REPÚBLICA DEL ECUADOR
Escuela Politécnica Nacional
"E SCIENTIA HOMINIS SALUS"

La versión digital de esta tesis está protegida por la Ley de Derechos de Autor del Ecuador.

Los derechos de autor han sido entregados a la "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL" bajo el libre consentimiento del (los) autor(es).

Al consultar esta tesis deberá acatar con las disposiciones de la Ley y las siguientes condiciones de uso:

- Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.

- Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.

- No se podrá obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

El Libre Acceso a la información, promueve el reconocimiento de la originalidad de las ideas de los demás, respetando las normas de presentación y de citación de autores con el fin de no incurrir en actos ilegítimos de copiar y hacer pasar como propias las creaciones de terceras personas.

Respeto hacia sí mismo y hacia los demás.

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

EFECTO DE LAS CARGAS NO LINEALES EN LAS PÉRDIDAS DE LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN – APLICACIÓN EN LA EMPRESA ELÉCTRICA QUITO S.A.

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN ELÉCTRICO.

MARCELO FERNANDO REINOSO MASAPANTA

fernanreinoso@hotmail.com

DIRECTOR: ING. MARIO BARBA.

mario.barba@epn.edu.ec

QUITO, Mayo 2012

DECLARACIÓN

Yo, Marcelo Fernando Reinoso Masapanta, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Marcelo F. Reinoso M.

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Marcelo F. Reinoso M. bajo mi supervisión.

Ing. Mario Barba.

DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

A mis padres que supieron encaminar mi accionar a través de estos años para lograr culminar esta gran meta.

Al Director del proyecto el Ing. Mario Barba que sido una guía para lograr la culminación exitosa de este trabajo.

Al Ing. Francisco Volpi que colabor con el desarrollo de este proyecto de titulación con la entrega de valiosa información.

Al Ing. Xavier Borja por su enorme aporte para la conclusión de este trabajo.

Al personal de la Empresa Eléctrica Quito que facilitó los datos y permisos necesarios para la realización de este estudio, especialmente al Tlgo. Santiago Proaño.

A todas las personas que han colaborado de una u otra forma en el desarrollo de este proyecto.

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mi Madre y mi Padre que con su paciencia, esfuerzo y dedicación inculcaron en mi valores de respeto, solidaridad, sinceridad, honradez y estudio. A mi hermana que siempre tuvo la confianza en mi y me acompaño en los momentos buenos y malos.

Marcelo

CONTENIDO

DECLARACIÓN I

CERTIFICACIÓN II

AGRADECIMIENTOS III

DEDICATORIA IV

CONTENIDO V

RESUMEN XIII

PRESENTACIÓN XV

1. CAPITULO I. 1

1.1 OBJETIVOS 1
1.1.1 OBJETIVO GENERAL. 1
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS. 1

1.2 ALCANCE 1

1.3 JUSTIFICACIÓN. 2

2. CAPÍTULO II. 3

2.1 PÉRDIDAS EN TRANSFORMADORES. 3
2.1.1 PÉRDIDAS CON CARGA. 3
2.1.2 PÉRDIDAS EN EL HIERRO. 8

2.2 TRATAMIENTO DE SEÑALES NO SENOIDALES. 13
2.2.1 SERIES DE FOURIER. 13

2.3 TÉRMINOS EN EL ESTUDIO DE ARMÓNICOS. 15
2.3.1 DEFINICIÒN DE ARMÒNICOS. 15
2.3.2 ARMÓNICOS DE VOLTAJE Y CORRIENTE. 15
2.3.3 CLASIFICACIÓN DE ARMÓNICOS. 17
2.3.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS ARMÓNICOS. 18

2.4 CARGAS LINEALES Y NO LINEALES. 21

2.5 POTENCIA FUNDAMENTAL Y ARMÓNICA. 22
2.5.1 RED ELÉCTRICA EN CONDICIONES SINUSOIDALES. 22
2.5.2 RED ELÉCTRICA EN CONDICIONES NO SINUSOIDALES. 23

2.6 PRINCIPALES FUENTES DE ARMÓNICOS 26

2.6.1 LÁMPARAS FLUORESCENTES....27
2.6.2 HORNOS DE ARCO....28
2.6.3 HORNOS DE INDUCCIÓN....30
2.6.4 VARIADORES DE VELOCIDAD....30
2.6.5 COMPENSADOR ESTÁTICO DE VARs....31
2.6.6 FUENTES DE PODER EN MODO CONMUTACIÓN....32
2.6.7 CONVERTIDORES DE POTENCIA....33

2.7 EFECTO DE LOS ARMÓNICOS....34
2.7.1 EFECTOS SOBRE MOTORES Y GENERADORES....35
2.7.2 EFECTO SOBRE LOS CONDUCTORES....37
2.7.3 EFECTO SOBRE CONDENSADORES....38
2.7.4 EFECTO SOBRE EQUIPOS ELECTRÓNICOS....39
2.7.5 EFECTOS SOBRE MEDIDORES....40
2.7.6 EFECTOS SOBRE MECANISMO DE CONTROL Y RELÉS....41
2.7.7 INTERFERENCIA TELEFONICA....42

2.8 PÉRDIDAS EN TRANSFORMADORES EN PRESENCIA DE ARMÓNICOS....43
2.8.1 CALCULO TEORICO DEL AUMENTO DE LAS PÉRDIDAS POR EFECTOS DE ARMONICO SEGÚN UNE 2148-4:1996....43
2.8.2 CALCULO TEORICO DEL AUMENTO DE LAS PÉRDIDAS POR EFECTOS DE ARMONICO SEGÚN NORMA IEEE Std 1158-1991....44
2.8.3 CALCULO TEORICO DEL AUMENTO DE LAS PÉRDIDAS POR EFECTOS DE ARMONICO SEGÚN NORMA IEEE Std 1158-1999....45
2.8.4 CALCULO TEORICO DEL AUMENTO DE LAS PÉRDIDAS POR EFECTOS DE ARMONICO SEGÚN NORMA UNE 61378-1:1997....47
2.8.5 CALCULO TEORICO DEL AUMENTO DE LAS PÉRDIDAS POR EFECTOS DE ARMONICO SEGÚN NORMA IEEE Std C57.110-1998....48

2.9 REGULACIÓN CONELEC 004/01....49
2.9.1 PERTURBACIONES – ARMÓNICOS....49

3. CAPITULO III. 52

3.1 TRANSFORMADORES ANALIZADOS....52
3.1.1 CALL CENTER CRONIX....52
3.1.2 IMPRENTA MARISCAL....53
3.1.3 TORRE DE DEPARTAMENTOS PARQUE REAL....53
3.1.4 CENTRO DE COMPUTO PUCE....54
3.1.5 ALMACEN COMERCIAL ETAFASHION C.C.I....55

3.2 EQUIPO DE MEDICIÓN UTILIZADO....55
3.2.1 MODO OSCILOSCOPIO....56
3.2.2 MODO MULTÍMETRO....56
3.2.3 ARMÓNICOS....57
3.2.4 DIAGRAMA DE FASORES....57
3.2.5 FLICKER....57
3.2.6 EVENTO....57
3.2.7 HISTORIAL....57
3.2.8 INFORMES....57
3.2.9 CONFIGURACIÓN....58

3.3 METODOLOGÍA QUE SE APLICARÁ PARA LA EVALUACIÓN DE PÉRDIDAS EN PRESENCIA DE ARMÓNICOS. 59
3.3.1 PÉRDIDAS DEBIDO A VOLTAJES ARMONICOS..... 60
3.3.2 PÉRDIDAS DEBIDO A CORRIENTES ARMÓNICOS..... 61
3.3.3 PÉRDIDAS ÓHMICAS EN DC. 61
3.3.4 FACTOR DE PÉRDIDAS POR CORRIENTES POLIARMONICAS EN LOS DEVANADOS. 63
3.3.5 FACTOR DE PÉRDIDAS ADICIONALES DEBIDO A CORRIENTES POLIARMONICAS EN OTRAS PARTES CONDUCTORAS..... 63

CAPÍTULO 4. 64

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS. 64

4.1 PRESENTACIÓN Y APLICACIÓN DE METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE PÉRDIDAS ADICIONALES. 64
4.1.1 CALL CENTER CRONIX..... 64
4.1.2 IMPRENTA MARISCAL. 76
4.1.3 EDIFICIO DE DEPARTAMENTOS PARQUE REAL. 86
4.1.4 CENTRO DE COMPUTO PUCE. 96
4.1.5 ETAFASHION CENTRO COMERCIAL IÑAQUITO..... 106

5. CAPITULO 5. 117

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. 117

5.1 CONCLUSIONES..... 117

5.2 RECOMENDACIONES 118

INDICE DE FIGURAS.

Figura 2.1 Esquema de Prueba de Voltaje de Cortocircuito en Transformadores Trifásicos. 4
Figura 2.2 Devanado D del transformador. 6
Figura 2.3 Devanado Y del transformador..... 7
Figura 2.4 Esquema de Instalación con dos vatímetros. 11
Figura 2.5 Esquema de instalación con tres vatímetros. 12
Figura 2.6 Esquema de instalación con neutro artificial. 12
Figura 2.7 Voltaje de distorsión debido a la corriente de distorsión. 16
Figura 2.8 Carga Lineal. 21
Figura 2.9 Carga No Lineal. 22
Figura 2.10 Triángulo de Potencias en Condiciones Sinusoidales. 22
Figura 2.11 Triángulo de Potencias con Potencias Armónicas. 24
Figura 2.12 Triangulo de Potencias en Condiciones No Sinusoidales. 25
Figura 2.13. Forma de onda de corriente de lámpara fluorescente a) Balasto magnético b) Balasto electrónico. 28
Figura 2.14 Horno de Arco Eléctrico. 28
Figura 2.15 . Forma de onda de corriente de una fuente de poder de seis pulsos PWM 31
Figura 2.16 . Compensador de VAR Estático Usando un Reactor Controlado por Tiristor. 31
Figura 2.17. Onda de Corriente de la Fuente de Poder en modo de conmutación. 33
Figura 2.18 Rectificador Trifásico de Seis Pulsos con Tiristores. 34
Figura 2.19 Efector Pelicular. 38
Figura 2.20 Reducción del Conductor vs. Armónicos con Distribución Armónica de Seis pulsos. 38
Figura 2.21 Circuito equivalente armónico de un sistema con condensadores de compensación de factor de potencia. 39
Figura 2.22 Pérdidas bajo carga vs Corriente Cuadrado..... 47
Figura 3.1 Analizador de Redes Power Explorer DRANETZ-BMI PX5..... 59
Figura 4.1 Diagrama de Contenido Armónico de Voltaje Canal A. Cronix..... 67
Figura 4.2 Diagrama de Contenido Armónico de Voltaje Canal B. Cronix..... 67
Figura 4.3 Diagrama de Contenido Armónico de Voltaje Canal C. Cronix 68
Figura 4.4 Diagrama de Contenido Armónico de Corriente Canal A. Cronix.... 70
Figura 4.5 Diagrama de Contenido Armónico de Corriente Canal B. Cronix.... 70
Figura 4.6 Diagrama de Contenido Armónico de Corriente Canal C. Cronix.... 71
Figura 4.7 Forma de Onda de Voltaje y Corriente Fase A. Cronix 72

Figura 4.8 Forma de Onda de Voltaje y Corriente Fase B. Cronix 72
Figura 4.9 Forma de Onda de Voltaje y Corriente Fase C. Cronix 73
Figura 4.10 Diagrama de Contenido Armónico de Voltaje Canal A. Imprenta.. 78
Figura 4.11 Diagrama de Contenido Armónico de Voltaje Canal B. Imprenta.. 79
Figura 4.12 Diagrama de Contenido Armónico de Voltaje Canal C. Imprenta.. 79
Figura 4.13 Diagrama de Contenido Armónico de Corriente Canal A. Imprenta 81
Figura 4.14 Diagrama de Contenido Armónico de Corriente Canal B. Imprenta 82
Figura 4.15 Diagrama de Contenido Armónico de Corriente Canal C. Imprenta 82
Figura 4.16 Forma de Onda de Voltaje y Corriente Fase A. Imprenta 83
Figura 4.17 Forma de Onda de Voltaje y Corriente Fase C. Imprenta 83
Figura 4.18 Forma de Onda de Voltaje y Corriente Fase C. Imprenta 84
Figura 4.19 Diagrama de Contenido Armónico de Voltaje Canal A. Parque Real 88
Figura 4.20 Diagrama de Contenido Armónico de Voltaje Canal B. Parque Real 89
Figura 4.21 Diagrama de Contenido Armónico de Voltaje Canal C. Parque Real 89
Figura 4.22 Diagrama de Contenido Armónico de Corriente Canal A. Parque Real 91
Figura 4.23 Diagrama de Contenido Armónico de Corriente Canal B. Parque Real 92
Figura 4.24 Diagrama de Contenido Armónico de Corriente Canal C. Parque Real 92
Figura 4.25 Forma de Onda de Voltaje y Corriente Fase B. Parque Real..... 93
Figura 4.26 Forma de Onda de Voltaje y Corriente Fase B. Parque Real..... 93
Figura 4.27 Forma de Onda de Voltaje y Corriente Fase C. Parque Real..... 94
Figura 4.28 Diagrama de Contenido Armónico de Voltaje Canal B. PUCE..... 98
Figura 4.29 Diagrama de Contenido Armónico de Voltaje Canal B. PUCE..... 99
Figura 4.30 Diagrama de Contenido Armónico de Voltaje Canal C. PUCE..... 99
Figura 4.31 Diagrama de Contenido Armónico de Corriente Canal A. PUCE 101
Figura 4.32 Diagrama de Contenido Armónico de Corriente Canal B. PUCE 102
Figura 4.33 Diagrama de Contenido Armónico de Corriente Canal C. PUCE 102
Figura 4.34 Forma de Onda de Voltaje y Corriente Fase A. PUCE..... 103
Figura 4.35 Forma de Onda de Voltaje y Corriente Fase B. PUCE..... 103
Figura 4.36 Forma de Onda de Voltaje y Corriente Fase C. PUCE 104
Figura 4.37 Diagrama de Contenido Armónico de Voltaje Canal A. Etafashion 108
Figura 4.38 Diagrama de Contenido Armónico de Corriente Canal B. Etafashion 109
Figura 4.39 Diagrama de Contenido Armónico de Corriente Canal C Etafashion. 109

Figura 4.40 Diagrama de Contenido Armónico de Corriente Canal A. Etafashion 111
Figura 4.41 Diagrama de Contenido Armónico de Corriente Canal B. Etafashion 112
Figura 4.42 Diagrama de Contenido Armónico de Corriente Canal C. Etafashion 112
Figura 4.43 Forma de Onda de Voltaje y Corriente Fase A. Etafashion..... 113
Figura 4.44 Forma de Onda de Voltaje y Corriente Fase B. Etafashion..... 113
Figura 4.45 Forma de Onda de Voltaje y Corriente Fase C. Etafashion..... 114

INDICE DE TABLAS.

