



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA – SISTEMAS ELÉCTRICOS DE
POTENCIA

MODELADO Y SIMULACIÓN EN UNA TRANSFORMACIÓN TRIFÁSICA A
BASE DE UNIDADES MONOFÁSICAS BAJO DIFERENTES TIPOS DE
CONEXIÓN PARA ESTUDIAR LA CORRIENTE DE EXCITACIÓN, EL
FLUJO MAGNÉTICO Y LA TENSION INDUCIDA

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ING. MARCO POLO JÁCOME TOSS

TUTOR PRINCIPAL
DR. GONZALO SANDOVAL RODRÍGUEZ
POSGRADO FACULTAD DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. NOVIEMBRE 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado Asignado

Presidente: Dr. Frédéric Trillaud Pighi

Secretario: Dr. César Ángeles Camacho

1er Vocal: Dr. Gonzalo Sandoval Rodríguez

2do Vocal: Dr. Juan Ramón Rodríguez Rodríguez

3er. Vocal: Dr. Rafael Escarela Pérez

Ciudad Universitaria, Ciudad de México

Tutor de tesis

Dr. Gonzalo Sandoval Rodríguez



Firma

Agradecimientos

Gracias CONACYT por tu aporte económico que me ha permitido dedicarme para el estudio de un nuevo grado académico.

Gracias papás por apoyarme en forma incondicional al darme alojamiento y por entenderme.

A mi tutor el Dr. Gonzalo Sandoval Rodríguez y mi maestro Dr. Rafael Escarela Pérez por darme puntos de vista en el desarrollo de esta tesis.

Un sincero agradecimiento a los miembros del jurado, por sus sugerencias y comentarios, especialmente al Dr. Frédéric Trillaud y al Dr. César Ángeles.

Gracias UNAM por tu biblioteca tan enriquecida y tus múltiples servicios.

Gracias a todos mis compañeros de clase especialmente Christian por hacer un buen equipo y el resto de mis compañeros.

Abstract

The work carried out addresses the analysis of the deformation of the excitation current, induced voltage and magnetic flux in a three-phase bank based on single-phase units before the increase and decrease of the voltage applied in steady state in different types of three-phase connection (wye-wye, ungrounded wye-wye, delta-wye, delta-delta) for an analysis of magnitudes and total harmonic distortions and other characteristics associated to the waveshape.

The deformation of the no-load-current, magnetic flux and induced voltage waveshapes has been analyzed in previous publications, however their scope is more related to which harmonics are present in the spectrum analysis than an analysis of the harmonic contribution to the distortion of the waveshape. The study has been carried out considering the core loss resistor to compare the results in the simulations when this loss resistor is not considered. The analysis included steady state voltage variations for performing an assessment in the waveshape of the three variables mentioned previously with a program developed for the Scilab platform.

Resumen

El trabajo realizado aborda el análisis de la deformación de la corriente en vacío, tensión inducida y flujo magnético en un banco trifásico a base de unidades monofásicas ante el incremento y disminución de la tensión aplicada en estado estable en diferentes tipos de conexión trifásica (estrella-estrella aterrizada, estrella-estrella neutro aislado, delta-estrella, delta-delta) para un análisis de magnitudes y distorsiones armónicas totales.

La deformación de la corriente en vacío, flujo magnético y tensión inducida ha sido analizada en publicaciones anteriores, sin embargo, su alcance está más relacionado con los armónicos que están presentes en el análisis del espectro que con un análisis de la contribución armónica a la distorsión de forma de onda. El estudio se ha llevado a cabo considerando y despreciando la resistencia de pérdidas del núcleo para comparar los resultados en las simulaciones. El análisis incluyó las variaciones de voltaje en estado estable para realizar una evaluación en la forma de onda de las tres variables mencionadas anteriormente con un programa desarrollado para la plataforma Scilab.

Índice general

Agradecimientos	v
Abstract	vii
Resumen.....	ix
Índice de figuras	xiv
Listado de tablas	xvii
Organización de tesis	xxiii
I Presentación.....	1
1.1 Introducción	1
1.2 Antecedentes.....	1
1.3 Motivación de la tesis	6
1.4 Objetivo general.....	8
1.4.1 Objetivos específicos.....	8
1.5 Hipótesis.....	9
1.6 Marco teórico.....	9
1.6.1 Componentes armónicas	9
1.6.2 Factor de cresta	11
1.6.3 Distorsión armónica total.....	12
1.6.4 Secuencia de fases para voltajes y corrientes armónicos.....	12
1.6.5 Armónicas en la corriente de excitación, tensión inducida y flujo magnético .	14
1.6.6 Modelado de los circuitos magnéticos.....	15
II Modelado del Circuito Magnético	18
2.1 Introducción	18
2.2 Dimensiones del transformador	19
2.3 Permeancia de fuga.....	21
2.4 Trayectorias de flujos magnéticos e intensidad de campo magnético.....	22
2.5 Permeancia de fuga en devanados.....	24
2.6 Permeancia en el núcleo.....	32
2.7 Características del núcleo, curva BH.....	34
2.8 Circuito magnético equivalente.....	35
2.9 Permeancia equivalente	37

III Análisis y simulación de la corriente de vacío, flujo magnético y voltaje inducido	39
3.1 Introducción	39
3.2 Modelo del transformador sin pérdidas.....	40
3.2.1 Parámetros transformador monofásico 127 V	40
3.3 Modelo del transformador con pérdidas	40
3.3.1 Parámetros transformador 220 V.....	41
3.4 Ecuación de estado en vacío	41
3.5 Caso 1. Transformador monofásico 127V	44
3.5.1 Corriente de vacío en unidad monofásica.....	44
3.5.2 Tensión inducida en unidad monofásica.....	48
3.5.3 Flujo magnético en unidad monofásica.....	50
3.6 Caso 2. Transformador monofásico 220 V.....	52
3.6.1 Corriente de vacío en unidad monofásica.....	52
3.6.2 Tensión inducida en unidad monofásica.....	56
3.6.3 Flujo magnético en unidad monofásica.....	58
3.7 Caso 3. Banco trifásico conexión Yy0	60
3.7.1 Corriente de vacío, tensión inducida y flujo magnético en el modelo sin pérdidas.....	61
3.7.2 Corriente de vacío, tensión inducida y flujo magnético en el modelo con pérdidas.....	63
3.7.3 Comparación de espectros de frecuencias al incrementar o disminuir la tensión nominal.	65
3.8 Caso 4. Banco trifásico conexión Dy1.....	69
3.8.1 Corrientes de vacío en la conexión Dy1.....	70
3.8.2 Tensión inducida en la conexión Dy1	74
3.8.3 Flujo magnético en la conexión Dy1	78
3.8.3 Comparación de espectros de frecuencias al incrementar o disminuir la tensión nominal	82
3.9. Caso 5. Banco trifásico conexión Dd0	86
3.9.1 Flujos magnéticos en unidades monofásicas	91
3.9.2 Tensiones inducidas en unidades monofásicas	95
3.9.2 Comparación de espectros de frecuencias al incrementar o disminuir la tensión nominal.	99

3.10 Caso 6. Banco trifásico conexión Yy0 con neutro aislado en el lado primario ..	102
3.10.1 Corrientes de vacío conexión Yy0 neutro aislado.....	103
3.10.2 Flujo magnético en conexión Yy0 neutro aislado.....	107
3.10.3 Tensiones inducidas en conexión Yy0 neutro aislado.....	111
3.10.4 Comparación de espectros de frecuencias al incrementar o disminuir la tensión nominal.	116
3.11 Resumen de casos de estudio.....	119
IV Validación de resultados	123
4.1 Introducción	123
4.2 Transformador monofásico 127 V.....	123
4.2.1 Comparación de corriente de vacío con ATP modelo sin pérdidas.....	124
4.2.2 Comparación de corriente de vacío con ATP modelo con pérdidas	127
4.2.3 Comparación de la tensión inducida en ATP modelo sin pérdidas	131
4.2.4 Comparación de tensiones inducidas con ATP modelo sin pérdidas.....	133
4.3 Transformador monofásico 220 V.....	134
4.3.1 Corrientes de vacío en ATP	134
4.3.2 Comparación de corrientes ATP y Scilab	135
4.4 Banco trifásico conexión Dy1	137
4.4.1 Comparación de corrientes ATP y Scilab	138
4.5 Banco trifásico conexión Dd0.....	140
4.6 Banco trifásico conexión Yy0 neutro aislado.....	141
4.7 Comprobación de la corriente de vacío, medición real y simulación, transformador monofásico 127 V.	142
4.8 Comprobación de la corriente de vacío, medición real y simulación, transformador monofásico 220 V.	143
V Conclusiones	144
5.1 Conclusiones.....	144
5.2 Aportaciones.....	146
Apéndice A Dimensiones en devanados.....	147
A.1.1 Dimensiones en devanado primario y secundario 127 V	149
A.1.2 Dimensiones en devanado primario y secundario 220 V	150
Apéndice B Dimensiones transformador	151
Apéndice C Pruebas de impedancia, pérdidas.....	152

C.1.1 Prueba de Circuito Abierto.....	152
C.1.2 Prueba de Impedancia.....	152
Apéndice D Códigos Scilab	153
Apéndice E Método de Runge-Kutta.....	153
Referencias.....	154

Índice de figuras

Figura 1.1 Medición real de la corriente de vacío en el transformador monofásico TA con bobinado de 127 V.....	09
Figura 1.2 Espectro de frecuencias de la corriente de vacío del transformador TA.	10
Figura 1.3 Ángulos de fase del espectro de frecuencias de la corriente de vacío del transformador TA	10
Figura 1.4 Componentes de secuencia positiva, negativa y cero de la corriente de vacío de un banco trifásico en conexión delta-estrella sin neutro.....	14
Figura 1.5 Componentes de secuencia positiva, negativa y cero de la corriente de vacío de un banco trifásico en conexión delta-estrella aterrizada	14
Figura 1.6 Núcleo de acero al silicio con bobinado en la columna izquierda.....	16
Figura 1.7 a) Circuito magnético con reluctancias b) Representación eléctrica de un circuito magnético utilizando permeancias en lugar de reluctancias	16
Figura 2.1 Planta transformador monofásico	19
Figura 2.2 Dimensiones del núcleo del transformador, corte A-A'	20
Figura 2.3 Dimensiones del transformador, corte B-B'.....	20
Figura 2.4 Dimensiones del transformador, sección C-C'.....	21
Figura 2.5 Disposición de bobinados 127 V/220 V, corte D-D'.....	22
Figura 2.6 Flujos magnéticos a través del núcleo y bobina	23
Figura 2.7 Representación de flujos magnéticos a través del núcleo y bobinas	23
Figura 2.8 Trayectoria de flujos de dispersión, bobinado primario y secundario	23
Figura 2.9 Disposición de bobinados primarios y secundarios 127 V/220 V, corte A-A'	24
Figura 2.10 Trayectoria de la intensidad de campo magnético para el devanado primario de 127 V.....	25
Figura 2.11 Permeancias de dispersión en aire y total en el devanado primario de 127 V ventana derecha del corte A-A'	29
Figura 2.12 Permeancia equivalente en aire y bobinado primario 127 V,ventana derecha del corte A-A'.....	32
Figura 2.13 Esquema radios de bobinados primarios y secundarios con cotas	32
Figura 2.14 Recorrido del flujo magnético, corte A-A'.....	33

Figura 2.15 Representación de permeancias en el núcleo, corte A-A'.....	34
Figura 2.16 Circuito magnético equivalente	37
Figura 2.17 Circuito magnético sin carga	37
Figura 2.18 Reducción del circuito magnético	38
Figura 3.1 Modelo del transformador monofásico sin pérdidas.....	40
Figura 3.2 Modelo del transformador monofásico con pérdidas	41
Figura 3.3 Transformador monofásico experimental 127 V/ 127 V.....	43
Figura 3.4 Flujo de fuga y mutuo, transformador monofásico.....	43
Figuras 3.5-3.10 Corrientes de vacío obtenidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas en el lado primario del transformador monofásico de 127 V a tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10% con espectros de frecuencias....	45
Figura 3.11-3.14 Tensiones inducidas y flujos magnéticos obtenidos del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas en el lado primario.	48,50
Figuras 3.15-3.20 Corrientes de vacío obtenidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas en el lado primario del transformador monofásico de 220 V a tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10% con espectros de frecuencias.....	53
Figuras 3.21-3.24 Tensiones inducidas y flujos magnéticos obtenidos del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas en el lado primario.....	56-58
Figuras 3.25-3.27 Corrientes de vacío, tensiones inducidas y flujos magnéticos obtenidos del modelo sin pérdidas del banco trifásico en conexión Yy0.....	61-62
Figuras 3.28-3.30 Corrientes de vacío, tensiones inducidas y flujos magnéticos obtenidos del modelo con pérdidas del banco trifásico en conexión Yy0	63-65
Figuras 3.31-3.33 Comparación de espectros de frecuencia de las corrientes de vacío del banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aterrizado, obtenidos del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas al incrementar y disminuir la tensión.....	66
Figuras 3.34-3.37 Corrientes de vacío obtenidas con el modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas del banco trifásico en conexión Dy1 con espectros de frecuencias	70-71
Figuras 3.38-3.41 Tensiones inducidas obtenidas con el modelo con pérdidas y el modelo con pérdidas del banco trifásico en conexión Dy1 con espectros de frecuencias.....	74-76
Figuras 3.42-3.45 Flujos magnéticos de las unidades monofásicas obtenidos del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas del banco trifásico en conexión Dy1 con espectros de frecuencias para la “fase a”	78-80
Figuras 3.46-3.49 Corrientes de vacío obtenidas con el modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas para el banco trifásico en conexión Dd0 con espectros de frecuencias para la “fase a”	87-88
Figuras 3.50-3.53 Flujos magnéticos de las unidades monofásicas del banco trifásico en conexión Dd0, obtenidos del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas más espectros de frecuencias.....	91-92

