pérdidas armónicas Fase A-B..... | 78 - |
| Tabla 51 Factores armónicos..... | 79 - |
| Tabla 52 Cálculos de pérdidas por armónicos en el transformador de 25 kVA..... | 79 - |
| Tabla 53 Resultados finales de las pérdidas de los armónicos..... | 80 - |
| Tabla 54 Pérdidas en el transformador de 25 kVA..... | 80 - |
| Tabla 55 Parámetros del transformador de 37,5 kVA | 81 - |
| Tabla 56 Pérdidas parásitas totales por corriente de Eddy y pérdidas óhmicas totales en condiciones normales..... | 81 - |
| Tabla 57 Pérdidas nominales por corrientes parásitas en los devanados..... | 81 - |
| Tabla 58 Cálculo de los factores de pérdidas armónicas Fase A-B..... | 81 - |
| Tabla 59 Factores armónicos..... | 81 - |
| Tabla 60 Cálculos de pérdidas por armónicos en el transformador de 37,5 kVA..... | 82 - |
| Tabla 61 Resultados finales de las pérdidas de los armónicos..... | 82 - |
| Tabla 62 Pérdidas en el transformador de 37,5 kVA..... | 83 - |

ABREVIATURAS

| | |
|------------------------------------|---|
| Δ_{pLL}: | Incremento de las pérdidas por la circulación de armónicos |
| f: | Frecuencia Relativa |
| FCM: | Técnica FUZZY C-MEANS de análisis clustering del software MATLAB |
| F_HL: | Factor de pérdida de armónicos por corriente de Eddy |
| F_HL-STR: | Factor de pérdida de armónicos para otras pérdidas parásitas |
| H: | Orden armónico 1,2,3, etc. |
| h_{max}: | máximo número de armónicos significativos |
| I₁: | Corriente de línea en el lado primario bajo condiciones de carga y frecuencia nominal |
| I₂: | Corriente de línea en el lado secundario bajo condiciones de carga y frecuencia nominal |
| I_h: | Corriente del h-ésimo armónico |
| I_{max}: | Corriente máxima permitida en el transformador |
| I_R: | Corriente nominal |
| K: | Constante que depende del número de fases (K=1 para transformadores monofásicos) |
| P: | Pérdidas totales sin armónicos |
| P_{AD,R}: | Pérdidas adicionales a corriente en condición nominal |
| P_{AD}: | Pérdidas adicionales por corrientes parásitas |
| P_{EC}: | Pérdidas por corrientes parásitas en los devanados (Eddy) |
| P_{EC-O}: | Pérdidas por unidad de corriente de Foucault en frecuencia de potencia |
| P_{EC-R}: | Pérdidas por corrientes parásitas en los devanados a condiciones nominales |
| P_H: | Pérdidas totales con armónicos |
| P_{I²R}: | Pérdidas armónicos |
| P_{LL1} (pu): | Pérdidas con carga en condiciones sinusoidal por unidad fase A |
| P_{LL2} (pu): | Pérdidas con carga en condiciones sinusoidal por unidad fase b |
| P_{LLH1} (pu): | Pérdidas con carga no sinusoidal por unidad fase A |
| P_{LLH2} (pu): | Pérdidas con carga no sinusoidal por unidad fase B |
| P_{LL-R}: | Pérdidas con carga en condiciones nominales |

| | |
|---------------------------|---|
| P_{LLT}: | Pérdidas con carga totales en condiciones no sinusoidales |
| P_{OSL}: | Pérdidas por dispersión en fijación depósitos |
| P_{OSL-R}: | Pérdidas parásitas bajo corrientes nominales |
| P_T: | Pérdidas totales |
| P_{TSL-R}: | Total de pérdidas parásitas bajo condiciones nominales |
| pu: | Valor por unidad |
| R₁: | Resistencia de medida entre dos terminales del lado primario |
| R₂: | Resistencia de medida entre dos terminales del lado secundario |
| R_{dc}: | Resistencia del devanado |
| S: | Descomposición Espectral |
| THDI: | Distorsión armónica de corriente |
| THDV: | Distorsión armónica de voltaje |
| Z: | Representa una transformación lineal de los datos cualitativos originales |

TEMA

**“IMPACTO DE LOS ARMÓNICOS
DE CORRIENTE EN LOS
TRANSFORMADORES DE
DISTRIBUCIÓN MONOFÁSICOS”**

RESUMEN

En este estudio se evalúa el impacto que generan los armónicos de corriente en los transformadores de distribución monofásicos de 10, 15, 25 y 37.5 kVA, tomando como referencia una base de datos de mediciones de calidad de energía de los años 2013, 2014 y 2015, las cuales fueron realizadas por la Empresa Eléctrica Regional del Sur S. A y entregadas para realizar este estudio con fines educativos, siendo esta base el punto de partida de la investigación.

Los armónicos de corriente según la literatura técnica revisada son los que generan un incremento en las pérdidas de energía y la disminución de la capacidad de los transformadores debido a los altos niveles de corrientes no-lineales causadas por cargas electrónicas.

Para determinar el espectro armónico característico se utilizaron métodos y modelos orientados a buscar un comportamiento armónico típico en el transformador, haciendo uso de las herramientas matemáticas que posee el software Matlab, en particular las herramientas matemáticas, análisis clustering con la técnica FUZZY c-MEANS, k-MEANS y análisis gráfico por dendograma, estas técnicas permitieron evaluar el comportamiento armónico en un intervalo de tiempo y determinar su coeficiente de pertenencia.

Para evaluar el conjunto de transformadores monitoreados con un espectro armónico característico se planteó un modelo de cálculo analítico considerando las recomendaciones técnicas expuestas en la norma ANSI/IEEE C57.110, determinándose la reducción de la capacidad y la corriente permisible del transformador ante cargas no-lineales asegurando que las pérdidas más altas no superen el valor de las pérdidas para las cuales el transformador fue diseñado considerando que el transformador opera en condiciones normales.

La capacidad real que pueden resistir y trabajar cada uno de los transformadores de 10kVA 15 kVA 25 kVA y el 37.5 kVA, será de 9,28 kVA, 13,91 kVA, 23,79 kVA y 34,60 kVA respectivamente.

SUMMARY

This study evaluates the impact that current harmonics generate in single-phase distribution transformers of 10, 15, 25 and 37.5 kVA, based on a data base of energy quality measurements for the years 2013, 2014 and 2015, Which were carried out by the Regional Electrical Company of South S. A and delivered to carry out this study for educational purposes, being this base the starting point of the research.

Current harmonics according to reviewed technical literature are those that generate an increase in energy losses and reduced capacity of transformers due to the high levels of non-linear currents caused by electronic loads.

To establish the characteristic harmonic spectrum, methods and models were used aimed at seeking a typical harmonic behavior in the transformer, using mathematical tools employed in Matlab software, specifically mathematical tools, clustering analysis utilizing the FUZZY c-MEANS and k -MEANS techniques as well as a graphic dendrogram analysis. These techniques permitted the assessment of harmonic behavior in a time intervals and to establish its membership coefficient.

To evaluate all monitored transformers with a characteristic harmonic spectrum, an analytical calculation model was proposed considering the technical recommendations put forward by the ANSI / IEEE C57.110 standard, determining the reduction of capacity and the allowable current of the transformer with respect to non-linear charges assuring that the highest losses do not exceed the value of the losses for which the transformer was designed considering that the transformer operates under normal conditions.

The actual capacity that can be withstand and work each of the transformers of 10kVA 15 kVA 25 kVA and 37.5 kVA, will be 9.28 kVA, 13.91 kVA, 23.79 kVA and 34.60 kVA respectively.

INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la red eléctrica ya no es un conjunto simple de conexiones eléctricas que provocan efectos invalorable, más aún, con la introducción de la electrónica de potencia se han convertido en receptores de componentes armónicas debidas a la aparición de formas de onda no-sinusoidal. Los equipos que han sufrido un impacto considerable por el paso de corrientes distorsionadas son los transformadores cuyos efectos presentes son reflejo de las características del tipo de carga que alimentan. La distorsión de las corrientes de la carga produce un calentamiento excesivo y evita que el transformador pueda funcionar a su capacidad de placa nominal.

En la evaluación y monitoreo de la calidad de energía en la mayoría de casos no se evalúa los armónicos de corriente (THDI), solo se monitorean los armónicos de voltaje (THDV), por lo que no se encuentran trabajos que orienten como procesar la base de datos y clasificar los armónicos de corriente presentes en los transformadores de distribución.

De la revisión de literatura técnica efectuada se identificó que la mayoría de autores utilizan el método propuesto por la norma ANSI/IEEE C57.110 para evaluar el efecto que generan los armónicos de corriente en el transformador, pero ningún autor presenta un trabajo de clasificación de armónicos, de una localidad o región de un país, solo se considera el espectro armónico de corriente propuesto en la norma ANSI/IEEE C57.110 como un ejemplo particular para demostrar el impacto de los armónicos en los transformadores distribución.

Dentro de los componentes más importantes de los sistemas eléctricos se encuentran los transformadores de potencia, cuya eficiencia se ve afectada por problemas de calidad de energía eléctrica presentes en las redes. Uno de los problemas al que son sensibles los transformadores es a la circulación de corrientes no sinusoidales por sus devanados, cuando alimentan cargas no lineales, esto produce un incremento en las pérdidas, por lo tanto, en la temperatura de trabajo que tienen los esfuerzos del aislamiento, en la reducción de la vida útil y en la capacidad del transformador. En la literatura especializada se menciona que el flujo de corrientes con alto contenido armónico genera calentamientos adicionales de los devanados del transformador, por consiguiente un

aumento de pérdidas por efecto joule durante la exposición a variaciones de frecuencia de la corriente circulante distorsionada, bajo estas condiciones, para garantizar que las temperaturas máximas de operación no superen los límites, el transformador se debe operar por debajo de sus valores nominales de corriente, es por ello que los últimos años se viene evaluando el impacto que generan los armónicos de corriente en el transformador de distribución.

Por lo expuesto, en el presente trabajo se identificará el espectro armónico presente en los transformadores de distribución monofásicos de 10, 15, 25 y 37.5 kVA de las mediciones efectuadas por la EERSSA, permitiendo determinar el impacto que generan los armónicos de corriente en los mismos, este análisis servirá para identificar la capacidad real que un transformador de distribución puede soportar durante las horas de máxima demanda.

OBJETIVOS

Objetivo General:

- Evaluar el impacto que generan los armónicos de corriente en los Transformadores de Distribución monofásicos de 10, 15, 25, 37.5 kVA, aplicando la norma ANSI/IEEE C57.110.

Objetivos Específicos:

- Determinar los armónicos de corriente característicos en transformadores de distribución monofásicos aplicando la técnica estadística clustering.
- Desarrollar un modelo analítico basado en la norma ANSI/IEEE C57.110 que permita analizar con un espectro armónico característico el impacto que genera la presencia de armónicos de corriente en transformadores de distribución.

CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LITERATURA

1. IMPACTO DE LOS ARMÓNICOS DE CORRIENTE EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

En los últimos años hemos presenciado un interés creciente sobre los efectos de las cargas no lineales en los sistemas eléctricos. Estas cargas son todas aquellas que generan corrientes no sinusoidales, es decir, corrientes que además de la componente fundamental tienen otras que son múltiplos enteros de la fundamental y que se conocen como armónicos. Este tipo de cargas ha existido en los sistemas eléctricos desde el principio, principalmente eran de tipo magnético, como las corrientes de excitación de los transformadores y los balastos magnéticos de luminarias tipo fluorescente, su influencia era escasa. La aparición de la electrónica ha mejorado mucho las propiedades de los productos, pero ha traído consigo, entre otros problemas, la generación de armónicos. Los mayores causantes de problemas de armónicos son grupos de pequeñas cargas electrónicas monofásicas, conectadas entre fase y neutro generalmente en un sistema triángulo-estrella. (Gil, 2013)

La curva característica corriente – voltaje de la carga define si es o no lineal su comportamiento y no se debe pensar que todos los equipos que tienen semiconductores por definición son no lineales. (Téllez, 2000)

En los transformadores, los armónicos influyen fundamentalmente sobre los transformadores de distribución reductores (típicamente triángulo-estrella) en los que el mayor porcentaje de cargas sean equipos electrónicos monofásicos, conectados entre línea y neutro. Las corrientes armónicas del neutro se reflejan en el triángulo, por donde circulan elevando la densidad de flujo en el núcleo. También, las corrientes de Foucault, proporcionales a la frecuencia, aumentan considerablemente.

1.2.1 TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

Los transformadores de distribución, siendo estos un equipo estático, que por medio de la cual la inducción electromagnética suscitado entre las bobinas internas del mismo,

éste transfiere energía eléctrica, de un circuito primario en media tensión a un circuito secundario en baja tensión. (Medina, 2012)

(Loor, 2012) Menciona que los transformadores de distribución transfieren energía eléctrica desde un circuito primario de distribución a un circuito secundario de distribución o circuito de servicio al consumidor.

Según (Medina, 2012), el transformador de distribución es el equipo más importante e indispensable para la red de distribución, por ser el responsable del suministro de la energía a los consumidores en baja tensión. Para garantizar el desempeño óptimo de los mismos, es necesario cumplir con las capacidades porcentuales de cargas, recomendadas por los fabricantes de los equipos, avalados por las normas internacionales pertinentes.

1.3 ARMÓNICOS

El concepto de armónicas proviene del teorema de Fourier que define que, bajo ciertas condiciones analíticas, una función periódica cualquiera puede considerarse integrada por una suma de funciones senoidales, incluyendo un término constante en caso de asimetría respecto al eje de las abscisas, siendo la primera armónica, denominada también señal fundamental, del mismo período y frecuencia que la función original y el resto serán funciones senoidales cuyas frecuencias son múltiplos de la fundamental. Cabe señalar que las ondas simétricas contienen únicamente armónicas impares, mientras que para ondas asimétricas existirán tanto armónicas pares como impares.

Las armónicas son corrientes y/o voltajes presentes en un sistema eléctrico, con una frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental. Así, en sistemas con frecuencia de 60 Hz y cargas monofásicas, las armónicas características son la tercera (180 Hz), quinta (300 Hz), y séptima (420 Hz). (Tejada & Llamas, 2006)

En general, los armónicos son producidos por cargas no lineales, lo cual significa que su impedancia no es constante, 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. (Ruggero & Sánchez, 2014).

Los principales equipos electrónicos generadores de armónicos son los que emplean circuitos de rectificación o fuentes de poder para su funcionamiento como computadores, televisores, equipos de sonido; etc.

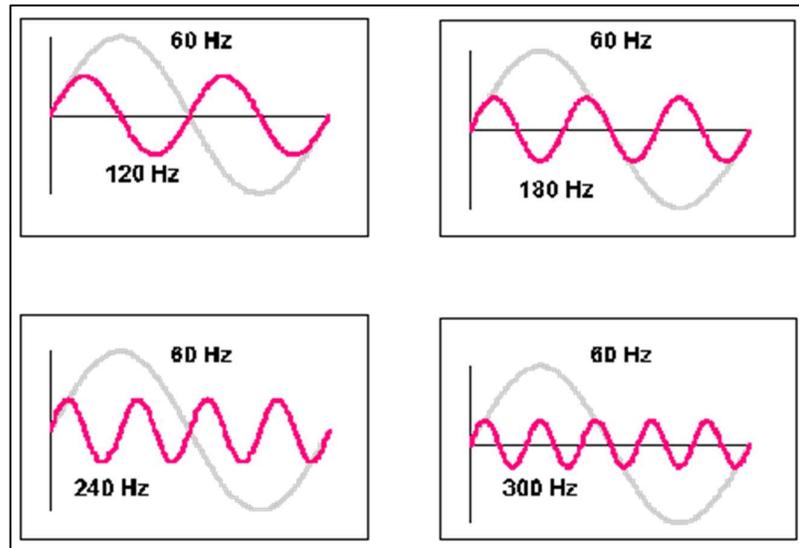


Figura 1. Muestra una onda senoidal de 60 Hz y 2^a, 3^a, 4^a y 5^a armónicas
Fuente: Extraído de (Cuevas, 2000)

1.3.1 Trayectoria De Los Armónicos

Toda corriente eléctrica fluye por donde se le presenta menor resistencia a su paso. Por esta razón las corrientes armónicas siguen trayectorias distintas, pues se tiene que las impedancias de los sistemas varían según la frecuencia. Donde se tiene que la reactancia inductiva se incrementa con la frecuencia y la resistencia se incrementa en menor medida, mientras que la reactancia capacitiva disminuye con la frecuencia. Así las armónicas fluyen hacia donde se le presenta menos resistencia a su paso, esto se muestra en la figura de abajo

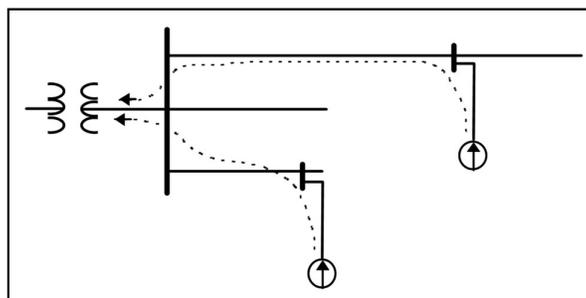


Figura 2. Trayectoria de las armónicas en un sistema inductivo
Fuente: Extraído de (Marulanda & Rebolledo, 2009)

En cambio, sí al sistema de la figura de arriba se le incluye un banco de capacitores como se muestra en la figura de abajo, da lugar a unas trayectorias distintas para las armónicas.

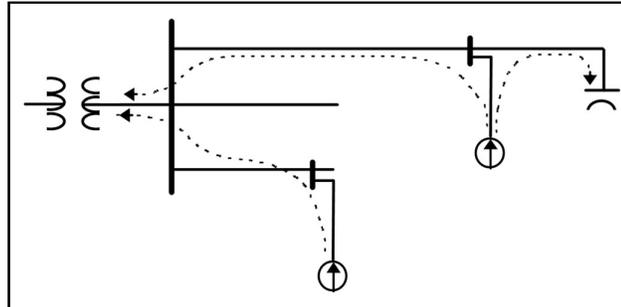


Figura 3. Efecto de los capacitores en las trayectorias de las armónicas

Fuente: Extraído de (Marulanda & Rebolledo, 2009)

La trayectoria que siguen las armónicas también depende del tipo de sistemas, ya sean monofásicos o trifásicos, así como las conexiones de los transformadores que se encuentra a su paso. Las armónicas que se presentan en sistemas balanceados tienen una relación directa con las componentes de secuencias positiva, negativa y cero.

1.3.2 Análisis de FOURIER

El análisis armónico es el proceso de calcular las magnitudes y fases de la armónica fundamental y todas las de orden mayor de una forma de onda periódica. La serie resultante se conoce como la serie de Fourier, la cual para una función periódica $X(t)$.

$$X(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) \right] \quad \text{(Ecuación 1)}$$

1.3.3 Transformada de FOURIER.

La Transformada de Fourier permite expresar funciones del dominio del tiempo en el dominio de la frecuencia. Con la inversa de la Transformada de Fourier se puede pasar funciones del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo. La serie de Fourier representa, por consiguiente, el caso especial de la Transformada de Fourier aplicada a una señal periódica.

En la práctica, los datos están frecuentemente disponibles en la forma de una función

muestreada en el tiempo, representada por una serie en el tiempo de amplitudes separadas por intervalos de tiempo fijo de duración limitada.

El análisis de Fourier cuando se aplica a una señal continua periódica en el dominio del tiempo, produce una serie de componentes de frecuencia discretos en el dominio de la frecuencia.

Las ecuaciones de arriba forman el par de la transformada de Fourier

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t)e^{-j2\pi ft}.dt \quad \text{(Ecuación 2)}$$

$$X(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f)e^{j2\pi ft}.df \quad \text{(Ecuación 3)}$$

1.3.4 Distorsión Armónica Total (THD)

La distorsión armónica total, es una medida de la coincidencia de formas entre una onda y su componente fundamental. Para el cálculo de este factor se aplica las siguientes fórmulas:

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} I_2^2}}{I_1} \times 100\% \quad \text{(Ecuación 4)}$$

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} V_2^2}}{V_1} \times 100\% \quad \text{(Ecuación 5)}$$

Donde:

i: Número de armónica

I1: Valor eficaz de la onda fundamental de la corriente

V1: Valor eficaz de la onda fundamental del voltaje.

Ii: Valor eficaz de la corriente del armónico k

Vi: Valor eficaz del voltaje del armónico k

1.3.4.1 Distorsión Armónica Total de la Corriente THD(I)

Es el valor potencial de capacidad de calentamiento de las armónicas relativo a la

componente fundamental.

Las fuentes que generan más distorsión armónica de corriente son:

- Dispositivos de electrónica de potencia
 - Rectificadores de CD
 - Inversores de CA
 - Fuentes de alimentación conmutadas
- Otras fuentes son:
 - Lámparas fluorescentes
 - Soldaduras de Arco
 - Variadores de velocidad

1.3.5 Efecto de los Armónicos en los Transformadores

La influencia de los armónicos de corriente en los transformadores de distribución se ha estudiado y se sigue estudiando por el efecto que estos causan, (Hernández, Sánchez, & Valido, 2005), consideran que antes que aplicar factores de "derrateo", sería mejor determinar la verdadera capacidad a que quedaría reducido un transformador, calculando el incremento de sus pérdidas y determinando las temperaturas que alcanzará en el aceite y en el punto más caliente para las condiciones de tensión y carga a que estaría expuesto, de esta forma, se puede predecir si el equipo podrá o no soportar el régimen de trabajo a que estará sometido.

(Castañeda & Castañeda, 2014), presenta un trabajo en el que se realizaron mediciones de los parámetros de la energía eléctrica: nivel de voltaje, perturbaciones de voltaje (flickers y armónicos de voltaje) y factor de potencia, además se analizan los armónicos de corriente para cada una de las mediciones realizadas; se realizó la simulación del efecto de los armónicos de corriente, concluyendo que en usuarios finales de bajo voltaje existe gran inserción de armónicos de corriente con mediciones fuera del límite en un total del 55% y a la vez se obtuvo un bajo factor de potencia alcanzando valores de 0.50; debido principalmente a la circulación de armónicos dentro de sus instalaciones

dado principalmente por el uso de focos ahorradores y la falta de un buen sistema de puesta a tierra.

(Marulanda & Rebolledo, 2009) Presentan la medición de la calidad de potencia en dos casos en los que existen cargas no lineales. La diferencia aquí es que el número de ordenadores conectados al primer caso es mucho más alto que la del segundo caso. Los datos se establecieron para medir las cantidades tales como la frecuencia, el voltaje, la corriente, la distorsión armónica total, potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente, tensión armónica, factor de potencia real de armónicos de corriente y el factor de potencia de desplazamiento.

El resultado de la simulación de los efectos de armónicos en los transformadores muestra que, al aumento de las cargas, menor será la vida del transformador debido a los armónicos de corriente generados por los dispositivos electrónicos.

(Fragozo, Malagón, Chacón, Ordoñez, & Giraldo, 2014) Utilizan el estándar IEEE C57.110™-2008 (IEEE Std. C57.110-1998, 1998), para la determinación de las condiciones óptimas de operación de transformadores sometidos a corrientes no sinusoidales. Se analizan los principales efectos de la distorsión armónica sobre los componentes internos del transformador, así como las variaciones en el comportamiento del flujo magnético, clases y tipos de pérdidas, al igual que las recomendaciones prácticas para la evaluación del máximo valor eficaz de corriente de carga no sinusoidal, tanto para transformadores tipo seco como inmersos en líquido.

Con estos valores de carga estimados se logra proteger al transformador, asegurando que las pérdidas más altas no superen el valor de las pérdidas para las cuales fue diseñado, evitando, de esta forma, los efectos de fenómenos ocasionados por la presencia de corrientes no sinusoidales.

Llegando a la conclusión que las corrientes no sinusoidales producen calentamientos adicionales en los transformadores debido al incremento de las pérdidas, especialmente de las pérdidas debidas a las corrientes parásitas.