Tabla 2.1 Contenido Armónico de Corriente en un Horno de Arco de Dos Fases de un Ciclo de Fundición. 29
Tabla 2.2. Espectro típico de corriente de la Fuente de Poder en modo de conmutación. 33
Tabla 2.3 Orden de Armónicos Derivados de un Convertidor de Seis Pulsos.. 36
Tabla 2.4 Resistencia Relativa. 45
Tabla 3.1 Características del Transformador Cronix. 53
Tabla 3.2 Características del Transformador IM. 53
Tabla 3.3 Características del Transformador P.R. 54
Tabla 3.4 Características del Transformador PUCE. 54
Tabla 3.5 Características de Transformador Etafashion. 55
Tabla 4.1 Voltajes Fase-Neutro, Fase-Fase. Cronix..... 65
Tabla 4.2 Corrientes por Fase. Cronix..... 65
Tabla 4.3 Componentes Armónicos de Voltaje 66
Tabla 4.4 THD Impar de Voltaje. Cronix..... 66
Tabla 4.5 THD Par de Voltaje. Cronix 66
Tabla 4.6 THD Total de Voltaje. Cronix..... 66
Tabla 4.7 Componentes Armónicos de Corriente. Cronix 69
Tabla 4.8 THD Impar de Corriente. Cronix..... 69
Tabla 4.9 THD Par de Corriente. Cronix..... 69
Tabla 4.10 THD Total de Corriente. Cronix 69
Tabla 4.11 Resistencia de Devanados de Alta y Baja Tensión. Cronix. 73
Tabla 4.12 Pérdidas Según Protocolos de Pruebas. Cronix..... 74
Tabla 4.13 Pérdidas a Corriente de Carga. Cronix..... 75
Tabla 4.14 Factor de Pérdidas en Devanados Cronix. 75
Tabla 4.15 Factor de Pérdidas Adicionales en otras Partes Conductoras. Cronix 75
Tabla 4.16 Pérdidas por Corrientes Poliarmónicas. Cronix. 76
Tabla 4.17 Voltajes Fase-Neutro, Fase-Fase. Imprenta..... 76
Tabla 4.18 Corrientes por Fase. Imprenta..... 76
Tabla 4.19 Componentes Armónicos de Voltaje. Imprenta 77
Tabla 4.20 THD Par de Voltaje. Imprenta..... 77
Tabla 4.21 THD Impar de Voltaje. Imprenta 77
Tabla 4.22 THD Total de Voltaje. Imprenta 78
Tabla 4.23 Componentes Armónicos de Corriente. Imprenta..... 80
Tabla 4.24 THD Par de Corriente. Imprenta..... 80
Tabla 4.25 THD Impar de Corriente. Imprenta 81
Tabla 4.26 THD Total de Corriente. Imprenta 81
Tabla 4.27 Resistencia de Devanados de Alta y Baja Tensión. Imprenta 84

Tabla 4.28 Pérdidas Según Protocolos de Pruebas. Imprenta 84
Tabla 4.29 Pérdidas a Corriente de Carga. Imprenta 85
Tabla 4.30 Factor de Pérdidas en Devanados. Imprenta 85
Tabla 4.31 Factor de Pérdidas Adicionales en otras Partes Conductoras. Imprenta 85
Tabla 4.32 Pérdidas por Corrientes Poliarmónicas. Imprenta 86
Tabla 4.33 Voltajes Fase-Neutro, Fase-Fase. Parque Real 86
Tabla 4.34 Corrientes por Fase. Parque Real 87
Tabla 4.35 Componentes Armónicos de Voltaje. Parque Real 87
Tabla 4.36 THD Par de Voltaje. Parque Real 88
Tabla 4.37 THD Impar de Voltaje. Parque Real 88
Tabla 4.38 THD Total de Voltaje. Parque Real 88
Tabla 4.39 Componentes Armónicos de Corriente. Parque Real 90
Tabla 4.40 THD Par de Corriente. Parque Real 90
Tabla 4.41 THD Impar de Corriente. Parque Real 91
Tabla 4.42 THD Total de Corriente. Parque Real 91
Tabla 4.43 Resistencia de Devanados de Alta y Baja Tensión. Parque Real .. 94
Tabla 4.44 Pérdidas Según Protocolos de Pruebas. Parque Real 94
Tabla 4.45 Pérdidas a Corriente de Carga. Parque Real 95
Tabla 4.46 Factor de Pérdidas en Devanados Parque Real 95
Tabla 4.47 Factor de Pérdidas Adicionales en otras Partes Conductoras. Parque Real 95
Tabla 4.48 Pérdidas por Corrientes Poliarmónicas. Parque Real 96
Tabla 4.49 Voltajes Fase-Neutro, Fase-Fase. PUCE 96
Tabla 4.50 Corrientes por Fase. PUCE 97
Tabla 4.51 Componentes Armónicos de Voltaje. PUCE 97
Tabla 4.52 THD Par de Voltaje. PUCE 98
Tabla 4.53 THD Impar de Voltaje. PUCE 98
Tabla 4.54 THD Total de Voltaje. PUCE 98
Tabla 4.55 Componentes Armónicos de Corriente. PUCE 100
Tabla 4.56 THD Par de Corriente. PUCE 100
Tabla 4.57 THD Impar de Corriente. PUCE 101
Tabla 4.58 THD Total de Corriente. PUCE 101
Tabla 4.59 Resistencia de Devanados de Alta y Baja Tensión. PUCE 104
Tabla 4.60 Pérdidas Según Protocolos de Pruebas. PUCE 104
Tabla 4.61 Pérdidas a Corriente de Carga. PUCE 105
Tabla 4.62 Factor de Pérdidas en Devanados PUCE 105
Tabla 4.63 Factor de Pérdidas Adicionales en otras Partes Conductoras. PUCE 105
Tabla 4.64 Pérdidas por Corrientes Poliarmónicas. PUCE 106
Tabla 4.65 Voltajes Fase-Neutro, Fase-Fase. Etafashion 106
Tabla 4.66 Corrientes por Fase. Etafashion 107
Tabla 4.67 Componentes Armónicos de Voltaje. Etafashion 107
Tabla 4.68 THD Par de Voltaje. Etafashion 108

Tabla 4.69 THD Impar de Voltaje. Etafashion 108
Tabla 4.70 THD Total de Voltaje. Etafashion 108
Tabla 4.71 Componentes Armónicos de Corriente. Etafashion..... 110
Tabla 4.72 THD Par de Corriente. Etafashion..... 110
Tabla 4.73 THD Impar de Corriente. Etafashion 111
Tabla 4.74 THD Total de Corriente. Etafashion..... 111
Tabla 4.75 Resistencia de Devanados de Alta y Baja Tensión. Etafashion ... 114
Tabla 4.76 Pérdidas Según Protocolos de Pruebas. Etafashion..... 114
Tabla 4.77 Pérdidas a Corriente de Carga. Etafashion 115
Tabla 4.78 Factor de Pérdidas en Devanados Etafashion 115
Tabla 4.79 Factor de Pérdidas Adicionales en otras Partes Conductoras. Etafashion 115
Tabla 4.80 Pérdidas por Corrientes Poliarmónicas. Etafashion 116

RESUMEN

La proliferación de cargas no lineales exige en la actualidad un estudio de los efectos que éstas producen en los transformadores de distribución. El presente trabajo propone analizar la influencia de los armónicos en el aumento de las pérdidas de los transformadores.

La Empresa Eléctrica Quito dispone de un universo bastante amplio de transformadores de distribución en los cuales se puede realizar las mediciones y análisis respectivo. Se escogió transformadores que alimentan cargas no lineales de tipo industrial, residencial, comercial y centros de cómputo, en los cuales es mayor la influencia de los armónicos.

La medición de los componentes armónicos se realizó con el analizador de redes Power Explorer DRANETZ-BMI PX5, este equipo pertenece a la Escuela Politécnica Nacional y provee un sin número de aplicaciones no solamente para medición de armónicos sino además para calidad de energía. Las mediciones se realizaron estimando días en los cuales los transformadores se encuentran con mayor carga, se tomaron datos en días diferentes para lograr contrastar y observar si mantienen una tendencia uniforme.

Para el procesamiento de los datos se analizó varias metodologías para el cálculo de las pérdidas adicionales, la metodología escogida para el cálculo es la propuesta por la IEEE en el estándar IEEE Std. C57.110-1998. Esta provee un método que se ajusta a los datos obtenidos con la medición y con los datos que provee el fabricante en el protocolo de pruebas, que son obtenidos con ensayos de cortocircuito y circuito abierto.

Debido a que los ensayos de cortocircuito y circuito abierto realizados por el fabricante son realizados a corrientes nominales fue necesario realizar un ajuste a la corriente de carga que se obtuvo de las mediciones.

Finalmente se realizó el cálculo de las pérdidas adicionales estableciendo el incremento de éstas en términos de porcentaje lo que permitió obtener un panorama más claro de la influencia de los armónicos en el aumento de las pérdidas.

PRESENTACIÓN

El presente trabajo se divide en 5 capítulos cuyo contenido se describe a continuación.

En el capítulo 1 se presenta los objetivos, alcance y justificación del trabajo que se va a desarrollar.

En el capítulo 2 se expone el marco teórico referente a las pérdidas de transformadores, definición, clasificación y parámetros para la caracterización de los armónicos; además se incluyen las diferentes metodologías para la evaluación de las pérdidas adicionales en los transformadores y finalmente las principales fuentes y efectos de los armónicos.

En el capitulo 3 se realiza una descripción de los transformadores establecidos como muestra para el estudio, una descripción de la carga conectada a éstos, el detalle del equipo de medición a utilizarse y una descripción detallada de la metodología establecida para el calculo de las pérdidas.

En el capitulo 4 se realiza la presentación de los resultados obtenidos con la aplicación de la metodología y un análisis de éstos.

En el capítulo 5 se presentan las conclusiones y recomendaciones acerca del trabajo desarrollado, después de obtenidos los resultados de los cálculos.

1. CAPITULO I.

1.1 OBJETIVOS.

1.1.1 OBJETIVO GENERAL.

Evaluar la incidencia de presencia de armónicos por la conexión de cargas no lineales, en las pérdidas de transformadores de distribución, aplicación a transformadores de la Empresa Eléctrica Quito S.A.(EEQ).

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Identificar las características del contenido de armónicos en las salidas de voltaje y corriente de transformadores de distribución mediante mediciones.
- Evaluar el incremento de las pérdidas para el grupo de armónicos más representativos.
- Evaluar y analizar el incremento con respecto al monto de pérdidas declaradas por el fabricante en un grupo de transformadores de la EEQ S.A.

1.2 ALCANCE.

Se expondrá el marco teórico sobre la incidencia del contenido de armónicos de voltaje y corriente en las partes vivas de un transformador de distribución y se establecerá la metodología para su evaluación. Se escogerá un grupo de transformadores instalados en el área de concesión de la EEQ. S.A. de los que se conoce sus características y los valores de pérdidas declaradas por el fabricante. Se escogerá edificios con cargas tipo, como: centros de cómputo, call centers, departamentos, centros educativos, clínicas. Se realizará la medición de los armónicos de voltaje y corriente en las salidas de los transformadores escogidos. Aplicando la metodología se evaluarán los incrementos y se analizarán los resultados.

1.3 JUSTIFICACIÓN.

La proliferación en el uso de equipos electrónicos de informática, médicos, de control de velocidad, etc. ha provocado una deformación de las señales de voltaje y corriente de alimentación de energía eléctrica. El comportamiento del equipamiento del sistema eléctrico de potencia ha sufrido una alteración sustancial en razón de los armónicos presentes en las señales indicadas, manifestadas especialmente por una elevación de la temperatura, deterioro de materiales y consecuente disminución de su vida útil. Si bien existe bibliografía que explica el efecto nocivo de los armónicos el presente el presente trabajo pretende establecer el incremento de pérdidas en muestras reales de transformadores de distribución y en perspectiva se norme una metodología para el dimensionamiento del transformador cuya carga es no lineal.

2. CAPÍTULO II.

2.1 PÉRDIDAS EN TRANSFORMADORES.

Existen dos tipos de pérdidas en los transformadores:

- Pérdidas con carga.
- Pérdidas en el núcleo.
-

2.1.1 PÉRDIDAS CON CARGA.

Las pérdidas bajo carga P_c de un transformador son aquellas especificadas para una carga dada alimentada por el transformador. Estas pérdidas incluyen las pérdidas I^2R en los devanados debido a la corriente de carga P_{EC-R} y pérdidas adicionales debido a las corrientes de Eddy inducidas por el flujo disperso en los bobinados, paredes del tanque, escudos magnéticos y otras partes conductoras P_{SL-R}. Las pérdidas con carga se miden mediante la aplicación de la prueba de cortocircuito bajo una carga prevista y a una temperatura especificada. [7]

2.1.1.1 Factores que Afectan el Valor de las Pérdidas con Carga.

Adicionalmente existen otros factores que afectan a las pérdidas con carga detalladas a continuación. [7]

- **Diseño:** Los factores relacionados con el diseño incluye material conductor, dimensiones del conductor, diseño del devanado, arreglos de los devanados y selección de los materiales estructurales.

- **Proceso:** Los factores relacionados con el proceso que impacta en las pérdidas con carga son las tolerancias dimensionales de los conductores, las dimensiones finales de los devanados, partes metálicas expuestas al flujo extraviado y la variación en las propiedades del material conductor y otras partes metálicas.

- **Temperatura:** Las pérdidas con carga son función de la temperatura. La componente I^2R se incrementa con la temperatura, mientras las pérdidas adicionales decrecen con la temperatura.

-

2.1.1.2 Prueba de Voltaje de Cortocircuito de Transformadores Trifásicos con Voltaje Trifásico.

Según norma NTE INEN 2129:98: el procedimiento para la prueba de voltaje de cortocircuito de transformadores trifásicos con voltaje trifásico. [8]

- Los tres terminales del devanado de alto o bajo voltaje deben cortocircuitarse, se prefiere unir los terminales de bajo voltaje, a los terminales del devanado de alto voltaje, se aplica un voltaje trifásico balanceado de frecuencia nominal y valor adecuado con el fin de hacer circular la corriente nominal tal como se indica en la Figura 2.1

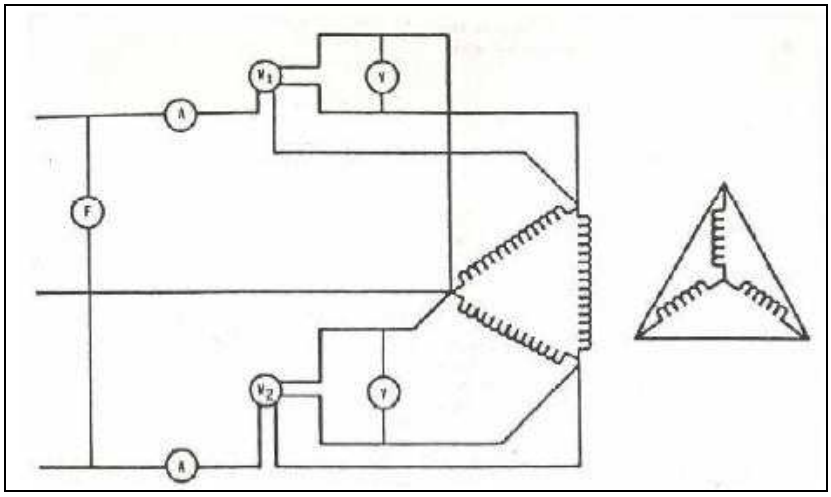

Figura 2.1 Esquema de Prueba de Voltaje de Cortocircuito en Transformadores Trifásicos.

- Con los valores de corriente y frecuencia ajustados a los valores de prueba, se toman las lecturas en los amperímetros, vatímetros y voltímetros y frecuencímetro.

- Se desconecta el transformador bajo prueba y se lee en el vatímetro la potencia consumida, la cual representa las pérdidas del equipo de medida.

- La temperatura del devanado debe tomarse antes y después de la medida del voltaje de cortocircuito; el promedio se toma como el valor verdadero. La temperatura del devanado antes de la prueba se

considera igual a la temperatura del aceite, cuando el transformador no ha sido excitado por lo menos 8 horas antes.

- Las lecturas de los vatímetros deben ser aproximadamente iguales y deben sumarse algebraicamente sus valores para obtener las pérdidas totales.
- Las pérdidas I^2R de los devanados se pueden calcular con la resistencia medida y la corriente utilizada en la prueba. Las pérdidas adicionales se obtienen restando de P_{SL-R} las pérdidas P_C.

2.1.1.3 Prueba de Voltaje de Cortocircuito de un Transformador Trifásico con Voltajes Monofásico.

Para establecer el procedimiento para esta prueba se recurre a la Norma NTE INEN 2129:98: [8]

- El devanado al cual se aplica el voltaje, debe estar conectado Delta y con extremo abierto. Los otros arrollamientos pueden estar conectados en Delta o en Y, en cuyo caso es necesario conectar los terminales a su neutro.

- Exceptuando las modificaciones anteriores el procedimiento es similar a la prueba de voltaje de cortocircuito para transformadores trifásicos con fuente trifásica.

- El voltaje de cortocircuito obtenido es tres veces el voltaje de cortocircuito de una fase del transformador, esto es importante tener en cuenta para convertir valores obtenidos en porcentaje o por unidad. Se utiliza la siguiente:

$$V_Z\,\% = \frac{Voltaje\ de\ cortocircuito\ medido}{3 * voltaje\ nominal\ del\ devanado\ de\ exitación\ en\ \Delta} * 100 \qquad 1)$$

- Este método de ensayo no reproduce exactamente las condiciones de impedancia trifásica y tiende a dar unas pérdidas mayores por introducir pérdidas de secuencia cero en la medida. El efecto es más pronunciado en transformadores del tipo de columna, por lo que no es adecuado para transformadores de alta reactancia.

- Las pérdidas adicionales se pueden obtener restando de las pérdidas de cortocircuito las pérdidas I^2R en el transformador. Si R_1 es la resistencia entre los terminales de alto voltaje y R_2 entre los terminales de bajo voltaje, I_1 e I_2 son las corrientes nominales respectivas. Las pérdidas I^2R de las tres fases deben ser:

$$P_{EC-R} = 1{,}5(I_1^2R + I_2^2R)\ Vatios. \qquad 2)$$

A continuación se detalla las fórmulas para el cálculo de las pérdidas I^2R para un transformador trifásico con conexión Dy5. [1]

- Resistencia por fase en el devanado Δ, en media tensión.