Figuras 3.54-3.57 Tensiones inducidas de las unidades monofasicas del banco trifasico en conexi3n Dd0 obtenidas del modelo sin p3rdidas y el modelo con p3rdidas m3s espectros de frecuencias.....	95-96
Figuras 3.58-3.61 Corrientes de vacio obtenidas con el modelo sin p3rdidas y con el modelo de p3rdidas del banco trifasico en conexi3n Yy0 con neutro aislado m3s espectros de frecuencias para la “fase a”	103-104
Figuras 3.62-3.65 Flujos magneticos de las unidades monofasicas del banco trifasico en conexi3n Yy0 con neutro aislado, obtenidos del modelo sin p3rdidas y el modelo con p3rdidas m3s espectros de frecuencias	107-109
Figuras 3.66-3.69 Tensiones inducidas de las unidades monofasicas del banco trifasico en conexi3n Yy0 con neutro aislado, obtenidas del modelo sin p3rdidas y el modelo con p3rdidas m3s espectros de frecuencias	112-113
Figura 4.1 Circuito el3ctrico en ATP para el transformador monof3sico con devanados de 127 V	123
Figura 4.2 Ventana de par3metros del programa ATP para el transformador monof3sico de 127 V, considerando el modelo sin p3rdidas.....	124
Figura 4.3 Corriente de vacio obtenida con el modelo sin p3rdidas a tensi3n nominal mediante ATP, considerando el modelo sin p3rdidas.....	124
Figuras 4.4-4.9 Comparacion de corrientes de vacio y espectros de frecuencias obtenidos a distintos niveles de tensi3n con el modelo sin p3rdidas mediante Scilab y ATP del transformador monofasico con bobinadis de 127 V.....	124-126
Figura 4.10-4.11 Ventana de par3metros del programa ATP y corriente de vacio del transformador monof3sico con bobinados de 127 V obtenida con el modelo de p3rdidas	127
Figuras 4.12-4.17 Comparacion de corrientes de vacio y espectros de frecuencias obtenidas a distintos niveles de tension con el modelo de p3rdidas y ATP en el transformador de 127 V	126-128
Figuras 4.18-4.21 Tensiones inducidas en el transformador monofasico de 127 V obtenidas a tension nominal con el modelo de p3rdidas mediante Scilab y ATP..	131-133
Figuras 4.22-4.26 Circuito el3ctrico, parametros y corrietente de vacio obtenida con el modelo de p3rdidas y el modelo de p3rdidas mediante ATP.....	134-135
Figuras 4.27-4.30 Comparaci3n de corrientes obtenidas con el modelo sin p3rdidas y el modelo de p3rdidas mediante Scilab y ATP a tensi3n nominal del transformador monof3sico con bobinados de 220 V.....	135-136
Figuras 4.31-4.33 Circuito electrico en ATP de un banco trifasico Dy1 y corriente de vacio obtenidas con el modelo de p3rdidas y el modelo sin p3rdidas	137-138
Figuras 4.34-4.37 Comparacion de corrientes de vacio del banco trifasico en conexi3n Dy1, obtenidas con ambos modelos mediante Scilab y ATP a tensi3n nominal....	138-139

Figuras 4.38-4.39 Comparacion de corrientes de vacio (fase) del banco trifasico en conexi3n Dd0 a tensi3n nominal, mediante Scilab (modelo con p3rdidas) y una medici3n real con espectros de frecuencias	140
Figuras 4.40-4.41 Comparacion de corrientes de vacio y espectros de frecuencias en conexi3n Yy0 con neutro aislado obtenida con Scilab (modelo sin p3rdidas) y ATP....	141
Figuras 4.42-4.45 Comparacion de corrientes de vacio y espectros de frecuencias del transformador monofasicos con bobinados de 127 V / 220 V mediante Scilab (modelo con p3rdidas) y una medici3n real.....	142-143
Figuras A.1-A.6 Detalles y bobinados en el transformador monofasico	146-149
Figuras B.1 Dimensiones externas del transformador monofasico 300 VA	150

Listado de tablas

Tabla 1.1 Arm3nicos de secuencia para corrientes y voltajes arm3nicos.....	13
Tablas 2.1 Curva de magnetizaci3n del transformador experimental	35
Tablas 2.2-2.3 Permeancias de fuga en bobinados primarios y secundarios.....	36
Tablas 3.1-3.2 Par3metros en el transformador monof3sico 300 VA.....	40-41
Tablas 3.3-3.5 Comparaci3n de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vaci3o del modelo sin p3rdidas y el modelo con p3rdidas a tensi3n nominal y al incrementar o disminuir la tensi3n nominal un 10%, transformador con bobinados de 127 V.....	46-47
Tablas 3.6-3.8 Comparaci3n de espectros de frecuencias obtenidos de las tensiones inducidas del modelo sin p3rdidas y el modelo con p3rdidas a tensi3n nominal y al incrementar o disminuir la tensi3n nominal un 10%	48-49
Tablas 3.9-3.11 Comparaci3n de espectros de frecuencias obtenidos de los flujos magn3ticos del modelo sin p3rdidas y el modelo con p3rdidas a tensi3n nominal y al incrementar o disminuir la tensi3n nominal un 10%	50-51
Tabla 3.12 Distorsiones arm3nicas totales obtenidas de la corriente de vaci3o, flujo magn3tico y tensi3n inducida del modelo sin p3rdidas y el modelo con p3rdidas, para el transformador monofasico con bobinados de 127 V	52
Tablas 3.13-3.15 Comparaci3n de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vaci3o del modelo sin p3rdidas y el modelo con p3rdidas a tensi3n nominal y al incrementar o disminuir la tensi3n nominal un 10%, transformador con bobinados de 220 V.....	54-55
Tablas 3.16-3.18 Comparaci3n de espectros de frecuencias obtenidos de las tensiones inducidas del modelo sin p3rdidas y el modelo con p3rdidas a tensi3n nominal y al incrementar o disminuir la tensi3n nominal un 10%	56-57
Tablas 3.19-3.21 Comparaci3n de espectros de frecuencias obtenidos de los flujos magn3ticos del modelo sin p3rdidas y el modelo con p3rdidas a tensi3n nominal y al incremenatr o disminuir la tensi3n nominal un 10%	58-59

Tabla 3.22 Distorsiones armónicas totales obtenidas de la corriente de vacío, flujo magnético y tensión inducida del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, para el transformador monofásico con bobinados de 220 V	60
Tablas 3.23-3.25 Comparación de magnitudes de los espectros de frecuencias obtenidos de la corriente de vacío, tensión inducida y flujo magnético del modelo sin pérdidas y modelo con pérdidas a tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10%, para el banco trifásico en conexión Yy0 aterrizada	67-69
Tablas 3.26-3.28 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas a tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10%, para el banco trifásico en conexión Dy1	72-73
Tablas 3.29-3.31 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las tensiones inducidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas a tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10%, para el banco trifásico en conexión Dy1	76-78
Tablas 3.32-3.34 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de los flujos magnéticos del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas a tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10%, para el banco trifásico en conexión Dy1	80-82
Tablas 3.35-3.38 Comparación de magnitudes de los espectros de frecuencias obtenidos de la corriente de vacío, tensión inducida y flujo magnético del modelo sin pérdidas y modelo con pérdidas a tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10%, para el banco trifásico en conexión Dy1 aterrizada.....	83-85
Tabla 3.39 Distorsiones armónicas totales obtenidas de la corriente de vacío, flujo magnético y tensión inducida del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, para el banco trifásico en conexión Dy1.....	86
Tablas 3.40-3.42 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas a tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10%, para el banco trifásico en conexión Dd0.....	89-91
Tablas 3.43-3.45 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de los flujos magnéticos del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas a tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10%, para el banco trifásico en conexión Dd0.....	93-95
Tablas 3.46-3.48 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las tensiones inducidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas a tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10%, para el banco trifásico en conexión Dd0.....	97-99
Tablas 3.49-3.51 Comparación de modelos ante el incremento y disminución de la tensión nominal en la corriente de vacío, tensión inducida y flujo magnético en un banco trifásico en conexión Dd0	99-101

Tabla 3.52 Distorsiones armónicas totales obtenidas de la corriente de vacío, flujo magnético y tensión inducida del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, para el banco trifásico en conexión Dd0.	102
Tablas 3.53-3.55 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas a tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10%, para el banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado.....	105-107
Tablas 3.56-3.58 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de los flujos magnéticos del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas a tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10%, para el banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado	109-111
Tablas 3.59-3.61 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las tensiones inducidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas a tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10%, para el banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado	114-116
Tablas 3.62-3.64 Comparación de modelos ante el incremento y disminución de la tensión nominal en la corriente de vacío, tensión inducida y flujo magnético en un banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado.....	116-118
Tabla 3.65 Distorsiones armónicas totales obtenidas de la corriente de vacío, flujo magnético y tensión inducida del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, para el banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado.....	119
Tabla 3.66-3.68 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de la corriente de vacío, flujo magnético y tensión inducida del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, para los bancos trifásicos en conexión Yy0 con neutro y Yy0 con neutro aislado	121-122
Tablas 4.1-4.3 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de la corriente de vacío del modelo sin pérdidas mediante Scilab y ATP, cuando se incrementa o disminuye la tensión nominal un 10%.....	124-127
Tablas 4.4-4.6 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de la corriente de vacío del modelo con pérdidas mediante Scilab y ATP, cuando se incrementa o disminuye la tensión nominal un 10%.....	128-130
Tabla 4.7 Comparación de distorsiones armónicas totales obtenidas de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, mediante Scilab y ATP para el transformador monofásico con bobinados de 127 V cuando se incrementa o disminuye la tensión nominal un 10%.....	131
Tablas 4.8-4.9 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las tensiones inducidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas a tensión nominal, mediante Scilab y ATP para el transformador monofásico con bobinados de 127 V.....	132-133

Tablas 4.10-4.11 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas a tensión nominal, mediante Scilab y ATP para el transformador monofásico con bobinados de 220 V	136,137
Tablas 4.12 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las tensiones inducidas del modelo con pérdidas a tensión nominal, mediante Scilab y ATP para el transformador monofásico con bobinados de 220 V.....	137
Tablas 4.13-4.14 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío (línea) del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdida a tensión nominal, mediante Scilab y ATP para el banco trifásico en conexión Dy1	139-140
Tabla 4.15 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío (fase) del modelo con pérdidas (Scilab) y una medición real a tensión nominal, para el banco trifásico en conexión Dd0.	141
Tabla 4.16 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas a tensión nominal, mediante Scilab y ATP para el banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado.....	141
Tabla 4.17-4.18 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío (fase) del modelo con pérdidas (Scilab) y una medición real a tensión nominal, para el transformador monofásico con bobinados de 127 V / 220 V	142-143
Tabla C1 Pruebas de circuito abierto.....	151
Tabla C2 Pruebas de impedancia	152

Lista de símbolos

Símbolos	Descripción
a_p	Área de la trayectoria de la bobina, corte A-A'
$Dd0$	Conexión trifásica delta-delta
$Dy1$	Conexión trifásica delta-estrella aterrizada
$Yy0$	Conexión trifásica estrella-estrella aterrizada
I_o	Corriente de vacío
i	Corriente en la bobina
I_p	Corriente en la bobina primaria
B	Densidad de flujo
THD	Distorsión armónica total
E	Energía almacenada en el interior de la bobina
F_c	Factor de cresta
φ_p	Flujo magnético bobinado primario
φ_{dp}	Flujo magnético de dispersión (fuga) lado primario
φ	Flujo magnético total
L_{dp}	Inductancia de dispersión (fuga) lado primario
L_{ds}	Inductancia de dispersión (fuga) lado secundario
L_m	Inductancia de magnetización
H	Intensidad del campo magnético
$l_{p(n)}$	Longitud de la permeancia en el exterior de la bobina n=1,2,3 etc.
l_p	Longitud de la trayectoria del flujo magnético, corte A-A'
l_d	Longitud horizontal del carrete.
d_4	Longitud horizontal ocupada por la bobina (primario, secundario)
lm_{YOKE}	Longitud media del yugo (Superior o inferior)
lm_{LEG}	Longitud media en la pierna del núcleo (izquierda o derecha)
l_a	Longitud media horizontal de H en aire.
l_b	Longitud media vertical de H en aire.
l_i	Longitud promedio de la bobina vista desde planta.
l_{rm}	Longitud promedio radial en el devanado.
l_c	Longitud vertical del carrete.
d_1	Longitud vertical ocupada por la bobina (primario, secundario)
N_p	Número de vueltas de bobinado lado primario
N_s	Número de vueltas de bobinado lado secundario
N	Numero de vueltas devanado
T	Periodo
μ_0	Permeabilidad del aire
$P_{fuga_devanado}$	Permeancia de dispersión total lado primario.
$P_{(n)}$	Permeancia promedio en aire, n=1,2,3 etc.
P	Permeancia total (Aire y bobina)
P_a	Permeancia total en aire
P_m	Permeancia total en la bobina
P_{CENTAL_LEG}	Permeancia variable de la columna central del núcleo
P_{YOKE}	Permeancia variable del yugo (superior o inferior) del núcleo

P_{LEG}	Permeancia variable en la pierna del núcleo (izquierda o derecha)
TA	Primer transformador experimental
$p\%$	Puntos porcentuales
r_m	Radio medio medido desde la esquina externa del carrete.
\mathcal{R}	Reluctancia
R_n	Resistencia de pérdidas rama de magnetización
R_p	Resistencia del conductor bobinado primario
R_s	Resistencia del conductor bobinado secundario
A_{LEG}	Sección transversal de la pierna del núcleo (Izquierda, derecha)
A_{YOKE}	Sección transversal del yugo (superior o inferior)
TB	Segundo transformador experimental
d_3	Separación entre bobina y aislante dieléctrico clase A.
d_5	Separación entre bobina y aislante dieléctrico clase A.
d_2	Separación entre la bobina y el carrete.
E_{ind}	Tensión inducida en graficas
E_p	Tensión inducida primario
E_s	Tensión inducida secundario
TC	Tercer transformador experimental
I_1	Valor eficaz de la corriente fundamental
I_k	Valor eficaz del armónico k
V_{rms}	Voltaje eficaz
V_m	Voltaje máximo
V_n	Voltaje nominal AC
V_p	Voltaje primario AC
V_s	Voltaje secundario AC
V	Volumen de la ventana en el bobinado

Organización de tesis

Capítulo 1. Presentación

En este capítulo se presenta una revisión del estado del arte respecto a la investigación realizada dentro de objetivos generales y específicos de trabajo. Así mismo, se incluye la motivación del desarrollo de esta investigación, hipótesis general y marco teórico.