Una de las causas de fallas en los transformadores de distribución sumergidos en aceite es el incremento de su temperatura interna, que acelera el envejecimiento de su

aislamiento. Como referencia para determinar su envejecimiento se considera el incremento de su punto más caliente cuando se encuentra por encima de los 110° C. Este incremento y su influencia se pueden observar en el comportamiento térmico del transformador, el cual refleja una relación entre la temperatura diaria en su punto más caliente (Jauregui & Tylavsky, 2008), (IEC, 2004), (IEEE Std C57.12.90, 1999), (Hashmi G., Mayo 8-9, 2008), que tradicionalmente ha sido modelada en función de la variación de la temperatura ambiente (Cadavid, 2007), (Stahlhut J., 2008) y de la carga.

Para las empresas del sector eléctrico, la presencia de armónicas en los transformadores produce un incremento de las pérdidas técnicas, que se ven reflejadas en los costos operacionales del sistema (Frau J. , 2007), (Frau J. , 2008), siendo estimadas para la Unión Europea en cinco (5) TWh/año, que es el equivalente a la energía suministrada por ocho centrales nucleares. Adicionalmente considerando que este equipo es el elemento más costoso y vital de estas empresas, las fallas que se presentan, a consecuencia de interrupciones provocadas, generan incrementos de los costos de mantenimiento y la desmejora en la calidad de la energía eléctrica, lo que se ve reflejado en el deterioro de la calidad de vida de los usuarios del servicio.

Tradicionalmente la capacidad de diseño del transformador, que es función de su comportamiento térmico, ha sido seleccionada considerando sólo la temperatura ambiente, las variaciones de carga y los tipos de materiales utilizados para su construcción (Cadavid, 2007), (Stahlhut J., 2008). Sin embargo, el creciente incremento de la presencia de cargas no lineales y, por ende, de las armónicas ha ocasionado que se incluyan en la modelación de su comportamiento la presencia de las armónicas de corrientes (Elmoudi A., 2006).

Elmoudi y otros (Elmoudi A., 2006), desarrollan un modelo para predecir la temperatura del punto más caliente del transformador, considerando un ciclo de carga y temperatura ambiente variable, lo que permite aproximar su comportamiento real en un período de tiempo. Estos autores analizan los efectos de las armónicas en su vida útil, utilizando las recomendaciones establecidas en las normas ANSI/IEEE C57.91-1995 (IEEE Std. C57.91-1995, 1995) y ANSI/IEEE C57.110-1998 (IEEE Std. C57.110-1998, 1998). Demostraron que el modelo presenta errores menores al 3%, al monitorear perfiles de carga a varios transformadores de diferentes capacidades y realizar

mediciones de las temperaturas que se presentan en el aceite superior y de su temperatura en el punto más caliente. Concluyen que los mismos pueden trabajar bajo condiciones de sobrecarga por cortos periodos de tiempo, considerando que se va a producir una reducción de su vida útil. Similar conclusión la obtiene Aponte (Aponte, 2007). Sin embargo, ambos autores sólo relacionan los efectos de las corrientes armónicas, sin considerar el efecto de las de tensión.

Los efectos causados por los armónicos en los transformadores pueden ser pérdidas con carga, sin carga o pérdidas de núcleo, los transformadores trabajan con corriente alterna a una frecuencia de 60 Hz, cuando el transformador esté operando en condiciones de carga nominal y con una temperatura no mayor a la temperatura ambiente especificada, el transformador deberá disipar sin mayor dificultad el calor producido por sus pérdidas sin sobrecalentarse ni deteriorar su vida útil.

Las pérdidas en los transformadores también pueden ser pérdidas por corrientes de Eddy y pérdidas adicionales en el tanque, sujetadores, u otras partes de hierro.

Las pérdidas sin carga o de núcleo son producidas por el voltaje de excitación en el núcleo. La forma de onda de voltaje en el primario es considerada sinusoidal independientemente de la corriente de carga, por lo que no se considera que aumentan para corrientes de carga no senoidales. Si la corriente de carga tiene armónicas estas pérdidas también pueden aumentar por el efecto piel. (Makarov & Emanuel, 2000).

Las pérdidas por corrientes de Eddy son proporcionales al cuadrado de la corriente de carga y al cuadrado de la frecuencia por lo que pueden presentar un aumento elevado en cuanto a pérdidas en los devanados los cuales conducen corrientes de carga no sinusoidal, lo que nos dará como resultado un aumento en su temperatura. (Gil, 2013)

Estas pérdidas se pueden expresar como:

$$P_e = P_{e,R} \sum_{h=1}^{h=h \max} \left[\frac{I_h}{I_R} \right]^2 h^2 \quad \text{(Ecuación 6)}$$

Donde:

- P_e: Pérdidas por Corrientes de Eddy
- h: Armónica
- I_h: Corriente de la armónica h, (A)

IR: Corriente nominal, (A)
P_{e, R}: Pérdidas de Eddy a corriente y Frecuencia nominal

(Gómez, Quispe, Reyes, Sousa, & Percy, 2014), (IEEE Std. C57.110-1998, 1998).
Mencionan que las pérdidas adicionales son por corrientes parásitas debido al flujo electromagnético extraviado en el devanado, núcleo, abrazadera del núcleo, campo magnético, pared del tanque y otras partes estructurales del transformador. Las pérdidas extraviadas del devanado incluyen pérdidas aisladas de Eddy en los conductores del devanado y pérdidas debido a la circulación de corrientes entre circuitos devanados paralelos o aislados.

$$P_{AD} = P_{AD,R} \sum_{h=1}^{h=h \max} \left[\frac{I_h}{I_R} \right]^2 h \quad \text{(Ecuación 7)}$$

Donde:

P_{AD}: Pérdidas adicionales por corrientes parásitas.

P_{AD,R}: Pérdidas adicionales a corriente y frecuencia nominal

Se puede añadir a estas pérdidas, algunas cargas no lineales las cuales tienen una componente de corriente directa en la corriente de carga, si se presenta este caso en particular la componente aumentará las pérdidas de sonido, por lo que este tipo de cargas se debe evitar.

En el caso de transformadores conectados en delta - estrella que suministran cargas no lineales monofásicas como pueden ser fuentes reguladas por conmutación, las armónicas múltiplos de 3 circularán por las fases y el neutro del lado de la estrella, pero no aparecerán en el lado de la delta (caso balanceado), ya que se quedan atrapadas, produciendo sobrecalentamiento de los devanados. Se debe tener especial cuidado al determinar la capacidad de corriente de estos transformadores bajo condiciones de carga no lineal puesto que es posible que los volts-amperes medidos en el lado primario sean menores que en el secundario. (González & De Armas, 2009)

Además, en el caso de transformadores que operarán bajo condiciones de carga no lineal, es conveniente en lugar de sobredimensionar el transformador, utilizar un transformador con un factor K mayor a 1. (Makarov & Emanuel, 2000), (Hernández, Sánchez, & Valido, 2005), (Savaghebi, Jalilian, & Gholami, 2008),

Estos transformadores son aprobados por UL (Underwriter's Laboratory) para su operación bajo condiciones de carga no senoidal, puesto que operan con menores pérdidas a las frecuencias armónicas. Entre las modificaciones con respecto a los transformadores normales están:

- a) El tamaño del conductor primario se incrementa para soportar las corrientes armónicas circulantes. Por la misma razón se dobla la sección del conductor neutro.
- b) Utilizando conductores secundarios aislados de menor calibre, devanados en paralelo y transpuestos para reducir el calentamiento por el efecto piel.

El factor K se puede encontrar mediante un análisis armónico de la corriente de la carga o del contenido armónico estimado de la misma. La ecuación que lo define es:

$$\text{factor } K = \sum_{h=1}^{h=h \max} [I_{h(pu)}]^2 h^2 \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

h: armónica

I_h (pu): corriente armónica en pu. tomando como base la corriente Irms con el valor del factor K de la corriente de la carga, se puede escoger el transformador adecuado.

La Tabla 1 muestra los valores comerciales de transformadores con factor K.

Tabla 1

Transformadores con factor K disponibles comercialmente

| Factor | Valores comerciales de Transformador |
|---------------|---|
| K | 4 |
| K | 9 |
| K | 13 |
| K | 20 |
| K | 30 |
| K | 40 |

Fuente: Extraído de (Tejada & Llamas, 2006)

El factor K permite evaluar el efecto que las corrientes armónicas tienen en el calentamiento del transformador. Un factor $K=1$ indica la no presencia de armónicos. En consecuencia, cuanto más alto es el factor K, mayor es el efecto de calentamiento producido por los armónicos.

Los transformadores con un factor K son diseñados para funcionar a plena carga con cualquier contenido armónico cuyo factor K resulte igual o menor al factor K declarado por el fabricante en la chapa de características del transformador.

Estos transformadores difieren de los transformadores normales debido a que tienen una capacidad térmica adicional que le permite tolerar los efectos térmicos debidos a las corrientes armónicas.

En el anexo 8 se presenta la literatura específica sobre el transformador monofásico.

1.4 ANÁLISIS DE TÉCNICAS ESTADÍSTICAS PARA CLASIFICAR LOS ARMÓNICOS DE CORRIENTE.

1.4.1 ANÁLISIS MULTIVARIANTE

En los últimos años, el uso del análisis multivariante ha tomado fuerza como una herramienta útil para analizar grandes cantidades de datos. Esto se debe a la facilidad que se tiene en la adquisición de datos, debido a las nuevas tecnologías, y su aplicación para varias disciplinas (ingeniería, ciencias económicas y empresariales, etc.) (Peña, 2002)

“El Análisis Multivariante es la rama de la Estadística y del análisis de datos, que estudia, interpreta y elabora el material estadístico sobre un conjunto de $n>1$ variables, que pueden ser cuantitativas, cualitativas o una mezcla” (Cuadras, 2007).

(Peña, 2002) Hace referencia que, mediante la utilización de varias técnicas, este tipo de análisis tiene por objetivos:

- 1.** Reducir una gran cantidad de variables en un conjunto representativo de menor número de variables, evitando en lo posible la pérdida de información.
- 2.** Buscar semejanzas en los datos, formar grupos y compararlos
- 3.** Clasificar nuevas observaciones

Para lograr estos objetivos se pueden plantear dos niveles de análisis:

- ✚ Exploración de Datos (o minería de datos)
- ✚ Inferencia, se busca obtener conclusiones sobre la población que ha generado los datos, para esto se requiere construir un modelo que explique su obtención y permita prever valores futuros.

Existen muchos métodos para realizar análisis multivariante, las herramientas matemáticas más utilizadas son; componentes principales, análisis de clustering con la técnica FUZZY C-MEANS (FCM) y con el algoritmo jerárquico, y análisis gráficos como dendograma.

1.4.2 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (PCA)

Es una técnica de minería de datos, cuyo objetivo es la reducción del número de variables sin perder información. Esta técnica permite determinar nuevas variables no correlacionadas entre sí, por lo que la metodología busca determinar las direcciones de máxima variabilidad de los datos.

Primero se transforman las variables en componentes principales (PCs); estas variables están ordenadas para que las primeras componentes retengan en lo posible las variaciones presentes en las variables originales, las variables no están correlacionadas.

Las PCs son definidas como una combinación lineal de las variables originales que tengan la máxima variabilidad. Para determinar estas variables se usan las propiedades de valores y vectores propios, las cuales se obtienen por la aplicación de la descomposición en valores singulares (SVD) a la matriz de covarianzas (S). (Cepeda, 2013)

La matriz de covarianzas es una matriz cuyos elementos de la diagonal representan la variabilidad de las variables respecto a la media (varianza) y los elementos fuera de la diagonal representan la variabilidad mutua entre cada variable (covarianza). Esta matriz se la calcula con los datos de la matriz de datos X , la matriz identidad I y $\mathbf{1}$ es el vector de unos, como se muestra en la ecuación 4. Los elementos i y j ($i \neq j$) corresponden a la covarianza entre i -ésimo y j -ésimo.

$$S = \frac{1}{n} X' \left[I - \frac{1}{n} \mathbf{1}\mathbf{1}' \right] X \quad \text{(Ecuación 9)}$$

La SVD de la matriz S es conocida como Descomposición Espectral, se define en la ecuación 10

$$S = U \Lambda U' \quad \text{(Ecuación 10)}$$

Donde:

U es una matriz orto normal la cual contiene los vectores propios de S

Λ es una matriz diagonal que contiene los valores propios (λ_i) de S.

La ecuación 9 muestra las nuevas variables, que son las proyecciones de los datos originales en el hiper plano definido por los vectores propios de S. Estas nuevas variables corresponden a los coeficientes de las componentes principales.

$$Z = XU \quad \text{(Ecuación 11)}$$

La varianza total de la matriz de datos equivale a la sumatoria de los valores propios de las componentes principales, estos valores propios brindan una medición de la variabilidad explicada (EV_i) por el i-ésimo PC, como se ve en la ecuación 10; de esta variabilidad explicada va a depender el número de componentes principales que se elija (Cepeda, 2013)

$$EV_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^p \lambda_j} \quad \text{(Ecuación 12)}$$

1.4.3 COORDENADAS PRINCIPALES Y DISTANCIAS

La generalización de las componentes principales son las coordenadas principales, que son un tipo de escalado multidimensional; la diferencia se basa en que, en lugar de tener una matriz de observación por variables, en coordenadas principales se usa la matriz de distancias o disimilaridad. Al igual que en PCA, el uso de la matriz de distancias se centra en la obtención de una matriz de datos X de dimensiones (n*p) con variables

ortogonales; el objetivo de las dos metodologías es describir e interpretar datos ((Peña, 2002)

Distancias. El concepto de distancias en coordenadas principales se usa para el estudio de la variabilidad de las observaciones. Una distancia, entre dos puntos X_i y X_j del conjunto \mathfrak{R}^p , debe cumplir las siguientes propiedades para considerarlas como tal (Peña, 2002)

“ $d: \mathfrak{R}^p \times \mathfrak{R}^p \rightarrow \mathfrak{R}^+$, es decir, dados dos puntos en el espacio de dimensión p, su distancia con esta función es un número no negativo, $d(X_i, X_j) \geq 0$ ”

“ $d(X_i, X_i) = 0 \forall i$ la distancia entre un elemento y sí mismo es cero.”

“ $d(X_i, X_j) \leq d(X_i, X_p) + d(X_p, X_j)$, propiedad triangular: la distancia debe verificar que entre tres puntos, la suma de las longitudes de dos lados cualesquiera del triángulo formado por los tres puntos debe siempre ser mayor que el tercer lado”

Existen diferentes tipos de distancias como la de Mahalanobis, la distancia promedio, la distancia Euclídea o la Distancia entre Señales.

Una distancia de mucha utilidad en varios procesos (como el método jerárquico que se explica posteriormente) es la distancia Euclídea, que se calcula mediante la ecuación 13:

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{s=1}^p (X_{is} - X_{js})^2} \quad \text{(Ecuación 13)}$$

La dimensión en particular que requiere ser eliminada es el tiempo, por este motivo se requiere un artificio matemático que permita embeber el tiempo dentro de la variable “armónico”. Para esto se utiliza el concepto de Distancias entre Señales (Cepeda, 2013).

Se empieza con la normalización de las señales en función del tiempo $X_i(t)$. La ecuación 14 indica los datos necesarios para realizar la normalización; en la inicialización se usa el primer valor de las señales X_{i0} , también interviene el valor promedio \bar{X} .

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{N_a} X_{ij}(t)}{N_a} \quad \text{(Ecuación 14)}$$

N_a es número de señales a ser analizadas

Se define X_{ij} como la diferencia entre las señales temporales.

$$X_{ij} = X_i(t) - X_j(t) \quad \text{(Ecuación 15)}$$

Con estas consideraciones se puede calcular la distancia entre señales discretas δ_{ij} con la siguiente ecuación:

$$\delta_{ij} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^T X_{ij}^2(t) dt} \quad \text{(Ecuación 16)}$$

De esta forma, se calcula una matriz de disimilaridad para cada variable temporal (serie de tiempo) que interviene en el análisis multivariante, por ejemplo, los armónicos influyentes, con la ecuación 17. Cada matriz de distancias formada tendrá la estructura que se indica:

$$D = \begin{bmatrix} 0 & \delta_{21} & \dots & \delta_{1n} \\ \delta_{21} & 0 & \dots & \delta_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \delta_{n1} & \delta_{21} & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad \text{(Ecuación 17)}$$

Donde n , es el número de señales temporales que intervienen. Luego se procede a la construcción de la correspondiente matriz de similitud (similar a la de covarianzas, pero para individuos) Q , la cual se la obtiene con la ecuación 18.

$$Q = -\frac{1}{2} \left[I - \frac{1}{n} \mathbf{1}\mathbf{1}' \right] D \left[I - \frac{1}{n} \mathbf{1}\mathbf{1}' \right] \quad \text{(Ecuación 18)}$$

La matriz se puede representar por los auto valores y auto vectores propios, de la siguiente manera:

$$Q = V \Lambda V' \quad \text{(Ecuación 19)}$$

Donde V tiene un rango $n \times p$ que contiene los vectores propios y Λ es la diagonal de valores propios de la matriz Q . Con estos valores se pueden calcular las coordenadas principales Y y conjuntamente se puede crear un espacio multidimensional de matriz de datos.

$$Y = V \Lambda^{1/2} \quad \text{(Ecuación 20)}$$

La matriz Y contiene las nuevas variables ortogonales, las cuales mantienen las distancias originales de las coordenadas principales. Si se parte de una matriz de datos X y se calcula a partir de estas variables la matriz de distancias y luego se aplica el método descrito a esta matriz de distancias no se obtienen las variables originales, sino sus componentes principales.

Con la técnica anterior se forma una nueva matriz de datos, en este trabajo se la denomina X_datos ; a esta matriz reducida se le aplica otro tipo de análisis, que es el de conglomerados o también llamado "clustering" basado en FCM.

$$X_datos = [Y_1 \ Y_2 \ \dots \ Y_w] \quad \text{(Ecuación 21)}$$

1.4.4 ANÁLISIS DE CORRESPONDENCIAS

Es un equivalente a coordenadas principales y componentes principales, con la variante de que este tipo de análisis se usa para variables cualitativas y la distancia que usa es la $ji - cuadrado$. Esta técnica descriptiva busca representar las tablas de contingencia en una matriz de datos.

Una tabla de contingencia es una tabla de números positivos la cual tiene en cada casilla la frecuencia absoluta que se observa al combinar dos variables cualitativas en n elementos, de orden $I \times J$. El análisis de correspondencias busca resumir la información que contiene la tabla de contingencia (Peña, 2002)

Con la tabla de contingencia, se procede a buscar la mejor proyección tanto de filas como de columnas; para esto se define una matriz de frecuencia relativa F la cual se la obtiene al dividir la matriz de contingencia para n el total de elementos. Las frecuencias relativas que verifican se denominan f_{ij} .

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J f_{ij} = 1 \quad \text{(Ecuación 22)}$$

A las I filas de la matriz F se las puede ver como I puntos en un espacio \mathcal{R}^n y a las J columnas como puntos en el espacio \mathcal{R}^I , se trata de buscar la representación de los puntos I y J en un espacio de menor dimensión para estimar sus distancias relativas.

Para cada fila de la matriz F se asigna una frecuencia relativa, las cuales se calculan con la siguiente expresión:

$$f = F\mathbf{1} \quad \text{(Ecuación 23)}$$

De igual manera se realiza para cada columna, donde cada frecuencia relativa se calcula de la siguiente manera:

$$c = F'\mathbf{1} \quad \text{(Ecuación 24)}$$

A cada fila y cada columna se debe dar un peso proporcional a su frecuencia relativa, dando más peso a aquellas que contienen más datos. Los términos de los vectores f y c se pueden considerar como pesos debido a que son números positivos que suman uno.

Una vez realizada la mejor proyección se calcula la distancia con proyección de las filas y columnas; para esto se define previamente la matriz de frecuencias relativas condicionadas R .

$$R = D_f^{-1}F \quad \text{(Ecuación 25)}$$

Donde D_f es de orden $I \times I$ y es una matriz diagonal que contiene los términos del vector f en la diagonal principal. Del mismo modo se realiza para las columnas con la variante D_c de orden $J \times J$, y en la diagonal principal los términos del vector c .

Se procede a calcular la Distancia Ji Cuadrada X^2 entre dos filas (r_a, r_b)

$$D^2(r_a, r_b) = (r_a - r_b)' D_c^{-1} (r_a - r_b) \quad \text{(Ecuación 26)}$$

Se simplifica el problema al usar una matriz de datos transformada, la cual considera una distancia Euclídea entre filas (Y).

$$Y = R D_c^{-1/2} = D_f^{-1} F D_c^{-1/2} \quad \text{(Ecuación 27)}$$

Con estos valores ya se puede construir una matriz de datos Z de la siguiente forma:

$$Z = D_f^{-1/2} F D_c^{-1/2} \quad \text{(Ecuación 28)}$$

Esta nueva matriz Z representa una transformación lineal de los datos cualitativos originales. Para poder realizar la representación bidimensional, a la matriz se le aplica

un procedimiento semejante al de componentes principales llamado singular value decomposition. Se calcula la matriz $Z'Z$ y se obtiene sus valores y vectores propios. Se toman los dos vectores propios asociados a los mayores valores propios menores que la unidad de la matriz Z . Se calculan las proyecciones con la ecuación 29 y se representa gráficamente en un espacio bidimensional.

$$Y\mathbf{a}_i = \mathbf{R}\mathbf{D}_c^{-1/2} = \mathbf{D}_f^{-1}\mathbf{F}\mathbf{D}_c^{-1/2}\mathbf{a}_i, \quad i = 1, 2 \quad (\text{Ecuación 29})$$

1.4.5 ANÁLISIS DE CLUSTERING

El clúster es una técnica de clasificación que sirve para poder detectar y describir subgrupos de sujetos o variables homogéneas en función de los valores observados dentro de un conjunto aparentemente heterogéneo. Se fundamenta en el estudio de las distancias entre ellos, permitiendo en el análisis, cuantificar el grado de similitud, en el caso de las proximidades, y el grado de diferencia, en el caso de las distancias. Como resultado aparecen agrupaciones o clústeres homogéneos. (Vila, Rubio, Verlanga, & Torrado, 2014)

Esta es una de las principales herramientas de la metodología data mining. Los conjuntos de datos pueden estar previamente clasificados en categorías llamadas “clases”; pero si éste no es el caso se puede hacer clústeres o agrupamientos, la cual define clases asociadas con los datos.

El análisis clustering tiene por objeto unir de manera homogénea los elementos en función de las similitudes de estos (que se obtienen de las variables). La agrupación se da de tal forma que los elementos parecen caer de forma natural en conjunto, es decir, los datos dentro de un grupo son similares entre sí y diferentes a los datos que pertenecen a otros grupos. Trata de reconocer patrones de comportamiento de los individuos en un grupo de variables; también se conoce a este análisis como “métodos de clasificación automática o no supervisada” (Cepeda, 2013), (Peña, 2002).

En cuanto al procedimiento, el análisis de clúster permite hacer una agrupación jerarquizada o no. El procedimiento jerárquico es más adecuado para muestras pequeñas en las que los grupos se configuran por agrupaciones sucesivas de individuo a individuo, de individuo a grupo configurando una estructura arborescente con niveles,

que desemboca en una jerarquización de clúster. El procedimiento no jerárquico (K-medias) parte, de entrada, de la determinación de un número de grupos y asigna los casos a grupos diferenciados sin que unos dependan de otros (clúster no jerárquico).

Existen métodos de partición y métodos jerárquicos, para desarrollar estos algoritmos se utilizan la matriz de datos y la matriz de distancias simultáneamente. En esta tesis se usan dos tipos de algoritmos de clustering, uno de partición (FCM) y otro jerárquico (en combinación con dendograma).

1.4.5.1 Método de partición: Algoritmo FUZZY C-MEANS (FCM)

Esta herramienta matemática trata de buscar grupos de datos mediante la participación difusa. Cada punto de datos pertenece a un grupo con un cierto grado de pertenencia, es decir, un punto de datos dado puede pertenecer a varios grupos con su propio grado de pertenencia entre 0 y 1.