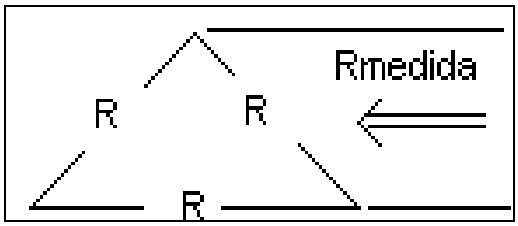

Figura 2.2 Devanado D del transformador.

$$R_{medida} = R_m \qquad 3)$$

$$\frac{1}{R_m} = \frac{1}{R} + \frac{1}{2R} = \frac{2R+R}{2R^2} = \frac{3R}{2R^2} \qquad 4)$$

$$\frac{1}{R_m} = \frac{3}{2R} \rightarrow R = \frac{3}{2}R_m = R_{fase} \qquad 5)$$

- Pérdidas por resistencia en el devanado D del transformador.
  Corriente de Fase:

$$I_{fase} = \frac{I_{linea}}{\sqrt{3}} \qquad 6)$$

Pérdidas I^2R:

$$I^2R_{fase} = \left[\frac{I_{linea}}{\sqrt{3}}\right]^2 * R = \frac{I^2}{3} * \frac{3}{2} * R_m = \frac{I^2 * R_m}{2} \qquad 7)$$

Las pérdidas totales I^2R en el devanado D a temperatura ambientes son:

$$(I^2R)_{total} = \frac{3}{2} I^2 R_m = 1{,}5 * I_{at}^2 * R_m \qquad 8)$$

- Resistencia por fase en el devanado Y, en baja tensión.

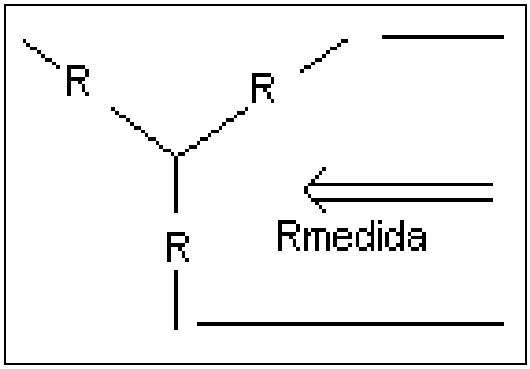

Figura 2.3 Devanado Y del transformador.

$$R_{medida} = R_m = 2 * R \qquad 9)$$

$$R = \frac{R_m}{2} \qquad 10)$$

Siendo R_m el promedio de las resistencias medidas entre uv, uw y vw.

Entonces tenemos que para los transformadores trifásicos, el cálculo de las I^2R a temperatura ambiente se reduce a:

$$I^2R = 1{,}5(I_{at}^2 R_{at} + I_{bt}^2 R_{bt}) \qquad 11)$$

Dónde:

I_{at}: *Corriente nominal de alta tensión.*

I_{bt}: *Corriente nominal de baja tensión.*

R_{at}: *Promedio de las resistencias medias entre UV, UW, VW en ohmios.*

R_{bt}: *Promedio de las resistencias medidas entre xy, xz, yz en ohmios.*

2.1.1.4 Corrección de Temperatura de Pérdidas con Carga.

Las pérdidas I^2R y las pérdidas adicionales varían con la temperatura. Las pérdidas I^2R, $P_{EC-R}(T_m)$ de un transformador son calculadas con las medidas de resistencia óhmica de los devanados y la corriente que es usada la prueba de cortocircuito tanto en el lado de bajo voltaje como en el lado de alto voltaje.

La componente I^2R incrementa con la temperatura. Las pérdidas adicionales $P_{SL}(T)$ disminuyen con la temperatura. Entonces es conveniente convertir las pérdidas con carga desde la temperatura a la cual es medida T_m a una temperatura T, las dos componentes de las pérdidas son corregidas por separado. Tal como se muestra en las ecuaciones siguientes. [7]

$$P_{EC-R}(T) = P_{EC-R}(T_m)\left(\frac{T_k+T}{T_k+T_m}\right) \qquad 12.$$

$$P_{SL-R}(T) = P_{SL-R}(T_m)\left(\frac{T_k+T_m}{T_k+T}\right) \qquad 13)$$

$$P_C(T) = P_{EC-R}(T) + P_{SL-R}(T) \qquad 14)$$

Donde:

$P_{EC-R}(T)$: *son las pérdidas I^2R a temperatura T(°C)*

$P_{SL-R}(T)$: *son las pérdidas adicionales a temperatura T(°C)*

$P_C(T)$: *son las pérdidas corregidas a temperatura T(°C)*

T_k : *es 234,5 °C para el cobre o 225°C para el aluminio.*

2.1.2 PÉRDIDAS EN EL HIERRO.

Estas pérdidas también son llamadas pérdidas en vacío, consisten en su mayoría de las pérdidas en el núcleo y son una función de la magnitud, frecuencia y forma de onda del voltaje aplicado. Las variaciones normales de temperatura no afectan de gran manera las pérdidas en vacío por esta razón no se realizan correcciones a diferentes temperaturas. En gran parte las

pérdidas por histéresis conforman las pérdidas sin carga. Estas pérdidas se determinan mediante un ensayo de circuito abierto que se describe más adelante. [1]

2.1.2.1 Pérdidas por Corrientes Parásitas.

Las corrientes de Foucault se originan cuando un material conductor es sometido a una variación de flujo magnético. Debido a que los núcleos magnéticos de los transformadores son buenos conductores eléctricos, se origina una fuerza electromotriz inducida que produce una circulación de corriente en los mismos lo que origina pérdidas de energía por efecto joule. Debido a esto los núcleos de los transformadores se construyen por laminaciones de acero al silicio, de grano orientado para de esta forma intentar disminuir al mínimo la formación de estas corrientes. Estas pérdidas dependerán del material del que esté constituido el núcleo magnético, al volumen del núcleo a la frecuencia, a la máxima densidad de flujo, al espesor de las láminas, esta dependencia se observa en la siguiente formula. [2]

$$P_p = \frac{2.2 * f^2 * B_{max}^2 * e^2}{10^{11}} \qquad 15)$$

En donde:

P_p: *Pérdidas debido a corrientes parásitas en el núcleo en* W/kg

f: *frecuencia*

B_{max}: *Densidad de Flujo Maxima*

e: *espesor de las láminas del material*

Esta expresión es válida para un acero de 0,00965 mΩ-cm y un peso específico de 7,65 kg/dm^3

2.1.2.2 Pérdidas por Histéresis.

Las pérdidas por histéresis son resultado de la memoria que posee un material magnético. Ya que se requiere más fuerza de coerción para desmagnetizar un material magnético que para magnetizarlo. Cuando una material ferromagnético, sobre el cual ha estado actuando un campo magnético, cesa la aplicación de este, el material no anula completamente su magnetismo, sino que permanece con un magnetismo residual. En el caso de los transformadores el magnetismo residual provoca una pérdida de energía en forma de calor. Estas dependen principalmente de las características magnéticas del tipo de acero utilizado para la elaboración el núcleo magnético, de la frecuencia, del volumen del núcleo y de la máxima densidad de flujo. Y se determinan mediante la fórmula de Steinmetz. [2]

$$P_H = \frac{n * B_{max}^{2.6} * f}{10^8} \frac{W}{kg} \qquad 16)$$

Donde:

P_H: *Pérdidas por histeresis en núcleo* W/kg

f: *frecuencia*

B_{max}: *Densidad de Flujo Maxima*

n: *Coeficiente de Steinmetz que siempre depende del material*

Existen varios métodos de ensayo para la determinación del valor de estas pérdidas, a continuación se detalla el método utilizado para transformador trifásico.

2.1.2.3 Prueba de Circuito Abierto en Transformadores Trifásicos.

La máxima densidad de flujo corresponde al valor promedio absoluto de voltaje y por lo tanto, si el valor promedio se ajusta para que sea igual al valor de la onda sinusoidal de voltaje deseada y se mantiene la frecuencia apropiada, las

pérdidas por histéresis deben ser las corrientes a la onda sinusoidal deseada [10]. En la figura 2.4 se muestra la conexión del equipo necesario:

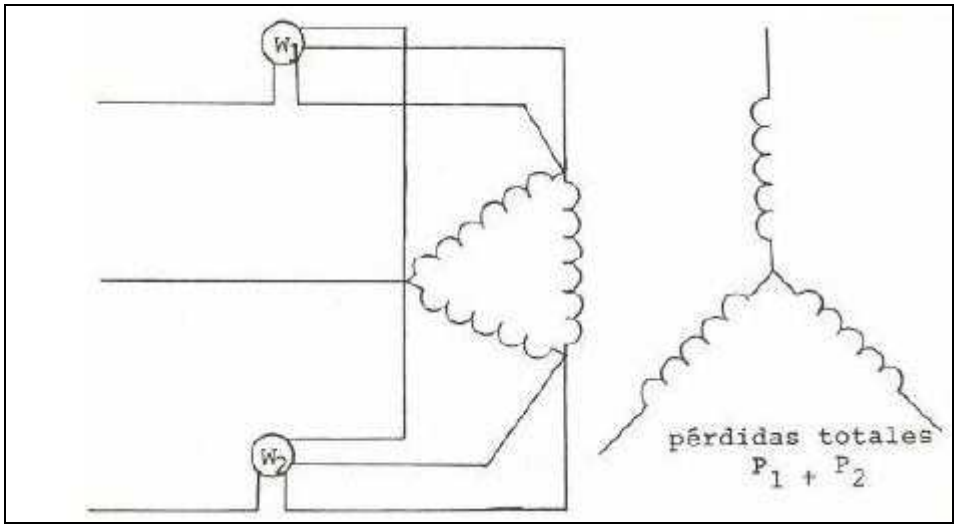

Figura 2.4 Esquema de Instalación con dos vatímetros.

- Se debe utilizar vatímetros de bajo factor de potencia para obtener resultados correctos.
- Aunque se puede utilizar cualquiera de los devanados del transformador, por razones de seguridad es aconsejable utilizar el devanado de bajo voltaje para el ensayo.
- Al medir las pérdidas en el núcleo de un transformador trifásico se deben hacer tres grupos separados de lecturas tomando cada una de las líneas como punto común. El valor promedio de los tres grupos de lecturas se debe tomar como el valor verdadero de las pérdidas sin carga.
- En el método de dos vatímetros se debe tener cuidado de efectuar las lecturas de éstos con exactitud. Debido al bajo factor de potencia, la lectura de un vatímetro puede ser negativa y se debe restar de la otra. Las dos lecturas pueden ser del mismo orden de magnitud y una pequeña inexactitud en sus valores pueden conducir a un gran error en el valor en porcentaje de sus pequeñas diferencias. Con estas dificultades se recomienda un procedimiento alternativo de medición con tres vatímetros.

- Se hacen medidas con tres vatímetros, conectando cada circuito potencial entre una línea y el neutro de las tres fases cuando se dispone de éste. Las tres lecturas deben sumarse para obtener las pérdidas si carga. Si no se dispone de neutro puede derivarse un neutro artifical.

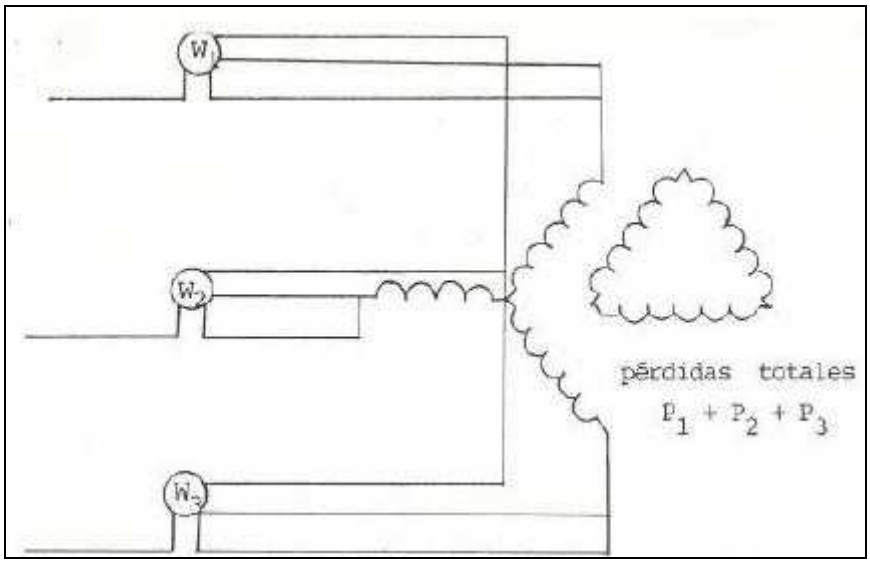

Figura 2.5 Esquema de instalación con tres vatímetros.

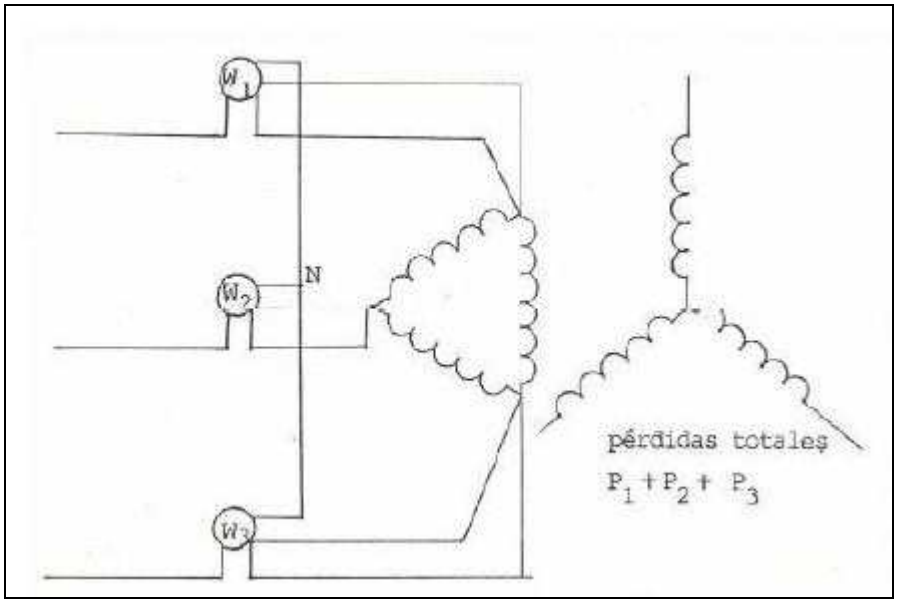

Figura 2.6 Esquema de instalación con neutro artificial.

2.2 TRATAMIENTO DE SEÑALES NO SENOIDALES.

Para el tratamiento señales no senoidales se utiliza la teoría desarrollada por el matemático Jean Baptiste Fourier, quien demostró que una función periódica puede descomponerse en un sumatorio de funciones seno y coseno con frecuencias múltiplos de la fundamental.[4]

2.2.1 SERIES DE FOURIER.

Las series de Fourier es el sumatorio de un infinito número de funciones senos y cosenos, cuya frecuencia angular w es un múltiplo entero de w_1

Para la aplicación de las series de Fourier a una función, la función debe cumplir las siguientes condiciones. [4]

La función debe ser periódica, esto es:

$f(t) = f(t + T)$ *donde T es una constante de tiempo.*

Si la función tiene discontinuidades, el número debe ser finito en un período determinado.

La función debe contener un número finito de máximos y mínimos en un período determinado.

La función debe ser absolutamente integrable en un período determinado, esto es:

$$\int_0^T |x(t)|dt < \infty \qquad 17)$$

Una señal periódica $f(t)$ con período T puede ser representada por series de Fourier de acuerdo a la siguiente formula:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty}(a_n \cos(nw_1 t) + b_n sen(nw_1 t)) \qquad 18)$$

Donde:

$\omega_1 = 2\pi f_1 = 2\pi/T$

a_n, b_n *amplitudes o coeficientes de Fourier*

a_0 *componente DC*

w_1 *frecuencia radial*

T *período*

f_1 *frecuencia fundamental*

Los términos en las series de Fourier son llamados armónicos.