Abarcando una amplia gama de antecedentes que discuten el tema de la medición y visualización de las formas de ondas producidas en una unidad monofásica y trifásica a base de unidades monofásicas bajo diferentes tipos de conexión, siendo vistas desde la perspectiva cualitativa y no cuantitativa, considerado en algunos casos la saturación del núcleo.

Los objetivos presentados en este capítulo abarcan el modelado y simulación de un transformador monofásico y a su vez se abarca el modelado y simulación de una unidad trifásica a base de unidades monofásicas bajo diferentes tipos de conexiones trifásicas, siendo alimentadas estas unidades por un sistema balanceado y obteniéndose un aumento y disminución del diez por ciento en la tensión nominal en estado estable, para la obtención de los porcentajes modulares eficaces en la corriente de excitación, flujo magnético y tensión inducida.

A su vez la hipótesis contenida en este capítulo es primordial siendo hechas aseveraciones conforme a los antecedentes y premisas mediante la modificación del circuito magnético equivalente.

En el marco teórico se atiende los temas de carácter básico respecto a la distorsión armónica total y secuencia de fases para corrientes armónicas tomando en consideración la teoría de las componentes simétricas.

Finalmente, se da a conocer la estructuración de esta tesis, los capítulos que son abarcados y los apéndices anexados. Se debe considerar que los apéndices contienen información importante de los transformadores experimentales al igual que los códigos con los cuales se han realizado las simulaciones.

Capítulo 2. Modelado del circuito magnético equivalente

En este capítulo es modelado el circuito magnético equivalente de un transformador real utilizando la permeancia de fuga y del núcleo del transformador monofásico. La permeancia de fuga se calcula en base a la energía almacenada en términos

del campo magnético y corriente circulante en el bobinado a través de una trayectoria uniforme. Los parámetros necesarios se obtienen a partir de pruebas eléctricas al igual que las dimensiones correspondientes para el modelado del circuito magnético equivalente y bobinados primarios y secundarios.

Capítulo 3. Análisis y simulación de la corriente de vacío, flujo magnético y voltaje inducido

Las simulaciones presentadas en este capítulo son realizadas mediante un código computacional desarrollado en la plataforma Scilab [26] con el cual se muestran las formas de onda de la corriente de vacío, flujo magnético y tensión inducida, producidas por los modelos del circuito eléctrico equivalente considerando la resistencia e inductancia del conductor (inductancia de fuga) e inductancia de magnetización, siendo utilizados tres transformadores monofásicos bajo las siguientes conexiones trifásicas, Yy0, Dd0, Dy1, Yy0 sin neutro aterrizado, todas las conexiones en operación sin carga.

A su vez se modifica el circuito eléctrico equivalente incluyendo la resistencia del conductor, resistencia de pérdidas e inductancia de magnetización y despreciando la inductancia de fuga, siendo utilizados tres transformadores monofásicos bajo las siguientes conexiones trifásicas Yy0, Dd0, Dy1, Yy0 sin neutro aterrizado, todas las conexiones en operación sin carga.

El análisis de la corriente de vacío se realiza mediante la aplicación de la transformada discreta de Fourier de corto tiempo, utilizada para observar el comportamiento de la corriente dentro del dominio de la frecuencia, el cual muestra amplio espectro de frecuencias, sin embargo, el análisis espectral es realizado únicamente a las primeras 15 armónicas.

Capítulo 4. Validación de resultados

La validación de resultados se muestra en este capítulo utilizando la herramienta ATP y comparándolos con los resultados obtenidos con el programa elaborado en Scilab [29], sin embargo, sería muy extenso simular todos los casos, en cambio se han seleccionado algunos para su validación. Principalmente se eligieron los casos monofásicos a nivel de tensión de 127 V y 220 V por ser la base de los restantes casos, siendo considerados ambos modelos modificados (sin pérdidas y con pérdidas), también se validan las conexiones trifásicas Yy0, Dy1 y finalmente se comparan los resultados obtenidos del modelo con pérdidas de los casos monofásicos a tensión nominal con sus respectivas mediciones reales, las cuales consideran la histéresis del transformador.

Capítulo 5. Conclusiones

En este capítulo se muestra las conclusiones obtenidas a partir de los resultados obtenidos del capítulo 3 y la validación de formas de ondas abarcadas en el capítulo 4, siendo el final de este trabajo y presentando lo significativo de estos análisis.

Apéndice A. Dimensiones en devanados.

Los cuatro devanados del transformador son dimensionados en este apéndice, siendo necesario para el cálculo de la permeancia de fuga que incluye la ecuación de estado del apartado (3.2), por lo que estas dimensiones son exclusivas para los bobinados.

Apéndice B. Esquema del transformador

En este apéndice se muestra un plano de conjunto que cuenta con todas las dimensiones externas del transformador monofásico experimental e incluye todas las piezas que lo componen, siendo necesario para el trazo del circuito magnético equivalente y trabajos futuros.

Apéndice C. Pruebas de impedancia y pérdidas

El apéndice C contiene los parámetros de los transformadores monofásicos, los cuales son la resistencia e inductancia del conductor y resistencia de pérdidas. Las pruebas en cada unidad se realizaron de lado de alta y baja, considerando en cada simulación el lado de alta y el más estable de los resultados, siendo elegida unidad TA.

Apéndice D. Códigos Scilab

El apéndice D contiene el código para obtener las formas de onda del flujo magnético, tensión inducida y corriente de vacío en la conexión Yy0 en operación sin carga, no obstante, puede ser descargado por medio del enlace proporcionado.

Apéndice E. Método de Runge-Kutta

El apéndice E contiene el método interactivo para la resolución aproximada de ecuaciones diferenciales utilizado en cada simulación y el cual fue desarrollado por C. Runge y M.W. Kutta, incluyendo esta rutina programa al final de este apéndice y es posible descargarla desde el enlace proporcionado en el apéndice anterior.

I

Presentación

1.1 Introducción

El presente capítulo introduce los conceptos necesarios para abordar la metodología de obtención de la corriente de vacío, flujo magnético y tensión inducida en estado estable de un transformador monofásico experimental de doble devanado a través de una simulación computacional, también explica la relación entre la corriente de vacío, flujo magnético y tensión inducida en una unidad monofásica, la cual constituye la base para extender el análisis al caso de un banco trifásico a base de unidades monofásicas.

También son planteados los objetivos generales como específicos del presente trabajo, existiendo antecedentes paulatinos a través de los años correspondientes a la obtención de la corriente en vacío en estado estable, siendo de carácter cualitativo, pero debido al desarrollo computacional actual existe una amplia gama de opciones, por la cual, se desarrolló esta investigación de procedencia cuantitativa.

1.2 Antecedentes

Desde la invención del transformador en 1885 por William Stanley, utilizando el principio del motor de inducción de Nikola Tesla, para transferir corriente alterna entre dos circuitos eléctricamente aislados, éste se convirtió en un componente de alta importancia dentro de un sistema eléctrico de potencia; al ser aplicado a niveles de voltaje desde transmisión, subtransmisión y distribución hoy en día.

Es conocido que la no linealidad existente entre la excitación magnética y la densidad de flujo produce una corriente de excitación no senoidal en un transformador en vacío, incluso siendo senoidal el voltaje. Esta corriente de excitación, en el caso de un transformador monofásico, se caracteriza por tener principalmente en su análisis espectral componentes como son fundamental, tercera, quinta y séptima, cuyas magnitudes disminuyen conforme aumenta el orden [19] y deben su existencia principalmente al fenómeno de saturación [17], [19], [20] e histéresis.

De acuerdo a la ley de voltajes de Kirchhoff (despreciando las pérdidas en primera instancia) y a la ley de Faraday, si la tensión aplicada en el devanado primario es senoidal el flujo magnético y la tensión inducida en dicho devanado también son senoidales [19]. Debido a que el ciclo de histéresis es una característica propia del material magnético, para

un transformador monofásico con núcleo ferromagnético, se tiene que si el flujo tiene naturaleza senoidal la corriente de excitación no puede ser senoidal, ya que se tiene una relación no lineal entre el flujo y dicha corriente [19] a través del ciclo de histéresis. También la forma de onda de la corriente de excitación en transformadores monofásicos ha sido reportada ampliamente en diversas fuentes [17], [18], [19], [20].

Cuando se tienen transformaciones trifásicas, las corrientes de excitación deben de obedecer las leyes de Kirchhoff de corrientes en los nodos, así como las tensiones inducidas deben obedecer las leyes de Kirchhoff de tensiones en las mallas. Esto implica que, si se tiene una transformación trifásica a base de unidades monofásicas, las componentes armónicas de la corriente de excitación circulan en el sistema trifásico atendiendo su secuencia de fases y el tipo de conexión de los devanados. En el caso de una transformación trifásica a base de unidades monofásicas, con conexión estrella-estrella, con el neutro flotante en la estrella del primario, se tiene que la tercera armónica de la corriente de excitación de todos los transformadores no puede circular, ya que no tiene un conductor de retorno para dichas componentes que son de secuencia cero. Esto hace que la corriente de excitación tenga principalmente una componente fundamental [19], [20] y magnitudes pequeñas de otras armónicas de secuencia positiva y negativa. La relación no lineal entre el flujo magnético y la corriente excitación hace que si ésta es esencialmente senoidal entonces el flujo magnético no es senoidal, apareciendo una componente de tercera armónica en el flujo magnético y aplanando sus crestas y valles [18], [19] en su forma de onda. La existencia de una tercera armónica en el flujo magnético da como resultado una tercera armónica en la tensión inducida en el devanado secundario [19], la cual se observa en las tensiones de fase a neutro, pero no en las de fase a fase (por ser las terceras armónicas de voltaje de secuencia cero) [18], [19] y los casos relativos al comportamiento de la corriente de excitación, el flujo magnético y la tensión inducida en otros tipos de conexión para transformaciones trifásicas a base de unidades monofásicas han sido reportadas de manera cualitativa.

Las ventajas y desventajas relativas al funcionamiento de las conexiones trifásicas más importantes fueron vistas en [1], utilizando conexiones delta-delta y delta-estrella, abarcando tres condiciones; primera, en operación normal (tres fases balanceadas); segunda, en operación de un banco trifásico con una fase deshabilitada; tercera, con los efectos de línea a tierra en operación sin carga.

La distorsión resultante debido a las conexiones Delta-Estrella y Estrella-Estrella de un banco trifásico con alimentación balanceada fue investigada en [2] tomando en cuenta la admitancia de los transformadores sin carga, observando la relación entre el flujo magnético, la tensión inducida, el ciclo de histéresis y la corriente de excitación; concluyendo que las terceras armónicas circulan en el secundario y por no ser aterrizado

el neutro provoca la deformación de la onda de flujo magnético, por consecuencia de no poder circular las terceras armónicas de corriente.

El efecto y causa de armónicas en la corriente de magnetización, flujo magnético y voltaje inducido fue investigado en [3], analizando un caso, centrando la investigación en una conexión típica (estrella-estrella) enfocándose en el tercer armónico para un banco trifásico y un transformador trifásico. Finalmente se muestra un análisis del flujo magnético para el primer ciclo dividido en 15 partes y el resultado obtenido fue que en la tensión inducida presentó componente de terceras armónicas debidas a la ausencia del tercer armónico en la corriente de excitación para la conexión investigada.