FCM se basa en la minimización de la función de costos J para poder dividir el conjunto de datos.

$$J = \sum_{i=1}^{cl} \sum_{j=1}^n u_{ij}^m d_{ij}^2 \quad (\text{Ecuación 30})$$

Donde u_{ij} es el grado de pertenencia o membresía de la j –ésima observación en el i –ésimo clúster, n es el número de puntos de datos, cl es el número de clústeres, $m = [1, \infty]$ es el tamaño del exponente. Para d se usa la ecuación 29 es la distancia Euclídea entre el i –ésimo centroide del clúster (c_i) y la j –ésima observación (X_j).

$$d_{ij} = ||c_i - x_j|| \quad (\text{Ecuación 31})$$

Para la implementación del algoritmo es necesario que la función de costo llegue a su mínima expresión, esto se lo realiza usando las ecuaciones 32 y 33.

$$c_i = \frac{\sum_{j=1}^n u_{ij}^m x_j}{\sum_{j=1}^n u_{ij}^m} \quad (\text{Ecuación 32})$$

$$u_{ij} = \left[\sum_{k=1}^{cl} \left(\frac{d_{ij}}{d_{kj}} \right)^{\frac{2}{m-1}} \right]^{-1} \quad (\text{Ecuación 33})$$

La optimización es iterativamente llevada a cabo con las dos condiciones anteriores hasta llegar a un criterio de parada. La salida del FCM comprenden los centroides de los

clústeres c_i y la matriz de funciones de membresía U (cuyos elementos son cada u_{ij}) (Cepeda, 2013).

1.4.5.2 Método de partición: Algoritmo K-MEANS

El algoritmo K-MEANS fue propuesto por Mac-Queen (MacQueen, 1968). Este algoritmo coge el parámetro de entrada, K , y particional el conjunto de n datos en K clúster de tal manera que la similitud entre los elementos que pertenecen a un mismo clúster es elevada y la similitud entre los elementos de distintos clústeres es baja. Dicha similitud se mide en relación al valor medio de los objetos en el clúster, es decir, con respecto a su centro de gravedad.

El algoritmo procede como sigue. En primer lugar, escoge aleatoriamente K objetos haciendo que estos representen el centro del clúster. Cada uno de los objetos restantes se va asignando al clúster que sea más similar basándose en la distancia del objeto a la media del clúster. Entonces computa la nueva media de cada clúster y el proceso sigue iterando hasta que se consigue la convergencia. Es decir:

1. Paso 1. En cada iteración se evalúan todos los puntos y se asignan a su clúster más cercano.

2. Paso 2. La reasignación de los puntos se lleva a cabo solo si la suma de las distancias se reduce. A continuación, se recalculan los centros de los clústeres.

El proceso itera hasta que se encuentra un mínimo de la función objetivo considerado que suele ser el error cuadrático medio, definido por:

$$E = \sum_{i=1}^K \sum_{x \in C_i} |x - m_i|^2 \quad \text{(Ecuación 34)}$$

Donde x es el punto en el espacio que representa al objeto dado y m_i es la media del clúster C_i . Este criterio busca que los K clúster resultantes sean lo más compacto posible y lo más distanciado posible entre ellos.

El método es relativamente escalable y eficiente para el procesamiento de conjuntos de datos grandes ya que la complejidad computacional del algoritmo es $O(nKt)$, donde n es el número de objetos, K el número de clúster y t el número de iteraciones. Normalmente K y t suelen tener órdenes de magnitud sensiblemente inferiores a n y N , respectivamente.

El algoritmo K-MEANS se puede aplicar sólo cuando la media de un clúster puede ser definida, esto es, no es de aplicación en los casos en que los atributos sean categóricos. Otro inconveniente es su sensibilidad al ruido y a los outliers. Además, la necesidad de dar el valor de K a priori resulta uno de sus mayores puntos débiles, tal y como se detalla en la siguiente sección.

1.4.5.3 Método jerárquico: El Dendograma

Esta técnica parte de la premisa de que todo fenómeno debe ser ordenado para ser entendible. (Sokal & Sneath, 1963) son los autores que más han influido en el desarrollo de esta técnica todavía vigente. Se trata de un conjunto de técnicas (fundamentalmente algoritmos) y métodos estadísticos multivariante de clasificación automática de datos.

Concretamente, a partir de una tabla se trata de situar todos los casos en grupos homogéneos (conglomerados o clústeres) no conocidos previamente pero que los propios datos sugieren (los individuos parecidos serán asignados a un mismo conglomerado, mientras que los diferentes estarán en conglomerados distintos). Es una técnica que se puede utilizar para agrupar individuos o variables. El procedimiento e interpretación de los resultados siguen el mismo patrón. La única diferencia es el contexto donde se ubica la clasificación. Los métodos jerárquicos tratan de clasificar los elementos de un conjunto en una jerarquía; para llegar a este objetivo se parte de una matriz de distancias, que se la calcula usualmente con la distancia Euclídea.

El software Matlab permite realizar este cálculo con el comando `pdist`, que calcula la distancia entre pares de objetos de una matriz de datos y la distancia Euclídea se encuentra por default pre programada. Con la matriz de distancias ya armada es posible aplicar un método aglomerativo.

Para este método se debe cumplir una de las siguientes reglas: Encadenamiento simple, Encadenamiento completo, Media de grupos y Método del centroide.

En Matlab el comando que se usa es `linkage`, el cual se usa en este trabajo con el método `average` o media de grupos:

$$\mathbf{d}(\mathbf{r}, \mathbf{s}) = \frac{1}{n_r n_s} \sum_{i=1}^{n_r} \sum_{j=1}^{n_s} \mathbf{dist}(\mathbf{x}_{ri}, \mathbf{x}_{sj}) \quad (\text{Ecuación 35})$$

Donde:

n_r es el número de objetos en clúster r

x_{ri} es el i -ésimo objeto en un clúster r

Finalmente se pueden observar gráficamente las agrupaciones con el dendograma. Esta herramienta es una representación gráfica del método jerárquico aglomerativo. Viene de la palabra dendro (árbol), por eso se lo conoce como árbol jerárquico. Este diagrama presenta el resultado del agrupamiento, mediante muchas líneas de conexión \cap en forma de árbol. La altura de cada \cap representa la distancia entre los dos objetos que están conectados.

1.5 ANÁLISIS Y AGRUPACIÓN DE LA BASE DE DATOS

1.5.1 ANÁLISIS SEMANAL

La caracterización semanal busca identificar el comportamiento de los armónicos durante los días de la semana, conocer qué días tienen un comportamiento parecido en cuanto a generación de armónicos. Para este propósito se realizan varios análisis concatenados de acuerdo a lo mostrado en Figura 4, teniendo en cuenta los pasos preliminares para la formación de la matriz de datos, presentada en figura. (Chugá, 2015)

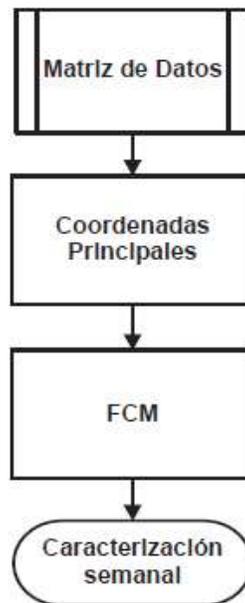


Figura 4. Metodología caracterización semanal

Fuente: Extraído de (Chugá, 2015)

La matriz de datos inicial de dimensiones $(n \times p)$, tiene como variables los 50 armónicos y como observaciones los valores promedio de cada diez minutos de los siete días (sobre la base de lo especificado en la normativa).

La nueva matriz de serie de datos tiene como variables los siete días de la semana y como observaciones los valores promedio de cada diez minutos de un armónico en particular, con el propósito de determinar clústeres de días en función del comportamiento del armónico influyente.

Primero se necesita calcular la matriz de disimilaridad, para lo cual se calcula la media de la matriz de datos, el proceso se lo realiza columna por columna; en este caso i es la variable (los valores de cada diez minutos).

Una vez obtenidos los resultados, se procede a calcular las distancias de las señales discretas con la ecuación 14, donde ij son los individuos y las variables respectivamente. Se procede a calcular las matrices de similitud para cada armónico; por ejemplo, si los armónicos son el 5 y 7 se calculan las matrices de distancia D_5 y D_7 , matrices de similitud Q_5 y Q_7 , y con el uso de los auto vectores y auto valores se calculan las matrices de coordenadas principales Y_5 y Y_7 . Con las últimas matrices se forma una nueva matriz de serie de datos $X_{5,7} = [Y_5 \ Y_7]$.

La nueva matriz es el punto de partida del algoritmo FCM, el cual deberá agrupar los días de la semana dependiendo de los diferentes puntos de datos multidimensionales en un número especificado de grupos, para esta consideración se experimenta con dos, tres y cuatro grupos llegando a la conclusión que semanalmente se tienen tres agrupaciones de días; este valor puede variar dependiendo del criterio que tome la persona que realiza el análisis.

(Chugá, 2015), dice que el proceso anterior se lo realiza para todas las semanas durante seis meses, lo cual dará una amplia visión de la caracterización semanal en este período de tiempo.

1.5.2 ANÁLISIS DIARIO

Esta caracterización trata de mostrar la conducta de los armónicos durante varios periodos del día, qué rangos de tiempo se comportan de manera similar y en cuáles se

tiene mayor presencia de armónicos. La principal herramienta para esta caracterización va a ser el análisis de clustering jerárquico (dendograma). El proceso resumido se lo puede ver en la Figura 5. (Chugá, 2015)

Previamente se construye la matriz de datos de series de tiempo con los armónicos más influyentes en un determinado día, se toma el valor de uno de estos armónicos en el período de una semana. La matriz del armónico de una semana va a ser de orden $m \times n$ donde las observaciones m tienen valores del 1 al 144 (intervalos de diez minutos en un día) y las variables n del 1 al 7 que representan los días de la semana.

$$H_{na,p,q} = \begin{bmatrix} X_{1,1} & X_{1,2} \dots & X_{1,7} \\ X_{2,1} & X_{2,2} \dots & X_{2,7} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{144,1} & X_{144,2} \dots & X_{144,7} \end{bmatrix} \quad \text{(Ecuación 36)}$$

Donde na es el número del armónico, p es la semana y q el mes a analizar.

A esta matriz se le calcula la distancia entre pares de objetos, la distancia usada es la Euclídea comando `pdist`. La formación de un árbol jerárquico que va a agrupar los datos se la realiza aplicando el comando `linkage` y finalmente para ver los resultados gráficamente se emplea el comando `dendograma` que tiene por entrada la matriz del árbol jerárquico.

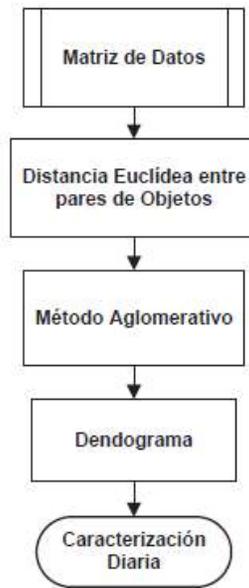


Figura 5. Metodología caracterización diaria
Fuente: Extraído de (Chugá, 2015)

1.5.3 ANÁLISIS MENSUAL

El objetivo de este análisis es determinar un patrón de comportamiento de los armónicos influyentes los días de la semana durante un mes. Esta caracterización se la realiza usando como datos los resultados obtenidos con anterioridad en el análisis semanal. Los datos van a ser utilizados para realizar un análisis de correspondencias y luego se usa la herramienta del dendograma para la agrupación de los días durante el mes. La Figura 6. muestra la metodología que se usa. (Chugá, 2015)

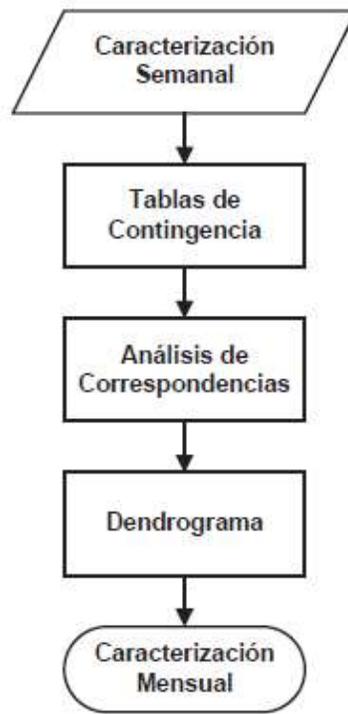


Figura 6. Metodología caracterización mensual
Fuente: Extraído de (Chugá, 2015)

1.6 CONCLUSIÓN DEL CAPÍTULO

Por lo expuesto en la revisión bibliográfica se determina que en la mayoría de citas se hace referencia a la Norma IEEE C57.110 (IEEE Std. C57.110-1998, 1998), esta proporciona un límite de armónicos de corriente para los transformadores, se menciona que el límite superior del factor de distorsión de corriente es 5%.

La mayoría de autores señalan que la presencia de cargas no sinusoidales en el transformador de distribución, es la causa para que el transformador en las horas pico

disminuya su capacidad de transformación, se señala que los armónicos de corriente influyen notablemente en el tiempo de vida útil del transformador.

Todos los autores citados utilizan el método de prorrateo y la metodología propuesta por la norma IEEE C57.110 para evaluar la influencia de los armónicos de corriente en los transformadores. En la literatura especializada revisada no se observa que para analizar la influencia de los armónicos de corriente se haga una previa caracterización de armónicos por alguna técnica estadística.

Clasificar el THDI se justifica porque en la carga es mayor que el THDV, pero su suma en el transformador también es menor respecto al de la carga. No se tienen elementos para evaluar cuanto mayor es en cada usuario ni como evaluar su suma en el transformador que es el dato que permitirá evaluar el calentamiento adicional que generan los armónicos de corriente.

La literatura especializada menciona que la técnica clúster es un método estadístico que nos permite ordenar objetos en grupos de forma que el grado de asociación/similitud entre miembros del mismo clúster sea más fuerte que el grado de asociación/similitud entre miembros de diferentes clústeres, esto permitirá buscar un comportamiento similar de los armónicos de corriente en la semana, y agruparlos en un solo grupo, llegándose a determinar el peor armónico en un intervalo de tiempo, este permitirá evaluar *el impacto de los armónicos de corriente en los transformadores de distribución monofásicos*

En la mayoría de los artículos no aplican algún método de clasificación para caracterizar los armónicos de corriente. Debido a la falta de herramientas con estándares y recomendaciones apropiadas para todo tipo de aplicaciones y configuraciones de clúster, cada usuario desarrolla por sí mismos sus propias herramientas y aplicaciones.

CAPÍTULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

Los métodos y técnicas que se utilizarán son el soporte técnico para esta investigación, se efectuará la observación sistemática, método deductivo, método de análisis y método de síntesis, de las diferentes unidades de observación a fin de alcanzar resultados que permitan el cumplimiento de cada uno de los objetivos, es decir que tengan un carácter cuantitativo, cualitativo, descriptivo y explicativo de cada uno de los problemas a resolver.

2. MÉTODOS DE CÁLCULO

2.1 CLÚSTER EN MATLAB

Para realizar una minería de datos es necesario conocer cuáles son las técnicas que se utilizan para clasificar o agrupar los datos, que en este caso son los armónicos de corriente en los transformadores de distribución, para formar los llamados clúster o grupos que poseen características similares y que juntos forman una curva típica, existen variados métodos o algoritmos de clasificación para realizar la curva característica. Principalmente se clasifican en técnicas estadísticas y técnicas de lógica difusa.

2.1.1 TÉCNICA ESTADÍSTICAS

Los métodos estadísticos son del tipo determinístico, en decir, cada medición pertenece a un único clúster. Además, pueden ser jerárquicos, lo que significa que los consumos se clasifican de manera ascendente o descendente en pasos sucesivos, o pueden estar basadas en una función objetivo, donde la agrupación va a ser resultado de una función de optimización. A continuación, se detallará las técnicas seleccionadas.

2.1.1.1 KMEANS

Este método, también conocido como C-MEANS, está basado en una función objetivo de minimización de distancia entre mediciones. Consiste en agrupar un set de datos (vectores) $x^{(n)}$ ($n = 1, \dots, N$) en $k = 1, \dots, K$ clústeres a través de un proceso iterativo. El primer paso es definir los centros $c^{(k)}$ de los k clústeres de forma aleatoria. El segundo paso es calcular la distancia (usualmente Euclidiana) $x^{(n)} - c^{(k)}$ entre cada dato y cada

centro de clúster. El tercer paso es agrupar cada dato con el centro del clúster en que la distancia haya sido la mínima y se calcula el nuevo centro del clúster $c^{(k)}$ como el promedio de los datos que pertenecen a ese clúster.

Luego se repite el segundo paso hasta que el centro de los clústeres se estabilice y su variación sea inferior a un valor ε antes definido. La función objetivo corresponde a la expresión que se muestra en la ecuación.

$$J(U, C) = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N u_{k,n} \|x^{(n)} - c^{(k)}\|^2 \quad \text{(Ecuación 37)}$$

Donde:

J: Centro de cada clúster

C: Matriz de pertenencia a cada clúster (binaria)

U: Función objetivo

Los coeficientes de la matriz de pertenencia se calculan con la expresión:

$$u_{k,n} = \begin{cases} 1, & \text{si } \|x^{(n)} - c^{(k)}\| = \min(\|x^{(n)} - c^{(j)}\|) \forall j \\ 0, & \text{si } \|x^{(n)} - c^{(k)}\| \neq \min(\|x^{(n)} - c^{(j)}\|) \forall j \end{cases} \quad \text{(Ecuación 38)}$$

Finalmente, los centros de cada clúster se calculan como se muestra en la ecuación

$$c^{(k)} = \frac{\sum_{n=1}^N u_{k,n} x^{(n)}}{\sum_{n=1}^N u_{k,n}} \quad \text{(Ecuación 39)}$$

Matlab posee un toolbox de estadísticas que realiza el algoritmo de K-MEANS clustering.

La sintaxis es que ejecuta esta operación se describe a continuación:

[...] =KMEANS (...,'param1', val1, 'param2', val2,)

Donde entre otras, devuelve:

- a) La matriz de pertenencia
- b) La matriz de centroides
- c) La matriz de distancias

Parámetros de entrada:

- Criterio para medir la distancia entre la matriz de datos y los centroides (la medida implícita es la norma Euclídea).
- La forma en que se establecen las condiciones iniciales de los centroides (de forma predeterminada escoge como valores iniciales de los centroides a valores de la matriz de datos)
- Numero de iteraciones de la búsqueda de los centroides (el valor implícito es 100).

Las variantes del algoritmo se basan en

- Condiciones iniciales de los centroides
- Método para determinar la distancia entre las variables y los centroides
- Cálculo de la pertenencia de variables a un grupo
- Criterio de parada del algoritmo

2.1.1.2 DENDOGRAMA

Este método es del tipo jerárquico. El primer paso consiste en agrupar el set de datos (vectores) $x^{(n)}$ ($n = 1, \dots, N$) en N clústeres, en que cada uno de esos clústeres será un dato distinto del set y que representará el primer nivel del árbol. Luego se construye una matriz de $N \times N$ que representa la similitud (utilizando algún criterio de distancia) entre cada una de las mediciones.

Utilizando esta matriz se construye el árbol de decisión, en que el segundo nivel será de $N-1$ clústeres, ya que los clústeres más cercanos se unirán para formar un nuevo clúster.

De esta forma para llegar a K clústeres el árbol deberá tener $N+1-K$ niveles. Existen dos criterios para decidir cuáles serán los clústeres que se fusionarán al pasar al nivel siguiente:

Average distance: con este método la fusión de dos clústeres s y t se decidirá de acuerdo al promedio de las distancias de todos los pares de datos de los dos clústeres $d_A(s, t)$, según se muestra en la ecuación.

$$d_A(s, t) = \frac{1}{n^{(s)}n^{(t)}} \sum_{i=1}^{n^{(s)}} \sum_{j=1}^{n^{(t)}} d(x_i^{(s)}, x_j^{(t)}) \quad \text{(Ecuación 40)}$$

Donde:

$n^{(s)}$, $n^{(t)}$: Número de objetos en grupos s y t

En Matlab el dendograma genera un trazado clúster binario, consta de muchas líneas en forma de U que conectan los puntos de datos, la altura de cada U representa la distancia entre los dos puntos que están conectados.

Si hay 30 o menos puntos de datos en el conjunto de datos original, entonces cada hoja en el dendograma se corresponde con un punto de datos.

Si hay más de 30 puntos de datos, a continuación, dendograma colapsa ramas inferiores de manera que hay 30 nodos hoja. Como resultado, algunas hojas en la trama corresponden a más de un punto de datos.

2.1.1.3 MÉTODO DE WARD

Con este método la fusión de dos clústeres s y t se decidirá de acuerdo a que el incremento de la suma de distancias al cuadrado de los centros del clúster al ser unidos $d_W(s, t)$ sea mínima, según lo indica la ecuación.

$$d_W(s, t) = \frac{n^{(s)}n^{(t)}}{n^{(s)} + n^{(t)}} d^2(\bar{x}^{(s)}, \bar{x}^{(t)}) \quad \text{(Ecuación 41)}$$

El método jerárquico aglomerativo más utilizado es el de Ward, este procedimiento trata de identificar grupos de casos, tratando de minimizar la varianza dentro de los grupos. Se minimiza la distancia euclidiana cuadrada a las medias del conglomerado o grupo. No usa la matriz de distancias. En cada paso, se elige la unión de grupos que minimice la suma de varianzas sobre todos los grupos.

$$W = \sum_{g=1}^G \sum_{i=1}^{N_g} \|x_i - \bar{x}_g\|^2 = \sum_{g=1}^G \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{k=1}^K (x_{i,k} - \bar{x}_{g,k})^2 \quad \text{(Ecuación 42)}$$

2.1.2 TÉCNICA DIFUSAS

Las técnicas difusas se caracterizan por ser de tipo probabilísticas, es decir, a cada dato se le asigna un grado o probabilidad de pertenecer a un clúster determinado. Dentro de esta familia se analizará el método FUZZY C-MEANS (FCM).

2.1.2.1 FUZZY C-MEANS

Este método se diferencia de K-MEANS en la naturaleza de la matriz de pertenencia U , que en este caso deja de ser binaria y se transforma en continua, tomando valores entre 0 y 1 según el grado de pertenencia de cada medición a cada clúster. Además, como es una técnica difusa se define el parámetro m llamado amount of fuzzyness, que pertenece al rango $(1, \infty)$ y que será el exponente de la matriz de pertenencia U . La función objetivo corresponde a la expresión que se muestra en la ecuación

$$J_m(U, C) = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N (u_{k,n})^m \|x^n - c^k\|^2 \quad \text{(Ecuación 43)}$$

Los coeficientes de pertenencia de la matriz U se calculan como se detalla en la ecuación

$$u_{k,n} = \frac{1}{\sum_{i=1}^k \left(\frac{d^2(x^{(n)}, c^{(k)})}{d^2(x^{(n)}, c^{(i)})} \right)^{\frac{1}{m-1}}}; \sum_{i=1}^k u_{k,n} = 1, \forall n \quad \text{(Ecuación 44)}$$

Conocido en el programa Matlab como FCM, es un método de agrupamiento que permite cada punto de datos pertenecen a varios clústeres con diversos grados de pertenencia.

FCM realiza los pasos siguientes durante la agrupación:

1. Al azar inicializar los valores de pertenencia de clúster
2. Calcular los centros de clúster:
3. Actualización del coeficiente
4. Calcular la Función objetivo m , J_m .
5. Repita los Pasos 2 a 4 hasta J_m mejora menor que un umbral mínimo especificado o hasta después de un número máximo especificado de iteraciones.

Las condiciones iniciales que necesita son:

- Datos de entrada
- Centroides iniciales
- Condiciones iniciales (influencia del grado de pertenencia y numero de centroides)

En el algoritmo FUZZY C-MEANS las condiciones iniciales

c: número de clúster

z: []matriz de datos

V: [] valores iniciales del clúster

Desde l=1 hasta...criterio de mínima distancia

- Se calcula la matriz de pertenencia
- Se calcula la matriz de centroides o clúster

La función principal es:

[CENTER, U]=FCM (DATA, N_CLUSTER, OPTIONS)

Donde:

CENTER: Coordenado de los centroides

U: Matriz de pertenencia

OPTIONS (1): Expone de la matriz U (implícito: 2.0)

OPTIONS (2): Máximo número de interacciones (implícito: 100)

OPTIONS (3): Diferencia entre variaciones de centroides deseado (implícito: 1e-5)

OPTIONS (4): Mostrar las iteraciones (implícito: 1)

Cada una de las técnicas presentadas en los párrafos anteriores posee fortalezas y debilidades frente a las demás. A modo informativo, en la tabla siguiente se describe un resumen con las principales características de cada método.