Los coeficientes de Fourier pueden ser calculados a partir de la función de tiempo original de acuerdo a la fórmula siguiente:

$$a_n = \frac{2}{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t)\cos(nw_1)\,dt; n = 0,1,2,\ldots \qquad 19)$$

$$b_n = \frac{2}{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t)\sin(nw_1)\,dt; n = 0,1,2,\ldots \qquad 20)$$

Las funciones impares, $f(t) = -f(-t)$ presentan solamente los términos de coseno en sus series de Fourier, mientras las funciones pares, $f(t) = f(-t)$ presentan solamente los términos de seno. [4]

2.3 TÉRMINOS EN EL ESTUDIO DE ARMÓNICOS.

2.3.1 DEFINICIÒN DE ARMÒNICOS.

Los armónicos son las componentes sinusoidales de una onda periódica cuyas frecuencias son múltiplos de la frecuencia fundamental. Estas componentes se presentan debido a la conexión de cargas cuyas características voltaje-corriente son no lineales. [3]

2.3.2 ARMÓNICOS DE VOLTAJE Y CORRIENTE.

Una forma de onda sinusoidal pura, con distorsión armónica cero es una cantidad hipotética y no de carácter real. La onda de voltaje posee una pequeña cantidad de distorsión armónica, generalmente menor al 1 %, en el punto de generación, esto debido a la no uniformidad del campo magnético de excitación y la distribución espacial de las bobinas alrededor de las ranuras del estator en el generador. Este voltaje es transmitido sufriendo varias transformaciones de nivel hasta finalmente llegar al usuario final. El usuario

posee equipos cuyo comportamiento es no lineal, generando corrientes con componentes de frecuencia armónica considerables. Esta corriente viaja hacia la fuente de alimentación lo que resulta en una distorsión de voltaje debido a la relación entre la corriente absorbida por las cargas no lineales y la impedancia de los diferentes componentes del sistema de potencia, tales como líneas de transmisión, distribución, transformadores. Sin embargo el voltaje de distorsión no se debe solamente al flujo de corriente distorsionada a través de la impedancia de alimentación; por ejemplo, en un UPS debido a la conversión de voltaje alterno a voltaje continuo y luego la reconversión a voltaje alterno, se puede generar una distorsión considerable de voltaje. Actualmente la mayor cantidad de distorsión es causada por cargas no lineales. Incluso cargas de comportamiento lineal generan corrientes armónicas si la forma de onda de alimentación es muy distorsionada. Cuando varios usuarios comparten la energía de un mismo ramal o transformador, la distorsión de voltaje producida por la inyección de armónicos de corriente de un usuario pueden afectar a los otros usuarios. [3]

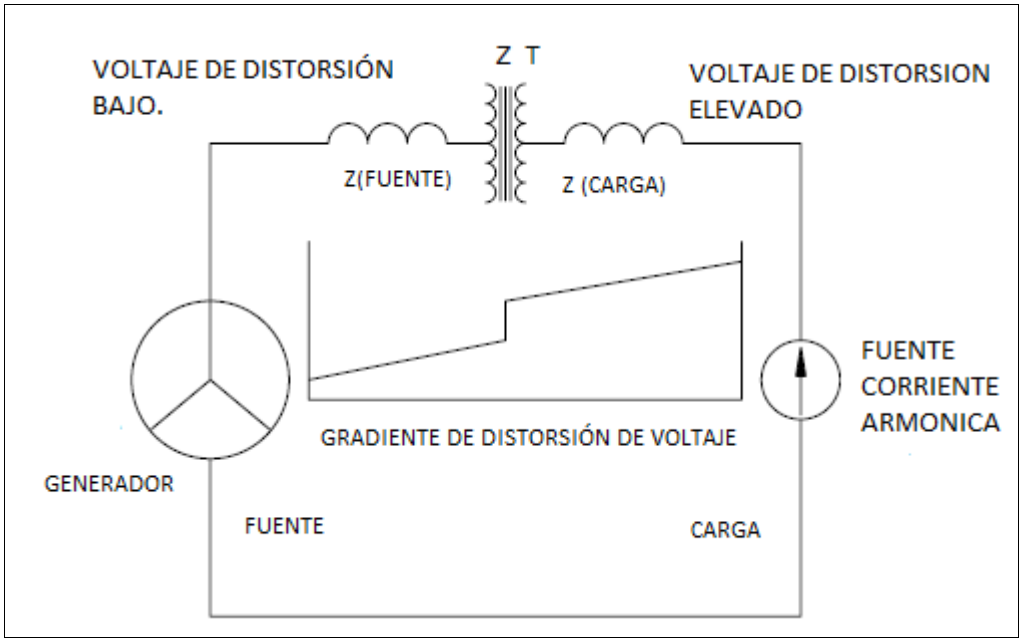

Figura 2.7 Voltaje de distorsión debido a la corriente de distorsión.

2.3.3 CLASIFICACIÓN DE ARMÓNICOS.

Los armónicos se clasifican por su:

- Orden.
- Frecuencia.
- Secuencia.

2.3.3.1 Clasificación Según el Orden.

Según el orden los armónicos se clasifican en base al número de veces que la frecuencia del armónico es mayor que la frecuencia fundamental. Existen armónicos pares e impares, los armónicos pares son aquellos que tienen números pares como el 2, 4, 6, 8…., los armónicos impares son los que tienen números impares como el 3,5,7,…., el numero 1 está reservado para la componente fundamental, el armónico 0 se refiere a la componente continua o DC.[11]

2.3.3.2 Clasificación Según la Frecuencia.

Para esta clasificación se toma en cuenta la frecuencia del armónico. Existen sistemas en donde la frecuencia fundamental es 50 Hz, y otros donde la frecuencia es 60 Hz. [11]

2.3.3.3 Clasificación según la Secuencia o Rotación.

Según su secuencia y rotación, los armónicos presentan diferentes efectos:

- Secuencia positiva: Rotación directa, pueden producir calentamiento de conductores, rotura de circuitos, etc.

- Secuencia negativa: Rotación inversa, producen freno en motores, además calentamiento de conductores y pueden quemar motores de inducción trifásicos.
- Secuencia cero: Los armónicos de secuencia cero se suman al neutro y son lo que producen sobrecalentamiento.[11]

2.3.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS ARMÓNICOS.

2.3.4.1 Valor Eficaz.

Se llama valor eficaz de una corriente alterna, al valor que tendría una corriente continua que produjera la misma potencia que dicha corriente alterna, al aplicarla sobre una misma resistencia. [10]

$$V = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T V(t)^2 dt} \qquad 21)$$

2.3.4.2 Factor de Cresta.

Indica la deformación de una señal periódica. Relaciona el valor pico con el valor eficaz. [10]

$$CF = \frac{V_{pico}}{V_{RMS}} \qquad 22)$$

2.3.4.3 Voltaje Armónico Relativo.

Se define como el porcentaje del valor eficaz del armónico de tensión de orden h respecto del valor eficaz del voltaje fundamental. [10]

$$v_h = \frac{V_h}{V_1}\ \% \qquad 23)$$

2.3.4.4 Corriente Armónica Relativa.

Se define como el porcentaje del valor eficaz del armónico de corriente de orden h respecto del valor eficaz de la corriente fundamental. [10]

$$i_h = \frac{I_h}{I_1}\ \% \qquad 24)$$

2.3.4.5 Valor Eficaz del Contenido Armónico de Voltaje.

Se define como el valor eficaz de todos los armónicos de voltaje.[10]

$$V_H = \sqrt{V_1^2 \quad + V_2^2 \quad + \cdots + V_N^2} \qquad 25)$$

2.3.4.6 Distorsión Armónica Total.

Es la relación entre el contenido armónico de la señal y la fundamental. Su valor puede variar desde 0 hasta infinito. Es el parámetro de medición de distorsión más común. Esta definido para voltajes como para corrientes. [10]

THD de voltaje:

$$THD_V = \frac{\sqrt[2]{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \qquad 26)$$

$$THD_V = \frac{\sqrt[2]{V_2^2 + V_3^2 + ..}}{V_1} \qquad 27)$$

THD de corriente:

$$THD_I = \frac{\sqrt[2]{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{V_1} \qquad 28)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt[2]{I_2^2 + I_3^2 + ..}}{I_1} \qquad 29)$$

2.3.4.7 Distorsión Total de Demanda.

En la norma IEEE 519-1992 se define el TDD como el porcentaje armónico de corriente respecto a la corriente de demanda máxima.

$$TDD = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}{I_L^2}}\ \% \qquad 30)$$

2.3.4.8 Factor de Interferencia Telefónica.

Las corrientes armónicas pueden crear ruido en circuitos cercanos de comunicaciones debido al acoplamiento inductivo o capacitivo. Una forma de medir el ruido es mediante el factor de influencia telefónica (TIF) que es un tipo de THD [10] y viene dado por la expresión:

$$TIF = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} (K_f \cdot p_f \cdot V_f)^2}}{V} \qquad 31)$$

$K_f = 5f$: *coeficiente de acoplamiento*

p_f: *peso de los ármonicos*

V: *valor rms de voltaje en la línea*

V_f : *Valor rms de voltaje armónico de frecuencia f*

2.4 CARGAS LINEALES Y NO LINEALES.

Carga lineal es aquella que cuando se le aplica directamente un voltaje senoidal produce una corriente proporcional que también es senoidal. Como por ejemplo una carga resistiva, capacitiva, inductiva o una mezcla de ellas.

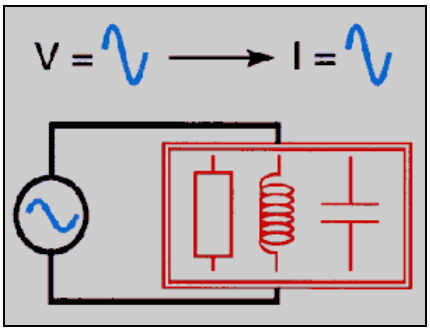

Figura 2.8 Carga Lineal.

Existen circuitos en los cuales la curva voltaje-corriente no es lineal, el voltaje aplicado no es proporcional a la corriente, produciendo una señal distorsionada con respecto a la senoidal, las cargas que producen este comportamiento de la corriente son conocidas como no lineales, ejemplo de este tipo cargas son aquellas que poseen en su circuitería elementos semiconductores; sin embargo la no linealidad de la carga se define por la curva característica corriente-voltaje, ya que existen circuitos con elementos semiconductores que no producen distorsión armónica. La distorsión armónica producida por la cargas no lineales contaminan la red, pudiendo incluso afectar a usuarios que poseen únicamente cargas lineales.

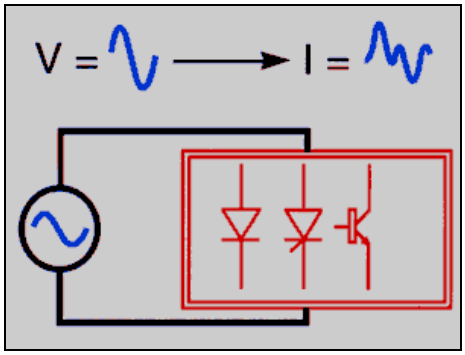

Figura 2.9 Carga No Lineal.

2.5 POTENCIA FUNDAMENTAL Y ARMÓNICA.

La medición de potencia en redes eléctricas presenta nuevos retos en la comprensión del cálculo al encontrarse redes con presencia de armónicos de tensión y de corriente. El principal problema se presenta cuando los parámetros calculados son interpretados, como si fuesen de una red en condiciones lineales, cuando realmente estas condiciones se apartan de esta hipótesis.

La IEEE Std. 1459-2000 define la medición de potencia en redes eléctricas en régimen sinusoidal, no sinusoidal, balanceado y no balanceado.

2.5.1 RED ELÉCTRICA EN CONDICIONES SINUSOIDALES.

La medida de las distintas componentes de la potencia y el factor de potencia en condiciones sinusoidales es una tarea sencilla, los conceptos iniciales de potencia activa y reactiva están expresados principalmente para condiciones sinusoidales puras. Con esto las expresiones de cálculo llevan al conocido triangulo de potencias.

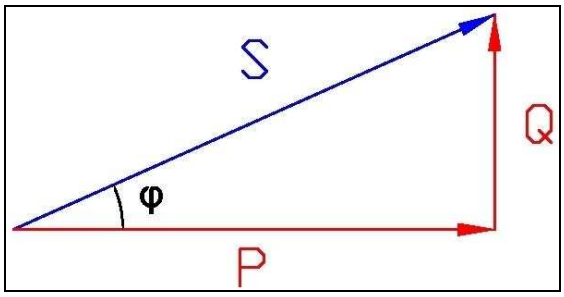

Figura 2.10 Triángulo de Potencias en Condiciones Sinusoidales.

A partir de este triángulo se define el factor de potencia y coseno ϕ, que para esta condición coinciden en su módulo. El Coseno ϕ es trigonométricamente el cociente entre la potencia activa fundamental y la potencia aparente fundamental. El factor de potencia es el cociente entre la potencia total activa y total aparente.

$$\cos(\varphi) = \frac{P_1}{S_1} \quad 32)$$

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P_1}{S_1} \quad 33)$$

2.5.2 RED ELÉCTRICA EN CONDICIONES NO SINUSOIDALES.

Debido a la presencia de armónicos de voltaje y corriente se provoca una adición de potencia activa y reactiva armónica, con lo que el triángulo de potencias se modifica.

La expresión para potencia activa se desglosa en la suma de la potencia activa fundamental más el aporte de la potencia activa de cada armónica. Siguiendo este razonamiento expresamos de igual manera la potencia reactiva. Las dos expresiones pertenecen a la definición de Budeanu, que es considerada por la IEEE y la IEC.[16]

$$P_{ACTIVA} = \int_0^T p(t).\,dt = \int_0^T u_{(t)}.i_{(t)}.dt \quad 34)$$

$$P_{ACTIVA} = \sum_{h=1}^{M} V_h\,.I_h.\cos(\theta_h - \alpha_h) \quad 35)$$

$$P_{ACTIVA} = P_1 + \sum_{h=2}^{M} V_h\,.I_h.\cos(\theta_h - \alpha_h) \quad 36)$$

$$P_{ACTIVA} = P_1 + P_h \quad 37)$$

$$Q_{REACTIVA} = \sum_{h=1}^{M} V_h\,.I_h.\mathrm{sen}(\theta_h - \alpha_h) \quad 38)$$

$$Q_{REACTIVA} = Q_1 + \sum_{h=2}^{M} V_h \cdot I_h \cdot \text{sen}(\theta_h - \alpha_h) \quad 39)$$

$$Q_{REACTIVA} = Q_1 + Q_h \quad 40)$$

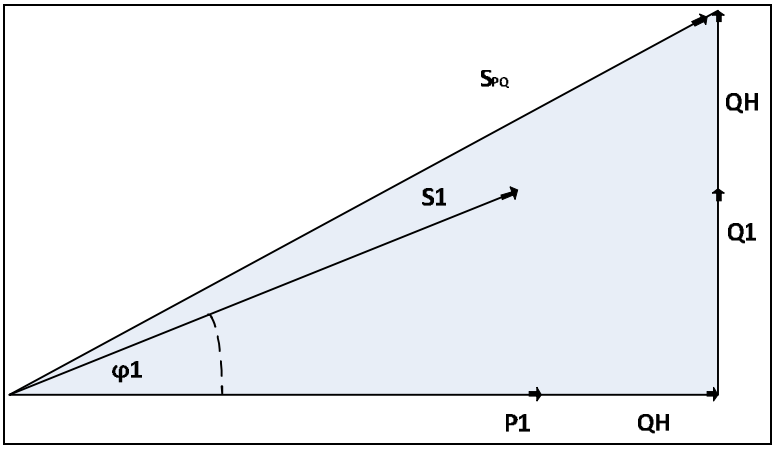

Figura 2.11 Triángulo de Potencias con Potencias Armónicas.

De la figura anterior podemos concluir que la definición de factor de potencia no coincidirá con la del cos (ϕ).

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P_1 + P_H}{S} \quad 41)$$

$$FP = \frac{P_1 + P_H}{S} \neq \frac{P_1}{S_1} = \cos(\varphi) \quad 42)$$

La potencia aparente total se puede expresar a partir de la aparente fundamental y la distorsión armónica de voltaje y corriente.

$$S = V_{rms} \cdot I_{rms} \quad 43)$$

$$S = V_1 * \sqrt{1 + THD_V^2} * I_1 * \sqrt{1 + THD_I^2} \quad 44)$$

$$S = S_1 * \sqrt{1 + THD_V^2} * \sqrt{1 + THD_I^2} \quad 45)$$

Expresaremos la potencia aparente mediante las componentes fundamentales y armónicas de voltaje y corriente.

$$S^2 = (V_1^2 + V_H^2) * (I_1^2 + I_H^2) \quad 46)$$

$$S^2 = S_1^2 + (V_1 * I_H)^2 + (V_H * I_1)^2 + (V_H * I_H)^2 \quad 47)$$

$$S^2 = S_1^2 + S_N^2 \quad 48)$$

Para condiciones no sinusoidales el triángulo de potencias quedará compuesto por tres componentes, la tercera componente se denomina potencia de distorsión. Esta nueva componente surge, a partir de la desigualdad de la potencia aparente total frente a la suma de potencia activa y reactiva total. [16]

$$S^2 = V_{RMS} * I_{RMS} \neq P^2 + Q^2 \quad 49)$$

Entonces:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad 50)$$

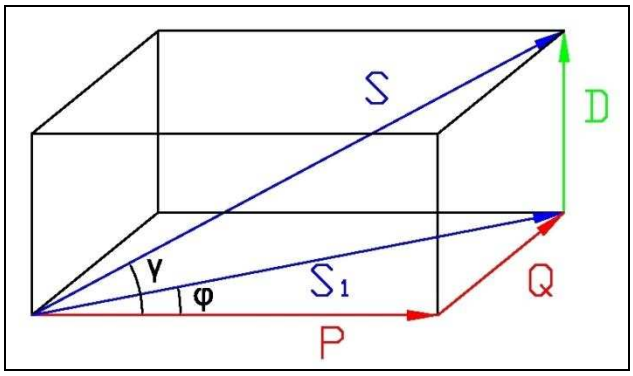

Figura 2.12 Triangulo de Potencias en Condiciones No Sinusoidales.