La generación de armónicos a causa de la curva de histéresis y variación de la permeabilidad fue investigada en [4], utilizando un banco trifásico en conexión estrella para el lado primario y secundario; sujeto a una carga de lado secundario y obteniendo resultados en las magnitudes de las componentes armónicas de la corriente de excitación, las cuales varían inversamente con los órdenes de las armónicas, aunque no necesariamente en proporción inversa.

Para las conexiones de un banco trifásico a base de unidades monofásicas y transformadores trifásicos con múltiples devanados fue investigada en [5], utilizando veinte diferentes conexiones en los siguientes diferentes casos; los cuales son: caso 1, conexión estrella-estrella, con ambos neutros aislados; caso 2, estrella-estrella-delta terciaria, neutros aislados; caso 3, estrella-estrella interconectada con neutros aislados; caso 4, estrella interconectada - estrella, con neutros aislados; caso 5, estrella-delta, con neutro aislado; caso 6, delta-estrella, neutro aislado; caso 7, delta-delta; caso 8, conexión T-T sin aterrizar; caso 9, conexión Scott; caso 10, conexión V-V, también conocida como delta abierta.

Los resultados en forma general fueron los siguientes:

Caso 1, conexión estrella-estrella con neutros aislados: el tercer armónico en la corriente de magnetización no puede circular y esta magnitud depende de la curva de saturación y el voltaje aplicado. La tensión inducida sufre una visible deformación al igual que el flujo magnético, conteniendo terceras armónicas, siendo de mayor amplitud la curva del flujo magnético al conectar el neutro al sistema de alimentación que al ser aislado.

Caso 2, conexión estrella-estrella-delta terciaria, con neutros aislados: se inducen considerables tensiones de terceras armónicas en los devanados debido a la supresión de la corriente de magnetización de tercer armónico en los dos devanados.

Case 3, conexión estrella-estrella interconectada, con neutros aislados: no pueden circular las corrientes de magnetización de terceras armónicas y existe deformación del flujo magnético. El voltaje inducido se deforma de lado primario al igual que en los

seis devanados secundarios, no existiendo magnetización del núcleo desde el secundario y siendo imposible la neutralización del efecto de deformación del flujo magnético.

Caso 4, conexión estrella interconectada – estrella con neutros aislados: en esta conexión ninguna corriente de tercera armónica puede fluir en el primario y el secundario, aplanando la onda de flujo magnético, el cual está compuesto principalmente de una fundamental y tercera armónica, por lo tanto, la tensión inducida presenta principalmente componentes de tercera armónica en el lado primario y secundario.

Caso 5, conexión estrella–delta con neutro aislado: la corriente de magnetización primaria sacada de una línea no puede contener armónicos que son múltiplos de tres y en consecuencia la onda de flujo magnético tendrá a ser plana. Las componentes fundamentales de las tensiones de fase secundaria se suman resultando cero, cuando es alrededor de la delta, pero las componentes de terceras armónicas estando en fase son libres para producir una corriente de magnetización circulante alrededor de la delta del lado secundario.

Caso 6, conexión delta-estrella neutro aislado: debido a la forma peculiar de la curva BH la corriente de magnetización circula alrededor de la delta del lado primario. Por ende, la magnetización completa del núcleo puede ser efectuada de lado primario con el resultado de la formación de una onda sinusoidal de flujo magnético, siendo de forma sinusoidal las F.E.M inducidas.

Caso 7, conexión delta-delta: aquí es posible que la corriente de magnetización del tercer armónico circule en ambas deltas, existiendo una mínima distorsión en el flujo magnético, por lo que la corriente de magnetización del tercer armónico dependerá de las impedancias de las dos deltas.

Caso 8, conexión T-T: el flujo magnético en los puntos $\phi(cd)$ y $\phi(db)$ están desfasados por 60° y están compuestos por una fundamental y componente armónica. El flujo $\phi(cb)$ está desfasado 30° de la fundamental ϕ_{cd1} y 15° con respecto a ϕ_{cd3} . El flujo $\phi(ad)$ tiene una deformación considerable, siendo visible una onda de flujo magnético aplanada.

Caso 9, conexión Scott: la cual a presentarse una carga con factor de potencia bajo no es eficaz este tipo de conexión, siendo la inductancia dada en el lado secundario causante de la amortiguación de las corrientes armónicas, por lo que la onda de flujo magnético se distorsiona en una forma de onda sinusoidal plana.

Caso 10, conexión V-V: es de tipo desbalanceada y presenta flujos aplanados y las corrientes de magnetización en las líneas “a” y “b” presentan terceros armónicos al igual que la línea “c”.

En los siguientes casos se utilizaron unidades monofásicas con varios devanados del lado secundario, los cuales no son de tal importancia para esta investigación; sin embargo, se realizaron los casos siguientes: caso 11, estrella–doble estrella; caso 12, estrella diametral; caso 13, conexión doble estrella–delta; caso 14, estrella-doble interconexión estrella; caso 15, conexión doble estrella–estrella terciaria–delta; caso 16, estrella-seis fases secundarias; caso 17, conexión delta–doble estrella y delta diametral; caso 18, conexión delta – doble delta; caso 19, conexión doble T-T; caso 20, conexión doble V-V; enfocándose en el tercer armónico de la corriente de magnetización aplicando diversas densidades de flujo sobre las placas “stalloy” en los núcleos de cada transformador.

El estudio de la forma de onda del flujo magnético en la laminación concéntrica del núcleo de un transformador y sobre la superficie de la laminación del núcleo fue estudiada en [6], aplicando diferentes densidades de flujo y observando que, al aumentar la densidad, las líneas de flujo magnético tienden a seguir la estructura del núcleo en forma forzada generando terceras armónicas.

La elaboración de un método práctico para la corrección de pérdidas en un núcleo de chapas finas en transformadores trifásicos fue investigada en [7], presentando el flujo magnético distorsión en su forma de onda a causa del tercer armónico y siendo medidas dichas pérdidas en las laminaciones de 0.01 y 0.025 pulgadas a distintos niveles de flujo con variación de 0.8 tesla a 1.9 tesla.

La forma de onda del flujo magnético y su deformación fue investigada en [8] variando la columna del ducto en U dentro del núcleo en forma de U de 0.1 a 30 milímetros. Los resultados obtenidos fueron que, al variar más la distancia entre las columnas, la densidad de flujo presentó deformación en su forma de onda. Y la densidad de flujo transversal en el núcleo externo presentó mayor deformación en la unión inferior y en el caso del flujo principal en las columnas externas e interna hubo presencia de contenido armónico.

En [9] se utilizó el método de elemento finito en dos dimensiones para observar la distribución de la densidad de flujo magnético en un núcleo de un transformador trifásico, despreciando las corrientes de eddy y considerando un flujo magnético sinusoidal con una $t=\pi/6$ e incluyendo los efectos del núcleo, por lo que se obtuvo como resultado una distribución de flujo magnético mayor en las esquinas interiores del núcleo.

Utilizando el método del circuito magnético equivalente y la no linealidad del núcleo de la corriente de vacío y tensión inducida, como con carga, en [10] se presentó un modelo para el estado estacionario y transitorio junto con la representación de un polinomio, para las características magnéticas de un transformador trifásico, obteniendo todas las inductancias y sus derivados, corrientes y voltajes, aplicado a una conexión estrella-estrella con carga y en vacío. La simulación para transformadores monofásicos en

el dominio del tiempo fue presentada en [11], enfocándose el resultado en las pérdidas del núcleo, el cual tuvo un efecto significativo sobre la corriente de vacío total.

La distorsión en la corriente de magnetización fue estudiada en [12] y algunas de sus conclusiones son; primera, el tener armónicos de entrada con transformadores operando cerca de la rodilla de la curva de saturación puede resultar en flujos picos, aumentando más allá de las condiciones nominales de tensión; segundo, los acoplamientos de flujo en el núcleo para las columnas tienen una fuerte influencia en la magnetización y la forma de onda que a menudo son ignoradas.

La no uniformidad de la densidad de flujo pico fue investigada en [13] donde se utilizó un núcleo con dos columnas de alta permeabilidad y otras dos convencionales, concluyendo que el aumento está limitado hasta un nivel de inducción crítico debido a la menor densidad de flujo pico de los núcleos externos e internos de HiB concluyendo que el aumento de las pérdidas presentado fue menor a 5.4% hasta 1.6 teslas.

El cálculo de pérdidas y la relación de la densidad de flujo magnético se investigó en [14], obteniendo como resultado la no uniformidad del flujo en su sección transversal para un núcleo trifásico con distribución aleatoria. Una de las observaciones mencionadas fue en el bobinado fue magnéticamente independiente de su bobinado vecino, concluyendo que la densidad de flujo en cada bobinado depende de su distancia media, la cual presenta una reluctancia, cuando es magnetizada a densidades ligeramente mayores de flujo.

La corriente de excitación y el ángulo de fase fueron investigados en [15] las cuales se pueden obtener a partir de mediciones a frecuencia nominal y frecuencia dependiente de la impedancia desde el lado secundario del transformador, obteniéndose como resultado que la medición de la corriente se ve afectada debido a la pequeña capacitancia en el bobinado, incluso a frecuencias de 50 o 60 Hz.

Una manera nueva de calcular la irregularidad del flujo local y las distorsiones de forma de onda de un transformador monofásico aplicando varias densidades de flujo ha sido investigada en [16], considerando la saturación magnética, por lo que el impacto de las superposiciones y distorsiones de inducción local fueron debidas a que se implementó tres caminos para el circuito magnético (interno, medio y externo), obteniéndose como resultado las irregularidades y distorsiones de flujo magnético en una unidad de transformación monofásica.

1.3 Motivación de la tesis

El presente trabajo fue influenciado por estudios previos de carácter cualitativo, en donde típicamente se indican las armónicas características de la corriente de vacío, así como para el flujo magnético y tensión inducida. Esto llevo a la necesidad de realizar un

código computacional en Scilab para simular dichas variables debido a las limitantes previstas en el programa ATP. No obstante, motivo a la realización de un estudio de carácter cuantitativo en la corriente de vacío, tensión inducida y flujo magnético en estado estable en una unidad de transformación monofásica y a su vez en un banco trifásico compuesto a base de unidades monofásicas en diferentes tipos de conexión.

El código utiliza el método de circuito magnético equivalente; para conocer, de manera numérica, mediante espectros de magnitud (valor eficaz y porcentaje con respecto a la fundamental) y de fase, cual es la relación que guardan las componentes armónicas en la corriente de vacío, tensión inducida y flujo magnético en estado estable en un banco trifásico a base de unidades monofásicas.

Adicionalmente se simuló el comportamiento de la corriente de vacío, flujo magnético y tensión inducida con un aumento y disminución en la tensión de suministro del 10%, provenientes de una fuente de corriente alterna, con la finalidad de estudiar el impacto de las elevaciones y reducciones de tensión en estado estable, así como la influencia de las conexiones trifásicas típicas Yy0, Yy0 sin neutro aterrizado, Dy1, Dd0.

Así mismo, en el modelado de la unidad de transformación monofásica experimental se consideraron aspectos importantes como son los materiales utilizados en la construcción del núcleo y devanados, dimensiones de éstos y pruebas eléctricas para la obtención de un resultado que reproduzca con precisión el comportamiento de la corriente de vacío en estado estable en el transformador monofásico.

El modelo matemático del transformador monofásico fue modificado en su rama de excitación para obtener dos diferentes circuitos eléctricos equivalentes, con la finalidad de estudiar las diferencias que existen en la corriente de excitación y observar el nivel de distorsión total en cada onda, considerando para ambos la saturación del núcleo.

El primer circuito eléctrico por su sencillez considera la inductancia de magnetización y la resistencia e inductancia del conductor, el cual debe generar una corriente similar encontrada en la literatura y el segundo circuito eléctrico considera la inductancia de magnetización, resistencia de pérdidas y resistencia del conductor, despreciando la inductancia de fuga, por no representar una caída de tensión considerable en este elemento.

Aunado a lo anterior la adquisición desmesurada de aparatos electrónicos e incorporación de nuevas tecnologías de iluminación impiden que puedan operar de una manera satisfactoria las unidades de transformación en el sector de distribución de una red eléctrica, debido a la no linealidad que se encuentra presente en la carga, siendo la demanda de energía debida a estos electrónicos entre el 30% y 40% de cada unidad instalada, por lo que la propia unidad de transformación es y se convierte en una fuente de armónicas debido a la no linealidad del núcleo, siendo esta demanda principalmente en corriente la

cual esta compuesta de una fundamental, 3^a, 5^a, 7^a, 9^a armónicas, sucediendo lo mismo con las unidades de transformación a nivel de transmisión y las utilizadas en generación. En caso de existir una variación de voltaje (caída de tensión y sobretensión) puede ocasionar un daño parcial o completo en la unidad, por lo que el suministro eléctrico será de baja calidad, haciendo presencia en forma creciente en algunas zonas del país.

La demanda excesiva durante horas pico permite establecer una variación planeada en aumentar o disminuir el voltaje en las estaciones de paso y subestaciones eléctricas debido a la demanda excesiva durante el tiempo transcurrido en horas pico, sin embargo, puede existir una variación de voltaje imprevista causada por el arranque de maquinarias, corto circuitos en líneas de transmisión, distribución o por el mal funcionamiento de una unidad generadora.