Tabla 2

Resumen de fortalezas y debilidades de cada técnica de agrupamiento

| Método | Fortalezas | Debilidades |
|----------------------|--|---|
| K-MEANS | <ul style="list-style-type: none"> • Velocidad de procesamiento • Habilidad para clasificar datos de entrada | <ul style="list-style-type: none"> • Sensibilidad al punto de Partida • Matriz de pertenencia binaria |
| Dendograma | <ul style="list-style-type: none"> • Detección de curvas atípicas • No es sensible al punto de partida | <ul style="list-style-type: none"> • Clústeres demasiado grandes • Velocidad de procesamiento |
| Ward | <ul style="list-style-type: none"> • Previene la formación de clústeres grandes • No es sensible al punto de partida | <ul style="list-style-type: none"> • Velocidad de procesamiento |
| FUZZY C-MEANS | <ul style="list-style-type: none"> • Matriz de pertenencia continua • Habilidad para clasificar datos de entrada | <ul style="list-style-type: none"> • Velocidad de procesamiento |

Fuente: Extraído de (Gómez D. , 2007)

2.1.3 ÍNDICES DE VALIDEZ

Todas las técnicas descritas anteriormente tienen el inconveniente de que hay que ingresar el número de clústeres que se desea tener, por ello un punto importante será poder definir cuál es el número óptimo de clústeres para cada set de datos. Desde el punto de vista de desarrollar alguna aplicación el número de clústeres debería ser lo más pequeño posible, tal que se encuentren bien definidos, pero por otro lado un número pequeño arrojará una gran dispersión en los resultados y el error cometido será muy grande.

Es por esta razón que existen los índices de validez de clústeres, que determinan el número adecuado haciendo una comparación de los resultados obtenidos para distintos números.

La literatura propone una diversidad de métodos para analizar la validez de cada agrupación, sin embargo, no es un objetivo de trabajo estudiar detalladamente cada uno de los métodos, por lo que sólo serán nombrados algunos de ellos. (Gómez D. , 2007)

Los más utilizados son:

Índice DBI (Davies-Bouldin Index). Este índice es el más popular dentro de la literatura consultada. Compara la distancia entre los datos al interior de cada clúster con la distancia entre los centros de cada clúster. La mejor elección será cuando el índice sea más pequeño.

Índices MIA (Mean Index Adequacy). Este índice está basado en la distancia Euclidiana que tiene cada medida con respecto al centro del clúster al que pertenece. Calcula el promedio de las distancias (o dispersiones) de cada centro de clúster frente a las medidas que lo integran. Al igual que el método anterior, la mejor elección es la que entrega el índice más pequeño.

Índice Knee Citation. Este índice difiere de los anteriores, ya que es una función decreciente a medida que se aumenta el número de clústeres, por lo que su interpretación es más subjetiva.

Es importante destacar que no siempre los resultados serán los mismos, ya que cada indicador realiza distintos cálculos, pero sirven para tener una certeza en que se está disminuyendo el error cometido en las aproximaciones de consumos por clústeres.

2.2 EVALUACIÓN ANALÍTICA DEL TRANSFORMADOR APLICANDO LA NORMA ANSI IEEE C57.110

2.2.1 Introducción

La norma ANSI/IEEE C57.110 titulada como "procedimiento recomendado para la determinación de la capacidad del transformador bajo cargas no sinusoidales" permite determinar la reducción de la capacidad y la corriente permisible del transformador cuando trabaja con corrientes no sinusoidales.

Este procedimiento determina el nivel de reducción del corriente nominal producto del aumento de armónicos, encontrar la capacidad adecuada de un transformador (seco o sumergido en aceite) que alimenta cargas no lineales para evitar la reducción de vida del equipo. (Romero, 2013)

2.2.2 Métodos para calcular los efectos del transformador ante corrientes no sinusoidales

Estos métodos permiten evaluar un transformador existente o nuevo.

Donde los transformadores suministran corrientes de carga no sinusoidales:

- Un transformador nuevo no será totalmente dedicado a un rectificador de carga.
- Un transformador existente estará obligado a suministrar una carga, parte de la cual es no sinusoidales.

El primer método tiene por objeto ilustrar, los cálculos de aquellos que tienen acceso a información detallada sobre la distribución de la densidad, de la pérdida dentro de cada uno de los devanados del transformador, enfatizará la información necesaria para especificar un nuevo transformador y muestran cómo esta información es utilizada por los diseñadores de transformadores.

El segundo método es menos preciso y está destinado para el uso de aquellos con acceso a informe de prueba certificada por transformador sólo datos y será empleado principalmente por los usuarios.

Estos métodos evalúan la factibilidad de aplicar carga no sinusoidales, las corrientes actuales de los transformadores y clarificar los requisitos de especificación de nuevos transformadores a no sinusoidales, suministro de cargas.

Los transformadores nuevos que están destinados a alimentar cargas con alto contenido armónico debe especificarse con una distribución de corriente armónica. El diseñador no puede "asumir" el usuario tampoco puede esperar el diseñador para utilizar "estándar" o "típico" cuadros de distribución actual.

Si el contenido de armónicos de la carga es desconocido, entonces tanto el usuario como el diseñador del transformador están en riesgo y deben adoptarse medidas razonables para asegurar un diseño conservador para la aplicación. (Romero, 2013)

2.2.3 Pérdidas del Transformador

Los estándares IEEE std C57.12.90 y IEEE std C57.12.91 categorizan las pérdidas de los transformadores como pérdidas sin carga (pérdidas por excitación) y pérdidas con carga (pérdidas por impedancia) y define las pérdidas totales como la sumatoria de las pérdidas sin carga y las pérdidas con carga y se expresa como se muestra a continuación:

$$P_T = P_{NL} + P_{LL} \quad \text{(Ecuación 45)}$$

Donde:

P_T : Pérdidas totales

P_{NL} : Pérdidas sin carga

P_{LL} : Pérdidas con carga

Las pérdidas con carga se subdividen en pérdidas por I^2R y pérdidas parásitas. En las pérdidas parásitas están incluidas las pérdidas por corrientes de Eddy (P_{EC}) y pérdidas parásitas en otros componentes diferentes al devanado (P_{OSL}).

Siendo las pérdidas con carga definidas por la siguiente ecuación:

$$P_{LL} = I^2R + P_{EC} + P_{OSL} \quad \text{(Ecuación 46)}$$

Donde:

P_{LL} : Pérdidas con carga.

I^2R : Pérdidas debidas a las corrientes de carga en los devanados.

P_{EC} : Pérdidas por corrientes parásitas en los devanados (Eddy).

P_{OSL} : Pérdidas por dispersión en fijación depósitos

Las pérdidas I^2R se pueden encontrar midiendo la resistencia dc del devanado y multiplicándolo por la corriente de carga.

2.2.4 Efectos de los armónicos en pérdidas con carga

2.2.4.1 Efectos de los armónicos en las pérdidas I^2R .

Si el valor RMS de la corriente de carga aumenta debido a componentes armónicos, entonces las pérdidas deberían incrementarse. Estas pérdidas bajo condiciones armónicas podría representarse así:

$$P_{I^2R} = R_{dc} * I^2 = R_{dc} * \sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_{hmax}^2 \quad (\text{Ecuación 47})$$

Donde:

P_{I^2R} : Pérdidas armónicos

R_{dc} : Resistencia del devanado

I^2 : Corriente

H: Orden armónico 1,2,3, etc.

h_{max} : máximo número de armónicos significativos

2.2.4.2 Efectos de los armónicos en las pérdidas por corrientes de Eddy.

Las pérdidas por corrientes de Eddy son proporcionales al cuadrado de la corriente y la frecuencia armónica en condiciones armónicas. Estas pérdidas se pueden calcular así:

$$P_{EC} = P_{EC-R} * \sum_{h=1}^{h=h_{max}} h^2 \left[\frac{I_h}{I_R} \right]^2 \quad (\text{Ecuación 48})$$

Donde:

P_{EC-R} : Pérdidas por corrientes parásitas en los devanados a corriente y frecuencia nominal

I_h : Corriente del h-ésimo armónico

I_R : Corriente nominal

2.2.4.3 Efectos de los armónicos en otras pérdidas parásitas.

Las pérdidas parásitas son asumidas que varían con el cuadrado de la corriente RMS y la frecuencia armónica a un factor de 0,8 como se indica a continuación:

$$P_{OSL} = P_{OSL-R} * \sum_{h=1}^{h=h_{max}} h^{0.8} \left[\frac{I_h}{I_R} \right]^2 \quad \text{(Ecuación 49)}$$

Donde:

P_{OSL-R} = Pérdidas parásitas bajo corrientes nominales

2.2.4.4 Factor de armónico para las pérdidas por corrientes de Eddy.

Como resultado de la corriente armónica de carga RMS, existe un factor aplicado que es proporcional a las pérdidas por corrientes de Eddy. Este factor es conocido como F_{HL} . F_{HL} es la relación entre las pérdidas por corrientes de Eddy debida a los armónicos (P_{EC}) y las pérdidas por corrientes de Eddy a frecuencia del sistema cuando no existen corrientes armónicas (P_{EC-O}). Esto se puede expresar de la siguiente manera:

$$F_{HL} = \frac{P_{EC}}{P_{EC-O}} * \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} h^2 [I_h]^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} [I_h]^2} \quad \text{(Ecuación 50)}$$

Donde:

P_{EC-O} : Pérdidas por unidad de corriente de Foucault en frecuencia de potencia, para el cálculo del factor de armónico adaptado para la corriente de carga fundamental tenemos que:

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} h^2 \left[\frac{I_h}{I} \right]^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I} \right]^2} \quad \text{(Ecuación 51)}$$

2.2.4.5 Factor de armónico para otras pérdidas parásitas.

En transformadores sumergidos en aceite las pérdidas pueden tener efectos sustanciales debido a que producen calentamiento adicional al líquido refrigerante. Expresada por la siguiente ecuación:

$$F_{HL-STR} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} h^{0.8} \left[\frac{I_h}{I} \right]^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I} \right]^2} \quad \text{(Ecuación 52)}$$

2.2.4.6 Evaluación de pérdidas y capacidad de transformadores bajo cargas armónicas.

A condiciones de cargas lineales se aplica en la siguiente ecuación:

$$P_{LL-R}(pu) = 1 + P_{EC-R}(pu) + P_{OSL-R}(pu) \quad \text{(Ecuación 53)}$$

Donde:

P_{LL-R} : Pérdidas con carga en condiciones nominales

1: Pérdidas debidas a las corrientes de carga en los devanados.

P_{EC-R} : Pérdidas por corrientes parásitas en los devanados a condiciones nominales

P_{OSL-R} : Otras pérdidas parásitas bajo corriente nominal.

Para calcular las pérdidas cuando un transformador sufre una carga armónica se expresa así:

$$P_{LL}(pu) = I^2(pu) * [1 + F_{HL} * P_{EC-R}(pu) + F_{HL-STR} * P_{OSL-R}(pu)] \quad \text{(Ecuación 54)}$$

Donde:

F_{HL-STR} : Factor de pérdida de armónicos para otras pérdidas parásitas

En el transformador la corriente permitida está dada por la siguiente ecuación:

$$I_{max}(pu) = \sqrt{\frac{P_{LL-R}(pu)}{1 + [F_{HL} * P_{EC-R}(pu)] + [F_{HL-STR} * P_{OSL-R}(pu)]}} \quad \text{(Ecuación 55)}$$

Usando esta ecuación se encuentra la corriente permisible y se puede determinar el transformador

2.2.5 Procedimiento recomendado por la norma IEEE std C57.110 para evaluar la capacidad de carga de un transformador existente.

Para evaluar la capacidad de carga de un transformador sumergido en aceite mediante IEEE std C57.110 es necesario tener un certificado de pruebas del fabricante para transformadores particulares y un estudio de análisis de carga para conocer el espectro armónico de la carga del equipo.

Calculo típico para transformadores sumergidos en aceite:

Paso 1. Parámetros reportados en el registro de pruebas del equipo.

Tabla 3*Parámetros Reportados en el certificado de Pruebas*

| Potencia (kVA) | Tipo | Tensión en primario (kV) | Tensión en secundario (kV) | Corriente en primario (A) |
|-----------------------------|------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------------|
| | | | | |
| Corriente en secundario (A) | Pérdidas con carga (W) | Pérdidas en vacío (W) | R ₁ (Ω) | R ₂ (Ω) |
| | | | | |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia**Paso 2.** Calcular las pérdidas parásitas totales:

$$P_{TSL-R} = P_{LL-R} - K * [I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2] \quad \text{(Ecuación 56)}$$

Donde:

P_{TSL-R}: Total de pérdidas parásitas bajo condiciones nominales.P_{LL-R}: Pérdidas con carga bajo condiciones nominales.I₁: Corriente de línea en el lado primario bajo condiciones de carga y frecuencia nominal.I₂: Corriente de línea en el lado secundario bajo condiciones de carga y frecuencia nominal.R₁: Resistencia dc medida entre dos terminales del lado primario.R₂: Resistencia dc medida entre dos terminales del lado secundario.

K: Constante que depende del número de fases (K=1 para transformadores monofásicos)

Paso 3. Calcular las pérdidas por corrientes de Eddy bajo condiciones nominales:

$$P_{EC-R} = P_{TSL-R} * 0.33 \quad \text{(Ecuación 57)}$$

Donde:

P_{TSL-R}: Total de pérdidas parásitas bajo condiciones nominales.P_{EC-R}: Pérdidas por corrientes de Eddy bajo condiciones nominales.**Paso 4.** Calcular las máximas pérdidas por corrientes de Eddy en pu mediante la siguiente ecuación:

$$P_{OSL-R} = P_{TSL-R} - P_{EC-R} \quad \text{(Ecuación 58)}$$

Donde:

P_{OSL-R} : Otras pérdidas parásitas bajo condiciones nominales.

P_{TSL-R} : Total de pérdidas parásitas bajo condiciones nominales.

P_{EC-R} : Pérdidas por corrientes de Eddy bajo condiciones nominales.

Paso 5. Es necesario tener la distribución armónica para la máxima corriente de carga del equipo.

Tabla 4

Espectro armónico para transformadores sumergidos en aceite

| ESPECTRO ARMÓNICO | | | | | | |
|-------------------|-------------------|----------------------------------|-------|--------------------------------------|-----------|--|
| h | $\frac{I_h}{I_1}$ | $\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2$ | h^2 | $\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^2$ | $h^{0.8}$ | $\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^{0.8}$ |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

A partir de aquí se obtienen valores de FHL y F_{HL-STR}

Paso 6. Calculamos las pérdidas a partir del espectro armónico presentado anteriormente y la tabulamos en la siguiente tabla.

Tabla 5

Cálculo de pérdidas para transformadores sumergidos en aceite

| Tipo de carga | Pérdida nominal (W) | Pérdida con carga bajo corriente armónica (W) | Factor de Pérdida armónica | Pérdida con carga bajo corrección armónica (W) |
|--------------------------------|---------------------|---|----------------------------|--|
| Sin carga | | | | |
| I^2R | | | | |
| Corriente de Eddy en devanados | | | | |
| Otras pérdidas | | | | |
| Total | | | | |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

Paso 7. Finalmente se aplican las ecuaciones 48, 49 y 50 para obtener la corriente máxima en por unidad (pu) y a partir de aquí obtener el valor de corriente de carga y potencia adecuada para el transformador.

2.3 CONCLUSIÓN DEL CAPÍTULO

En este capítulo se presenta el desarrollo de una metodología generalizada, a partir de las recomendaciones de la norma ANSI/IEEE C57.110, para determinar las pérdidas en transformadores de distribución monofásicos con derivación central, alimentando cargas no lineales de diferentes contenidos armónicos por cada semidevanado, analiza los principales efectos de la distorsión armónica sobre los componentes internos del transformador, así como las variaciones en el comportamiento del flujo magnético, clases y tipos de pérdidas, al igual que las recomendaciones prácticas para la evaluación del máximo valor eficaz de corriente de carga no sinusoidal, tanto para transformadores tipo seco como inmersos en líquido.

Con los valores de carga estimados se logra proteger al transformador, asegurando que las pérdidas más altas no superen el valor de las pérdidas para las cuales fue diseñado, evitando, de esta forma, los efectos de fenómenos ocasionados por la presencia de corrientes no sinusoidales.

Se demuestra que en estos casos la energía cuantificada como pérdida puede ser considerable solo cuando se parte de valores elevados de THD de corriente, por lo que el efecto de circulación de corrientes armónicas no debe ser sobreestimado, aunque la calidad de la potencia es un aspecto a tener en cuenta al evaluar oportunidades de mejora en el desempeño energético en las redes actuales.

El proceso para hallar el espectro armónico de los transformadores de distribución, tiende a realizarse varios cálculos, eventualmente programación de algoritmos y análisis estadísticos, es por ello que se hace necesario encontrar alguna plataforma que permita realizar estas actividades, principalmente la programación de los distintos métodos de clasificación estudiados.

El software de cálculo Matlab posee en el toolbox la herramienta de clustering, así, los datos serán cargados en forma matricial correspondientes a las mediciones horarias normalizadas.

La decisión particular de utilizar alguna de las técnicas mencionadas dependerá de las aplicaciones que se quiera realizar, teniendo en consideración las características expuestas en la literatura y los requerimientos de la investigación.

Al utilizar el método clustering tenemos como ventaja que agrupa gran cantidad de elementos por patrones de comportamiento y similitud, aplicando cada una de las técnicas se puede encontrar el espectro armónico de corriente de los transformadores de Distribución y con la utilización de la norma en estudio se verificará la capacidad que soporta cada uno de las fases de los transformadores.

Por lo tanto, la presencia de armónicos en los transformadores se verá disminuida y así aumentará la vida de los transformadores hasta un 5%, disminuyendo las pérdidas y evitando el sobrecalentamiento en los mismos.

CAPÍTULO III

RESULTADOS

3.1 MÉTODO ANALÍTICO PARA EL ANÁLISIS CLÚSTER DE LOS THDI PRESENTES EN LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN MONOFÁSICOS

Para realizar la investigación nos basamos primeramente en que los armónicos en el sistema eléctrico de distribución se presentan por la conexión de cargas no lineales, las cuales se han incrementado sustancialmente con la incorporación de nuevos equipos electrónicos. Éstas son causantes de las deformaciones de las ondas de tensión y corriente de alimentación y del incremento de las pérdidas según lo expuesto en la literatura técnica revisada. Los equipos que han sufrido un impacto considerable por el paso de corrientes distorsionadas son los transformadores cuyos efectos presentes son reflejo de las características del tipo de carga que alimentan. La distorsión de las corrientes de la carga produce un calentamiento excesivo en los equipos de los sistemas eléctricos produciendo: operaciones erráticas de las protecciones, deterioro de los conductores y equipos eléctricos y el envejecimiento prematuro de los equipos de este sistema (Baggini, 2008), (Bravo, Llorent, & Alberto, 2004), evitando que el transformador pueda funcionar a su capacidad de placa nominal.

Las consecuencias de conectar cargas no lineales al transformador producen un incremento en ruido y la vibración que da como resultado deformaciones en sus partes y producción de gases disueltos en el aceite, lo que reduce su rigidez dieléctrica. Esta situación provoca el envejecimiento prematuro de su aislamiento y, finalmente, de la vida útil del transformador, estimada en 20 años (Acevedo & Ortiz, 2008).

Por lo expuesto y señalado en la revisión bibliográfica se puede identificar que en la actualidad hay una gran influencia de los THDI en los transformadores de distribución, por lo que es necesario evaluar el impacto que estos generan en los transformadores considerando un espectro armónico típico.

Para conformar el espectro armónico característico en transformadores de distribución monofásicos de 10, 15, 25 y 37,5 kVA fue necesario procesar una base de datos conformada por tres años de medición (2013-2015).

En la Tabla 6 se presenta la cantidad de datos que fue procesada en cada año en análisis.

Tabla 6

Cantidad de datos procesados en los años 2013-2014-2015

| CAPACIDAD DEL TRANSFORMADOR MONOFÁSICO(kVA) | NÚMERO DE DATOS ANALIZADOS EN EL PERIODO DE EVALUACIÓN (FASE A Y B) | CANTIDAD DE TRANSFORMADORES ANALIZADOS | ARMÓNICOS EVALUADOS |
|---|---|--|---------------------|
| 10 | 1272 | 106 | 1,3,5,7,9,11 |
| 15 | 1344 | 112 | 1,3,5,7,9,11 |
| 25 | 1296 | 108 | 1,3,5,7,9,11 |
| 37,5 | 612 | 51 | 1,3,5,7,9,11 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

3.1.1 ANÁLISIS CLÚSTER

De la revisión de literatura técnica efectuada se determinó que la mayoría de autores citados mencionan que la técnica clúster es muy útil cuando se busca determinar un comportamiento característico de un evento.

En la revisión de literatura se menciona además que las técnicas más utilizadas para efectuar un análisis clúster es la técnica del dendograma, K-MEANS y FUZZY C-MEANS.

Estas técnicas se utilizaron para determinar la cantidad de clústeres y elementos que debe poseer cada clúster, asimismo para evaluar cómo se comportan los armónicos a nivel de mensual.

Para conformar los clústeres primeramente fue necesario escoger de la base de datos proporcionada por la EERSSA (datos proporcionados con fines académicos), el promedio de los armónicos de corriente de cada uno de los transformadores de Distribución monofásica.

Para indicar el procedimiento desarrollado a cada uno de los transformadores estudiados, seleccionamos el de 10 kVA, por lo tanto, el primer paso fue seleccionar el promedio de la corriente armónica de los 106 transformadores existentes para cada mes del año 2013,2014,2015.

Para conformar los clústeres fue necesario efectuar los siguientes métodos de cálculo:

1. Base de datos. La conformación de esta base de datos fue estructurada en dos etapas.

- **Primera etapa.** Esta se encuentra conformada por el promedio de cada armónico de corriente (THDI) para cada mes del año para la fase A y B del transformador, se consideró evaluar desde el armónico 1 al 11, Tabla 7 se presenta la forma de cómo se efectuó el primer procesamiento de datos.

Tabla 7

Procesamiento de datos THDI mensual medidos en Amperios

| JUNIO 2014 | | | | | | | |
|-------------------|-------|--------|-----------|--------|---------|--------------|---------|
| CAPACIDAD: 10 KVA | | | FASE: A | | | ARMÓNICO: H1 | |
| HORA | LUNES | MARTES | MIÉRCOLES | JUEVES | VIERNES | SÁBADO | DOMINGO |
| 0H00 | 21,56 | 21,45 | 22,77 | 22,94 | 28,03 | 22,86 | 18,31 |
| 1H00 | 20,01 | 21,18 | 20,85 | 22,13 | 29,79 | 22,77 | 17,33 |
| 2H00 | 21,10 | 21,18 | 20,74 | 22,24 | 28,57 | 19,78 | 18,09 |
| 3H00 | 21,18 | 24,83 | 18,96 | 22,17 | 27,91 | 20,42 | 17,22 |
| 4H00 | 20,00 | 25,52 | 20,45 | 21,64 | 27,55 | 23,02 | 17,38 |
| 5H00 | 22,95 | 28,46 | 20,80 | 23,36 | 31,02 | 21,39 | 20,70 |
| 6H00 | 25,00 | 27,81 | 20,52 | 27,09 | 34,70 | 26,00 | 25,52 |
| 7H00 | 19,62 | 19,42 | 16,59 | 20,21 | 27,52 | 17,26 | 18,45 |
| 8H00 | 15,22 | 17,99 | 15,88 | 16,98 | 20,63 | 16,34 | 16,54 |
| 9H00 | 15,61 | 19,49 | 17,00 | 19,18 | 21,16 | 18,34 | 14,82 |
| 10H00 | 16,70 | 16,75 | 20,84 | 15,09 | 21,71 | 22,20 | 15,46 |
| 11H00 | 19,92 | 20,22 | 15,34 | 18,17 | 25,91 | 20,70 | 17,10 |
| 12H00 | 22,49 | 21,39 | 20,50 | 16,42 | 22,75 | 20,13 | 19,53 |
| 13H00 | 18,66 | 22,20 | 22,65 | 16,59 | 25,02 | 19,09 | 17,98 |
| 14H00 | 18,45 | 17,34 | 23,58 | 21,74 | 24,80 | 18,50 | 19,09 |
| 15H00 | 21,46 | 17,82 | 20,31 | 20,21 | 27,99 | 18,11 | 18,05 |
| 16H00 | 19,75 | 18,01 | 18,92 | 19,40 | 28,24 | 19,14 | 20,26 |
| 17H00 | 18,46 | 19,17 | 19,11 | 18,11 | 26,73 | 22,43 | 20,97 |
| 18H00 | 27,00 | 26,32 | 26,04 | 28,23 | 35,55 | 27,16 | 29,00 |
| 19H00 | 35,32 | 33,33 | 30,38 | 36,73 | 47,98 | 40,04 | 34,95 |
| 20H00 | 34,64 | 34,60 | 35,25 | 35,68 | 44,46 | 40,73 | 36,05 |
| 21H00 | 31,83 | 29,52 | 31,94 | 34,53 | 39,97 | 30,21 | 31,48 |
| 22H00 | 26,01 | 27,61 | 26,12 | 32,45 | 34,51 | 24,90 | 28,47 |
| 23H00 | 27,13 | 23,07 | 23,24 | 30,83 | 30,37 | 21,27 | 22,28 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

Esta base de datos representa el promedio del mes que fue medido en el transformador, en Anexo Digital 1, se presenta los resultados de cada mes para el periodo evaluado (año 2013-2014-2015).