En la figura 5 podemos observar el ángulo ϕ correspondiente al cos (ϕ) y el ángulo ϒ correspondiente al factor de potencia.

Ahora se desarrollará las expresiones para encontrar la relación entre el cos(ϕ) y el factor de potencia.

$$FP = \frac{P_1 + P_H}{S} \qquad 51)$$

$$FP = \frac{P_1 * (1 + \frac{P_H}{P_1})}{S_1 * \sqrt{1 + \left(\frac{S_N}{S_1}\right)^2}} \qquad 52)$$

$$FP = \cos(\varphi_1) * \left(1 + \frac{P_H}{P_1}\right) * \frac{1}{\sqrt{1 + THD_V^2 + THD_I^2 + THD_V^2 * THD_I^2}} \qquad 53)$$

Se reducirá la ecuación anterior tomando en cuenta el nivel de la potencia armónica con respecto a la potencia activa fundamental, además que en la generalidad $THD_V \ll THD_I$.

$$FP \cong \cos(\varphi) * \frac{1}{\sqrt{1 + THD_I^2}} \qquad 54)$$

De la ecuación anterior se concluye que el factor de potencia aproximado siempre será menor que el cos(ϕ).

2.6 PRINCIPALES FUENTES DE ARMÓNICOS.

En la actualidad muchas de las cargas instaladas son generadoras de corrientes armónicas que contaminan el sistema de potencia, esto en combinación con la impedancia del sistema producen adicionalmente voltajes

armónicos. Sin embargo no se debe olvidar que la red de suministro también produce distorsión de voltaje, aunque su valor sea en el orden del 1%.

A continuación se describirá, algunas de las cargas no lineales más comunes presentes en un sistema eléctrico.

2.6.1 LÁMPARAS FLUORESCENTES.

Las lámparas fluorescentes pueden tener dos formas de construcción y originan armónicos de orden totalmente diferente.
Las lámparas de balasto convencional tienen una característica no lineal debido al comportamiento del arco y del inductor que se conecta en serie para limitar la corriente. Producen armónicos de baja frecuencia, la armónica dominante es la tercera, en el orden del 15% a 20% de la fundamental.
El balasto electrónico está basado en una tecnología totalmente diferente a la del balasto convencional, enciende y regula las lámparas en altas frecuencias generalmente mayores a 20 kHz, utilizando componentes electrónicos. Debido a que su operación es en altas frecuencias genera armónicos de alta frecuencia y el espectro generado depende en gran medida del tipo de control utilizado. [10]

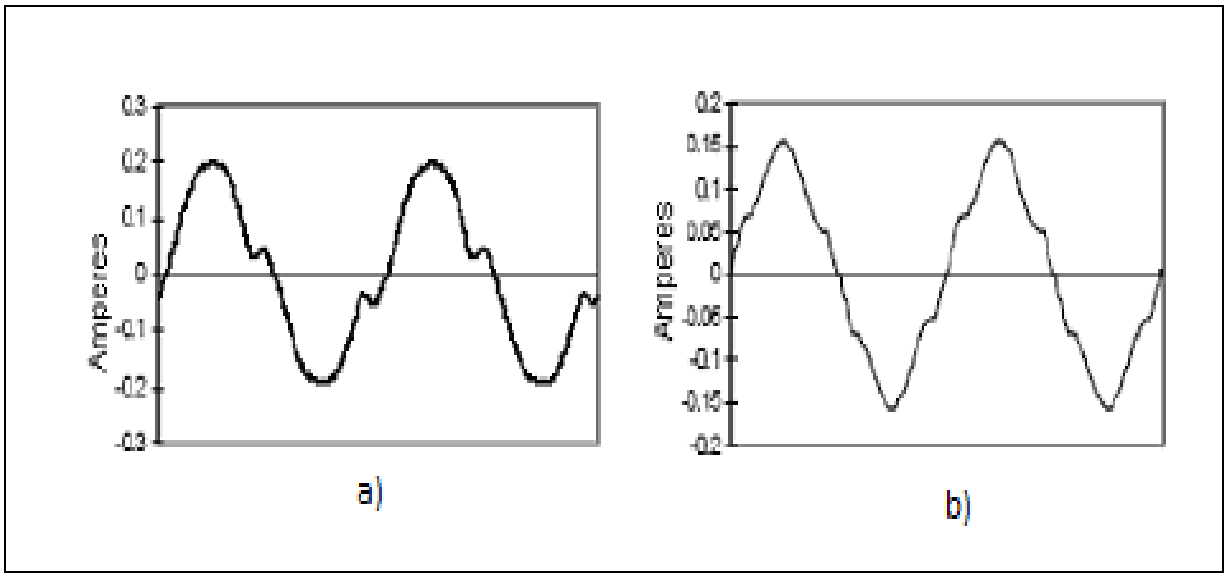

Figura 2.13. Forma de onda de corriente de lámpara fluorescente a) Balasto magnético b) Balasto electrónico.

2.6.2 HORNOS DE ARCO.

Según las características de diseño un horno de arco eléctrico puede fundir acero, minerales y en general material de desecho metálico y el método de fundición consiste en la producción de un arco de gran energía que fundir el acero o algún otro material. [10]

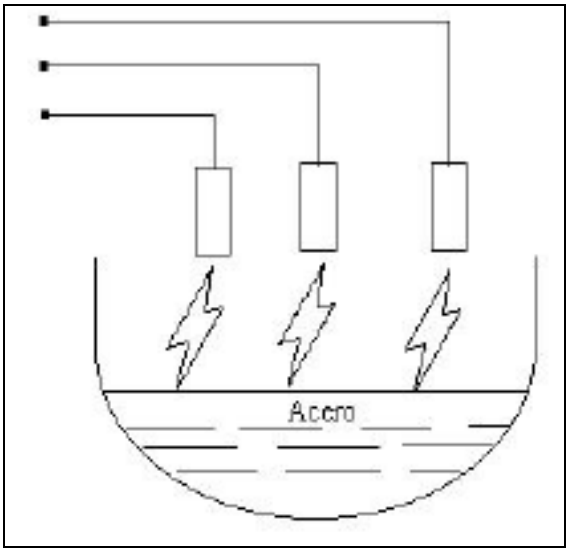

Figura 2.14 Horno de Arco Eléctrico.

Los hornos de arco eléctrico son cargas altamente no lineales, que producen gran cantidad de armónicos. Los armónicos producidos son impredecibles debido a la variación ciclo a ciclo del arco, especialmente cuando se perfora un nuevo trozo de acero. La corriente del arco no es periódica, y los análisis realizados muestran un continuo espectro de frecuencias armónicas tanto de orden entero y como no enteros. Sin embargo las mediciones realizadas han demostrado que las frecuencias armónicas predominantes son de bajo orden empezando en el segundo y terminando en el séptimo, también se puede notar que la amplitud decrece con el aumento del orden del armónico. El arco se vuelve estable conforme el depósito de fundición del metal se incrementa, esto produce corrientes mucho más uniformes y con mucho menos distorsión.

	Corriente Armónica en % de la Fundamental				
	Orden de Armónico				
Condición del Horno	2	3	4	5	7
Fundición Inicial (Arco Activo)	77	5,8	2,5	4,2	3,1
Refinamiento (Arco Estable)	0	2	0	2,1	0

Tabla 2.1 Contenido Armónico de Corriente en un Horno de Arco de Dos Fases de un Ciclo de Fundición.

La tabla 2.1 muestra el contenido armónico típico de corriente del horno de arco en dos fases del ciclo de fundición en un horno típico para la producción de acero. Para otros hornos se producirá un comportamiento diferente sin embargo puede ser usados en estudios de armónicos. [10]

2.6.3 HORNOS DE INDUCCIÓN.

Los hornos de inducción son cargas no lineales de tipo industrial, presentan en su estructura un rectificador e inversor, este controla la frecuencia de alimentación de una bobina y esta a su vez mediante inducción calienta las piezas metálicas hasta que alcancen temperaturas a las cuales puedan ser moldeadas. [17]

2.6.4 VARIADORES DE VELOCIDAD.

Las tecnologías para crear fuentes de poder de voltaje y frecuencia variable para el control de velocidad de motores de corriente de alterna son varias, sin embargo en la actualidad el de mayor uso es el Modulación por Ancho de Pulso (PWM), este variador posee un rectificador de diodo que proporciona un factor de potencia de alto desplazamiento, y además posee un gran condensador que se encarga de regular el voltaje. Debido a esto, en una carga ligera, la corriente sólo fluirá cuando el voltaje de salida del diodo rectificador circule por el condensador. Como la carga en el variador se incrementa, la corriente llega a ser continua. [10]

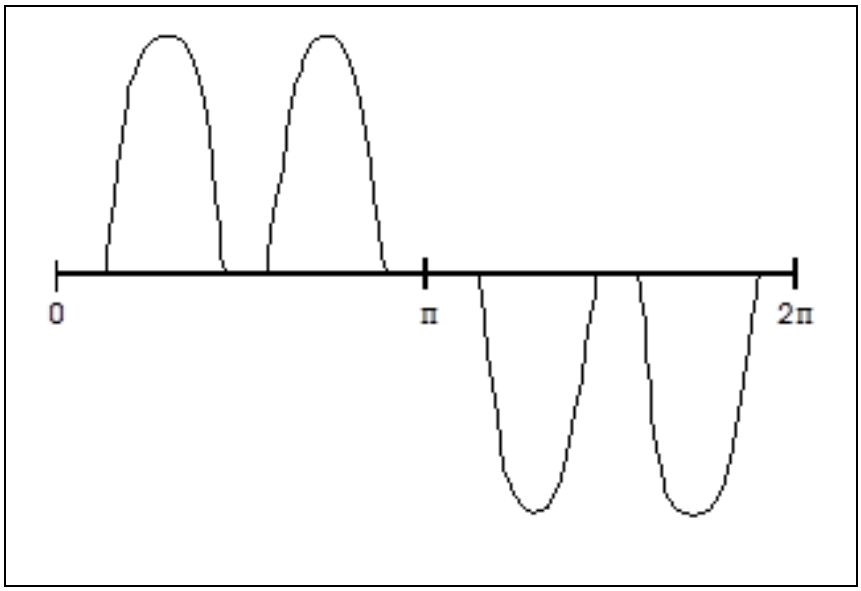

Figura 2.15 . Forma de onda de corriente de una fuente de poder de seis pulsos PWM

2.6.5 COMPENSADOR ESTÁTICO DE VARs

Se utiliza para compensar potencia reactiva usando un control de la magnitud del voltaje. Después de los años 60s el reactor controlado por tiristor (TCR) se han utilizado ampliamente para mantener niveles de voltaje, mejorar el factor de potencia, corregir desbalances de fase y mejorar la estabilidad del sistema de potencia. [10]

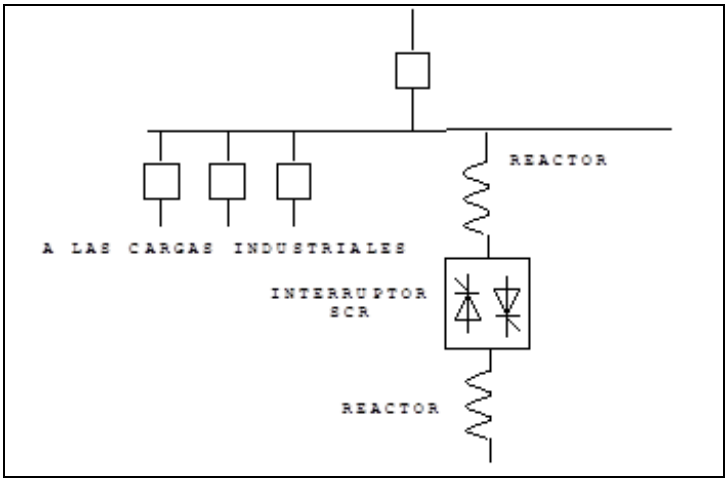

Figura 2.16 . Compensador de VAR Estático Usando un Reactor Controlado por Tiristor.

El retardo de disparo de los tiristores no solamente reduce la magnitud de la corriente, sino que además altera la forma de onda. Las corrientes armónicas producidas serán de orden impar. El valor rms de la componente armónica viene dado por la ecuación: [10]

$$I_k = \frac{4}{\pi}\frac{V}{X}\left[\frac{\sin(h+1)}{2(h+1)}\alpha + \frac{\sin(h-1)}{2(h-1)}\alpha - \cos\alpha\,\frac{\sin h\alpha}{h}\right] \qquad 55)$$

Donde:

h = 3,5,7,...
V = voltaje fundamental línea a línea
X = reactancia inductiva total de los reactores en cada fase
α = ángulo de avance

2.6.6 FUENTES DE PODER EN MODO CONMUTACIÓN.

Equipos electrónicos como computadores personales, maquinas copiadoras y de fax poseen una fuente regulada por conmutación que proporciona voltaje a estos equipos. Este tipo de fuentes son económicas y no es afectada por cambios de voltaje menores en el sistema. La fuente alimenta a un condensador que suple el voltaje al circuito electrónico. Debido a que el sistema mira la carga como un condensador la corriente en la fuente es discontinua, esto significa corriente en un pulso corto de cada medio ciclo. [10]

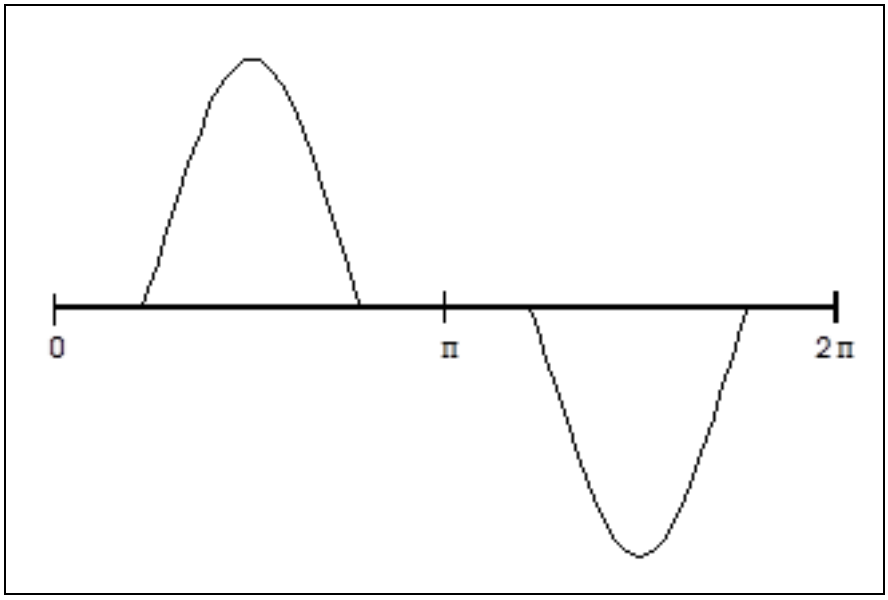

Figura 2.17. Onda de Corriente de la Fuente de Poder en modo de conmutación.

Armónico	Magnitud	Armónico	Magnitud
1	1.000	9	0.157
3	0.810	11	0.024
5	0.606	13	0.063
7	0.370	15	0.079

Tabla 2.2. Espectro típico de corriente de la Fuente de Poder en modo de conmutación.

2.6.7 CONVERTIDORES DE POTENCIA.

Los convertidores de potencia en sus diferentes tipos: CA/CC, CC/CC, CC/CA, CA/CA, inyectan armónicos de corriente en el sistema dependiendo del tipo de conversión y operación que realizan.

Los armónicos característicos de corriente lado de línea está dado por la expresión.

$$h = k(p \pm 1) \qquad 56)$$

h: orden del armónico

p: número de pulsos del convertidor

k: número entero 1,2,3…

En los rectificadores el ángulo de disparo tiene influencia sobre el desplazamiento de fase entre tensión y corriente y no sobre la amplitud de los armónicos.

Pueden producirse armónicos de corriente no característicos, para esto se debe cumplir ciertas condiciones:

- Voltaje de suministro no senoidal pura.
- Red balanceada.
- Encendido de tiristores con ángulo de retardo no constante.