Las corrientes armónicas que circulan en las redes eléctricas propician una gran cantidad de perturbaciones causando envejecimiento prematuro y destrucción de equipos electrónicos como un sobredimensionamiento en las instalaciones, disparo inesperado de protecciones, sobrecalentamiento en los conductores (neutro), disminución del factor de potencia, deterioro en la forma de onda de tensión y degradación del aislamiento del transformador, representando un impacto económico, por un lado en los equipos instalados y en otro por pérdidas de energía.

Finalmente, en esta tesis se estudia el comportamiento de la corriente de vacío, flujo magnético y tensión inducida bajo un análisis cuantitativo de frecuencias al existir una sobretensión y caída de tensión del 10% en forma aislada en una unidad monofásica y en un banco trifásico, para las conexiones Yy0 aterrizada y con neutro aislado, Dy1 y Dd0 en operación sin carga, considerando la no linealidad del núcleo y utilizando el modelo del circuito eléctrico equivalente.

1.4 Objetivo general

Estudiar la influencia de las conexiones trifásicas en la corriente de vacío, flujo magnético y tensión inducida en un banco de transformadores a base unidades monofásicas ante un aumento o disminución del 10% en la tensión de suministro, por medio un modelo programado en la plataforma Scilab considerando la saturación del núcleo del transformador.

1.4.1 Objetivos específicos

- Determinar el modelo matemático del circuito magnético y eléctrico de un transformador monofásico y elaborar un código en Scilab para simular los modelos matemáticos de un transformador monofásico saturable.

- Aplicar los modelos matemáticos del transformador monofásico en el modelado de un banco trifásico a base de unidades monofásicas en conexión estrella aterrizada – estrella aterrizada en primera instancia, para simular la operación del banco y obtener oscilogramas de la corriente de vacío, tensión inducida y flujo magnético.
- Realizar simulaciones del banco trifásico a base de unidades monofásicas con diferentes tipos de conexión y niveles de tensión aplicada, para analizar la influencia de estas condiciones en la corriente de vacío, tensión inducida y flujo magnético mediante el análisis espectral y de forma de onda.
- Comparar los resultados obtenidos con el programa ATP a nivel forma de onda y análisis espectral para validar los análisis realizados.

1.5 Hipótesis

El aumento o disminución de la tensión de suministro y el tipo de conexión en un banco trifásico de transformadores a base de unidades monofásicas tiene influencia en la presencia de armónicas en la corriente de vacío, tensión inducida y flujo magnético.

1.6 Marco teórico

1.6.1 Componentes armónicas

Las armónicas se definen como aquellas componentes senoidales o cosenoidales cuya frecuencia es un entero, múltiplos de la frecuencia fundamental de una onda periódica no sinusoidal. En señales pulsantes la magnitud de las componentes armónicas tiene un valor decreciente conforme aumenta la frecuencia de éstas y un ejemplo ilustrado de una corriente de excitación de un transformador se muestra en la figura 1.1, con su respectivo espectro de frecuencia y ángulos de fase mostrados en las figuras 1.2 y 1.3.

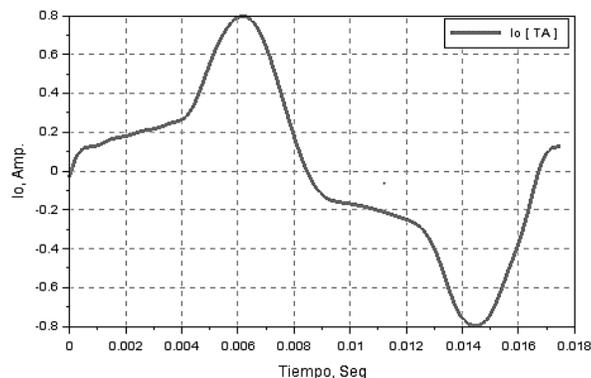


Figura 1.1 Medición real de la corriente de vacío en el transformador monofásico TA con bobinado de 127 V.

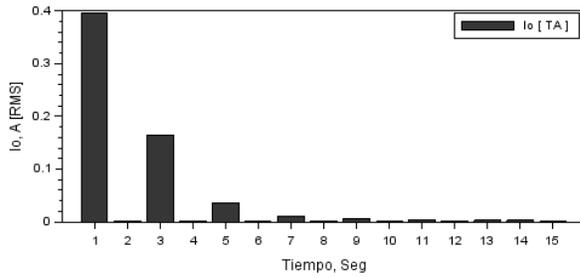


Figura 1.2 Espectro de frecuencias de la corriente de vacío del transformador TA.

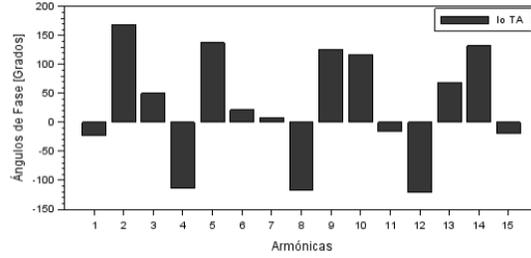


Figura 1.3 Ángulos de fase del espectro de frecuencias de la corriente de vacío del transformador TA.

Las componentes senoidales o cosenoidales obtenidas de este análisis se suelen denominar como componentes armónicas, las cuales se caracterizan por tener un valor eficaz y un ángulo de fase para cada componente. A la primera componente, que tiene la misma frecuencia de la señal analizada, se le conoce como componente fundamental. Existe adicionalmente una componente que no depende del tiempo la cual es conocida en ingeniería eléctrica como componente de directa o valor promedio, y ésta arroja un valor diferente de cero cuando la señal analizada no tiene simetría de media onda o bien presenta simetría oculta.

Una señal periódica puede ser expandida en series de Fourier para obtener las componentes armónicas dada por la expresión (1.1).

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \left(\frac{2\pi n t}{T} \right) + b_n \sin \left(\frac{2\pi n t}{T} \right) \right) \quad (1.1)$$

Donde a_0 es un valor promedio de una señal periódica encontrada con la expresión (1.2) y también conocida como componente de corriente directa.

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{T/2}^{T/2} f(t) dt \quad (1.2)$$

Siendo a_n y b_n coeficientes de la serie dadas por las expresiones (1.3) y (1.4)

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{T/2}^{T/2} \cos \left(\frac{2\pi n t}{T} \right) dt \quad \text{para } n = 1, 2, \dots, \infty \quad (1.3)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{T/2}^{T/2} \sin \left(\frac{2\pi n t}{T} \right) dt \quad \text{para } n = 1, 2, \dots, \infty \quad (1.4)$$

Una señal periódica puede ser clasificada como par, impar y de media onda siempre y cuando se cumplan los puntos siguientes:

- Función con simetría par: $f(t) = f(-t)$
- Función con simetría impar: $f(t) = -f(-t)$
- Función con simetría de media onda: $f(t) = -f(t + T/2)$

Sin embargo, estas condiciones de simetría no son las únicas, existen señales periódicas que al obtener su serie de Fourier el valor de a_0 es diferente de cero. Si dichas señales muestran simetría respecto a a_0 éstas son conocidas como señales con simetría oculta.

1.6.2 Factor de cresta

El factor de cresta es una de las técnicas de análisis de señales en el dominio del tiempo más implementada por su sencillez de utilizar y aplicar a una señal repetitiva, siendo definida por Bruel y Kjaer en [24] entre los años 1985 y 1989 respectivamente como el cociente entre el nivel de pico máximo de una señal y su valor eficaz (RMS) en un tiempo predeterminado, mostrada en la expresión (1.5), siendo el valor eficaz mostrado en la expresión (1.6).

Las expresiones (1.5), (1.6) son aplicadas a una señal de voltaje V_e de corriente alterna con un valor pico V_p , siendo posible utilizar estas mismas expresiones en el caso de una señal de corriente o flujo magnético.

$$fc = \frac{V_p}{V_{rms}} \text{ para } 0 < t \leq t_f \quad (1.5)$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int (V_e(t) \cdot V_e(t)) dt} \quad (1.6)$$

Donde:

t_f : tiempo de evaluación en segundos.

T : periodo de evaluación en segundos.

$V_e(t)$: voltaje de la señal de entrada en voltios.

V_p : voltaje del pico máximo en voltios.

V_{rms} : voltaje eficaz de la señal en voltios.

El factor de cresta es un indicador sencillo de algunas propiedades de la forma de onda. En el caso de funciones senoidales el factor de cresta es de 1.41, el cual se constituye como el factor de cresta de referencia. Una señal periódica con un factor de cresta superior a 1.41 tiende a ser esbelta y de picos muy pronunciados si el valor eficaz de ésta permanece constante. De la misma forma, una señal periódica con un factor de cresta inferior a 1.41 tiende a ser ancha y de picos achatados si el valor eficaz de ésta permanece constante. Nótese que en ambos casos ($f_c > 1.41$ y $f_c < 1.41$) el factor de cresta es un indicador cuantitativo de distorsión en la forma de onda, es decir, si el $f_c \neq 1.41$ entonces se sabe que la señal no es senoidal y que exhibe las características descritas anteriormente dependiendo de si éste es mayor o menor a 1.41.

1.6.3 Distorsión armónica total

La distorsión armónica total es aplicable a cualquier señal cuyo análisis espectral (o de componentes armónicas) se conoce y se utiliza para obtener el tamaño relativo del valor eficaz de todas las componentes que generan distorsión respecto a la componente fundamental, denominada también por sus siglas en inglés como THD (Total Harmonic Distortion) y está dada por la ecuación (1.7).

$$THD = \left(\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2 / I_1} \right) \times 100\% \quad (1.7)$$

Donde:

k : número de armónica.

I_1 : valor eficaz de la corriente fundamental.

I_k : valor eficaz del armónico k .

La expresión (1.7) puede ser utilizada para calcular el THD de la corriente de vacío, tensión inducida y flujo magnético, siendo un resultado porcentual el cual puede variar desde un porcentaje de cero hasta ser superado el 100%.

1.6.4 Secuencia de fases para voltajes y corrientes armónicos

Debido a que prácticamente la totalidad de los dispositivos no lineales operan bajo el principio de simetría de media onda, entonces éstos inyectan una corriente cuyo semiciclo negativo es idéntico al semiciclo positivo, pero con signo opuesto. La corriente

con simetría de media onda únicamente contiene armónicas impares, mientras que las armónicas pares son nulas y la componente de directa puede o no existir si hay o no simetría oculta.

En los sistemas eléctricos trifásicos las armónicas de corriente y de voltaje se clasifican como armónicas de secuencia positiva, de secuencia negativa y de secuencia cero. En forma general, considerando todas las componentes armónicas, la secuencia de éstas se presenta en forma cíclica como se muestra en la tabla 1.1.

Secuencia (+)		Secuencia (-)		Secuencia (0)	
Armónico	Frecuencia	Armónico	Frecuencia	Armónico	Frecuencia
1	60 Hz	2	120 Hz	3	180 Hz
4	240 Hz	5	300 Hz	6	360 Hz
7	420 Hz	8	480 Hz	9	540 Hz
10	600 Hz	11	660 Hz	12	720 Hz
y así sucesivamente					

Tabla 1.1 Armónicos de secuencia para corrientes y voltajes armónicos.

Las secuencias de fase de la tabla anterior son solamente válidas bajo las siguientes condiciones:

- Los voltajes presentan secuencia positiva.
- El sistema está balanceado en voltajes y en cargas no lineales.

Si la primera de las condiciones no se cumple entonces las componentes de secuencia positiva se convierten en secuencia negativa y viceversa, mientras que las componentes de secuencia cero permanecen sin cambio. Si la segunda de las condiciones no se cumple entonces las componentes fundamentales se descomponen en secuencia positiva, negativa y cero con predominio de la secuencia positiva, las segundas armónicas se descomponen en secuencia positiva, negativa y cero con predominio de la secuencia negativa, las terceras armónicas se descomponen en secuencia positiva, negativa y cero con predominio de la secuencia cero, y así en forma sucesiva. El circuito trifásico de tres hilos y de cuatro hilos mostrado en las figuras 1.4 y 1.5 permiten la circulación de armónicas de corriente de secuencia positiva y secuencia negativa sin problema alguno, sin embargo, las armónicas de secuencia cero únicamente pueden circular en circuitos trifásicos de cuatro hilos, ya que al ser éstas de tipo homopolar requieren de un camino para retornar, el cual es ofrecido por el conductor neutro. En el caso de un sistema de tres hilos no se presenta esta trayectoria de retorno lo cual hace que el circuito ofrezca una impedancia infinita a las armónicas de secuencia cero.

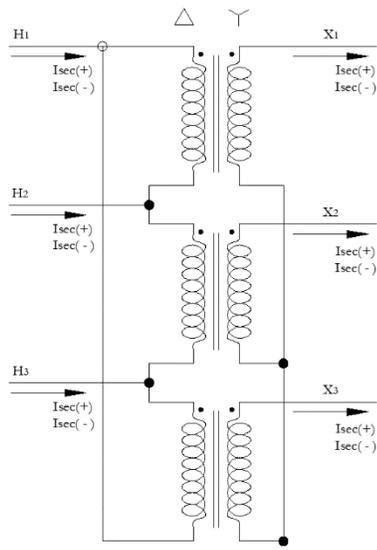


Figura 1.4 Componentes de secuencia positiva, negativa y cero de la corriente de vacío de un banco trifásico en conexión delta-estrella sin neutro.