- **Segunda etapa.** Una vez conformada la base de datos en la primera etapa, fue necesario llevar éstos a valores por unidad, los cuales serán asignados como entrada de cálculo para la conformación e interpretación de los clústeres.

En la tabla 8 se muestran los valores considerados valor base y en el Anexo 2 se presentan todos los valores determinados para cada transformador.

Tabla 8

Valores base THDI mensual medidos en Amperios

| TRANSFORMADOR 10 kVA | | | | | | |
|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| JUNIO 2014 | | | | | | |
| ARMÓNICO | H1 | H3 | H5 | H7 | H9 | H11 |
| FASE A | 47,98 | 4,938 | 3,15 | 0,95 | 2,40 | 1,16 |
| FASE B | 46,408 | 7,80 | 3,96 | 1,28 | 2,84 | 1,27 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

El valor por unidad obtenido se puede apreciar en la Tabla 9, en el Anexo Digital 3, se presentan la base de datos convertida por unidad. Se debe convertir en una matriz de 7 x 24, esta matriz será la base de datos que deberá ser ingresada como entrada a Matlab.

Tabla 9

Valores por unidad THDI mensual

| FASE: | A | | CAPACIDAD: 10 kVA | | | ARMÓNICO: H1 | |
|--------------|--------------|---------------|--------------------------|---------------|----------------|---------------------|----------------|
| MES: | JUNIO | | AÑO: 2014 | | | | |
| HORA | LUNES | MARTES | MIÉRCOLES | JUEVES | VIERNES | SÁBADO | DOMINGO |
| 0H00 | 0,45 | 0,45 | 0,47 | 0,48 | 0,58 | 0,48 | 0,38 |
| 1H00 | 0,42 | 0,44 | 0,43 | 0,46 | 0,62 | 0,47 | 0,36 |
| 2H00 | 0,44 | 0,44 | 0,43 | 0,46 | 0,60 | 0,41 | 0,38 |
| 3H00 | 0,44 | 0,52 | 0,40 | 0,46 | 0,58 | 0,43 | 0,36 |
| 4H00 | 0,42 | 0,53 | 0,43 | 0,45 | 0,57 | 0,48 | 0,36 |
| 5H00 | 0,48 | 0,59 | 0,43 | 0,49 | 0,65 | 0,45 | 0,43 |
| 6H00 | 0,52 | 0,58 | 0,43 | 0,56 | 0,72 | 0,54 | 0,53 |
| 7H00 | 0,41 | 0,40 | 0,35 | 0,42 | 0,57 | 0,36 | 0,38 |
| 8H00 | 0,32 | 0,37 | 0,33 | 0,35 | 0,43 | 0,34 | 0,34 |
| 9H00 | 0,33 | 0,41 | 0,35 | 0,40 | 0,44 | 0,38 | 0,31 |
| 10H00 | 0,35 | 0,35 | 0,43 | 0,31 | 0,45 | 0,46 | 0,32 |
| 11H00 | 0,42 | 0,42 | 0,32 | 0,38 | 0,54 | 0,43 | 0,36 |
| 12H00 | 0,47 | 0,45 | 0,43 | 0,34 | 0,47 | 0,42 | 0,41 |
| 13H00 | 0,39 | 0,46 | 0,47 | 0,35 | 0,52 | 0,40 | 0,37 |
| 14H00 | 0,38 | 0,36 | 0,49 | 0,45 | 0,52 | 0,39 | 0,40 |
| 15H00 | 0,45 | 0,37 | 0,42 | 0,42 | 0,58 | 0,38 | 0,38 |
| 16H00 | 0,41 | 0,38 | 0,39 | 0,40 | 0,59 | 0,40 | 0,42 |
| 17H00 | 0,38 | 0,40 | 0,40 | 0,38 | 0,56 | 0,47 | 0,44 |
| 18H00 | 0,56 | 0,55 | 0,54 | 0,59 | 0,74 | 0,57 | 0,60 |

| | | | | | | | |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|
| 19H00 | 0,74 | 0,69 | 0,63 | 0,77 | 1,00 | 0,83 | 0,73 |
| 20H00 | 0,72 | 0,72 | 0,73 | 0,74 | 0,93 | 0,85 | 0,75 |
| 21H00 | 0,66 | 0,62 | 0,67 | 0,72 | 0,83 | 0,63 | 0,66 |
| 22H00 | 0,54 | 0,58 | 0,54 | 0,68 | 0,72 | 0,52 | 0,59 |
| 23H00 | 0,57 | 0,48 | 0,48 | 0,64 | 0,63 | 0,44 | 0,46 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

3.1.2 CONFORMACIÓN DE CLÚSTER USANDO MATLAB

Para buscar la conformación adecuada del clúster es necesario aplicar la técnica dendograma, KMEANS y FUZZY C-MEANS, para llegar a determinar la agrupación más representativa del clúster.

3.1.2.1 EVALUACIÓN POR LA TÉCNICA DEL DENDOGRAMA.

Esta técnica permitió conformar de forma gráfica los clústeres que se encuentran presentes en la base de datos analizada, obteniéndose los resultados que se presentan en la Figura 7, los parámetros de evaluación de este método se presentan a continuación, y en el Anexo Digital 4 se presentan todos los resultados obtenidos.

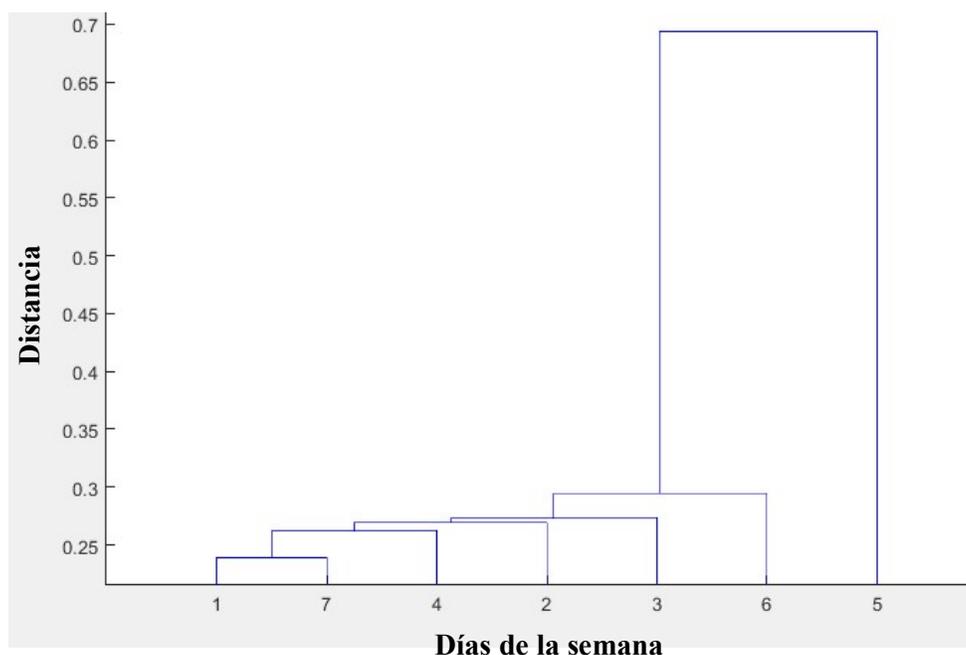


Figura 7. Representación gráfica Dendograma (junio 2014/10kVA/H1)

Fuente: Elaboración y Formulación Propia.

Con este método se llega a determinar la distancia que existe entre centros, estos se presentan en la Tabla 10 y Anexo Digital 4.

Tabla 10*Distancia entre centros (SQUAREFORM), (junio 2014/10kVA/H1)*

| DISTANCIA | Lunes | Martes | Miércoles | Jueves | Viernes | Sábado | Domingo |
|-----------|-------|--------|-----------|--------|---------|--------|---------|
| Lunes | 0,00 | 0,27 | 0,27 | 0,26 | 0,77 | 0,29 | 0,24 |
| Martes | 0,27 | 0,00 | 0,36 | 0,34 | 0,75 | 0,32 | 0,37 |
| Miércoles | 0,27 | 0,36 | 0,00 | 0,38 | 0,88 | 0,34 | 0,30 |
| Jueves | 0,26 | 0,34 | 0,38 | 0,00 | 0,69 | 0,39 | 0,34 |
| Viernes | 0,77 | 0,75 | 0,88 | 0,69 | 0,00 | 0,74 | 0,88 |
| Sábado | 0,29 | 0,32 | 0,34 | 0,39 | 0,74 | 0,00 | 0,32 |
| Domingo | 0,24 | 0,37 | 0,30 | 0,34 | 0,88 | 0,32 | 0,00 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

El enlace entre los valores del Dendograma y la evaluación de los clústeres formados por el método de Ward, se presentan en la Tabla 11 y Anexo Digital 4.

Tabla 11*Enlace entre valores del Dendograma (LINKAGE) y evaluación del clúster por el método de WARD. (junio 2014/10kVA/H1)*

| Enlace de valores | | | Evaluación del Clúster formado por el método de Ward | | |
|-------------------|-----------|-------------------|--|-----------|--------------------|
| Clúster 1 | Clúster 2 | Enlace de valores | Clúster 1 | Clúster 2 | Evaluación Clúster |
| 1 | 7 | 0,24 | 1 | 7 | 1,00 |
| 4 | 8 | 0,26 | 3 | 8 | 1,20 |
| 2 | 9 | 0,27 | 6 | 9 | 1,24 |
| 3 | 10 | 0,27 | 2 | 10 | 1,33 |
| 6 | 11 | 0,29 | 4 | 11 | 1,45 |
| 5 | 12 | 0,69 | 5 | 12 | 4,56 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

Las calidades de clúster formados aplicando el método del dendograma y el método de Ward, se presentan en la Tabla 12 y Anexo Digital 4.

Tabla 12*Calidad del clúster (COPHENET). (junio 2014/10kVA/H1)*

| CALIDAD DEL CLÚSTER FORMADO | |
|-----------------------------|------|
| DENDOGRAMA | WARD |
| 0,97 | 0,98 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

La inconsistencia que presenta el dendograma se puede evidenciar en la Tabla 13 y Anexo Digital 4.

Tabla 13

Inconsistencia en el dendograma. (junio 2014/10kVA/H1)

| Media de las Alturas | Desviación Típica | Número de Enlaces | Coefficiente de inconsistencia |
|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------------|
| 1,00 | 0 | 1 | 0 |
| 1,10 | 0,14 | 2 | 0,71 |
| 1,22 | 0,03 | 2 | 0,71 |
| 1,29 | 0,06 | 2 | 0,71 |
| 1,39 | 0,09 | 2 | 0,71 |
| 3,01 | 2,20 | 2 | 0,71 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

Al dividir los clústeres se forman las combinaciones posibles hasta llegar al corte, en el análisis se determina que el número máximo de clústeres que se puede formar es 3, siendo este el número de agrupaciones a buscar, se seleccionó un número por encima del rango de valores de la gráfica (valores de Y del dendograma) el resultado la agrupación de siete clústeres (1 equivale a cada clúster) cada clúster que equivale 100% debido a que no hay como formar agrupaciones cuando el corte se hace por arriba del árbol.

Por lo tanto, la formación de clústeres por el método del dendograma se puede observar en la Tabla 14 y Anexo Digital 4. Calculo Espectro Armónico.

Tabla 14

Agrupación de Clúster (DENDOGRAMA). (junio 2014/10kVA/H1)

| DÍAS | AGRUPACIÓN |
|-------------|-------------------|
| LUNES | 2 |
| MARTES | 2 |
| MIÉRCOLES | 2 |
| JUEVES | 1 |
| VIERNES | 3 |
| SÁBADO | 2 |
| DOMINGO | 2 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

La conformación del clúster por días se puede evidenciar en la Tabla 15 y Anexo Digital 4.

Tabla 15

Conformación de clúster (DENDOGRAMA). (junio 2014/10kVA/HI)

| CLÚSTER 1 | CLÚSTER 2 | CLÚSTER 3 |
|-----------|---|-----------|
| JUEVES | LUNES MARTES MIÉRCOLES SÁBADO DOMINGO | VIERNES |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

3.1.2.2 EVALUACIÓN POR LA TÉCNICA KMEANS

Hay diversas técnicas para clasificar datos, sin embargo, hay que decidir que técnica es la más conveniente. Para fines exploratorios o primeros acercamientos se recomienda el uso de K-MEANS, debido a la velocidad de convergencia del método.

Es por ello que se ha decidido utilizar esta técnica para determinar el número óptimo de clústeres que debe tener el agrupamiento.

Dentro de las condiciones que debe cumplir una minería de datos se menciona la simplicidad de las reglas obtenidas. Por este motivo se ha decidido que el máximo número de clústeres debe ser 3, de acuerdo a los resultados obtenidos en el dendograma, para no obtener tantas curvas que puedan resultar complejas de analizar.

Además, el número de clústeres debe ser al menos 2, ya que tener un solo clúster representaría el promedio de todas las curvas, lo que no entrega ninguna información adicional a la curva agregada. Para escoger el número óptimo de clústeres hay que utilizar alguno de los índices de validez mencionados anteriormente.

El más utilizado corresponde al índice de Davies-Bouldin, y además posee la ventaja de estar implementado en Matlab. (Gómez D. , 2007)

Una vez efectuado el método del dendograma, e identificado el número de clúster, con la técnica de agrupamiento K-MEANS se procede a obtener la distancia menor entre los clústeres, este valor se presenta en la Tabla 16 y Anexo Digital 4.

Tabla 16*Agrupamiento de la menor suma (Replicates). (junio 2014/10kVA/H1)*

| |
|--------------|
| VALOR |
| 3,55119 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

Los resultados de la formación de clústeres por el método del K-MEANS se puede observar en la Tabla 17 y Anexo Digital 4.

Tabla 17*Agrupación Clúster (K-MEANS). (junio 2014/10kVA/H1)*

| DÍAS | AGRUPACIÓN |
|-------------|-------------------|
| LUNES | 1 |
| MARTES | 1 |
| MIÉRCOLES | 1 |
| JUEVES | 2 |
| VIERNES | 3 |
| SÁBADO | 1 |
| DOMINGO | 1 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

La conformación del clúster por días se puede evidenciar en la Tabla 18 y Anexo Digital 4.

Tabla 18*Conformación de clúster (K-MEANS). (junio 2014/10kVA/H1)*

| CLÚSTER 1 | CLÚSTER 2 | CLÚSTER 3 |
|---|------------------|------------------|
| LUNES MARTES MIÉRCOLES SÁBADO DOMINGO | JUEVES | VIERNES |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

Los centros del clúster se presentan en la Tabla 19 y Anexo Digital 4.

Tabla 19*Centros de clúster (K-MEANS). (junio 2014/10kVA/H1)*

| HORA | CLÚSTER 1 | CLÚSTER 2 | CLÚSTER 3 |
|-------------|------------------|------------------|------------------|
| 0H00 | 0,45 | 0,58 | 0,47 |
| 1H00 | 0,44 | 0,62 | 0,43 |
| 2H00 | 0,44 | 0,60 | 0,41 |

| | | | |
|-------|------|------|------|
| 3H00 | 0,46 | 0,58 | 0,40 |
| 4H00 | 0,45 | 0,57 | 0,43 |
| 5H00 | 0,49 | 0,65 | 0,43 |
| 6H00 | 0,56 | 0,72 | 0,53 |
| 7H00 | 0,41 | 0,57 | 0,36 |
| 8H00 | 0,35 | 0,43 | 0,34 |
| 9H00 | 0,40 | 0,44 | 0,35 |
| 10H00 | 0,35 | 0,45 | 0,43 |
| 11H00 | 0,42 | 0,54 | 0,36 |
| 12H00 | 0,45 | 0,47 | 0,42 |
| 13H00 | 0,39 | 0,52 | 0,40 |
| 14H00 | 0,38 | 0,52 | 0,40 |
| 15H00 | 0,42 | 0,58 | 0,38 |
| 16H00 | 0,40 | 0,59 | 0,40 |
| 17H00 | 0,38 | 0,56 | 0,44 |
| 18H00 | 0,56 | 0,74 | 0,57 |
| 19H00 | 0,74 | 1,00 | 0,73 |
| 20H00 | 0,72 | 0,93 | 0,75 |
| 21H00 | 0,66 | 0,83 | 0,66 |
| 22H00 | 0,58 | 0,72 | 0,54 |
| 23H00 | 0,57 | 0,63 | 0,46 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

La agrupación de cada clúster por día se presenta en la Tabla 20 y Anexo Digital 4.

Tabla 20

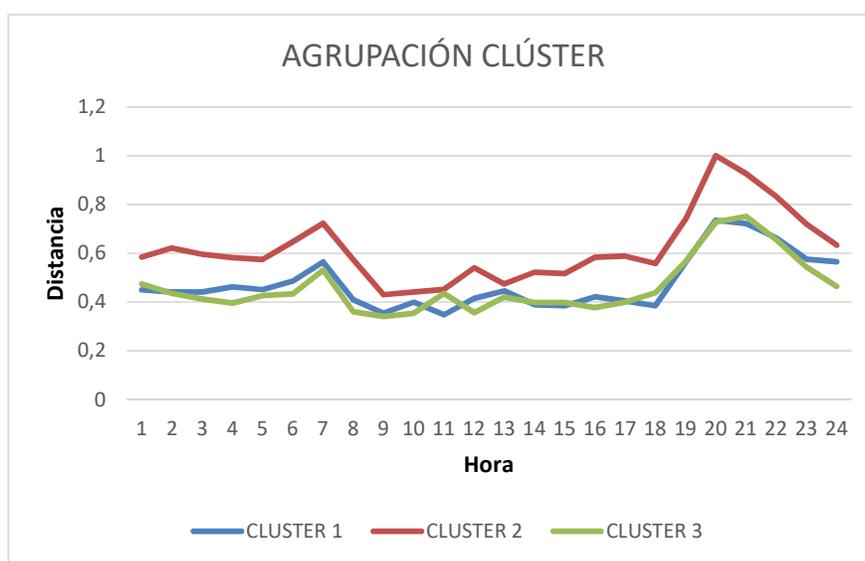
Agrupación de Clúster día por K-MEANS. (junio 2014/10kVA/HI)

| HORA | CLÚSTER 1 | | | | | CLÚSTER 2 | CLÚSTER 3 |
|------|-----------|--------|-----------|--------|---------|-----------|-----------|
| | Lunes | Martes | Miércoles | Sábado | Domingo | Jueves | Viernes |
| 0H00 | 0,45 | 0,45 | 0,47 | 0,48 | 0,38 | 0,48 | 0,58 |
| 1H00 | 0,42 | 0,44 | 0,43 | 0,47 | 0,36 | 0,46 | 0,62 |
| 2H00 | 0,44 | 0,44 | 0,43 | 0,41 | 0,38 | 0,46 | 0,60 |
| 3H00 | 0,44 | 0,52 | 0,40 | 0,43 | 0,36 | 0,46 | 0,58 |
| 4H00 | 0,42 | 0,53 | 0,43 | 0,48 | 0,36 | 0,45 | 0,57 |

| | | | | | | | |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| 5H00 | 0,48 | 0,59 | 0,43 | 0,45 | 0,43 | 0,49 | 0,65 |
| 6H00 | 0,52 | 0,58 | 0,43 | 0,54 | 0,53 | 0,56 | 0,72 |
| 7H00 | 0,41 | 0,40 | 0,35 | 0,36 | 0,38 | 0,42 | 0,57 |
| 8H00 | 0,32 | 0,37 | 0,33 | 0,34 | 0,34 | 0,35 | 0,43 |
| 9H00 | 0,33 | 0,41 | 0,35 | 0,38 | 0,31 | 0,40 | 0,44 |
| 10H00 | 0,35 | 0,35 | 0,43 | 0,46 | 0,32 | 0,31 | 0,45 |
| 11H00 | 0,42 | 0,42 | 0,32 | 0,43 | 0,36 | 0,38 | 0,54 |
| 12H00 | 0,47 | 0,45 | 0,43 | 0,42 | 0,41 | 0,34 | 0,47 |
| 13H00 | 0,39 | 0,46 | 0,47 | 0,40 | 0,37 | 0,35 | 0,52 |
| 14H00 | 0,38 | 0,36 | 0,49 | 0,39 | 0,40 | 0,45 | 0,52 |
| 15H00 | 0,45 | 0,37 | 0,42 | 0,38 | 0,38 | 0,42 | 0,58 |
| 16H00 | 0,41 | 0,38 | 0,39 | 0,40 | 0,42 | 0,40 | 0,59 |
| 17H00 | 0,38 | 0,40 | 0,40 | 0,47 | 0,44 | 0,38 | 0,56 |
| 18H00 | 0,56 | 0,55 | 0,54 | 0,57 | 0,60 | 0,59 | 0,74 |
| 19H00 | 0,74 | 0,69 | 0,63 | 0,83 | 0,73 | 0,77 | 1,00 |
| 20H00 | 0,72 | 0,72 | 0,73 | 0,85 | 0,75 | 0,74 | 0,93 |
| 21H00 | 0,66 | 0,62 | 0,67 | 0,63 | 0,66 | 0,72 | 0,83 |
| 22H00 | 0,54 | 0,58 | 0,54 | 0,52 | 0,59 | 0,68 | 0,72 |
| 23H00 | 0,57 | 0,48 | 0,48 | 0,44 | 0,46 | 0,64 | 0,63 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

A continuación, se presenta las gráficas de la agrupación clúster por el método K-MEANS, que se puede ver en la Figura 8 y Anexo Digital 4.