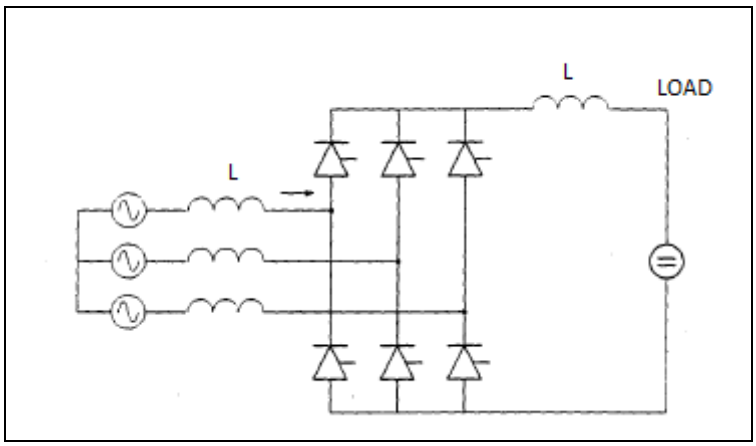

Figura 2.18 Rectificador Trifásico de Seis Pulsos con Tiristores.

2.7 EFECTO DE LOS ARMÓNICOS.

Los efectos de los se pueden dividir en tres clases principales:

- Efectos sobre el sistema de potencia.
- Efectos sobre la carga del consumidor.
- Efectos sobre circuitos de comunicación.

Los efectos dependerán de la proporción que exista entre la carga no lineal y la carga total del sistema. La susceptibilidad de la carga o de la fuente de potencia a los armónicos determina el grado al que pueden ser soportados.

Las cargas cuya función principal es un calentador poseen el mínimo de susceptibilidad hacia los armónicos, en este caso la energía armónica es totalmente utilizada y completamente tolerable. Sin embargo en el caso de los equipos menos susceptibles pueden ser dañinos. Existen cargas cuyo diseño asume una entrada fundamental sinusoidal casi perfecta en este caso el grado de afectación de los armónicos aumenta notablemente. [10]

2.7.1 EFECTOS SOBRE MOTORES Y GENERADORES.

El mayor efecto sobre máquinas de inducción y máquinas sincrónicas se manifiesta con el incremento del calentamiento debido a las pérdidas en el cobre y en el hierro a frecuencias armónicas. De esta forma los componentes armónicos afectan la eficiencia de la máquina y pueden afectar el torque desarrollado por el motor. Además las corrientes armónicas en un motor pueden aumentar a una alta emisión de ruido audible siendo comparadas con una excitación sinusoidal. Los armónicos además producen una distribución de flujo resultante en el entrehierro, esto puedo causar o intensificar el fenómeno denominado arrastre en motores de inducción.

Los armónicos quinto y séptimo poseen el potencial para crear oscilaciones mecánicas en una combinación turbina-generador o en un sistema motor-carga. Las oscilaciones mecánicas resultan cuando el par del motor oscilante, causado por la interacción entre las corrientes armónicas y el campo magnético de frecuencia fundamental, excita una frecuencia de resonancia mecánica.

La tabla define la característica del orden armónico derivado de un convertidor de seis pulsos y amplia el efecto cuando es aplicado a los terminales de la

máquina rotativa. Cada armónico de voltaje quinto, séptimo, onceavo, inducirá una corriente armónica correspondiente en el estator de máquina. Cada uno de estos armónicos estará a una secuencia negativa o positiva de la componente simétrica de corriente total. Estas corrientes producirán un aumento de temperatura en el devanado del estator, este aumento de temperatura se adicionará al causado por la corriente fundamental.

Orden del Armónico	Frecuencia (Hz)	Red de Secuencia	Armónico del Estator	Rotación del Armónico	Armónico del Rotor
1	60	+	1	Hacia delante	-
5	300	-	5	Hacia atrás	6
7	420	+	7	Hacia delante	6
11	660	-	11	Hacia atrás	12
13	780	+	13	Hacia delante	12
17	1020	-	17	Hacia atrás	18
19	1140	+	19	Hacia delante	18
23	1380	-	23	Hacia atrás	24
25	1500	+	25	Hacia delante	24

Tabla 2.3 Orden de Armónicos Derivados de un Convertidor de Seis Pulsos.

El flujo de corrientes en el rotor producirá una fuerza magnetomotriz en el entrehierro, que a su vez inducirá flujos de corriente en el rotor de la máquina. Como se puede definir un armónico característico con una secuencia positiva o negativa así se puede definir la rotación del armónico como adelante o hacia atrás con respecto a la rotación del rotor. Por ejemplo el quinto armónico rotará hacia atrás, así un armónico de corriente inducirá en el rotor una frecuencia correspondiente a la diferencial rotacional de la red entre la frecuencia fundamental del entrehierro y el quinto, dando como resultado un armónico de orden 6. El séptimo armónico rotara hacia adelante, una corriente armónica será inducida en el rotor con frecuencia correspondiente a la diferencia rotacional de la red entre el séptimo y la frecuencia fundamental del entrehierro, resultando nuevamente en un sexto armónico. Así desde el punto de vista del calentamiento del rotor, el quinto y el séptimo armónico en el

estator se combinan para producir una corriente de sexto armónico en el rotor. El armónico undécimo y el decimotercero actúan de la misma forma para producir la doceava corriente armónica en el rotor, con estos armónicos existen dos puntos de gran importancia que son el calentamiento resultante del rotor y las reducciones en el par del motor.

La magnitud de calentamiento afecta a las máquinas de rotor bobinado se en mayor proporción que una máquina de jaula de ardilla, mientras los rotores jaula de ardilla con barra profunda son más afectados que los ordinarios jaula de ardilla. El efecto sumado de los armónicos reduce la eficiencia y la vida útil de los motores. El calentamiento armónico generalmente reduce el funcionamiento entre un 90% y un 95% del que se presenta con una onda sinusoidal pura.

Los armónicos pueden también causar una pulsación de torque de salida en el motor. Ésta puede afectar la calidad del producto en lugares donde las cargas de los motores sean sensibles a tales variaciones como en un spin de fibra sintética o en algunas aplicaciones de trabajos con metal.

2.7.2 EFECTO SOBRE LOS CONDUCTORES.

Los conductores aislados pueden estar sometidos a fuerzas y coronas de voltaje, esto puede conducir a fallas en el aislamiento. Los conductores que están sometidos a niveles altos de corrientes armónicas son propensos a calentamientos. Al circular una corriente no sinusoidal en un conductor causará un calentamiento adicional comparado con la corriente RMS fundamental, esto debido al llamado efecto piel y efecto de proximidad, que varían en función de la frecuencia así como del calibre del conductor. El efecto piel a medida que aumenta la frecuencia de la corriente que transporta el cable disminuye el área efectiva por donde ésta circula puesto que la densidad de corriente crece en la periferia exterior, lo cual se refleja como un aumento en la resistencia efectiva del conductor, esto es llamado el efecto pelicular o efecto piel. [11]

Figura 2.19 Efector Pelicular.

Como resultado del efecto piel y el efecto proximidad, la resistencia efectiva AC, es elevada con respecto a la resistencia DC esto se da especialmente en conductores largos.

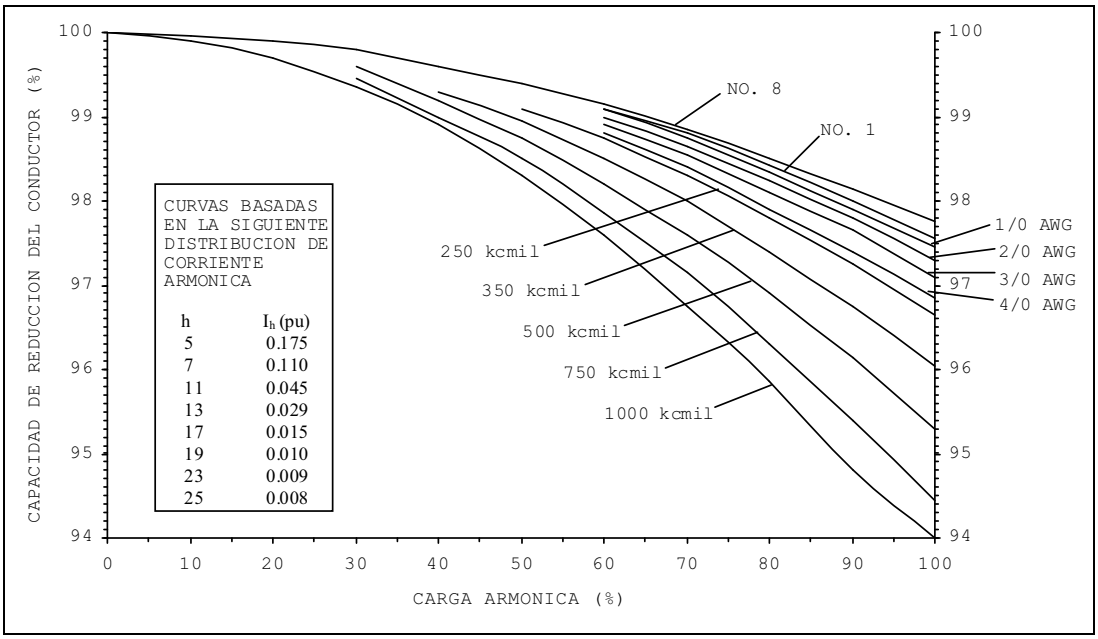

Figura 2.20 Reducción del Conductor vs. Armónicos con Distribución Armónica de Seis pulsos.

2.7.3 EFECTO SOBRE CONDENSADORES.

El uso de condensadores supone un mayor inconveniente esto debido a la posibilidad de resonancia del sistema. Este efecto se da con voltajes y corrientes que son mucho mayores a lo que sería el caso sin resonancia.

La reactancia de un banco de capacitores disminuye con la frecuencia, de esta forma el banco se comporta como una carga para corrientes armónicas altas. Este efecto aumenta el calentamiento y el esfuerzo dieléctrico. El cambio frecuente de componentes no magnéticos como transformadores y reactores, puede producir corrientes que se agregarán a la carga de condensadores.

La norma IEEE Std. 18-1992 proporciona los límites en voltaje, corriente y potencia reactiva para bancos de condensadores, lo que puede utilizarse para determinar el máximo nivel de armónicos permisible.
El aumento del calentamiento y esfuerzo dieléctrico por los armónicos se traduce en una disminución de la vida útil de los condensadores.

Existen condensadores tales como los usados en motores monofásicos de arranque por condensador o los que son usados en circuitos rectificadores amortiguadores son susceptibles a esfuerzos térmicos y de voltaje, tal como los que son u sados en la corrección del factor de potencia y filtrado de armónicos. [4]

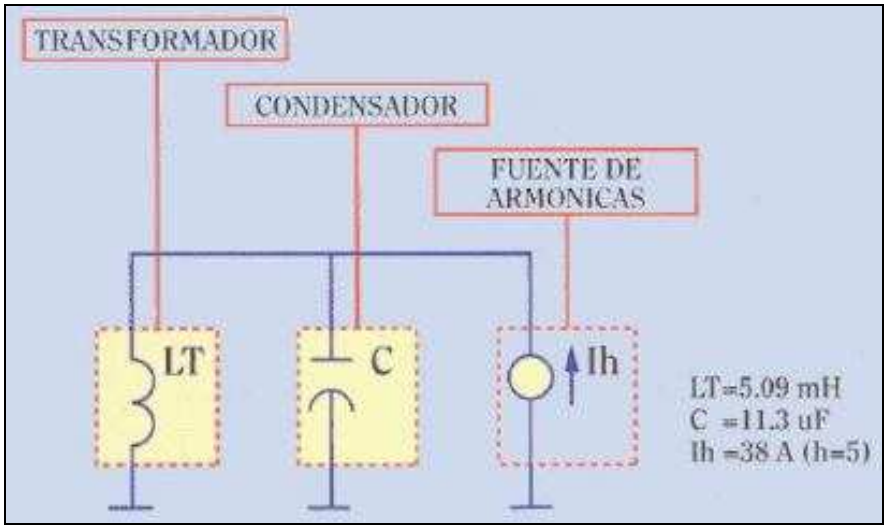

Figura 2.21 Circuito equivalente armónico de un sistema con condensadores de compensación de factor de potencia.

2.7.4 EFECTO SOBRE EQUIPOS ELECTRÓNICOS.

Puede existir un mal funcionamiento de equipo electrónico de potencia debido a las distorsiones armónicas. Generalmente el equipo depende de la determinación exacta del cruce por cero de la onda de voltaje. Los armónicos

pueden producir un cambio del cruce en el cruce por voltaje cero o en el punto al cual un voltaje fase-fase se vuelve mayor que otro voltaje fase-fase. Estos puntos son críticos para muchos tipos de controles de circuitos electrónicos lo que pueden acarrear el mal funcionamiento del equipo.
Existen tipos de equipos electrónicos que pueden ser afectados por la transmisión de armónicos hacia las fuentes AC ya sea por acoplamiento magnético o a través de los alimentadores.

Equipos tales como computadores y dispositivos asociados externos requieren de fuentes AC con un factor de distorsión de voltaje menor al 5%, con el mayor armónico solo siendo menor al 3% de la fundamental de voltaje. Un gran contenido armónico resulta en irregularidades, mal funcionamiento de los equipos. De igualmente los instrumentos pueden ser afectados, dando datos erróneos o funcionamiento impredecible, esto se vuelve critico en instrumentos médicos lo que obliga a que muchos instrumentos médicos sean proporcionados con potencia de condición de lineal. Los efectos con menor trascendencia se puede observar frecuentemente en equipos de radio y televisión, videograbadoras y sistemas de reproducción de audio.

El equipo electrónico cuyo funcionamiento se da a un voltaje menor que el voltaje del sistema de distribución, se encuentra expuesto a los efectos del escalonamiento de voltaje. Este a menudo introduce frecuencias armónicas y no armónicas, que son mucho mayores que las que se dan en 5 kV y en sistemas de distribución de alto voltaje. Estas frecuencias pueden estar dentro del rango de radio frecuencias y pueden ocasionar efectos nocivos asociados con radio frecuencias falsas, resultando en señales de interferencia introducidas en circuitos lógicos o de comunicación. [12]

2.7.5 EFECTOS SOBRE MEDIDORES.

Los instrumentos de medición son afectados especialmente cuando ocurren condiciones de resonancia que producen altos voltajes o altas corrientes en los circuitos. Los dispositivos con disco de inducción como los vatímetros normalmente ven solo la corriente fundamental, sin embargo el desbalance

ocasionado por la distorsión armónica puede ocasionar un mal funcionamiento del instrumento. Pueden existir errores positivos o negativos con la presencia de distorsión armónica esto depende del medidor y de los armónicos involucrados. [4]

2.7.6 EFECTOS SOBRE MECANISMO DE CONTROL Y RELÉS

Al igual que en otros equipos, las corrientes armónicas pueden producir incremento del calentamiento y las pérdidas, así reducen la capacidad de carga de la corriente de estado sólido y disminuyen la vida útil de los componentes aislantes. Los fusibles sufren una reducción en su capacidad nominal debido al calentamiento producido por la distorsión armónica durante su operación normal.

En la actualidad no existe norma alguna sobre los niveles de corrientes armónicas requeridas por los dispositivos de maniobra o fusibles para la interrupción [10]

Según un estudio canadiense se establece los efectos de los armónicos en operaciones de relés de la siguiente manera:

- Los relés muestran una tendencia a operar más lentamente y/o con valores pico muy altos, mejor que operar más rápidamente y/o con valores pico muy bajos.
- Los relés de baja frecuencia estática son susceptibles a sustanciales cambios en las características de operación.
- En muchos casos, los cambios en las características son relativamente pequeños sobre el rango moderado de distorsiones esperadas durante la operación normal (p.e. un factor armónico de 5%).
- Para diferentes fabricantes, los relés de sobrecorriente ó sobrevoltaje muestran diferentes cambios en las características de operación.
- Dependiendo del contenido armónico, la operación de torsión de los relés es a veces inversa.

- Los relés que emiten una impedancia balanceada muestran exceso y escasez, dependiendo de la distorsión.
- A veces los armónicos dañan la operación de alta velocidad de los relés diferenciales. Algunas pruebas demuestran que los relés pueden exhibir fijación completa.

2.7.7 INTERFERENCIA TELEFONICA.

La presencia de voltajes o corrientes armónicas en los circuitos asociados con aparatos convertidores de potencia pueden producir campos magnéticos y eléctricos que dañaran el funcionamiento satisfactorio de los sistemas de comunicación que, por virtud o por su proximidad y susceptibilidad, pueden ser distorsionados. Para un arreglo físico dado, es aparente que la distorsión es una función de la amplitud y la frecuencia de la componente distorsionada en el equipo de conversión.