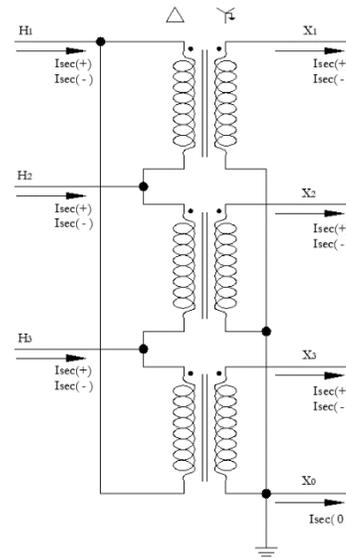


Figura 1.5 Componentes de secuencia positiva, negativa y cero de la corriente de vacío de un banco trifásico en conexión delta-estrella aterrizada.

1.6.5 Armónicas en la corriente de excitación, tensión inducida y flujo magnético

Para el estudio de las armónicas en la corriente de excitación es primordial que la unidad a estudiar no posea carga alguna. La figura 1.2 muestra un núcleo ferromagnético con un bobinado primario en la columna izquierda, si el bobinado posee una fuente de tensión conectada a la bobina se produce una corriente de vacío y debido a la saturación del núcleo la corriente no posee características sinusoidales, aunque sigue siendo periódica, presentan un alto grado de contenido de armónico siendo éstas retornadas por el neutro en el caso monofásico y en el caso de la conexión estrella aterrizada en el lado primario.

Considérese primero el caso de un transformador monofásico. Debido a las características ferromagnéticas del núcleo y el nivel de tensión aplicado, la corriente de vacío puede poseer grados diferentes de distorsión reflejados en su forma de onda. Esta corriente de excitación se compone de armónicos impares, y en los casos trifásicos éstas se pueden clasificar como de secuencia positiva, negativa y cero. Si se desprecian las pérdidas y las inductancias de dispersión, de acuerdo a la ley de Faraday si el voltaje aplicado en el primario es senoidal el flujo magnético es senoidal, y a su vez si el flujo magnético es senoidal la tensión inducida en los devanados es senoidal.

Sin embargo, adicionalmente a la ley de Faraday existe una relación física entre la corriente de excitación y el flujo magnético dada por el ciclo de histéresis. Si se parte de lo expresado anteriormente de que una tensión senoidal aplicada a un transformador implica

un flujo senoidal y a su vez una tensión inducida senoidal, entonces, la relación no lineal establecida por el ciclo de histéresis implica que la corriente de excitación debe de tener forzosamente componentes armónicas, y debido a que el transformador demanda corriente bajo el principio de simetría de media onda, entonces las componentes armónicas son únicamente impares, las cuales no tienen problema alguno para circular en un circuito monofásico. Debido a la forma pulsante de la corriente de vacío las principales componentes armónicas son tercera, quinta y séptima, las cuales suelen tener magnitudes referidas a la fundamental de 10-60% para la tercera armónica, 0-30% para la quinta armónica y 0-20% para la séptima armónica [19], [22].

El caso de un banco trifásico a base de unidades monofásicas en conexión estrella – estrella con el neutro aterrizado del primario es similar a tres unidades monofásicas, aunque en el neutro de retorno las armónicas de secuencia cero alcanzan una magnitud del triple a la magnitud en los conductores de fase. Si fuera retirado el hilo de retorno del neutro las componentes de secuencia cero en la corriente de excitación no podrían circular debido a la falta de un camino de retorno. De acuerdo a lo expuesto para el transformador monofásico, la relación no lineal entre el flujo magnético y la corriente de vacío implica que si el flujo es senoidal la corriente de vacío debe ser no senoidal con un alto predominio de la tercera armónica, que en el caso trifásico es de secuencia cero, pero al retirar el camino de retorno en el primario se imposibilita la circulación de las armónicas de secuencia cero de la corriente de excitación, sin embargo, la relación entre corriente de excitación y flujo magnético dada por el ciclo de histéresis no cambia, ya que es una característica del material ferromagnético, entonces esto implica que si la corriente de excitación es forzada a no tener armónicas de secuencia cero, el flujo magnético ahora debe tener una componente armónica de secuencia cero, tercera en este caso, perdiendo sus características sinusoidales y por ende la tensión inducida también deja de ser senoidal. Lo anterior implica que la corriente de excitación debe de cambiar su forma de onda, valor eficaz y contenido armónico y lo mismo sucede para los flujos magnéticos y las tensiones inducidas.

1.6.6 Modelado de los circuitos magnéticos

Debido a la similitud de los circuitos eléctricos con los circuitos magnéticos se puede aplicar la Ley de Ohm en los circuitos magnéticos, siendo Φ_m el flujo magnético promedio que circula por el núcleo, Φ_d el flujo magnético que se pierde, ambos con unidades en weber (Wb), siendo la suma de ambos dada por la ecuación (1.8).

La figura 1.6 muestra el flujo magnético que es transferido a través del núcleo y el flujo magnético que se pierde en el medio, siendo el núcleo con el bobinado mostrado en la figura 1.6 y el circuito que lo representa mostrado en la figura 1.7, donde se utilizan las permeancias en lugar de reluctancias para representar el circuito magnético, pero realmente corresponde a reluctancias, siendo manejado el circuito como una pseudo equivalencia.

Si \mathcal{F} es la fuerza magnetomotriz con unidades amperio vuelta (A-V) y \mathcal{P} la permeancia total con unidades weber sobre amperio vuelta (Wb/A-V), se obtiene la ecuación (1.9).

$$\Phi = \Phi_m + \Phi_d \quad (1.8)$$

$$\Phi = \mathcal{F}\mathcal{P} \quad (1.9)$$

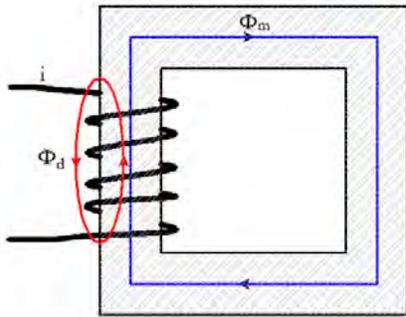


Figura 1.6 Núcleo de acero al silicio con bobinado en la columna izquierda.

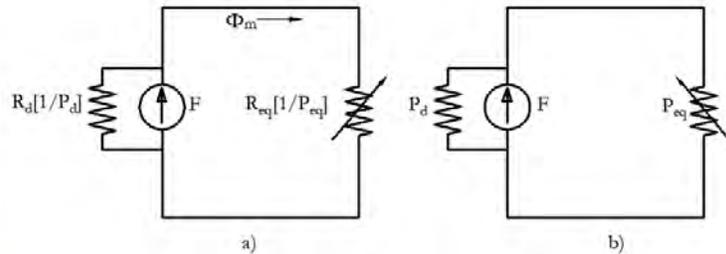


Figura 1.7 a) Circuito magnético con reluctancias b) Representación eléctrica de un circuito magnético utilizando permeancias en lugar de reluctancias.

El núcleo de acero al silicio de la figura 1.6 se puede dividir en cuatro partes nombradas como yugos (\mathcal{P}_{yoke}) y piernas (\mathcal{P}_{leg}), la fuerza magnetomotriz contiene en paralelo la permeancia de fuga (\mathcal{P}_d), siendo el cálculo de esta permeancia muy extenso para ser cubierto en esta sección, por consiguiente, en el capítulo 2 se calcula la permeancia para un transformador del tipo acorazado de tres piernas con cuatro bobinados.

La permeancia el núcleo del transformador es variable debido a curva de saturación y ésta se obtiene con la ecuación (1.10), siendo necesario trazar el circuito magnético perteneciente al núcleo, considerando el área, la longitud media y el circuito magnético promedio.

Es necesario establecer las unidades a utilizar siendo l la longitud media de una parte del circuito magnético con unidades en metros (m) y la permeabilidad en vacío μ_0 con unidades de henry sobre metro (H/m), siendo la sección del núcleo A con unidades de metro cuadrado (m^2)

$$\mathcal{P} = \frac{1}{\mathcal{R}} \quad (1.10)$$

$$\mathcal{P} = \frac{\mu A}{l} \quad (1.11)$$

La permeabilidad μ es el producto de la permeabilidad relativa y la permeabilidad de vacío, la cual posee su relación con la densidad del flujo B dada por las unidades weber sobre metro cuadrado (Wb/m^2 o Tesla) y es expresada por la ecuación (1.12).

$$B = \mu H \quad (1.12)$$

Para el cálculo de la permeabilidad es necesario conocer el flujo magnético y la densidad de flujo, obteniendo ambas se pueden ubicar los puntos de operación sobre la curva de saturación del núcleo del transformador y obtener como resultado la permeabilidad.

La curva BH puede ser lineal cuando el material no es ferromagnético, pero los materiales ferromagnéticos poseen una curva no lineal, siendo este último material el que caracteriza a las unidades monofásicas.

II

Modelado del Circuito Magnético

2.1 Introducción

En el presente capítulo se da a conocer el modelado del circuito magnético equivalente de un transformador experimental del tipo monofásico, categorizado como transformador de aislamiento con capacidad de 300 VA, también se obtiene la permeancia de fuga en los devanados mediante [27] y en el núcleo considerando la información de los apéndices A, B y C. La unidad monofásica consta de un núcleo ferromagnético de tres piernas con dos devanados en alta y dos devanados en baja para soportar tensiones de 127 V y 220 V.

El apéndice A se encuentran todas las dimensiones de la unidad monofásica experimental, principalmente de los devanados primarios y secundarios que se obtuvieron de la unidad experimental.

En el apéndice B se incluyen las dimensiones externas del núcleo del transformador mientras que el apéndice C se detalla los parámetros utilizados en el programa como son la resistencia e inductancia del conductor, resistencia de pérdidas e inductancia de magnetización, por lo que se ha considerado únicamente los parámetros del lado de alta tensión.

No obstante, se debe considerar que los bobinados de cada transformador no presentaron una exactitud en su número de vueltas, obteniéndose diferencias en la resistencia e inductancia del conductor, pero se seleccionó y modelo el transformador experimental TA, el cual presentó parámetros adecuados al promedio de los transformadores restantes.

2.2 Dimensiones del transformador

En la figura 2.1 se muestra el transformador monofásico en su vista en planta siendo posible apreciar algunas dimensiones y cortes indispensables para la obtención de datos que son utilizados en páginas posteriores, siendo estas dimensiones proporcionadas en centímetros.

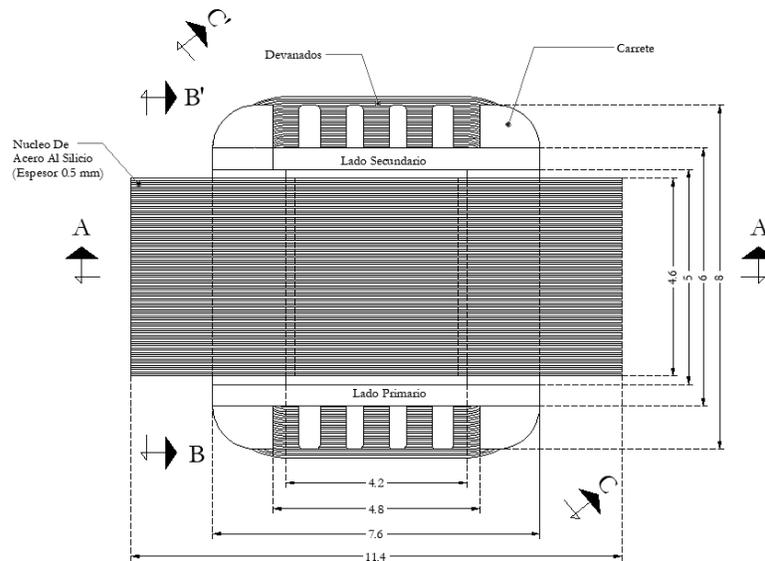


Figura 2.1 Planta transformador monofásico.

Los diferentes cortes asignados a la figura 2.1 son requeridos para obtener dimensiones adicionales del transformador monofásico, siendo el corte A-A' la elevación del transformador; el corte B-B' la vista lateral del núcleo y el corte C-C' dimensiones adicionales, los cuales se muestran en las figuras 2.2, 2.3 y 2.4 respectivamente.

El núcleo del transformador se compone por laminas RC38 de acero al silicio del tipo "I" y "E" con espesor de 0.5 mm y de composición de acero al silicio, mostrado en la figura 2.2 e indicado con el corte A-A', cuyas dimensiones están en centímetros.

La figura 2.2 también muestra la disposición de los devanados arrollados en la pierna central, existiendo entre el devanado y el núcleo una ligera separación por el espesor del carrete plástico el cual mantiene sujeto al laminado.

Entre los devanados, existe una ligera separación por un dieléctrico de clase A, siendo visible en los huecos formados por las placas "I" y "E", nombrados estos huecos rectangulares como ventana izquierda y derecha en relación a los cortes mostrados.