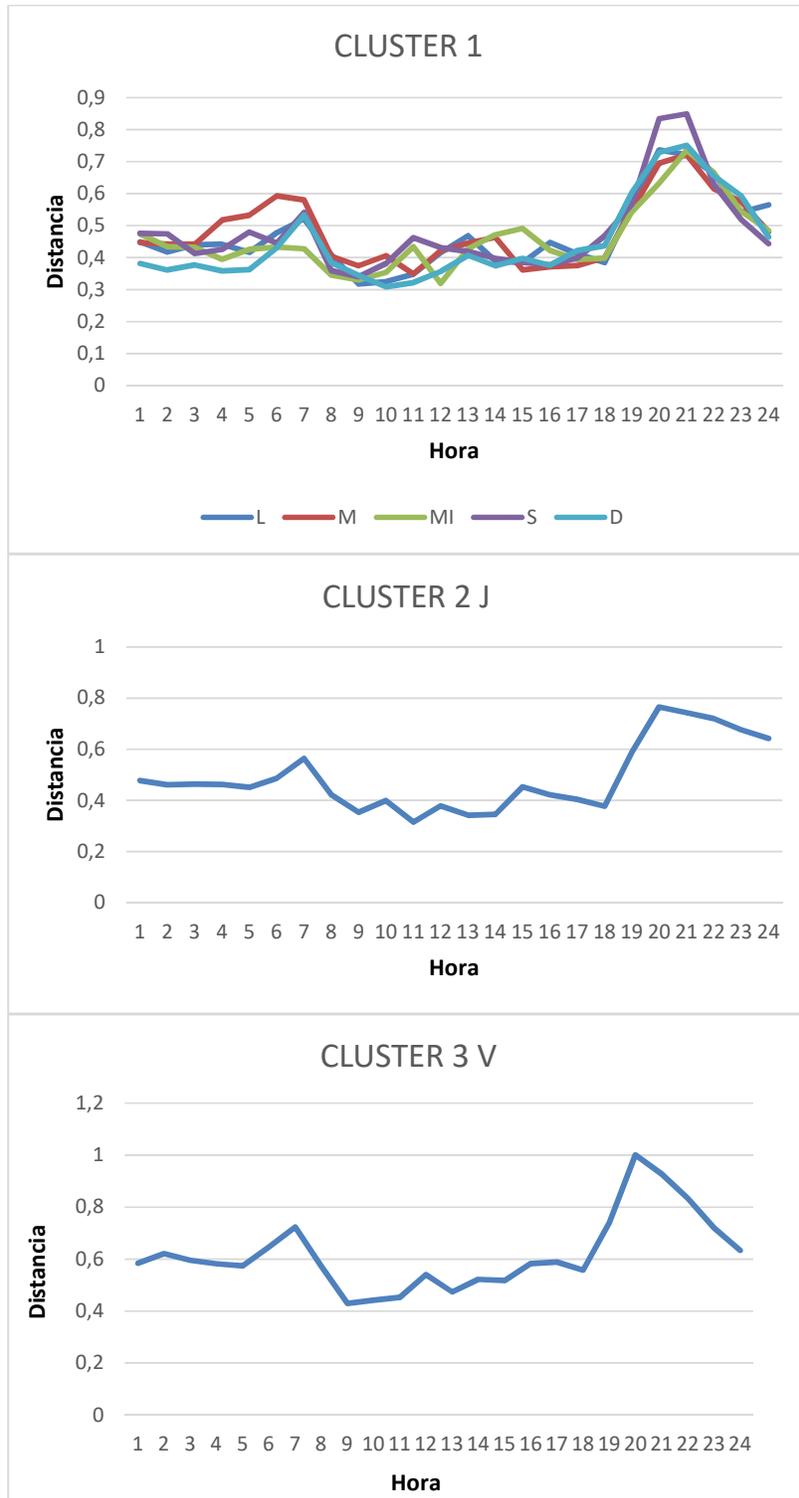


Figura 8. Curva promedio (K-MEANS). (junio 2014/10kVA/H1)
Fuente: Elaboración y Formulación Propia

3.1.2.3 EVALUACIÓN POR LA TÉCNICA FUZZY C-MEANS

Para realizar la clasificación por clúster que entregará los resultados definitivos hay que escoger la técnica que resulte más adecuada para los fines del estudio. Es por esto que la elección debe realizarse según lo expuesto en la Tabla 5 (Resumen de fortalezas y debilidades de cada técnica). Debido a ello y a tener una matriz de pertenencia con coeficientes continuos, es que se ha escogido la técnica FUZZY C-MEANS.

A pesar que esta técnica también presenta una sensibilidad al punto de partida, esta se ve disminuida a medida que el factor m aumenta su valor. Además, para disminuir la dependencia del punto de partida y aumentar la confiabilidad será necesario realizar varios agrupamientos y escoger como definitivo el que tenga la función objetivo más pequeña, de la misma forma en que se hizo para determinar el número óptimo de clústeres.

Como se explicó anteriormente, hay que definir el valor del factor m , ya que valores distintos entregan distintas soluciones. En la literatura se utiliza el factor $m = 1,2$ de forma arbitraria, ya que no se presenta ningún método para escoger un valor idóneo. Para este caso se hicieron pruebas para distintos valores, un valor que tiende a 1 da como resultado una técnica que pierde su categoría de difusa, mientras que valores mayores a 1,8 entregan como resultado curvas idénticas para cada clúster. Por ello, se ha elegido el valor $m = 1,2$, siguiendo la experiencia previa presentada en la literatura técnica.

Una vez que se determinó la conformación adecuada de cada clúster se procedió a evaluar la conformación de clúster por la técnica **FUZZY C-MEANS**, la cual permite obtener un clúster más compacto.

La agrupación de cada clúster se determinó con el método anterior.

Los resultados obtenidos son el Centro de cada clúster en la Tabla 21 y Anexo Digital 4.

Tabla 21*Centros clúster (FUZZY K-MEANS). (junio 2014/10kVA/H1)*

| HORA | CLÚSTER 1 | CLÚSTER 2 | CLÚSTER 3 |
|-------|-----------|-----------|-----------|
| 0H00 | 0,48 | 0,58 | 0,45 |
| 1H00 | 0,46 | 0,62 | 0,43 |
| 2H00 | 0,46 | 0,60 | 0,42 |
| 3H00 | 0,46 | 0,58 | 0,43 |
| 4H00 | 0,45 | 0,57 | 0,44 |
| 5H00 | 0,49 | 0,65 | 0,48 |
| 6H00 | 0,56 | 0,72 | 0,52 |
| 7H00 | 0,42 | 0,57 | 0,38 |
| 8H00 | 0,35 | 0,43 | 0,34 |
| 9H00 | 0,40 | 0,44 | 0,36 |
| 10H00 | 0,32 | 0,45 | 0,38 |
| 11H00 | 0,38 | 0,54 | 0,39 |
| 12H00 | 0,34 | 0,47 | 0,43 |
| 13H00 | 0,35 | 0,52 | 0,42 |
| 14H00 | 0,45 | 0,52 | 0,40 |
| 15H00 | 0,42 | 0,58 | 0,40 |
| 16H00 | 0,40 | 0,59 | 0,40 |
| 17H00 | 0,38 | 0,56 | 0,42 |
| 18H00 | 0,59 | 0,74 | 0,56 |
| 19H00 | 0,77 | 1,00 | 0,73 |
| 20H00 | 0,74 | 0,93 | 0,76 |
| 21H00 | 0,72 | 0,83 | 0,65 |
| 22H00 | 0,68 | 0,72 | 0,55 |
| 23H00 | 0,64 | 0,63 | 0,49 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

Seguidamente se encuentra la matriz de pertenencia Tabla 22 y Anexo Digital 4

Tabla 22*Matriz de Pertenencia (U). (junio 2014/10kVA/H1)*

| | Lunes | Martes | Miércoles | Jueves | Viernes | Sábado | Domingo |
|------------------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|
| Clúster 1 | 1,90E-03 | 1,44E-02 | 2,38E-03 | 1,00E+00 | 1,03E-61 | 2,27E-03 | 3,79E-03 |
| Clúster 2 | 3,52E-08 | 5,08E-06 | 5,46E-07 | 1,23E-24 | 1,00E+00 | 3,21E-06 | 3,09E-07 |
| Clúster 3 | 9,98E-01 | 9,86E-01 | 9,98E-01 | 9,18E-21 | 3,11E-62 | 9,98E-01 | 9,96E-01 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

La agrupación de clúster por FUZZY C-MEANS se efectúa considerando la matriz de pertenencia encontrada, Tabla 23 y Anexo Digital 4.

Tabla 23

Agrupación Clúster por la matriz de pertenencia (FUZZY C-MEANS). (junio 2014/10kVA/H1)

| Hora | CLÚSTER 1 | | | | | CLÚSTER 2 | CLÚSTER 3 |
|-------|-----------|--------|-----------|--------|---------|-----------|-----------|
| | Lunes | Martes | Miércoles | Sábado | Domingo | Jueves | Viernes |
| 0H00 | 0,45 | 0,45 | 0,45 | 0,45 | 0,45 | 0,48 | 0,58 |
| 1H00 | 0,43 | 0,43 | 0,43 | 0,43 | 0,43 | 0,46 | 0,62 |
| 2H00 | 0,42 | 0,42 | 0,42 | 0,42 | 0,42 | 0,46 | 0,6 |
| 3H00 | 0,43 | 0,43 | 0,43 | 0,43 | 0,43 | 0,46 | 0,58 |
| 4H00 | 0,44 | 0,44 | 0,44 | 0,44 | 0,44 | 0,45 | 0,57 |
| 5H00 | 0,48 | 0,48 | 0,48 | 0,48 | 0,48 | 0,49 | 0,65 |
| 6H00 | 0,52 | 0,52 | 0,52 | 0,52 | 0,52 | 0,56 | 0,72 |
| 7H00 | 0,38 | 0,38 | 0,38 | 0,38 | 0,38 | 0,42 | 0,57 |
| 8H00 | 0,34 | 0,34 | 0,34 | 0,34 | 0,34 | 0,35 | 0,43 |
| 9H00 | 0,36 | 0,36 | 0,36 | 0,36 | 0,36 | 0,4 | 0,44 |
| 10H00 | 0,38 | 0,38 | 0,38 | 0,38 | 0,38 | 0,32 | 0,45 |
| 11H00 | 0,39 | 0,39 | 0,39 | 0,39 | 0,39 | 0,38 | 0,54 |
| 12H00 | 0,43 | 0,43 | 0,43 | 0,43 | 0,43 | 0,34 | 0,47 |
| 13H00 | 0,42 | 0,42 | 0,42 | 0,42 | 0,42 | 0,35 | 0,52 |
| 14H00 | 0,4 | 0,41 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,45 | 0,52 |
| 15H00 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,42 | 0,58 |
| 16H00 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,59 |
| 17H00 | 0,42 | 0,42 | 0,42 | 0,42 | 0,42 | 0,38 | 0,56 |
| 18H00 | 0,56 | 0,57 | 0,56 | 0,56 | 0,57 | 0,59 | 0,74 |
| 19H00 | 0,73 | 0,73 | 0,73 | 0,73 | 0,73 | 0,77 | 1 |
| 20H00 | 0,76 | 0,76 | 0,76 | 0,76 | 0,76 | 0,74 | 0,93 |
| 21H00 | 0,65 | 0,65 | 0,65 | 0,65 | 0,65 | 0,72 | 0,83 |
| 22H00 | 0,56 | 0,56 | 0,56 | 0,56 | 0,56 | 0,68 | 0,72 |
| 23H00 | 0,49 | 0,49 | 0,49 | 0,49 | 0,49 | 0,64 | 0,63 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

Fue necesario unificar cada clúster obteniéndose Tabla 24 y Anexo Digital 4.

Tabla 24

Comportamiento armónico por unidad FUZZY C-MEANS. (junio 2014/10kVA/H1)

| HORA | CLÚSTER 1 | CLÚSTER 2 | CLÚSTER 3 |
|-------|-----------|-----------|-----------|
| 0H00 | 0,45 | 0,48 | 0,58 |
| 1H00 | 0,43 | 0,46 | 0,62 |
| 2H00 | 0,42 | 0,46 | 0,60 |
| 3H00 | 0,43 | 0,46 | 0,58 |
| 4H00 | 0,44 | 0,45 | 0,57 |
| 5H00 | 0,48 | 0,49 | 0,65 |
| 6H00 | 0,52 | 0,56 | 0,72 |
| 7H00 | 0,38 | 0,42 | 0,57 |
| 8H00 | 0,34 | 0,35 | 0,43 |
| 9H00 | 0,36 | 0,40 | 0,44 |
| 10H00 | 0,38 | 0,32 | 0,45 |
| 11H00 | 0,39 | 0,38 | 0,54 |

| | | | |
|-------|------|------|------|
| 12H00 | 0,43 | 0,34 | 0,47 |
| 13H00 | 0,42 | 0,35 | 0,52 |
| 14H00 | 0,40 | 0,45 | 0,52 |
| 15H00 | 0,40 | 0,42 | 0,58 |
| 16H00 | 0,40 | 0,40 | 0,59 |
| 17H00 | 0,42 | 0,38 | 0,56 |
| 18H00 | 0,57 | 0,59 | 0,74 |
| 19H00 | 0,73 | 0,77 | 1,00 |
| 20H00 | 0,76 | 0,74 | 0,93 |
| 21H00 | 0,65 | 0,72 | 0,83 |
| 22H00 | 0,56 | 0,68 | 0,72 |
| 23H00 | 0,49 | 0,64 | 0,63 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

Al determinar la mejor agrupación y comportamiento armónico característico es necesario cambiar de base, para este caso el valor base fue 47.978, obteniéndose los resultados que se presentan en la Tabla 25 y Anexo Digital 4.

Tabla 25

Comportamiento armónico característico por FUZZY C-MEANS. (06/2014/10kVA/H1)

| THDI CONFORMADO POR CLÚSTER MEDIDO EN AMPERIOS | | | |
|---|------------------|------------------|------------------|
| HORA | CLÚSTER 1 | CLÚSTER 2 | CLÚSTER 3 |
| 0H00 | 21,40 | 22,93 | 28,03 |
| 1H00 | 20,43 | 22,12 | 29,79 |
| 2H00 | 20,19 | 22,23 | 28,57 |
| 3H00 | 20,52 | 22,18 | 27,91 |
| 4H00 | 21,27 | 21,66 | 27,55 |
| 5H00 | 22,85 | 23,39 | 31,02 |
| 6H00 | 24,97 | 27,08 | 34,70 |
| 7H00 | 18,27 | 20,20 | 27,52 |
| 8H00 | 16,39 | 16,98 | 20,63 |
| 9H00 | 17,06 | 19,17 | 21,16 |
| 10H00 | 18,38 | 15,11 | 21,71 |
| 11H00 | 18,65 | 18,18 | 25,91 |
| 12H00 | 20,79 | 16,46 | 22,75 |
| 13H00 | 20,09 | 16,63 | 25,02 |
| 14H00 | 19,41 | 21,71 | 24,80 |
| 15H00 | 19,16 | 20,19 | 27,99 |
| 16H00 | 19,22 | 19,40 | 28,24 |
| 17H00 | 20,02 | 18,12 | 26,73 |
| 18H00 | 27,11 | 28,22 | 35,55 |
| 19H00 | 34,82 | 36,70 | 47,98 |
| 20H00 | 36,25 | 35,68 | 44,46 |
| 21H00 | 31,01 | 34,49 | 39,97 |
| 22H00 | 26,65 | 32,40 | 34,50 |
| 23H00 | 23,43 | 30,76 | 30,37 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

A continuación, se presenta las gráficas de la agrupación clúster por el método **FUZZY C-MEANS** presentados en la Figura 9 y Anexo Digital 4.

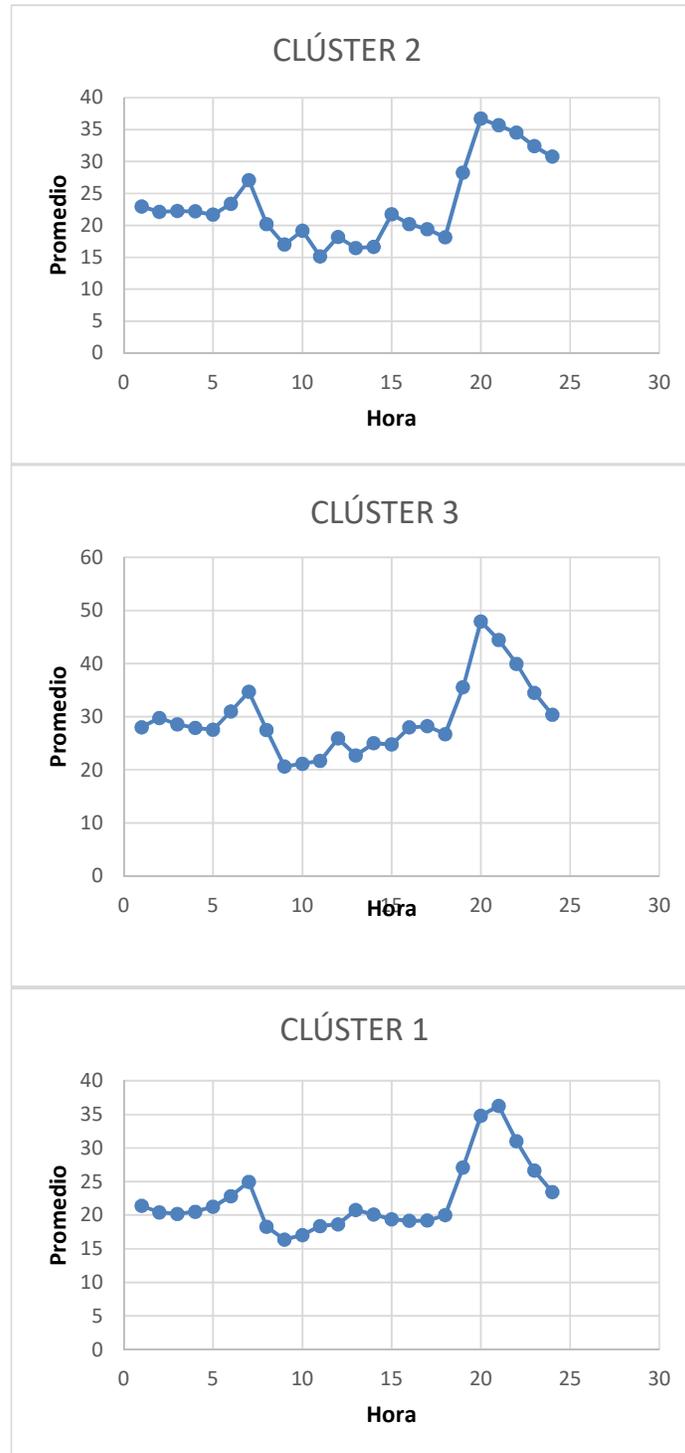


Figura 9. Curvas promedio de los clústeres (FUZZY C-MEANS). (junio 2014/10kVA/H1)

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

Los procedimientos aplicados en cada etapa permitieron determinar e identificar la conformación ideal de cada clúster y obtener el espectro armónico para cada transformador, seleccionándose el espectro de mayor valor de los tres clústeres conformados, obteniendo los resultados que se presentan en la Tabla 26 y en el Anexo 5.

Tabla 26.

Espectro armónico en Amperios. (junio 2014/10kVA)

| Nº Armónico (H) | FASE A | FASE B |
|--------------------|--------|--------|
| | TDHI | TDHI |
| 1 | 47,98 | 44,97 |
| 3 | 4,84 | 7,67 |
| 5 | 3,01 | 5,45 |
| 7 | 0,80 | 1,14 |
| 9 | 2,22 | 2,72 |
| 11 | 1,04 | 1,21 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

3.2 EVALUACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES APLICANDO LA NORMA ANSI IEEE C57.110

Para evaluar la capacidad de carga de un transformador mediante la norma ANSI/IEEE std C57.110 es necesario tener un protocolo de pruebas del fabricante para transformadores particulares y un estudio de análisis de carga para conocer el espectro armónico de la carga del equipo.

Estos parámetros son los que se presentan en la Tabla 27.

Tabla 27

Parámetros del transformador de 10 kVA

| Potencia (kVA) | Tipo | Tensión en primario (kV) | Tensión en secundario (kV) | I prim (A) | I sec (A) |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------------|-------------------------------|---------------|--------------|
| 10 | Monofásico | 7,970 | 0,12 | 1,25 | 41,67 |
| Pérdidas con carga(W) | Pérdidas en vacío (W) | Relación Transformación | R1 Ω (prim) | R2 Ω (sec) | |
| 142 | 52 | 66.42 | 37,07 | 0,043 | |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

Con los valores del protocolo de pruebas se procede a calcular el comportamiento del transformador ante la presencia de un espectro armónico, aplicando la siguiente secuencia de cálculos;

Pérdidas por corrientes parásitas totales

$$P_{TSL-R} = P_{LL-R} - K * [I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2] = 8.19 W$$

Luego se calcula las pérdidas por corrientes de Eddy bajo condiciones nominales, según la norma ANSI/IEEE C57.110, las pérdidas en los devanados constituyen aproximadamente un 33% de las pérdidas adicionales totales para transformadores en aceite, por lo que las pérdidas en los devanados son:

$$P_{EC-R} = P_{TSL-R} * 0.33 = 2.70 W$$

Las otras pérdidas adicionales son:

$$P_{OSL-R} = P_{TSL-R} - P_{EC-R} = 5.49 W$$

Las pérdidas óhmicas totales en condiciones normales serian:

$$P_{DC} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 = 133,80 W$$

Las pérdidas parásitas totales por corriente de Eddy se pueden ver en la Tabla 28.

Tabla 28.

Pérdidas parásitas totales por corriente de Eddy

| PTSL-R (W) | PEC-R (W) | POSL-R (W) |
|-------------------|------------------|-------------------|
| 8,20 | 2,70 | 5,49 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

La norma recomienda que la división de las pérdidas por corrientes parásitas entre los devanados se asuma de la siguiente manera:

1. 60% para el devanado interior y 40% para el devanado exterior de los transformadores que tengan una corriente nominal inferior a 1000 A o la relación de transformación sea de 4:1 o inferior.
2. 70% para el devanado interior y 30% para el devanado exterior de los transformadores que tengan una relación de transformación mayor a 4:1 y uno o más devanados con corriente nominal mayor a 1000 A.

En ausencia de otra información, se considera que el devanado interior es el devanado de baja tensión. Para este caso, se tiene que las pérdidas nominales por corriente parásitas en el devanado primario son:

$$P_{ECI-R} = 0.4 * P_{ECR} = 1.08W$$

Para el devanado secundario:

$$P_{ECI-R} = 0.6 * P_{ECR} = 1.62W$$

Las pérdidas nominales por corrientes parásitas en los devanados tanto en el primario como en el secundario se pueden observar en la Tabla 29.

Tabla 29

Pérdidas nominales por corrientes parásitas en los devanados

| Primario (W) | Secundario (W) |
|--------------|----------------|
| 1.08 | 1.62 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

Lo siguiente es calcular las máximas pérdidas por corrientes de Eddy en pu, en este momento de cálculo se utiliza el espectro armónico que se determinó en epígrafes anteriores, con ello se puede obtener el factor de armónico para pérdidas por corriente de Eddy y el factor de armónico para otras pérdidas. (Gómez D. , 2007)

Este procedimiento se realiza tanto para la Fase A como Fase B del Transformador. Como podemos ver en la siguiente Tabla 30.

Tabla 30

Cálculo de los factores de pérdidas armónicas Fase A

| SECUNDARIO 1 | | | | | | | | |
|--------------|----|--------------|-------------------|----------------------------------|------------|--------------|--------------------------------------|--|
| % h | h | I_h | $\frac{I_h}{I_1}$ | $\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2$ | h^2 | $h^{0.8}$ | $\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^2$ | $\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^{0.8}$ |
| 100 | 1 | 47,98 | 1,15 | 1,3259 | 1 | 1,00 | 1,33 | 1,33 |
| 0,10 | 3 | 4,84 | 0,12 | 0,0135 | 9 | 2,41 | 0,12 | 0,03 |
| 0,06 | 5 | 3,01 | 0,07 | 0,0052 | 25 | 3,62 | 0,13 | 0,02 |
| 0,02 | 7 | 0,80 | 0,02 | 0,0004 | 49 | 4,74 | 0,02 | 0,01 |
| 0,05 | 9 | 2,22 | 0,05 | 0,0028 | 81 | 5,80 | 0,23 | 0,02 |
| 0,02 | 11 | 1,04 | 0,03 | 0,0006 | 121 | 6,81 | 0,08 | 0,004 |
| | | 59,89 | 1,44 | 1,35 | 286 | 24,38 | 1,90 | 1,40 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

El factor de las pérdidas armónicas para las pérdidas por corrientes parásitas en los devanados se define por la siguiente expresión

$$F_{HL} = \frac{P_{EC}}{P_{EC-O}} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} h^2 [I_h]^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} [I_h/I_R]^2} = 1.41$$

El factor por las pérdidas armónicas para otras pérdidas adicionales es:

$$F_{HL-ST} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} h^{0.8} \left[\frac{I_h}{I} \right]^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I} \right]^2} = 1.04$$

Y calculados la corriente del secundario se obtiene para la fase A:

$$I_{pu}^2 = \sqrt{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2} = 1.16 pu$$

Presentando a continuación un resumen de los cálculos obtenidos en la Tabla 31.

Tabla 31
Factores armónicos Fase A

| I (pu)² | F_{HL} | F_{HL-STR} |
|---------------------------|-----------------------|---------------------------|
| 1,16 | 1,41 | 1,04 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

La corriente optima del equipo se refiere a la máxima carga que se puede instalar para evitar reducir el tiempo de vida.

Las pérdidas por corrientes de Eddy en condiciones armónicas serian:

$$P_{EC} = P_{EC-R} * \sum_{h=1}^{h=h_{max}} h^2 \left[\frac{I_h}{I_R} \right]^2 = 5.14W$$

Las pérdidas parásitas son asumidas por que estas varían con el cuadrado de la corriente RMS y la frecuencia armónica a un factor de 0,8 como se muestra a continuación:

$$P_{OSL} = P_{OSL-R} * \sum_{h=1}^{h=h_{max}} h^{0.8} \left[\frac{I_h}{I_R} \right]^2 = 7.68W$$

Estas pérdidas se representan en por unidad:

$$P_{EC-R} (pu) = 0,53$$

$$P_{OSL-R}(pu) = 0,71$$

Cuando un transformador es utilizado en una red con armónicos de tensión y corriente, debido al incremento de las pérdidas, también aumenta la temperatura, y, por tal razón, su potencia nominal debe ser desclasificada.