El estudio de medidas para minimizar la interferencia que los sistemas de potencia pueden causar a los sistemas de comunicación es una propiedad sujeta a una coordinación inductiva, que es seguida activamente por el Subcomité Adjunto para el Desarrollo y la Investigación del Instituto Eléctrico Edison y el Sistema de Telefonía Bell. Subsecuentemente una fuente primaria de interferencia es la presencia de corrientes o voltajes armónicos en sistemas de potencia, una fuerte tarea del anterior subcomité adjunto que revisó los factores de peso a ser colocados en los componentes de frecuencia armónica para actualizarlos con el progreso del estado de los sistemas de comunicación de 1960, continuando con la introducción del conjunto de teléfonos tipo 500. Por subjetivas y objetivas pruebas de audición en un grupo de individuos, los pesos relativos fueron establecidos para varias frecuencias armónicas que indicaron perturbación con la comunicación a frecuencias de voz, ya que la inyección de una señal de frecuencia armónica en las redes de comunicación se producirá igual a aquella ocasionada por una señal de 1000 Hz de inyección similar. [4]

2.8 PÉRDIDAS EN TRANSFORMADORES EN PRESENCIA DE ARMÓNICOS.

Los transformadores de distribución se encuentran diseñados para una operación bajo condiciones sinusoidales en la fuente y/o la carga, sin embargo en la práctica existe la conexión de cargas no lineales que generan la presencia de armónicos esto produce un efecto sobre la calidad de la energía y el comportamiento de los transformadores.

La pérdida de vida útil en los transformadores debido al calentamiento producido por los armónicos es uno de los grandes problemas ocasionados.

Se analizarán varias metodologías que permiten cuantificar el efecto de los armónicos en el aumento de las pérdidas de los transformadores. Se estableció condiciones para el desarrollo de las metodologías como se ensayara con transformadores trifásicos, inmersos en aceite. [15]

2.8.1 CALCULO TEORICO DEL AUMENTO DE LAS PÉRDIDAS POR EFECTOS DE ARMONICO SEGÚN UNE 2148-4:1996.

En esta norma UNE define la capacidad del transformador con base en un factor K. [15]

$$K = \left[1 + \frac{e}{1+e}\left(\frac{I_1}{I}\right)^2 \sum_{n=2}^{n=N}\left(n^q\left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2\right)\right]^{\frac{1}{2}} \qquad 57)$$

Donde:

$n = orden\ del\ armónico.$

$N = orden\ del\ armónico\ mas\ alto.$

$I_1 = corriente\ fundamental.$

$I_n = corriente\ del\ armónico\ n$

$e = Relación\ entre\ pérdidas\ de\ Foucault\ con\ corriente\ sinusoidal\ a\ frecuencia\ fundamental\ y\ las\ perdidas\ debidas\ a\ una\ corriente\ continua\ igual\ al\ valor\ eficaz\ de\ la\ corriente\ sinusoidal,\ ambas\ a\ la\ misma\ temperatura\ de\ referencia$

$q = Constante\ exponencial\ que\ depende\ de\ la\ geometria\ de\ los\ devanados.$

$I = Valor\ eficaz\ de\ corriente$

Con esta metodología un transformador nuevo debe poseer una potencia K veces mayor y un transformador en uso no debe alimentar una carga mayor de 1/K, para no sobrepasar sus límites de funcionamiento.
La norma estima el porcentaje de reducción en la capacidad total del transformador, pero no permite calcular las pérdidas adicionales generadas por los armónicos, por este motivo no se incluyó en el análisis.

2.8.2 CALCULO TEORICO DEL AUMENTO DE LAS PÉRDIDAS POR EFECTOS DE ARMONICO SEGÚN NORMA IEEE Std 1158-1991.

En esta norma IEEE se centra en la determinación de pérdidas en subestaciones convertidoras HDVC, donde se tiene una muy alta generación de armónicos. [15]
Las pérdidas bajo carga están dadas por la expresión.

$$P_{LL} = \sum_{n=1}^{40} R_n (I_n)^2 \qquad 58)$$

Donde:

$n: Orden\ del\ armonico.$

$I_n: Corriente\ del\ armonico\ n.$

$R_n: Resistencia\ efectiva\ del\ devanado\ a\ la\ frecuencia\ del\ armonico\ n.$

Para la determinación de las pérdidas del transformador se debe conocer la resistencia ante cada armónico y el espectro armónico de la carga. Para la obtención de Rn se realiza ensayos bajo carga a las diferentes frecuencias o se determina como un múltiplo de la resistencia efectiva a frecuencia fundamental.

Armonico (n)	Resistencia Relativa (kn)
1	1
3	2,29
5	4,24
7	5,65
11	13
13	16,5
17	26,6
19	33,8
23	46,4
25	52,9
29	69
31	77,1
35	92,4
37	101
41	121
43	133
47	159
49	174
17	26,6
19	33,8
23	46,4
25	52,9
29	69

Tabla 2.4 Resistencia Relativa.

2.8.3 CALCULO TEORICO DEL AUMENTO DE LAS PÉRDIDAS POR EFECTOS DE ARMONICO SEGÚN NORMA IEEE Std 1158-1999.

En esta norma se encuentra enfocada en transformadores de estaciones convertidores HVDC. [15]

Las pérdidas bajo carga están dadas por:

$$P_{LL} = P_1 \sum_{h=1}^{\infty} F_h \left(\frac{I_h}{I}\right)^2 \qquad 59)$$

Donde:

P_1: *Perdidas bajo carga a frecuencia fundamental.*

h: Orden del armónico.

I_h: *Corriente del armónico.*

I: Valor eficaz de corriente.

F_h: *Factor de pérdidas del armónico h.*

Para determinar las pérdidas es necesario conocer las pérdidas bajo carga a frecuencia fundamental, F_h y el espectro armónico de la carga.

$$F_h = \frac{P_H}{P_1} \qquad 60)$$

Donde:

P_h: *Pérdidas bajo carga del armónico.*

Para determinar F_h se realizan pruebas de pérdidas bajo carga a diferentes frecuencias, obteniéndose curvas como la siguiente.

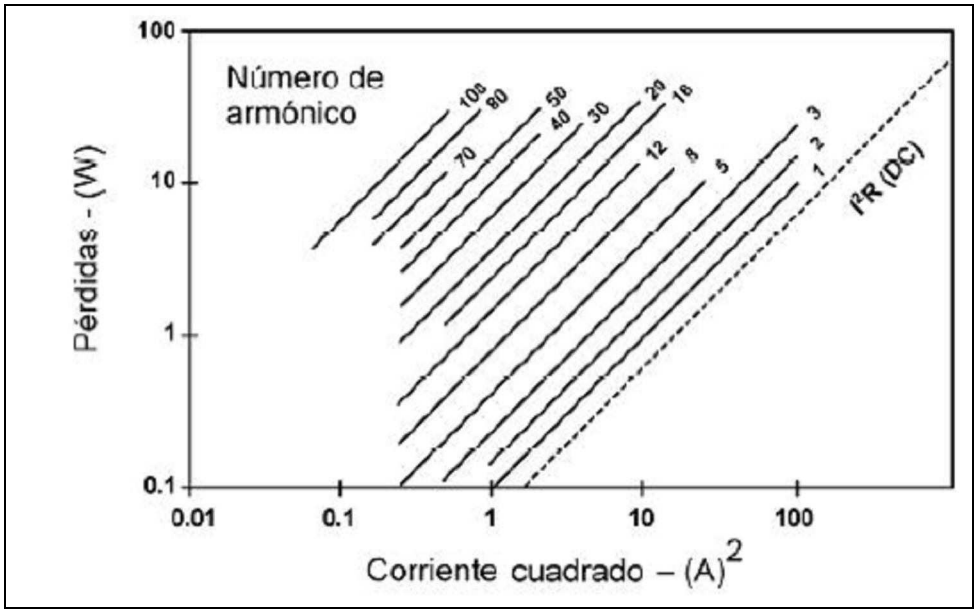

Figura 2.22 Pérdidas bajo carga vs Corriente Cuadrado.

2.8.4 CALCULO TEORICO DEL AUMENTO DE LAS PÉRDIDAS POR EFECTOS DE ARMONICO SEGÚN NORMA UNE 61378-1:1997.

Esta norma establece que la capacidad de carga de un transformador es esencialmente un problema de calentamiento en los devanados. [15]

Las pérdidas que ocasionan el calentamiento están dadas por:

$$P_N = I_{LN}{}^2(R_W + R_C) + P_{WE1}F_{WE} + P_{CE1}F_{CE} + P_{SE1}F_{SE} \qquad 61)$$

Donde:

I_{LN}: *Valor eficaz de carga asignada.*

R_w: Resistencia de devanados.

R_C: *Resistencia de conexiones.*

P_{WE1}: *Pérdidas por corriente de Foucault*

F_{WE}: *Factor de pérdidas por corrientes de Foucault en devanados.*

$$F_{WE} = \sum_{h=1}^{\infty} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^2 \qquad 62)$$

P_{CE}: *Pérdidas por corrientes de Foucault en conexiones a frecuencia fundamental*

F_{CE}: *Factor de pérdidas por corrientes de Focucault en conexiones*

P_{SE}: *Pérdidas por corrientes de Foucault en estructuras a frecuencia fundamental*

F_{SE}: *Factor de pérdidas por corrientes de Foucault en estructuras.*

$$F_{SE} = F_{CE} = \sum_{h=1}^{\infty} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^{0.8} \qquad 63)$$

Se debe establecer si se produce un calentamiento permisible para los devanados y para esto es necesario conocer las pérdidas en los devanados, conexiones, estructuras y el contenido armónico de la carga.

2.8.5 CALCULO TEORICO DEL AUMENTO DE LAS PÉRDIDAS POR EFECTOS DE ARMONICO SEGÚN NORMA IEEE Std C57.110-1998.

La norma establece un procedimiento para evaluar si el transformador no sobrepasa sus límites de operación, estimando el aumento de temperatura de la superficie superior del aceite y en el devanado. [15]
El aumento de la temperatura en el aceite está dado por la expresión:

$$\theta_{TO} = \theta_{TO-R} \left(\frac{P_{LL} + P_{NL}}{P_{LL-R} + P_{NL}}\right)^{0.8} \qquad 64)$$

Donde:

θ_{TO}: *Aumento de temperatura en aceite bajo carga armónica*

θ_{TO-R}: *Aumento de temperatura en aceite bajo carga nominal*

P_{NL}: *Pérdidas en vacío*

P_{LL-R}: *Perdidas bajo carga nominal.*

P : *Pérdidas bajo carga nominal.*

P_{EC-R}: *Pérdidas nominales debidas a corrientes de Foucault bajo carga.*

P_{OSL-R}: *Pérdidas debidas a corrientes de Foucault en el tanque.*

P_{LL}: *Perdidas bajo carga armónica.*

F_{HL}: *Factor de pérdidas armónicas en los devanados.*

F_{HL-STR}: *Factor de pérdidas por armónicos en el tanque y otras partes conductoras*

2.9 REGULACIÓN CONELEC 004/01.

En la regulación emitida por el CONELEC se establece que es necesario asegurar un nivel satisfactorio de la prestación de los servicios eléctricos a que a se refieren las disposiciones legales establecidas en la Ley de Régimen del Sector Eléctrico y sus reformas. Para esto se establece varios aspectos con los cuales se medirá la calidad de servicio. [18]

- **CALIDAD DE PRODUCTO.**
  - Nivel de Voltaje.
  - Perturbaciones de Voltaje.
  - Factor de Potencia.
- **CALIDAD DEL SERVICIO TÉCNICO.**
  - Frecuencia de Interrupciones.
  - Duración de Interrupciones.
- **CALIDAD DEL SERVICIO COMERCIAL.**
  - Atención de Solicitudes.
  - Atención de Reclamos.
  - Errores de Medición y Facturación.

2.9.1 PERTURBACIONES – ARMÓNICOS.

Aquí se establecen índices de calidad, metodología de mediciones y límites de los armónicos.

2.9.1.1 Índices De Calidad.

Se establecen dos índices de calidad:

- **FACTOR DE DISTORSIÓN ARMÓNICA INDIVIDUAL DE VOLTAJE.**

$$V_i^{\cdot} = \left(\frac{V_i}{V_n}\right) * 100 \qquad 65)$$

- **FACTOR DE DISTORSIÓN TOTAL.**

$$THD = \left(\frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{40}(V_i)^2}}{V_n}\right) * 100 \qquad 66)$$

2.9.1.2 Mediciones.

El Distribuidor deberá realizar mensualmente lo siguiente:

1. Un registro en cada uno de los puntos de medición, en un número equivalente al 0,15% de los transformadores de distribución, en los bornes de bajo voltaje, no menos de 5.

2. Para la selección de los puntos se considerarán los niveles de voltaje, el tipo de zona (urbana, rural), y la topología de la red, a fin de que las mediciones sean representativas de todo el sistema. Una vez realizada la selección de los puntos, la Empresa Distribuidora debe notificar al CONELEC, por lo menos 2 meses antes de efectuar las mediciones.

3. Simultáneamente con este registro se deberá medir la energía entregada a efectos de conocer la que resulta suministrada en malas condiciones de calidad.

4. En cada punto de medición, para cada mes, el registro se efectuará durante un período no inferior a 7 días continuos, en intervalos de medición de 10 minutos.

Las mediciones se deben realizar con un medidor de distorsiones armónicas de voltaje de acuerdo a los procedimientos especificados en la norma IEC 61000-4-7.

Con la finalidad de ubicar de una manera más eficiente los medidores de distorsiones armónicas, se efectuarán mediciones de monitoreo de armónicas, de manera simultánea con las mediciones de voltaje indicadas anteriormente; por lo que los medidores de voltaje deberán estar equipados para realizar tales mediciones de monitoreo.

2.9.1.3 Límites.

Se establecen valores límites de voltajes armónicos individuales y de THD.

ORDEN (n) DE LA ARMONICA Y THD	TOLERANCIA $\|V_i'\|$ o $\|THD'\|$ (% respecto al voltaje nominal del punto de medición)	
	V > 40 kV (otros puntos)	**V ≤ 40 kV (trafos de distribución)**
Impares no múltiplos de 3		
5	2.0	6.0
7	2.0	5.0
11	1.5	3.5
13	1.5	3.0
17	1.0	2.0
19	1.0	1.5
23	0.7	1.5
25	0.7	1.5
> 25	0.1 + 0.6*25/n	0.2 + 1.3*25/n
Impares múltiplos de tres		
3	1.5	5.0
9	1.0	1.5
15	0.3	0.3
21	0.2	0.2
Mayores de 21	0.2	0.2
Pares		

2	1.5	2.0
4	1.0	1.0
6	0.5	0.5
8	0.2	0.5

3. CAPITULO III.

3.1 TRANSFORMADORES ANALIZADOS.

Del universo de transformadores existentes en el área de concesión de la Empresa Eléctrica Quito, se escogió cinco cámaras con transformadores trifásicos de diferentes potencias. Las cámaras corresponden a centros de cómputo, industrias, universidades y edificios de departamentos, cuya carga típica es generadora de armónicos. Esta densidad de carga no lineal permitirá tener mediciones reales de sistemas eléctricos cuyo contenido armónico es muy alto.

Se definió cinco instituciones que se detallan a continuación:

3.1.1 CALL CENTER CRONIX.

La cámara de transformación pertenece al Call Center que ofrece los servicios para el Instituto Ecuatoriano de Seguridad Social, posee una carga típicamente generadora de armónicos compuesta en su mayoría por computadores personales. Las características del transformador se detallan a continuación.

Serie	0956811
Potencia(kVA):	250
Número de Fases:	3
Grupo de Conexión:	Dy5
Voltaje Primario(V):	6000
Voltaje Secundario(V):	210
Corriente Primaria(A):	24,06
Corriente Secundaria(A):	687,32
Frecuencia(Hz):	60

Clase de Aislamiento:	A0
Refrigeración:	ONAN
Año de Fabricación:	2011

Tabla 3.1 Características del Transformador Cronix.

3.1.2 IMPRENTA MARISCAL.

La cámara de transformación es de tipo industrial, posee máquinas impresoras de gran consumo además de las oficinas administrativas. El transformador instalado se detalla a continuación.

Serie	0692906
Potencia(kVA):	500
Número de Fases:	3
Grupo de Conexión:	Dy5
Voltaje Primario(V):	6000
Voltaje Secundario(V):	220
Corriente Primaria(A):	48,11
Corriente Secundaria(A):	1312,16
Frecuencia(Hz):	60
Clase de Aislamiento:	A0
Refrigeración:	ONAN
Año de Fabricación:	2006

Tabla 3.2 Características del Transformador IM.

3.1.3 TORRE DE DEPARTAMENTOS PARQUE REAL.

La cámara de transformación pertenece al edificio de departamentos Parque Real, aquí se encuentran conectadas cargas de tipo residencial que en conjunto son grandes generadoras de armónicos. Los datos del transformador instalado se enumeran a continuación.