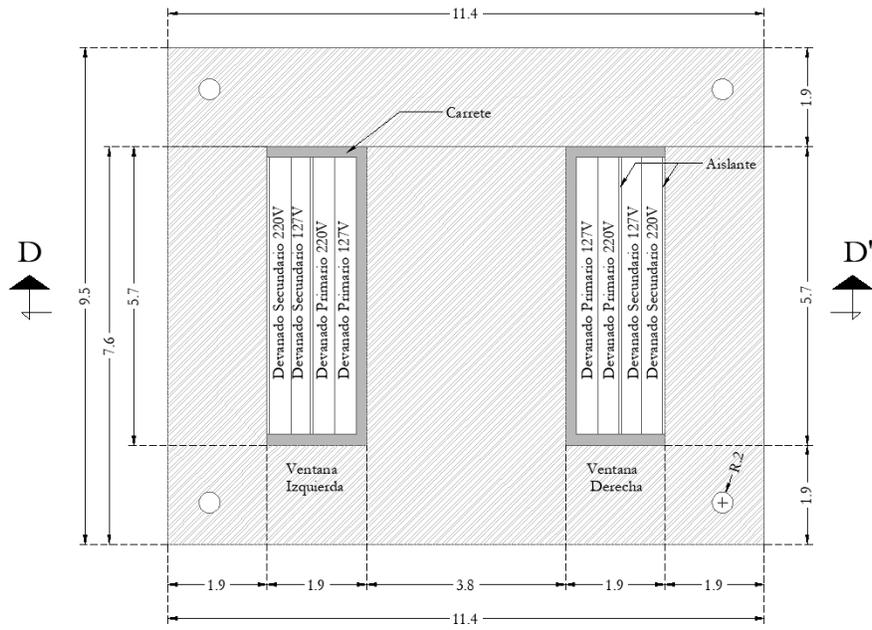


Figura 2.2 Dimensiones del núcleo del transformador, corte A-A'.

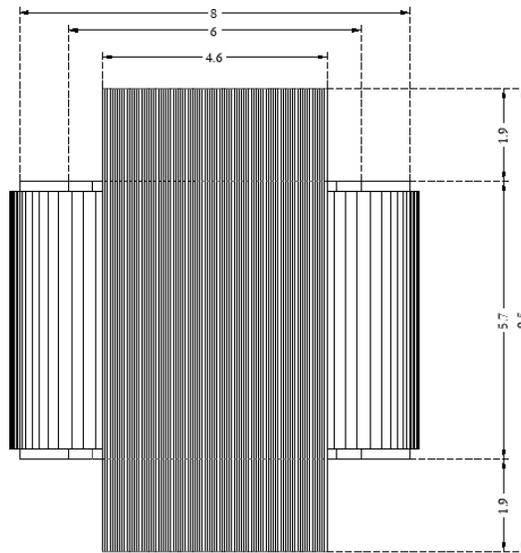


Figura 2.3 Dimensiones del transformador, corte B-B'

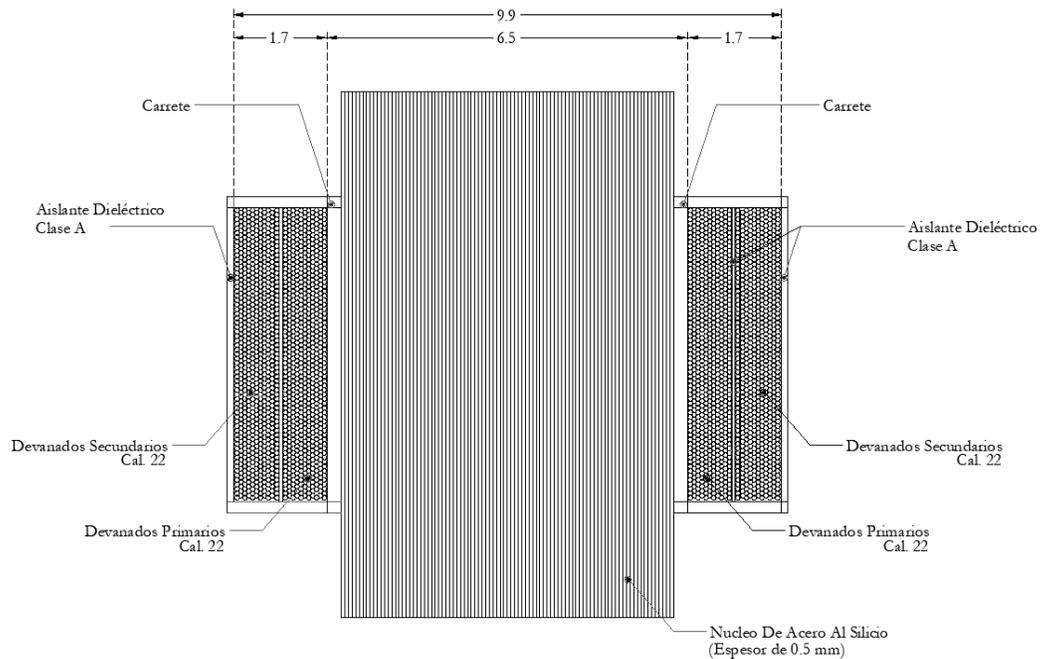


Figura 2.4 Dimensiones del transformador, sección C-C'.

En la figura 2.4 se muestra la sección C-C' del transformador monofásico de 300 VA, siendo posible observar los materiales que lo componen y la disposición de los conductores. La disposición de las bobinas primarias y secundarias para los diferentes niveles de tensión se suponen constantes y poseen conductores esmaltados del calibre 22, siendo cada bobinado individual y separado los bobinados primarios de los secundarios por un aislante, mostrado en la figura 2.4.

2.3 Permeancia de fuga

El cálculo de la permeancia de fuga de los bobinados primarios y secundarios del transformador monofásico con terminales de 127 V / 220 V se basa en [27], siendo los bobinados inactivos considerados como espacios de aire.

Para simplificar el análisis de la trayectoria del flujo de fuga el núcleo tiene la característica de poseer permeabilidad infinita. Las bobinas son consideradas con densidad de corriente uniforme y la dirección del campo magnético se encuentra en la misma dirección como se muestra en la figura 2.8, siendo la magnitud de la intensidad del campo magnético constante en toda la trayectoria.

El devanado, mostrado en la figura 2.5, es considerado con esquinas radiales, existiendo así cuatro radios correspondientes a cada devanado y dos longitudes particulares “ l_c ” y “ l_d ” mostrados en la figura 2.5.

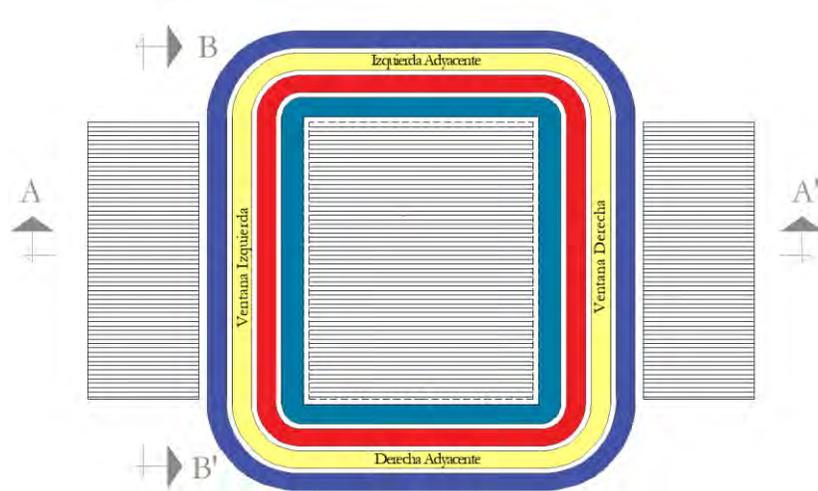


Figura 2.5 Disposición de bobinados 127 V/220 V, corte D-D'.

Para el cálculo de la permeancia de fuga con núcleo de permeabilidad infinita se plantean los casos siguientes:

Caso 1: Permeancia de fuga interior en ventana izquierda y derecha. En este caso las permeancias son similares para ambas ventanas, siendo necesario calcular únicamente una para cada bobinado primario y secundario.

Caso 2: Permeancia de fuga exterior adyacente al núcleo izquierda y derecha. En este caso las permeancias son similares para ambos lados externos, siendo necesario calcular únicamente una para cada bobinado primario y secundario.

2.4 Trayectorias de flujos magnéticos e intensidad de campo magnético

Los bobinados primarios y secundarios del transformador monofásico residen en la pierna central siendo la distribución del flujo magnético a través del material ferromagnético dado por la figura 2.6, la cual contiene los segmentos que se compone el núcleo del transformador (yugos, piernas).

La figura 2.7 es una representación de la distribución del flujo magnético incluyendo la bobina primaria y secundaria, no presentando ésta última una carga siendo el sentido de entrada de la corriente a través de la ventana derecha del núcleo del transformador

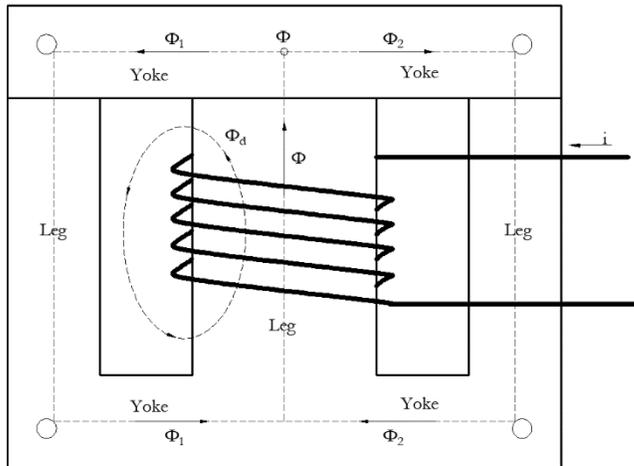


Figura 2.6 Flujos magnéticos a través del núcleo y bobina.

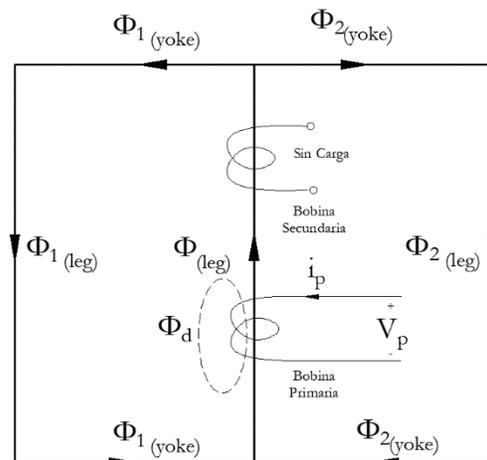


Figura 2.7 Representación de flujos magnéticos a través del núcleo y bobinas.

La serie de conductores de las bobinas primarias y secundarias se modelan en forma rectangular como se muestra en la figura 2.8, siendo los campos generados B (Tesla) modelados con la intensidad de campo magnético H (A/m), para no entrar en ambigüedad sobre que parte del campo magnético proviene de la corriente externa y que parte es proporcionada por el material, por lo que, la intensidad del campo independiente de la respuesta magnética del material, entrando la corriente por la ventana derecha y saliendo por la ventana izquierda, considerando como aire los bobinados de color azul marino y rojo.

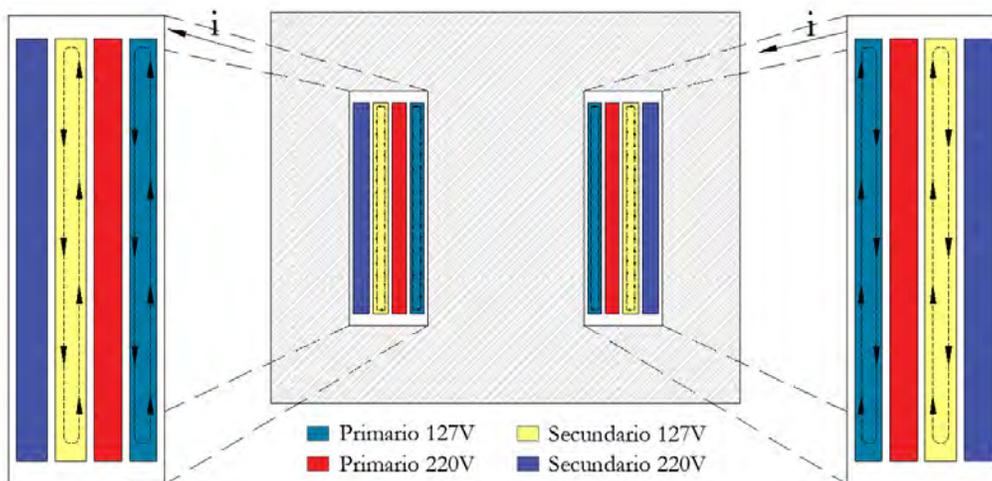


Figura 2.8 Trayectoria de flujos de dispersión, bobinado primario y secundario.

2.5 Permeancia de fuga en devanados

Caso 1.- La disposición de los devanados primario y secundario a nivel de tensión de 127 V es mostrada en la figura 2.9. Debido a que las dimensiones en interior de la ventana donde se encuentra alojado el bobinado son muy pequeñas, fue necesario un estándar de dimensionamiento, el cual se encuentra en el apéndice A y mostrado en la figura 2.7.

Los espacios creados entre los devanados son considerados como aire debido a que los devanados de 127 V y 220 V son independientes. El devanado de 127 V se representa con los colores verde agua (primario) y amarillo (secundario), existiendo un espacio entre estos a causa de los devanados de 220 V, véase la figura 2.9.