Esta acción resulta posible cuando se limitan las pérdidas totales del transformador bajo condiciones no sinusoidales, al valor de las pérdidas a corriente de carga y tensión sinusoidales. Es decir, la máxima corriente de carga del transformador con armónicos tiene que ser determinada por aquella que provocaría iguales pérdidas en condiciones sinusoidales.

Las pérdidas con carga por unidad (pu) sin armónicos y en condiciones nominales son iguales a:

$$P_{LL-R}(pu) = 1 + P_{EC-R}(pu) + P_{OSL-R}(pu) = 2.24$$

Para calcular las pérdidas cuando un transformador sufre una carga armónica se expresa

$$P_{LL}(pu) = I^2(pu) * [1 + F_{HL} * P_{EC-R}(pu) + F_{HL-STR} * P_{OSL-R}(pu)] = 2.88$$

La corriente permitida para el transformador sería expresada de la siguiente manera:

$$I_{max}(pu) = \sqrt{\frac{P_{LL-R}(pu)}{1 + [F_{HL} * P_{EC-R}(pu)] + [F_{HL-S} * P_{OSL-R}(pu)]}} = 0.95$$

La corriente máxima que soportará el equipo ante la presencia del espectro armónico seleccionado será:

$$I_{max} = I_2 * I_{max}(pu) = 39.58 A$$

Por lo tanto, si la intensidad del secundario del transformador de 10 kVA es de 41.67 A, la capacidad de transformación en la fase A por la presencia de armónicos es de 4,75 kVA, despreciando la sobrecarga admisible.

En la tabla 32 se presenta el resumen de los cálculos efectuados para determinar el incremento de pérdidas por la presencia de un espectro armónico en el transformador de distribución

Tabla 32*Cálculos de pérdidas por armónicos en el transformador de 10 kVA Fase A*

| TIPO DE CARGA | PÉRDIDA NOMINAL (W) | PÉRDIDA CON CARGA BAJO CORRIENTE ARMÓNICA (W) | FACTOR DE PÉRDIDA ARMÓNICA | CORRECCIÓN DE PÉRDIDAS CON CARGA BAJO CORRECCIÓN ARMÓNICA (W) |
|--------------------------------|---------------------|---|----------------------------|---|
| SIN CARGA | 52 | 52 | ..... | 52 |
| DC (I^2R) | 133,80 | 180,40 | ..... | 180,41 |
| CORRIENTE DE EDDY EN DEVANADOS | 2,70 | 3,6 | 1,41 | 5,15 |
| OTRAS PÉRDIDAS | 5,49 | 7,40 | 1,04 | 7,70 |
| TOTAL | 194 | 243,45 | ..... | 245,26 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

En la Tabla 33 se presentan los resultados de las pérdidas que generan los armónicos en el transformador.

Tabla 33*Resultados finales de las pérdidas de los armónicos Fase A*

| PEC (W) | POSL (W) | PEC-R (pu) | POSL-R (pu) | PLL (pu) | PLL-R (pu) | I _{max} (pu) | I _{max} (A) | Potencia sugerida (kVA) | Porcentaje de Derrateo (%) |
|---------|----------|------------|-------------|----------|------------|-----------------------|----------------------|-------------------------|----------------------------|
| 5.15 | 7.7 | 0,53 | 0,71 | 2,88 | 2,24 | 0,94 | 39,5 | 4.75 | 94,98 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

El mismo procedimiento se aplicó para la Fase B, obteniéndose los siguientes resultados.

Tabla 34*Cálculo de los factores de pérdidas armónicas Fase B*

| SECUNDARIO 1 | | | | | | | | |
|--------------|----|--------------|-------------------|----------------------------------|------------|--------------|--------------------------------------|--|
| % h | h | I_h | $\frac{I_h}{I_1}$ | $\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2$ | h^2 | $h^{0.8}$ | $\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^2$ | $\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^{0.8}$ |
| 100 | 1 | 44,97 | 1,08 | 1,1648 | 1 | 1,00 | 1,16 | 1,16 |
| 0,17 | 3 | 7,67 | 0,18 | 0,0339 | 9 | 2,41 | 0,31 | 0,08 |
| 0,12 | 5 | 5,45 | 0,13 | 0,0171 | 25 | 3,62 | 0,43 | 0,06 |
| 0,03 | 7 | 1,14 | 0,03 | 0,0008 | 49 | 4,74 | 0,03 | 0,004 |
| 0,06 | 9 | 2,72 | 0,07 | 0,0043 | 81 | 5,80 | 0,34 | 0,025 |
| 0,03 | 11 | 1,21 | 0,03 | 0,0008 | 121 | 6,81 | 0,10 | 0,006 |
| | | 63,16 | 1,52 | 1,222 | 286 | 24,38 | 2,38 | 1,342 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

Tabla 35*Factores armónicos Fase B*

| I (pu)² | F_{HL} | F_{HL-STR} |
|---------------------------|-----------------------|---------------------------|
| 1,11 | 1,95 | 1,90 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia**Tabla 36***Cálculos de pérdidas por armónicos en el transformador de 10 kVA. Fase B*

| TIPO DE CARGA | PÉRDIDA NOMINAL (W) | PÉRDIDA CON CARGA BAJO CORRIENTE ARMÓNICA (W) | FACTOR DE PÉRDIDA ARMÓNICA | CORRECCIÓN DE PÉRDIDAS CON CARGA BAJO CORRECCIÓN ARMÓNICA (W) |
|---------------------------------------|----------------------------|--|-----------------------------------|--|
| SIN CARGA | 52 | 52 | ..... | 52 |
| DC (I²R) | 133,80 | 163,44 | ..... | 163,44 |
| CORRIENTE DE EDDY DE DEVANADOS | 2,70 | 3,3 | 1,95 | 6,44 |
| OTRAS PÉRDIDAS | 5,49 | 6,71 | 1,90 | 7,37 |
| TOTAL | 194 | 225,45 | ..... | 229,25 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia**Tabla 37***Resultados finales de las pérdidas de los armónicos Fase B*

| P_{EC} (W) | P_{OSL} (W) | P_{EC-R} (pu) | P_{OSL-R} (pu) | P_{LL} (pu) | P_{LL-R} (pu) | I_{max} (pu) | I_{max} (A) | Potencia sugerida (kVA) | Porcentaje de Derrateo (%) |
|---------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------------|----------------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| 6,44 | 7,37 | 0,42 | 0,75 | 2,91 | 2,17 | 0,91 | 37,76 | 4,53 | 90,61 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

Aplicando la siguiente ecuación se calculan las pérdidas con carga en pu para cada corriente de carga. Como cada sección del devanado secundario contribuye de manera independiente, se utiliza como base la mitad de las pérdidas óhmicas nominales. Por otro lado, si cada corriente de las secciones secundarias contribuye de igual manera a las otras pérdidas adicionales, se tiene que las pérdidas de carga en pu provocadas por cada corriente de carga no sinusoidal serán:

$$P_{LLH1}(pu) = I_{sec1}(pu)^2 \left[1 + \frac{F_{HL1} \left(\frac{P_{EC-R}}{2} \right)}{\frac{P_{dc}}{2}} + \frac{F_{HL1-STR} \left(\frac{P_{OSL-R}}{2} \right)}{\frac{P_{dc}}{2}} \right] = 1.44 pu$$

$$P_{LLH2}(pu) = I_{sec2}(pu)^2 \left[1 + \frac{F_{HL2} \left(\frac{P_{EC-R}}{2} \right)}{\frac{P_{dc}}{2}} + \frac{F_{HL2-STR} \left(\frac{P_{OSL-R}}{2} \right)}{\frac{P_{dc}}{2}} \right] = 1.32 pu$$

Las pérdidas con carga totales en condiciones no sinusoidales son:

$$P_{LLT} = (P_{LL1}(pu) + P_{LL2}(pu)) \cdot \frac{P_{dc}}{2} = 185.24W$$

Las pérdidas totales con armónicos son:

$$P_H = P_{NL} + P_{LLTH} = 237.24W$$

Para condiciones sinusoidales suponiendo igual valor RMS de las corrientes de carga se tiene:

$$P_{LL1}(pu) = I_{sec1}(pu)^2 \left[1 + \frac{\left(\frac{P_{EC-R}}{2} \right)}{\frac{P_{dc}}{2}} + \frac{\left(\frac{P_{OSL-R}}{2} \right)}{\frac{P_{dc}}{2}} \right] = 1.43 pu$$

$$P_{LL2}(pu) = I_{sec2}(pu)^2 \left[1 + \frac{\left(\frac{P_{EC-R}}{2} \right)}{\frac{P_{dc}}{2}} + \frac{\left(\frac{P_{OSL-R}}{2} \right)}{\frac{P_{dc}}{2}} \right] = 1.30 pu$$

$$P_{LLT} = (P_{LL1}(pu) + P_{LL2}(pu)) \cdot \frac{P_{dc}}{2} = 182.45W$$

Las pérdidas totales sin armónicos serían:

$$P = P_{NL} + P_{LLT} = 234.45W$$

El incremento de las pérdidas por la circulación de armónicos en este caso será igual a:

$$\Delta_{PLL} = P_H - P = 2.79W$$

A continuación, se presenta una tabla resumen:

Tabla 38*Pérdidas en el transformador de 10 kVA*

| PÉRDIDAS CON CARGAS TOTALES EN CONDICIONES NO SINUSOIDALES | | | PÉRDIDAS TOTALES CON ARMÓNICOS | INCREMENTO DE PÉRDIDAS POR CIRCULACIÓN DE ARMÓNICOS |
|--|----------------|--------------|--------------------------------|---|
| $P_{LLH1}(pu)$ | $P_{LLH2}(pu)$ | $P_{LLT}(W)$ | $P_H(W)$ | |
| 1.43 | 1.32 | 185.24 | 237.24 | |
| PÉRDIDAS CON CARGAS TOTALES EN CONDICIONES SINUSOIDALES | | | PÉRDIDAS TOTALES SIN ARMÓNICOS | |
| $P_{LL1}(pu)$ | $P_{LL2}(pu)$ | $P_{LLT}(W)$ | $P(W)$ | $\Delta_{PLL}(W)$ |
| 1.43 | 1.30 | 182.45 | 234.45 | 2.79 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

Para el resto de transformadores en análisis se efectuó el mismo procedimiento de cálculo obteniéndose los siguientes resultados.

TRANSFORMADOR DE 15 kVA

Los parámetros del transformador de 15 kVA se presentan en la Tabla 39.

Tabla 39*Parámetros del transformador de 15 kVA*

| Potencia (kVA) | Tipo | Tensión en primario (kV) | Tensión en secundario (kV) | I prim (A) | I sec (A) |
|-----------------------|-----------------------|--------------------------|----------------------------|-------------------|-----------|
| 15 | Monofásico | 7,970 | 0,12 | 1,88 | 62,50 |
| Pérdidas con carga(W) | Pérdidas en vacío (W) | Relación Transformación | R1 Ω (prim) | R2 Ω (sec) | |
| 192 | 68 | 66.42 | 23,5 | 0,0253 | |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

Las pérdidas parásitas totales por corriente de Eddy y pérdidas óhmicas en condiciones normales se presentan en la Tabla 40.

Tabla 40*Las pérdidas parásitas y pérdidas óhmicas en condiciones normales*

| P _{TSL-R} (W) | P _{EC-R} (W) | P _{OSL-R} (W) | P _{DC} (W) |
|------------------------|-----------------------|------------------------|---------------------|
| 9,97 | 3,29 | 6,68 | 182,03 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

Las pérdidas nominales por corrientes parásitas Pérdidas parásitas totales por corriente de Eddy y pérdidas óhmicas totales en condiciones normales en los devanados se pueden observar en la Tabla 41.

Tabla 41*Pérdidas nominales por corrientes parásitas en los devanados*

| Primario | Secundario |
|----------|------------|
| 1,32 | 1,97 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

El cálculo de los factores de pérdidas realizado para la Fase A y Fase B del Transformador se presentan en la Tabla 42.

Tabla 42*Cálculo de los factores de pérdidas armónicas Fase A*

| FASE A | | | | | | | | |
|--------|----|---------------|-------------------|----------------------------------|------------|--------------|--------------------------------------|--|
| % h | h | I_h | $\frac{I_h}{I_1}$ | $\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2$ | h^2 | $h^{0.8}$ | $\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^2$ | $\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^{0.8}$ |
| 100 | 1 | 67,03 | 1,07 | 1,15029 | 1 | 1,00 | 1,150 | 1,150 |
| 0,22 | 3 | 14,84 | 0,24 | 0,05641 | 9 | 2,41 | 0,508 | 0,136 |
| 0,08 | 5 | 5,69 | 0,09 | 0,00828 | 25 | 3,62 | 0,207 | 0,030 |
| 0,02 | 7 | 1,29 | 0,02 | 0,00043 | 49 | 4,74 | 0,021 | 0,002 |
| 0,03 | 9 | 2,07 | 0,03 | 0,00110 | 81 | 5,80 | 0,089 | 0,006 |
| 0,01 | 11 | 0,54 | 0,01 | 0,00007 | 121 | 6,81 | 0,009 | 0,001 |
| | | 91,47 | 1,46 | 1,217 | 286 | 24,38 | 1,984 | 1,325 |
| FASE B | | | | | | | | |
| % h | h | I_h | $\frac{I_h}{I_1}$ | $\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2$ | h^2 | $h^{0.8}$ | $\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^2$ | $\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^{0.8}$ |
| 100 | 1 | 74,00 | 1,184 | 1,40167 | 1 | 1,00 | 1,40 | 1,402 |
| 0,22 | 3 | 16,00 | 0,256 | 0,06550 | 9 | 2,41 | 0,59 | 0,158 |
| 0,08 | 5 | 6,25 | 0,100 | 0,01001 | 25 | 3,62 | 0,25 | 0,036 |
| 0,02 | 7 | 1,44 | 0,023 | 0,00053 | 49 | 4,74 | 0,03 | 0,003 |
| 0,03 | 9 | 2,50 | 0,040 | 0,00160 | 81 | 5,80 | 0,13 | 0,009 |
| 0,01 | 11 | 0,96 | 0,015 | 0,00024 | 121 | 6,81 | 0,03 | 0,002 |
| | | 101,15 | 1,618 | 1,480 | 286 | 24,38 | 2,43 | 1,609 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

Tabla 43*Factores armónicos*

| FASE A | | | FASE B | | |
|---------------------|------|---------|---------------------|------|---------|
| I (pu) ² | FHL | FHL-STR | I (pu) ² | FHL | FHL-STR |
| 1,103 | 1,63 | 1,09 | 1,22 | 1,64 | 1,09 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

Tabla 44*Cálculos de pérdidas por armónicos en el transformador de 15 kVA*

| FASE A | | | | |
|--------------------------------|---------------------|---|----------------------------|---|
| TIPO DE CARGA | PÉRDIDA NOMINAL (W) | PÉRDIDA CON CARGA BAJO CORRIENTE ARMÓNICA (W) | FACTOR DE PÉRDIDA ARMÓNICA | CORRECCIÓN DE PÉRDIDAS CON CARGA BAJO CORRECCIÓN ARMÓNICA (W) |
| SIN CARGA | 68 | 68 | ..... | 68 |
| DC (I^2R) | 182,03 | 221,45 | ..... | 221,45 |
| CORRIENTE DE EDDY EN DEVANADOS | 3,29 | 4,0 | 1,63 | 6,53 |
| OTRAS PÉRDIDAS | 6,68 | 8,13 | 1,09 | 8,85 |
| TOTAL | 260 | 301,58 | ..... | 304,83 |
| FASE B | | | | |
| TIPO DE CARGA | PÉRDIDA NOMINAL (W) | PÉRDIDA CON CARGA BAJO CORRIENTE ARMÓNICA (W) | FACTOR DE PÉRDIDA ARMÓNICA | CORRECCIÓN DE PÉRDIDAS CON CARGA BAJO CORRECCIÓN ARMÓNICA (W) |
| SIN CARGA | 68 | 68 | ..... | 68 |
| DC (I^2R) | 182,03 | 269,32 | ..... | 269,32 |
| CORRIENTE DE EDDY EN DEVANADOS | 3,29 | 4,9 | 1,64 | 7,98 |
| OTRAS PÉRDIDAS | 6,68 | 9,88 | 1,09 | 10,75 |
| TOTAL | 260 | 352,07 | ..... | 356,05 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

Tabla 45*Resultados finales de las pérdidas de los armónicos*

| FASE A | | | | | | | | | |
|---------|----------|------------|-------------|----------|------------|----------------|---------------|-------------------------|----------------------------|
| PEC (W) | POSL (W) | PEC-R (pu) | POSL-R (pu) | PLL (pu) | PLL-R (pu) | I_{max} (pu) | I_{max} (A) | Potencia sugerida (kVA) | Porcentaje de Derrateo (%) |
| 6,53 | 8,85 | 0,50 | 0,75 | 2,92 | 2,26 | 0,92 | 57,77 | 6,93 | 92,43 |
| FASE B | | | | | | | | | |
| PEC (W) | POSL (W) | PEC-R (pu) | POSL-R (pu) | PLL (pu) | PLL-R (pu) | I_{max} (pu) | I_{max} (A) | Potencia sugerida (kVA) | Porcentaje de Derrateo (%) |
| 7,98 | 10,75 | 0,41 | 0,62 | 2,86 | 2,03 | 0,93 | 58,12 | 6,97 | 92,99 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

La capacidad de transformación por la presencia de armónicos en la Fase A es de 6,93 kVA y en la Fase B es de 6,97 kVA, por lo tanto, la capacidad del transformador será de 13,906 kVA.

Tabla 46*Pérdidas en el transformador de 15 kVA*

| PÉRDIDAS CON CARGAS TOTALES EN CONDICIONES NO SINUSOIDALES | | | PÉRDIDAS TOTALES CON ARMÓNICOS | INCREMENTO PÉRDIDAS CIRCULACIÓN ARMÓNICOS | DE POR DE |
|--|----------------|--------------|--------------------------------|---|-----------|
| $P_{LLH1}(pu)$ | $P_{LLH2}(pu)$ | $P_{LLT}(W)$ | $P_H(W)$ | | |
| 1,30 | 1,58 | 262,44 | 330,44 | | |
| PÉRDIDAS CON CARGAS TOTALES EN CONDICIONES SINUSOIDALES | | | PÉRDIDAS TOTALES SIN ARMÓNICOS | | |
| $P_{LL1}(pu)$ | $P_{LL2}(pu)$ | $P_{LLT}(W)$ | $P(W)$ | $\Delta_{PLL}(W)$ | |
| 1,28 | 1,56 | 258,83 | 326,83 | 3,61 | |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

TRANSFORMADOR DE 25 kVA**Tabla 47***Parámetros del transformador de 25 kVA*

| Potencia (kVA) | Tipo | Tensión en primario (kV) | Tensión en secundario (kV) | I prim (A) | I sec (A) |
|-----------------------|-----------------------|--------------------------|----------------------------|-------------------|-----------|
| 25 | Monofásico | 7,970 | 0,12 | 3,14 | 104,17 |
| Pérdidas con carga(W) | Pérdidas en vacío (W) | Relación Transformación | R1 Ω (prim) | R2 Ω (sec) | |
| 289 | 98 | 66.42 | 12,32 | 0,014 | |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

Tabla 48*Pérdidas parásitas totales por corriente de Eddy y pérdidas óhmicas totales en condiciones normales*

| P _{TSL-R} (W) | P _{EC-R} (W) | P _{OSL-R} (W) | P _{DC} (W) |
|------------------------|-----------------------|------------------------|---------------------|
| 16,84 | 5,56 | 11,29 | 272,16 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

Tabla 49*Pérdidas nominales por corrientes parásitas en los devanados*

| Primario | Secundario |
|----------|------------|
| 2,22 | 3,33 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

Tabla 50

Cálculo de los factores de pérdidas armónicas Fase A-B

| FASE A | | | | | | | | |
|--------|----|---------------|-------------------|----------------------------------|------------|--------------|--------------------------------------|--|
| % h | h | I_h | $\frac{I_h}{I_1}$ | $\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2$ | h^2 | $h^{0.8}$ | $\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^2$ | $\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^{0.8}$ |
| 100 | 1 | 78,55 | 0,75 | 0,56867 | 1 | 1,00 | 0,569 | 0,569 |
| 0,15 | 3 | 12,12 | 0,12 | 0,01354 | 9 | 2,41 | 0,122 | 0,033 |
| 0,03 | 5 | 2,58 | 0,03 | 0,00061 | 25 | 3,62 | 0,015 | 0,002 |
| 0,03 | 7 | 2,09 | 0,02 | 0,00040 | 49 | 4,74 | 0,020 | 0,002 |
| 0,02 | 9 | 1,94 | 0,02 | 0,00035 | 81 | 5,80 | 0,028 | 0,002 |
| 0,02 | 11 | 1,24 | 0,01 | 0,00014 | 121 | 6,81 | 0,017 | 0,001 |
| | | 98,53 | 0,95 | 0,584 | 286 | 24,38 | 0,771 | 0,608 |
| FASE B | | | | | | | | |
| % h | h | I_h | $\frac{I_h}{I_1}$ | $\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2$ | h^2 | $h^{0.8}$ | $\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^2$ | $\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^{0.8}$ |
| 100 | 1 | 102,86 | 0,99 | 0,97507 | 1 | 1,00 | 0,975 | 0,975 |
| 0,13 | 3 | 13,83 | 0,13 | 0,01763 | 9 | 2,41 | 0,159 | 0,042 |
| 0,03 | 5 | 2,73 | 0,03 | 0,00069 | 25 | 3,62 | 0,017 | 0,002 |
| 0,02 | 7 | 2,44 | 0,02 | 0,00055 | 49 | 4,74 | 0,027 | 0,003 |
| 0,03 | 9 | 2,63 | 0,02 | 0,00064 | 81 | 5,80 | 0,052 | 0,004 |
| 0,01 | 11 | 1,14 | 0,01 | 0,00012 | 121 | 6,81 | 0,015 | 0,001 |
| | | 125,63 | 1,21 | 0,995 | 286 | 24,38 | 1,244 | 1,027 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

Tabla 51

Factores armónicos

| FASE A | | | FASE B | | |
|---------------------|-----------------|---------------------|---------------------|-----------------|---------------------|
| I (pu) ² | F _{HL} | F _{HL-STR} | I (pu) ² | F _{HL} | F _{HL-STR} |
| 0,76 | 1,32 | 1,04 | 1,00 | 1,25 | 1,03 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

Tabla 52

Cálculos de pérdidas por armónicos en el transformador de 25 kVA

| FASE A | | | | |
|--------------------------------|---------------------|---|----------------------------|---|
| TIPO DE CARGA | PÉRDIDA NOMINAL (W) | PÉRDIDA CON CARGA BAJO CORRIENTE ARMÓNICA (W) | FACTOR DE PÉRDIDA ARMÓNICA | CORRECCIÓN DE PÉRDIDAS CON CARGA BAJO CORRECCIÓN ARMÓNICA (W) |
| SIN CARGA | 98 | 98 | ..... | 98 |
| DC (I^2R) | 272,16 | 158,86 | ..... | 158,86 |
| CORRIENTE DE EDDY EN DEVANADOS | 5,56 | 3,2 | 1,32 | 4,28 |
| OTRAS PÉRDIDAS | 11,28 | 6,58 | 1,04 | 6,86 |
| TOTAL | 387 | 266,70 | ..... | 268,00 |

| FASE B | | | | |
|--------------------------------|---------------------|---|----------------------------|---|
| TIPO DE CARGA | PÉRDIDA NOMINAL (W) | PÉRDIDA CON CARGA BAJO CORRIENTE ARMÓNICA (W) | FACTOR DE PÉRDIDA ARMÓNICA | CORRECCIÓN DE PÉRDIDAS CON CARGA BAJO CORRECCIÓN ARMÓNICA (W) |
| SIN CARGA | 98 | 98 | ..... | 98 |
| DC (I^2R) | 272,16 | 270,70 | ..... | 270,70 |
| CORRIENTE DE EDDY EN DEVANADOS | 5,56 | 5,5 | 1,25 | 6,91 |
| OTRAS PÉRDIDAS | 11,8 | 11,22 | 1,03 | 11,59 |
| TOTAL | 387 | 385,44 | ..... | 387,198 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

Tabla 53

Resultados finales de las pérdidas de los armónicos

| FASE A | | | | | | | | | |
|--------------|---------------|-----------------|------------------|---------------|-----------------|----------------|---------------|-------------------------|----------------------------|
| P_{EC} (W) | P_{OSL} (W) | P_{EC-R} (pu) | P_{OSL-R} (pu) | P_{LL} (pu) | P_{LL-R} (pu) | I_{max} (pu) | I_{max} (A) | Potencia sugerida (kVA) | Porcentaje de Derrateo (%) |
| 4,28 | 6,86 | 1,30 | 1,64 | 3,38 | 3,94 | 0,94 | 98,29 | 11,79 | 94,36 |
| FASE B | | | | | | | | | |
| P_{EC} (W) | P_{OSL} (W) | P_{EC-R} (pu) | P_{OSL-R} (pu) | P_{LL} (pu) | P_{LL-R} (pu) | I_{max} (pu) | I_{max} (A) | Potencia sugerida (kVA) | Porcentaje de Derrateo (%) |
| 6,91 | 11,59 | 0,80 | 0,97 | 3,00 | 2,78 | 0,96 | 100,05 | 12,00 | 96,05 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

La capacidad de transformación por la presencia de armónicos en el transformador de 25 kVA en la Fase A es de 11,79 kVA y en la Fase B es de 12,00 kVA, por lo tanto, la capacidad del transformador será de 23,79 kVA.