Serie	05037629

Potencia(kVA):	500
Número de Fases:	3
Grupo de Conexión:	Dy5
Voltaje Primario(V):	6000
Voltaje Secundario(V):	210
Corriente Primaria(A):	48,11
Corriente Secundaria(A):	1312,16
Frecuencia(Hz):	60
Clase de Aislamiento:	A0
Refrigeración:	ONAN
Año de Fabricación:	

Tabla 3.3 Características del Transformador P.R.

3.1.4 CENTRO DE COMPUTO PUCE.

La cámara de transformación se encuentra ubicada en el subsuelo del Centro Cultural de la Pontificia Universidad Católica, alimenta la demanda del centro de cómputo, posee en su mayoría computadores, ups e impresoras.

Serie	09013457
Potencia(kVA):	250
Número de Fases:	3
Grupo de Conexión:	Dy5
Voltaje Primario(V):	6000
Voltaje Secundario(V):	220/127
Corriente Primaria(A):	24,09
Corriente Secundaria(A):	687
Frecuencia(Hz):	60
Clase de Aislamiento:	A0
Refrigeración:	ONAN
Año de Fabricación:	1999

Tabla 3.4 Características del Transformador PUCE.

3.1.5 ALMACEN COMERCIAL ETAFASHION C.C.I.

La cámara de transformación se encuentra ubicada en el Centro Comercial Iñaquito, pertenece al local comercial de Etafashion, tiene como carga lámparas fluorescentes en su mayoría, los datos de placa del transformador se detallan a continuación:

Serie	011121103
Potencia(kVA):	125
Número de Fases:	3
Grupo de Conexión:	Dy5
Voltaje Primario(V):	6000
Voltaje Secundario(V):	220/127
Corriente Primaria(A):	12,03
Corriente Secundaria(A):	328,04
Frecuencia(Hz):	60
Clase de Aislamiento:	A0
Refrigeración:	ONAN
Año de Fabricación:	2011

Tabla 3.5 Características de Transformador Etafashion.

3.2 EQUIPO DE MEDICIÓN UTILIZADO.

El equipo utilizado fue el Dranetz-BMI Power Explorer PX5 este es un monitor/medidor de redes de 8 canales, de mano y portátil. Este instrumento de calidad eléctrica está diseñado con una pantalla de cristal líquido LCD táctil. Este equipo puede monitorizar, registrar y visualizar datos de cuatro canales de tensión y cuatro canales de corriente. El equipo está diseñado para cumplir con las normas IEEE 1159 e IEC 61000-4-30 Clase A en cuanto a precisión y requisitos de medida. El equipo puede realizar un análisis de calidad

optimizado de perturbaciones o eventos de la instalación. Además incluye un paquete de análisis estadístico denominado calidad de alimentación, con funciones y protocolos de monitorización para determinar si las medidas realizadas cumplen con la norma EN50160. [18]

El modelo del Power Explorer PX5 está equipado con una tarjeta análogica de muestreo de alta velocidad para la detección, digitalización y análisis de transitorios de hasta 1 microsegundo. El PX5-XFAST realiza medidas en sistemas eléctricos de 60 Hz.

El PX5 puede monitorizar los siguientes sistemas:

- 3 Fases estrella.
- 3 Triángulo.
- 3 Fases, triángulo 2 vatímetros.
- Monofásico.
- Fase partida o bifásico.

El PX5 posee varias funciones todas aquellas que se describen a continuación pueden realizarse utilizando la pantalla táctil.

3.2.1 MODO OSCILOSCOPIO.

Este modo permite la visualización en tiempo real de las formas de onda de voltaje y corriente de hasta ocho canales simultáneamente, con una actualización de un segundo. El color de las ondas es programable. También aparece información textual sobre valores eficaces, escalas de los ejes y la frecuencia.[18]

3.2.2 MODO MULTÍMETRO.

Proporciona funciones de voltímetro y amperímetro de verdadero valor eficaz, junto con la medida de otros muchos parámetros de la instalación. La información se muestra en modo texto y gráfico.[18]

3.2.3 ARMÓNICOS.

Se muestra la amplitud y el ángulo de fase de cada armónico hasta el orden 63, en formato texto y gráfico.[18]

3.2.4 DIAGRAMA DE FASORES.

Esta pantalla muestra un gráfico que indica las relaciones de fase entre todas las tensiones y todas las corrientes a la frecuencia fundamental, obtenidas a partir del análisis de Fourier. Funcionando como un medidor de ángulo de fase, el equipo puede visualizar condiciones de desequilibrio e indicar esta información en formato texto. La visualización de los ángulos también permite verificar si las conexiones se han realizado correctamente. [18]

3.2.5 FLICKER.

El flicker es un fenómeno debido, principalmente, a pequeñas fluctuaciones de tensión. Las cargas que generan fluctuaciones rápidas de corriente, en particular las inductivas. [18]

3.2.6 EVENTO

Un evento se produce cuando se cruza el umbral programado. Un evento contiene ciclos antes, durante y después del disparo. [18]

3.2.7 HISTORIAL.

El historial permite a los usuarios visualizar gráficos de los valores min/med/max registrados a intervalos de tiempos programados. [18]

3.2.8 INFORMES.

El PX5 permite los usuarios visualizar dos tipos de informes de cumplimiento de las normas de calidad. El informe EN50160 y el Estado PQ.

3.2.9 CONFIGURACIÓN.

Los usuarios tienen la opción de usar la configuración automática y proceder directamente con la monitorización de datos, o configurar el equipo paso a paso para analizar el circuito.

3.2.9.1 Configuración Automática.

La configuración inteligente es un proceso que auto configura el equipo en un paso para proceder directamente con la monitorización. El usuario tiene la opción de visualizar la lista de los parámetros autoconfigurados, proceder directamente con la monitorización, o cancelarla para realizar una configuración manual.

3.2.9.2 Configuración Paso A Paso.

La configuración paso a paso de un circuito, guía al usuario a través de una serie de pantallas en donde se le solicita información sobre el circuito que se va a monitorizar. El equipo activa automáticamente los canales correctos, configura los umbrales de los parámetros y captura de formas de onda dependiendo del tipo de circuito detectado, valores nominales de tensión y corriente, y modo de monitorización especificado por el usuario

Figura 3.1 Analizador de Redes Power Explorer DRANETZ-BMI PX5.

3.3 METODOLOGÍA QUE SE APLICARÁ PARA LA EVALUACIÓN DE PÉRDIDAS EN PRESENCIA DE ARMÓNICOS.

La metodología que se aplicará para el cálculo es la establecida por la norma Std. C57.110-1998. A continuación se establecerá las pérdidas establecidas por esta norma.

Generalmente los efectos producidos por los componentes armónicos se traducen en calentamiento parásito, sin embargo ciertos armónicos producen incremento del ruido audible.

El efecto producido por los armónicos en los transformadores es doble: Las corrientes armónicas causan un incremento de pérdidas en el cobre y pérdidas de flujo disperso, mientras los voltajes armónicos causan un incremento de las pérdidas en el hierro. Sumados estos dos efectos da como consecuencia el calentamiento del transformador, al ser comparado con una operación puramente sinusoidal.

La pérdidas en el transformador producidas por voltajes y corrientes armónicas dependen de la frecuencia, conforme aumenta la frecuencia aumentan las pérdidas, por lo que las componentes de alta frecuencia pueden llegar a ser más importantes que las de baja frecuencia, sin embargo los armónicos de alta frecuencia ocurren con la disminución de la amplitud lo que produce la

cancelación de su efecto. Aunque se puede esperar una situación real en la que las altas frecuencias presenten altas amplitudes.

Las pérdidas del transformador pueden ser sumadas dentro de las pérdidas con carga y sin carga. Dentro de las pérdidas con carga se pueden encontrar las pérdidas I^2R, pérdidas por corrientes inducidas por efecto del campo magnético disperso en los conductores activos, resultando su dependencia con la frecuencia cuadrática, pérdidas en otras partes conductores debido a corrientes inducidas por campos dispersos.

3.3.1 PÉRDIDAS DEBIDO A VOLTAJES ARMONICOS.

De acuerdo con la ley de Faraday el voltaje terminal está determinado por la rapidez de cambio del flujo en tiempo: [12]

$$N_1 \frac{d\emptyset}{dt} \cong U_1(t) \tag{3.1}$$

Transformando esta ecuación al dominio de la frecuencia, muestra la relación entre el voltaje armónico y las componentes de flujo.

$$N_1 . j(hw) . \emptyset_h \cong U_h \qquad h = 1,2,3 \ldots \tag{3.2}$$

La ecuación anterior muestra que la magnitud del flujo es proporcional al voltaje armónico e inversamente proporcional al orden del armónico h. En la mayoría de sistemas de potencia la distorsión armónica de voltaje está por debajo del 5% y la magnitud de las componentes de armónicos de voltaje son pequeñas comparadas con la fundamental, pocas veces excede el 2% o 3%. Con estos antecedentes se puede despreciar las pérdidas adicionales producidas por el voltaje armónico.

3.3.2 PÉRDIDAS DEBIDO A CORRIENTES ARMÓNICOS.

Las corrientes armónicas tiene mayor significancia en el sistema de potencia, estas componentes causan pérdidas adicionales en los devanados y otras partes estructurales del transformador. [12]

3.3.3 PÉRDIDAS ÓHMICAS EN DC.

Las pérdidas PDC se deben a la corriente nominal, cuando ésta fluye a través de los devanados. Si la corriente de carga aumenta debido a la presencia de componentes armónicos, entonces estas pérdidas aumentan con el cuadrado de la corriente.

$$P_{DC} = I^2 R \tag{3.3}$$

3.3.3.1 Pérdidas por Corrientes de Eddy en los Devanados.

Convencionalmente, se asume que las pérdidas por corrientes parasitas generadas por el flujo electromagnético, varia con el cuadrado de la corriente eficaz y el cuadrado de la frecuencia, como se indica en la formula siguiente. [12]

$$P_{EC} = P_{EC-R} \sum_{h=1}^{h=max} h^2 . \left(\frac{I_h}{I_R}\right)^2 \tag{3.4}$$

Donde:

P_{EC} *Pérdidas por corrientes de Eddy debido a las corrientes no sinusoidales*

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

h *Orden armónico*

I_h *Corriente eficaz del armónico h*

I_R *Corriente eficaz fundamental*

Debido al efecto piel, el flujo electromagnético no penetra totalmente en los conductores de los devanados a altas frecuencias. Sin embargo la potencia 2 es usualmente utilizado en los cálculos.

El incremento de las pérdidas por corrientes de Eddy producidas por una corriente de carga no sinusoidal puede producir pérdidas excesivas en los devanados y por lo tanto un aumento de la temperatura. Esto demuestra que la influencia de la corriente armónica tiene mayor importancia, no solamente porque se asume el cuadrado del orden armónico, sino también por las corrientes armónicas relativamente grandes.

3.3.3.2 Pérdidas por Dispersión o Adicionales.

Las pérdidas adicionales se presentan debido al flujo disperso, que introducen pérdidas en el núcleo, soportes, tanques y otras partes de hierro. Si los transformadores se encuentran sometidos a corrientes armónicas estas pérdidas también aumentan. Para transformadores sumergidos en aceite las pérdidas adicionales incrementan la temperatura del aceite y de las partes estructurales del transformador. Las pérdidas adicionales se asume que varían con el cuadrado de la corriente eficaz y con las potencia 0.8 del orden del armónico. [12]

$$P_{SL} = P_{SL-R} \sum_{h=1}^{h=max} h^{0.8} \left(\frac{I_h}{I_R}\right)^2 \qquad (3.5)$$

P_{SL} *Pérdidas por dispersión debido a las corrientes no sinusoidales*

P_{EC-R} *Pérdidas por dispersión bajo condiciones nominales*

h *Orden armónico*

I_h *Corriente eficaz del armónico h*

I_R *Corriente eficaz fundamental*

3.3.4 FACTOR DE PÉRDIDAS POR CORRIENTES POLIARMONICAS EN LOS DEVANADOS.

Se puede definir un factor aplicable a las pérdidas adicionales en los devanados, este permite evaluar el calentamiento producido por las corrientes armónicas de la carga. Se determina mediante la relación entre las pérdidas adicionales totales debidas a las corrientes armónicas P_{EC} y las pérdidas por corrientes de Eddy a la frecuencia fundamental sin la presencia de armónicas P_{EC-R}. El factor F_{HL} viene definido por la norma IEEE C57.110-1998.

$$F_{HL} = \frac{P_{EC}}{P_{EC-o}} = \frac{\sum_{h=1}^{h=hmax} I_h^2 . h^2}{\sum_{h=1}^{h=hmax} I_h^2} \tag{3.6}$$

3.3.5 FACTOR DE PÉRDIDAS ADICIONALES DEBIDO A CORRIENTES POLIARMONICAS EN OTRAS PARTES CONDUCTORAS.

El calentamiento debido a pérdidas adicionales en otras conductoras afecta principalmente a transformadores que poseen líquido refrigerante, mientras en los transformadores secos no se tiene en cuenta.
Se define el factor con la siguiente expresión.

$$F_{HL-R} = \frac{\sum_{h=1}^{h=hmax} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 . h^{0.8}}{\sum_{h=1}^{h=hmax} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \tag{3.7}$$

CAPÍTULO 4.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos de las mediciones de cada uno de los transformadores sometidos a prueba, así como el cálculo de las pérdidas adicionales y se realizarán comparaciones con las pérdidas establecidas por el fabricante.

4.1 PRESENTACIÓN Y APLICACIÓN DE METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE PÉRDIDAS ADICIONALES.

En la sección siguiente se presentan los valores de las mediciones realizadas en cada uno de los transformadores. Así como el cálculo de varios factores característicos de los armónicos.

4.1.1 CALL CENTER CRONIX

Las características del transformador se detallaron en la sección 3.1. Se realizaron dos mediciones en días hábiles para de esta manera contrastarlas. Los resultados obtenidos fueron similares por lo que se escogió sólo uno de ellos.

4.1.1.1 Valores de Corrientes y Voltajes RMS.

Voltajes:

VOLTAJES (V)			
FASE-FASE	A-B	B-C	A-C
	213,65	212,34	211,63
FASE-NEUTRO	A-N	B-N	C-N
	122,69	123,52	121,92

Tabla 4.1 Voltajes Fase-Neutro, Fase-Fase. Cronix

Corrientes:

CORRIENTES (A)			
FASE	A	B	C
	279,1	252,3	118,2

Tabla 4.2 Corrientes por Fase. Cronix

4.1.1.2 Valores de Armónicos de Voltaje Y THD.

Valores RMS de Voltaje de Armónicos:

Valores RMS de Voltaje (V)			
FND	122,59	123,41	121,8
H02	0,6461	0,3878	0,3853
H03	0,544	0,5366	0,3243
H04	0,3339	0,19313	0,14618
H05	4,739	5,154	5,318
H06	0,07454	0,12699	0,09711
H07	0,16083	0,17905	0,12161
H08	0,07568	0,05374	0,04372
H09	0,05353	0,30004	0,08135
H10	0,06148	0,04209	0,03848
H11	0,22308	0,3985	0,181
H12	0,05814	0,04391	0,028286
H13	0,10627	0,25373	0,06484
H14	0,04948	0,04394	0,019835
H15	0,05498	0,09025	0,019285

H16	0,04393	0,03708	0,022133
H17	0,06988	0,12089	0,017531
H18	0,03283	0,0324	0,012102
H19	0,13453	0,11519	0,04759
H20	0,04274	0,04054	0,019333
H21	0,03876	0,019347	0,031162
H22	0,03264	0,03081	0,012539
H23	0,03302	0,028517	0,020128
H24	0,031129	0,028727	0,016423
H25	0,04201	0,017231	0,015061

Tabla 4.3 Componentes Armónicos de Voltaje

THD de Voltaje Impar:

THD (%)			
FASE	A	B	C
	3,9	4,23	4,38

Tabla 4.4 THD Impar de Voltaje. Cronix

THD de Voltaje Par:

THD (%)			
FASE	A	B	C
	0,61	0,38	0,35

Tabla 4.5 THD Par de Voltaje. Cronix

THD total:

THD (%)			
FASE	A	B	C
	3,95	4,25	4,39

Tabla 4.6 THD Total de Voltaje. Cronix

4.1.1.3 Diagrama DFT de Armónicos de Voltaje.

En las siguientes figuras se presentan los valores de los armónicos de voltaje como porcentaje de la fundamental.

En la figura 4.1 se puede observar que el valor del quinto armónico de voltaje en el canal A es el de mayor valor respecto a la fundamental.

```
ERROR: typecheck
OFFENDING COMMAND: image

STACK:

-dictionary-
-mark-
-savelevel-
```