Tabla 54

Pérdidas en el transformador de 25 kVA

| PÉRDIDAS CON CARGAS TOTALES EN CONDICIONES NO SINUSOIDALES | | | PÉRDIDAS TOTALES CON ARMÓNICOS | | INCREMENTO DE PÉRDIDAS DE CIRCULACIÓN ARMÓNICOS | DE POR DE |
|--|-----------------|---------------|--------------------------------|--|---|-----------|
| P_{LLH1} (pu) | P_{LLH2} (pu) | P_{LLT} (W) | P_H (W) | | | |
| 0.63 | 1.06 | 229.60 | 327.62 | | | |
| PÉRDIDAS CON CARGAS TOTALES EN CONDICIONES SINUSOIDALES | | | PÉRDIDAS TOTALES SIN ARMÓNICOS | | | |
| P_{LL1} (pu) | P_{LL2} (pu) | P_{LLT} (W) | P (W) | | Δ_{PL} (W) | |
| 0.62 | 1.06 | 228.07 | 326.07 | | 1.53 | |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

TRANSFORMADOR DE 37,5 kVA

Tabla 55

Parámetros del transformador de 37,5 kVA

| Potencia (kVA) | Tipo | Tensión en primario (kV) | Tensión en secundario (kV) | I prim (A) | I sec (A) |
|-----------------------|-----------------------|--------------------------|----------------------------|------------|-----------|
| 37,5 | Monofásico | 7,970 | 0,12 | 4,71 | 156,25 |
| Pérdidas con carga(W) | Pérdidas en vacío (W) | Relación Transformación | R1 Ω (prim) | R2 Ω (sec) | |
| 403 | 130 | 66.42 | 7,38 | 0,00774 | |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

Tabla 56

Pérdidas parásitas totales por corriente de Eddy y pérdidas óhmicas totales en condiciones normales

| P _{TSL-R} (W) | P _{EC-R} (W) | P _{OSL-R} (W) | P _{DC} (W) |
|------------------------|-----------------------|------------------------|---------------------|
| 50,65 | 16,72 | 33,94 | 352,35 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

Tabla 57

Pérdidas nominales por corrientes parásitas en los devanados

| Primario | Secundario |
|----------|------------|
| 6,69 | 10,023 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

Tabla 58

Cálculo de los factores de pérdidas armónicas Fase A-B

| FASE A | | | | | | | | |
|--------|----|---------------|-------------------|----------------------------------|------------|---------------|--------------------------------------|--|
| % h | h | I_h | $\frac{I_h}{I_1}$ | $\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2$ | h^2 | $h^{0.8}$ | $\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^2$ | $\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^{0.8}$ |
| 100 | 1 | 179,39 | 1,15 | 1,3182 | 1 | 1,00 | 1,32 | 1,318 |
| 0,18 | 3 | 31,91 | 0,20 | 0,0418 | 9 | 2,41 | 0,36 | 0,100 |
| 0,05 | 5 | 8,83 | 0,06 | 0,0032 | 25 | 3,62 | 0,08 | 0,012 |
| 0,03 | 7 | 5,08 | 0,03 | 0,0011 | 49 | 4,74 | 0,05 | 0,005 |
| 0,02 | 9 | 3,31 | 0,02 | 0,0005 | 81 | 5,80 | 0,04 | 0,003 |
| 0,01 | 11 | 1,72 | 0,01 | 0,0001 | 121 | 6,81 | 0,01 | 0,001 |
| | | 230,26 | 1,48 | 1,365 | 286 | 24,384 | 1,88 | 1,439 |
| FASE B | | | | | | | | |
| % h | h | I_h | $\frac{I_h}{I_1}$ | $\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2$ | h^2 | $h^{0.8}$ | $\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^2$ | $\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^{0.8}$ |
| 100 | 1 | 97,27 | 0,623 | 0,3876 | 1 | 1,00 | 0,39 | 0,388 |
| 0,23 | 3 | 22,15 | 0,142 | 0,0201 | 9 | 2,41 | 0,19 | 0,048 |
| 0,08 | 5 | 7,62 | 0,049 | 0,0024 | 25 | 3,62 | 0,06 | 0,009 |
| 0,02 | 7 | 1,87 | 0,012 | 0,0001 | 49 | 4,74 | 0,01 | 0,001 |
| 0,03 | 9 | 3,09 | 0,020 | 0,0004 | 81 | 5,80 | 0,03 | 0,002 |
| 0,02 | 11 | 1,64 | 0,010 | 0,0001 | 121 | 6,81 | 0,01 | 0,001 |
| | | 133,64 | 0,855 | 0,411 | 286 | 24,38 | 0,68 | 0,448 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

Tabla 59*Factores armónicos*

| FASE A | | | FASE B | | |
|---------------------|-----------------|---------------------|---------------------|-----------------|---------------------|
| I (pu) ² | F _{HL} | F _{HL-STR} | I (pu) ² | F _{HL} | F _{HL-STR} |
| 1,17 | 1,37 | 1,05 | 0,64 | 1,66 | 1,09 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

Tabla 60*Cálculos de pérdidas por armónicos en el transformador de 37,5 kVA*

| FASE A | | | | |
|--------------------------------|---------------------|---|----------------------------|---|
| TIPO DE CARGA | PÉRDIDA NOMINAL (W) | PÉRDIDA CON CARGA BAJO CORRIENTE ARMÓNICA (W) | FACTOR DE PÉRDIDA ARMÓNICA | CORRECCIÓN DE PÉRDIDAS CON CARGA BAJO CORRECCIÓN ARMÓNICA (W) |
| SIN CARGA | 130 | 130 | ..... | 130 |
| DC (I^2R) | 352,35 | 480,85 | ..... | 480,85 |
| CORRIENTE DE EDDY EN DEVANADOS | 16,72 | 22,8 | 1,38 | 31,37 |
| OTRAS PÉRDIDAS | 33,94 | 46,32 | 1,05 | 48,83 |
| TOTAL | 533 | 679,98 | ..... | 691,04 |
| FASE B | | | | |
| TIPO DE CARGA | PÉRDIDA NOMINAL (W) | PÉRDIDA CON CARGA BAJO CORRIENTE ARMÓNICA (W) | FACTOR DE PÉRDIDA ARMÓNICA | CORRECCIÓN DE PÉRDIDAS CON CARGA BAJO CORRECCIÓN ARMÓNICA (W) |
| SIN CARGA | 130 | 130 | ..... | 130 |
| DC (I^2R) | 352,35 | 144,70 | ..... | 144,70 |
| CORRIENTE DE EDDY EN DEVANADOS | 16,72 | 6,9 | 1,65 | 11,36 |
| OTRAS PÉRDIDAS | 33,94 | 13,94 | 1,09 | 15,21 |
| TOTAL | 533 | 295,51 | ..... | 301,28 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

Tabla 61*Resultados finales de las pérdidas de los armónicos*

| FASE A | | | | | | | | | |
|---------------------|----------------------|------------------------|-------------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|-------------------------|----------------------------|
| P _{EC} (W) | P _{OSL} (W) | P _{EC-R} (pu) | P _{OSL-R} (pu) | P _{LL} (pu) | P _{LL-R} (pu) | I _{max} (pu) | I _{max} (A) | Potencia sugerida (kVA) | Porcentaje de Derrateo (%) |
| 31,36 | 48,83 | 0,53 | 0,70 | 2,88 | 2,23 | 0,95 | 148,53 | 17,82 | 95,06 |
| FASE B | | | | | | | | | |
| P _{EC} (W) | P _{OSL} (W) | P _{EC-R} (pu) | P _{OSL-R} (pu) | P _{LL} (pu) | P _{LL-R} (pu) | I _{max} (pu) | I _{max} (A) | Potencia sugerida (kVA) | Porcentaje de Derrateo (%) |
| 11,36 | 15,21 | 1,47 | 2,23 | 3,76 | 4,70 | 0,89 | 139,84 | 16,781 | 89,50 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

La capacidad de transformación por la presencia de armónicos en el transformador de 37,5 kVA en la Fase A es de 17,82 kVA y en la Fase B es de 16,78 kVA, por lo tanto, la capacidad del transformador será de 34,60kVA.

Seguidamente se calculan el incremento de las pérdidas por la circulación de armónicos en el transformador de 37,5 kVA.

Tabla 62

Pérdidas en el transformador de 37,5 kVA

| PÉRDIDAS CON CARGAS TOTALES EN CONDICIONES NO SINUSOIDALES | | | PÉRDIDAS TOTALES CON ARMÓNICOS | INCREMENTO DE PÉRDIDAS POR CIRCULACIÓN DE ARMÓNICOS | DE POR DE |
|--|----------------|--------------|--------------------------------|---|-----------|
| $P_{LLH1}(pu)$ | $P_{LLH2}(pu)$ | $P_{LLT}(W)$ | $P_H(W)$ | | |
| 1,59 | 0,49 | 366,16 | 496,16 | | |
| PÉRDIDAS CON CARGAS TOTALES EN CONDICIONES SINUSOIDALES | | | PÉRDIDAS TOTALES SIN ARMÓNICOS | | |
| $P_{LL1}(pu)$ | $P_{LL2}(pu)$ | $P_{LLT}(W)$ | $P(W)$ | $\Delta_{PLL}(W)$ | |
| 1,56 | 0,47 | 357,74 | 487,74 | 8,42 | |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

Por lo tanto, los resultados finales los presentamos en la tabla siguiente:

Tabla 63

Resumen de los resultados de los transformadores estudiados

| CUADRO RESUMEN DE LOS TRANSFORMADORES ESTUDIADOS | | | | | | |
|--|-------------------------|--------|-----------------|------------------------------------|------------------------------------|---|
| CAPACIDAD (kVA) | POTENCIA SUGERIDA (kVA) | | | PÉRDIDAS TOTALES CON ARMÓNICOS (W) | PÉRDIDAS TOTALES SIN ARMÓNICOS (W) | INCREMENTO DE PÉRDIDAS POR CIRCULACIÓN DE ARMÓNICOS (W) |
| | FASE A | FASE B | CAPACIDAD (kVA) | | | |
| 10 | 4,75 | 4,53 | 9,08 | 237,24 | 234,45 | 2,79 |
| 15 | 6,93 | 6,97 | 13,90 | 330,44 | 326,83 | 3,61 |
| 25 | 11,79 | 12 | 23,79 | 327,62 | 326,07 | 1,53 |
| 37,5 | 17,82 | 16,78 | 34,60 | 496,16 | 487,74 | 8,42 |

Fuente: Elaboración y Formulación Propia

DISCUSIÓN

El crecimiento constante de la demanda eléctrica en el sector residencial por la entrada de cargas lineales y no lineales, ha generado que en los últimos años se preste una atención especial a los transformadores de distribución, ya que estos son los encargados de atender la demanda eléctrica de los usuarios finales, la presencia de cargas no lineales ha generado que el transformador se afecte ante la presencia de estas cargas, llegando a disminuir su capacidad de transformación en las horas de máxima demanda, por el calentamiento adicional que generan los armónicos de corriente.

La literatura técnica en particular la norma IEEE Std. C57.110 recomienda que se analice la influencia de los armónicos de corriente, para ello se orienta a que se debe trabajar con un espectro armónico característico, pero en la mayoría de trabajos solo se considera ejemplos particulares para aplicar la metodología de cálculo propuesta en esta norma, para efectuar la evaluación del impacto que generan los armónicos de corriente en los transformadores monofásicos de 10, 15, 25 y 37.5 kVA, fue necesario evaluar una base de datos de mediciones de calidad de energía en la cual se encontraban los registros de armónicos de corriente monitoreados de los años 2013, 2014 y 2015, datos obtenidos de la EERSSA (Datos dados con fines académicos), para determinar un espectro armónico característico para cada capacidad de transformación fue necesario aplicar métodos y modelos estadísticos implementados en Matlab, estos permitieron definir como es el comportamiento de los armónicos en el tiempo, llegando a obtenerse un espectro armónico característico y que representa la condición más crítica para el transformador, la técnica seleccionada para evaluar el comportamiento armónico en el tiempo fue la técnica clúster, la literatura sobre como caracterizar espectros armónicos es limitada en la mayoría de trabajos revisados, no se orienta sobre que procedimiento o modelo se debe aplicar para caracterizar espectros armónicos, por lo que la caracterización de los armónicos por la técnica clúster debe ser revisada en futuras investigaciones para proponer métodos y modelos que orienten sobre cómo se debe construir espectros armónicos para un a región o país.

CONCLUSIONES

- La norma ANSI/ IEEE C57.110, basada en los parámetros del transformador proporcionados por el fabricante o por los datos en el reporte de pruebas certificado de dicho transformador, será el método que determina la máxima corriente que puede soportar un transformador sin que sufra un daño y su vida útil no disminuya.
- La metodología de cálculo propuesta en la norma ANSI/IEEE C57.110 permitió evaluar la disminución de la capacidad de transformación en transformadores monofásicos por la presencia de armónicos de corriente en las horas de demanda máxima con un espectro armónico característico para cada transformador estudiado, logrando garantizar que las pérdidas más altas no superen el valor para las cuales fue diseñado.
- La caracterización de los armónicos aplicando la técnica clúster permite determinar cuál es el comportamiento de los armónicos de corriente en la semana, llegándose a conformar tres clústeres representativos, considerando la misma agrupación del primer armónico para el resto de armónicos y de estos se selecciona el más representativo que será el espectro armónico de cada transformador.
- El planteamiento del modelo analítico permitió la ejecución de dos procedimientos, el primero consistió en conformar un clúster característico de cada armónico de corriente y con estos conformar el espectro armónico del transformador, el segundo procedimiento consiste en ejecutar la secuencia de cálculos que permitieron derratear el transformador para determinar su capacidad disponible ante la presencia de un espectro armónico característico.

- La capacidad real que pueden resistir y trabajar cada uno de los transformadores de 10kVA 15 kVA 25 kVA y el 37.5 kVA, será de 9,28 kVA, 13,91 kVA, 23,79 kVA y 34,60 kVA respectivamente.
- El incremento de pérdidas por circulación de armónicos de corriente en los transformadores de distribución monofásicos de 10 kVA, 15kVA, 25kVA y 37,5 son de 2,79 W, 3,61 W, 1.53 W y 8,42 W respectivamente.

RECOMENDACIONES

- Conformar los espectros armónicos de corriente con los armónicos impares del primero al decimoprimeros de forma individual para cada semana y luego seleccionar el peor caso para conformar el espectro armónico. La misma hora que se selecciona un armónico debe seleccionarse para todos los casos tanto para la fase A y B.
- Plantear y validar nuevos métodos que permitan determinar la conformación ideal del espectro armónico representativos para una región o país.
- Continuar con la investigación evaluando la incidencia de la temperatura y la reducción de la vida del transformador.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Abad, V., González, J., & Sagredo, J. (1998). Influencia de cargas no lineales en transformadores de distribución. *8º Reunión Nacional de Grupos de Investigación en Ingeniería Eléctrica*. Cádiz, Andalucía, España.
- Acevedo, R., & Ortiz, S. (2008). Statistical Analysis of Distribution Transformers' Lifetime Data. *The 3rd International Conference on Electrical and Control Technologies ECT- 2008*, (pág. 6). Kaunas, Lithuania.
- Aponte, O. (2007). Evaluación de pérdidas en transformadores de distribución bajo condiciones no sinusoidales. *VIII Jornadas Latinoamericanas en Alta Tensión y Aislamiento Eléctrico ALTAE 2007*, (pág. 6). Cuernavaca, México.
- Argüelles, S. (16 de 01 de 2016). *slideshare*. Obtenido de <http://es.slideshare.net/Hually/electrotecnia-transformadores>
- Baggini, A. (2008). *Handbook of Power Quality*. Wiley & Sons Ltd.
- Bravo, N., Llorent, M., & Alberto, A. (2004). *La amenaza de los armónicos y sus soluciones*. Thomsom Learning.
- Cadavid, H. (2007). Evaluación del Comportamiento Térmico del Transformador de Distribución. *VIII Jornadas Latinoamericanas y V Iberoamericanas en Alta Tensión y Aislamiento Eléctrico ALTAE 2007*, (pág. 6). Cuernavaca, México.
- Castañeda, O., & Castañeda, W. (2014). Análisis de Calidad de Energía acerca de la Calidad del Producto e Influencia de Armónicos de Corriente dentro del Área de Concesión de CNEL-Milagro.
- Cepeda, J. (2013). *Evaluación de la Vulnerabilidad del Sistema Eléctrico de Potencia en Tiempo Real usando Tecnología de Medición Sincrofasorial, Tesis de Grado para obtener el título de Doctor en Ingeniería Eléctrica, Instituto De Energía Eléctrica*. San Juan, Argentina.
- Chapman, S. (2000). Transformadores. En *Máquinas Eléctricas* (TERCERA ed., pág. 61). Mc GRAW HILL.
- Chugá, K. (2015). *Caracterización de armónicos en el Sistema Nacional Interconectado a partir de información del Sistema de monitoreo de área extendida (WAMS), Escuela Politécnica Nacional*. Quito.
- Cuadras, C. (2007). *Nuevos Métodos de Análisis Multivariante*. Barcelona, España:

CMC Editions.

- Cuevas, F. (2000). Armónicas en los sistemas eléctricos, Pág. 2.
- Elmoudi, A. (2006). *Effect of Harmonics on Transformers Loss of life*. .
- Elmoudi, A., Lehtonen, M., & Nordman, H. (2005). *Corrected winding eddy-current harmonic loss factor for transformers subject to nonsinusoidal load currents*. Rusia: IEEE.
- Fragozo, R., Malagón, G., Chacón, J., Ordoñez, G., & Giraldo, W. (2014). Recomendaciones prácticas para la evaluación de la carga de un transformador sometido a corrientes no sinusoidales.
- Frau, J. (2007). Eficiencia Energética En Redes Eléctricas, Desde La Perspectiva De Las Empresas Distribuidoras. *Jornadas de la Cátedra ENDESA de Innovación Energética*, (pág. 29). Barcelona.
- Frau, J. (2008). Amorphous versus Conventional core technology in Distribution Transformers. *III International Conference on Energy Innovation*, (pág. 9). Barcelona.
- Gil, H. (2013). *Metodología para derrateo de transformadores que atienden cargas no lineales para uso comercial e industrial*.
- Gómez, D. (2007). *Análisis de Estacionalidad de la Curva de Demanda para Clientes BT-1*. Santiago.
- Gómez, J., Quispe, E., Reyes, R., Sousa, V., & Percy, V. (2014). Influencia de los armónicos de corriente sobre las pérdidas en los transformadores de distribución monofásicos con derivación central. En *El Hombre y la Máquina* (págs. 33-43). Cali, Colombia.
- González, G., & De Armas, M. (2009). Selección Eficiente de Bancos de Transformadores. *Revista Energética*, 29-38,42.
- Hashmi G., I. M. (Mayo 8-9, 2008). Transformers Loading Conditions For Future Thermally Unfavorable Environments. Power Systems and High Voltage Engineering Helsinki University of Technology (TKK), Espoo, Finland. *The 3rd International Conference on Electrical and Control Technologies ECT-2008*. Kaunas, Lithuania.
- Hernández, O., Sánchez, J., & Valido, R. (2005). El problema de los armónicos en los transformadores. *Estado mundial del arte, Revista Energética*, 3-8.

- IEC. (2004). Power Transformer, Part 2, Temperature Raise. *Norma IEC 60076-2*, 61.
- IEEE. (1995). IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers. *IEEE Std. C57.91-1995*.
- IEEE. (1998). IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents. *IEEE Std. C57.110-1998*.
- IEEE. (1999). IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers. *IEEE Std C57.12.90*, 87.
- Jauregui, L., & Tylavsky, D. (2008). Acceptability of Four Transformer Top-Oil Thermal Models—Part I: Defining Metrics. En T. D. Jauregui-Rivera L., *IEEE Transactions on Power Delivery* (Vol. 23, págs. 860-865).
- Loor, M. (2012). *Propuesta Para El Estudio De Optimización De Cargabilidad De Transformadores De Distribución En La Empresa Eléctrica Pública De Guayaquil, Sector Cdl. Bolivariana*. Guayaquil: Tesis Previa a la Obtención del Título de Ingeniero Eléctrico.
- MacQueen, J. (1968). Some methods for classification and analysis of multivariate observations. En *Math Statist* (págs. 281-297).
- Makarov, S., & Emanuel, A. (2000). Corrected harmonic loss factor for transformers supplying nonsinusoidal load currents. *Harmonics and Quality of Power, 2000. Proceedings. Ninth International Conference On, 1*, págs. 87-90. doi:10.1109/ICHQP.2000.897003
- Martínez, E. (1986). Transformadores. En E. Martínez, *Electrotecnia Básica* (págs. 178-220). La Habana: Pueblo y Educación.
- Marulanda, L., & Rebolledo, B. (2009). Efectos de las Armónicas sobre los Transformadores de Distribución.
- Medina, M. (2012). Estimación de Curvas de Demanda de Transformadores de Distribución.
- Osorio, L. (2009). *Estudio de Cargabilidad en Transformadores de Distribución Monofásicos y Trifásicos*. Colombia: CHEC.
- Peña, D. (2002). *Análisis de Datos Multivariantes*.
- Ramírez, J., Dagá, P., Oñós, E., & Ruiz, F. (s.f.). *Transformadores Convertidores*. Barcelona: CEAC, S.A.,.
- Romero, H. (2013). Metodología para derrateo de transformadores que atienden cargas

- no lineales para uso comercial e industrial. *Articulo IEEE*.
- Ruggero, B., & Sánchez, M. (2014). *Incidencias de Cargas No Lineales en Transformadores de Distribución* (págs. 28-44). Revista Científica UCSA.
- Savaghebi, M., Jalilian, A., & Gholami, A. (2008). A new approach for transformer loading capability assessment under non-linear load currents. *Industrial Technology, 2008. ICIT 2008. IEEE International Conference* (págs. 1-5). IEEE.
- Singer, F. (2012). *Transformadores*. Argentina.
- Sokal, R., & Sneath, P. (1963). *Principles of Numerical Taxonomy*. San Francisco: FREEMAN.
- Stahlhut J., H. G. (2008). *A Preliminary Assessment of the Impact of Ambient Temperature Rise on Distribution Transformer Loss of Life*. *IEEE Transactions On Power Delivery* (Vol. 23).
- Tejada, A., & Llamas, A. (2006). Efectos de las Armónicas en los Sistemas Eléctricos.
- Téllez, E. (2000). *Automatización, Productividad y calidad. Programa de Distorsión Armónica*. México.
- Vila, R., Rubio, M., Verlanga, V., & Torrado, M. (2014). Cómo aplicar un cluster jerárquico en SPSS. *REIRE*, 113-127.