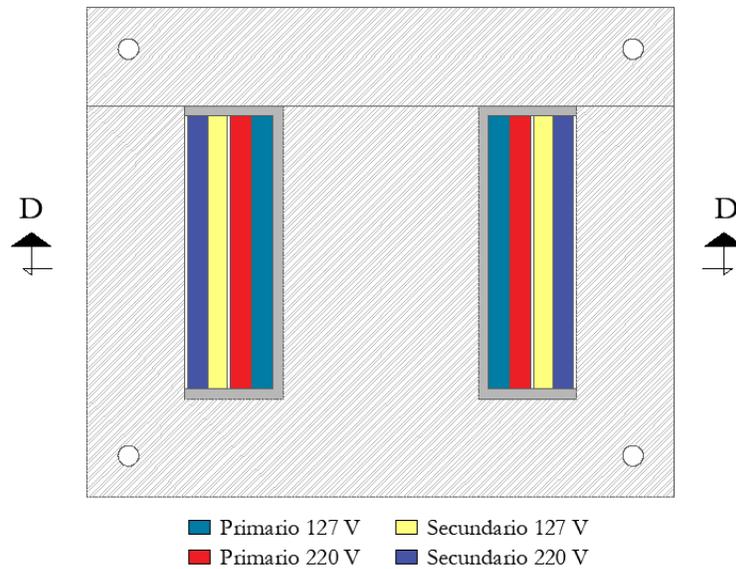


Figura 2.9 Disposición de bobinados primarios y secundarios 127 V/220 V, corte A-A'.

Para el devanado primario (127 V) en el interior de la ventana existen dos trayectorias, una propia del devanado y otra externa considerada aire; el cual incluye los aislantes y bobinado de 220V, siendo ambas trayectorias encontradas el interior del núcleo y mostradas con líneas punteadas en la figura 2.7.

Para obtener la permeancia de fuga asociada al interior de esta sección se utilizó un análisis basado en la energía. La energía almacenada para este caso en términos del campo magnético está dada por la expresión (2.1).

$$E = \frac{1}{2} \mu_0 \int_V H^2 dV \quad (2.1)$$

Donde:

H : Intensidad del campo magnético, A/m

V : Volumen de la ventana del devanado, m^3 .

μ_0 : Permeabilidad del aire, H/m.

También la energía puede ser expresada en términos de la corriente que circula en la bobina, el número de vueltas y la permeancia de fuga, mostrada en la expresión (2.2).

$$E = \frac{1}{2} P N^2 i^2 \quad (2.2)$$

Aplicando la Ley de Ampere a la trayectoria mostrada en la figura 2.7 y previamente mencionada la uniformidad a través de esta trayectoria, se obtiene la expresión (2.3).

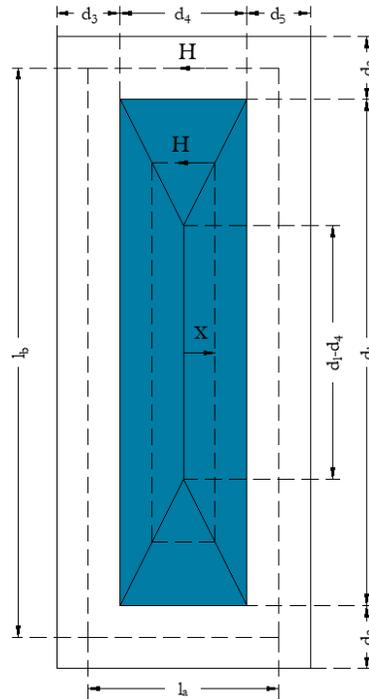


Figura 2.10 Trayectoria de la intensidad de campo magnético para el devanado primario de 127 V.

$$Hl_p = \frac{a_p}{d_4 d_1} N^2 i^2 \quad (2.3)$$

Donde

l_p : Longitud de la trayectoria, m.

d_1 : Altura de bobina, m.

d_4 : Ancho de bobina, m.

a_p : Área formada por la trayectoria, m².

Las ecuaciones (2.4) involucra la longitud de la trayectoria cubierta por el área en la expresión (2.5).

$$l_p = 2|d_1 - d_4| + 8x \quad 0 < x < x_{max} \quad (2.4)$$

$$a_p = 2x|d_1 - d_4| + 4x^2 \quad 0 < x < x_{max} \quad (2.5)$$

.

El valor de x_{max} definido en la figura 2.10 es la distancia máxima que envuelve el mínimo de la distancia vertical y la longitud horizontal del bobinado y está dado por la expresión (2.6).

$$x_{max} = \min\left(\frac{d_1}{2}, \frac{d_4}{2}\right) \quad (2.6)$$

La diferencial de volumen se muestra en la ecuación (2.7), siendo l_i la longitud de la sección del devanado para el caso deseado, visto desde planta.

$$dV = l_p l_i dx \quad (2.7)$$

La energía almacenada en la bobina se obtiene sustituyendo la expresión (2.1) con las expresiones anteriores y obteniendo como resultado la expresión (2.8).

$$E = \frac{1}{2} \mu_0 \int_0^{x_{max}} \left(\frac{a_p}{l_p d_4 d_1} N^2 i^2 \right)^2 l_p l_i dx \quad (2.8)$$

Simplificando los términos en la expresión obtenida en (2.8) da como resultado la expresión (2.9).

$$E = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{N^2 i^2 l_i}{d_4^2 d_1^2} \int_0^{x_{max}} \frac{a_p^2}{l_p} dx \quad (2.9)$$

Sustituyendo (2.4) y (2.5) en (2.9) se obtiene la expresión (2.10), conteniendo una integral definida dada por la expresión (2.6).

$$E = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{N^2 i^2 l_i}{d_4^2 d_1^2} \int_0^{x_{max}} \frac{(2x|d_1 - d_4| + 4x^2)^2}{2|d_1 - d_4| + 8x} dx \quad (2.10)$$

Para dar solución a la integral de la expresión anterior es necesario simplificar el numerador y denominador de la integral definida mostrada en (2.11).

$$E = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{N^2 i^2 l_i}{d_4^2 d_1^2} \int_0^{x_{max}} \frac{4x^2|d_1 - d_4|^2 + 16x^3|d_1 - d_4| + 16x^4}{2|d_1 - d_4| + 8x} dx \quad (2.11)$$

Asignando L_1 como variable de la diferencia en el alto y ancho del bobinado, mostrada la expresión en (2.12).

$$L_1 = |d_1 - d_4| \quad (2.12)$$

Y dividiendo entre dos el numerador y denominador del resultado obtenido en (2.11) y sustituyendo la ecuación (2.12) se obtiene como resultado la expresión (2.13).

$$E = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{N^2 i^2 l_i}{d_4^2 d_1^2} \int_0^{x_{max}} \frac{8x^4 + 8x^3 L_1 + 2x^2 L_1^2}{L_1 + 4x} dx \quad (2.13)$$

Simplificando la expresión (2.13) se obtiene como resultado la expresión (2.14).

$$E = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{N^2 i^2 l_i}{d_4^2 d_1^2} \int_0^{x_{max}} \left(2x^3 + \frac{3}{2}x^2 L_1 + \frac{1}{8}x L_1^2 - \frac{1}{32}L_1^3 + \frac{1}{32} \frac{L_1^4}{4x + L_1} \right) dx \quad (2.14)$$

Separando cada una de los términos obtenidos en la división de la expresión (2.13) se obtienen cinco integrales definidas expresadas en (2.15).

$$E = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{N^2 i^2 l_i}{d_4^2 d_1^2} \left(2 \int_0^{x_{max}} x^3 dx + \frac{3L_1}{2} \int_0^{x_{max}} x^2 dx + \frac{L_1^2}{8} \int_0^{x_{max}} x dx - \frac{1}{32} L_1^3 \int_0^{x_{max}} dx + \frac{L_1^4}{32} \int_0^{x_{max}} \frac{1}{4x + L_1} dx \right) \quad (2.15)$$

Realizando la integración correspondiente de cada una de las integrales anteriores se obtiene la expresión (2.16).

$$E = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{N^2 i^2 l_i}{d_4^2 d_1^2} \left(2 \frac{x^4}{4} \Big|_0^{x_{max}} + \frac{3}{2} L_1 \frac{x^3}{3} \Big|_0^{x_{max}} + \frac{1}{8} L_1^2 \frac{x^2}{2} \Big|_0^{x_{max}} - \frac{1}{32} L_1^3 x \Big|_0^{x_{max}} + \frac{L_1^4}{128} \ln|4x + L_1| \Big|_0^{x_{max}} \right) \quad (2.16)$$

La evaluación de la integral definida mostrada en (2.16) se realiza con (2.17).

$$x_{max} = \frac{1}{2} \min(d_1, d_4) \quad (2.17)$$

Y siendo sustituidas las expresiones (2.17), (2.18) y (2.19) se obtiene como resultado la expresión (2.20).

$$L_2 = \min(d_1, d_4) \quad (2.18)$$

$$x_{max} = \frac{L_2}{2} \quad (2.19)$$

$$E = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{N^2 i^2 l_i}{d_4^2 d_1^2} \left(\frac{L_2^4}{32} + \frac{L_1 L_2^3}{16} + \frac{L_1^2 L_2^2}{64} - \frac{L_1^3 L_2}{64} + \frac{L_1^4}{128} \ln|2L_2 + L_1| \right) \quad (2.20)$$

La solución de la integral definida mostrada en (2.20) es sustituida en (2.10), resultando la expresión (2.21).

$$E = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{N^2 i^2 l_i}{d_4^2 d_1^2} \left[\frac{1}{128} \left(4L_2^4 + 8L_1 L_2^3 + 2L_1^2 L_2^2 - 2L_1^3 L_2 + L_1^4 \ln|2L_2 + L_1| \right) \right] \quad (2.21)$$

La expresión (2.21) es sustituida en (2.2), siendo despejada la permeancia del devanado y resultando la ecuación (2.22). Siendo L_1 la expresión (2.12) y L_2 la expresión (2.18).

$$P_w = \frac{\mu_0 l_i}{128 d_4^2 d_1^2} \left[4L_2^4 + 8L_1 L_2^3 + 2L_1^2 L_2^2 - 2L_1^3 L_2 + k_1^4 \ln(2L_2 + L_1) \right] \quad (2.22)$$

La ecuación obtenida en (2.22) es utilizada de manera similar para la obtención de la permeancia de fuga en el devanado de 220 V, siendo considerado como aire los devanados de 127 V (primario y secundario), por consiguiente, el devanado primario de 220 V posee una ligera separación con respecto a la pierna central del núcleo.

Para la obtención de los lados adyacentes al núcleo (izquierdo y derecho) se utiliza esta misma expresión considerando la misma situación, sin embargo, todas las dimensiones y longitudes radiales en los devanados cambian, como se muestra en el apéndice A.

La obtención de la permeancia en aire en el devanado primario es obtenida a partir de la figura 2.11 que es un simplificado de la figura 2.10, dando importancia a la trayectoria externa, al bobinado, aire, con respecto al devanado primario. Donde “ l_a ” y “ l_b ” son las longitudes de las permeancias horizontales y verticales respectivamente en aire, representadas con P_1 y P_2 que rodean al devanado.

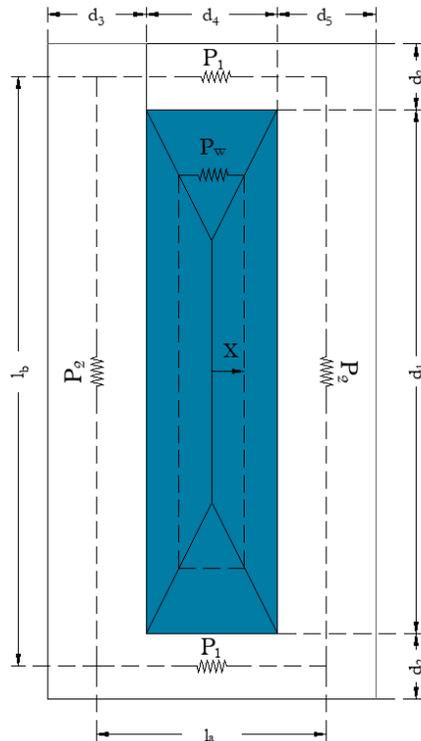


Figura 2.11 Permeancias de dispersión en aire y en total en devanado primario de 127 V, ventana derecha del corte A-A'

Para obtener la permeancia P_1 se utiliza la expresión mostrada en (2.23).

$$P_1 = \frac{\mu_0 a_{P1}}{l_{P1}} \quad (2.23)$$

Siendo el área de la permeancia en aire dada por (2.24).

$$a_{P1} = d_2 l_i \quad (2.24)$$

Y la longitud cubierta por esta área dada por la expresión (2.25).

$$l_{P1} = d_4 + d_5 \quad (2.25)$$

Siendo sustituidas las expresiones (2.23) y (2.24) en (2.25) se obtiene como resultado (2.26).

$$P_1 = \frac{\mu_0 d_2 l_i}{\frac{1}{2}(2d_4 + d_3 + d_5)} \quad (2.26)$$

Simplificando esta última expresión se obtiene la ecuación (2.27), siendo la permeancia en aire P_1 mostrada en la figura 2.7.

$$P_1 = \frac{\mu_0 l_i}{\frac{(2d_4 + d_3 + d_5)}{2d_2}} \quad (2.27)$$

Para obtener la permeancia en aire P_2 se utiliza (2.28).

$$P_2 = \frac{\mu_0 a_{P2}}{l_{P2}} \quad (2.28)$$

Siendo el área cubierta por la permeancia P_2 dada por (2.29).

$$a_{P2} = d_1 l_i \quad (2.29)$$

Y la longitud se encuentra dada por (2.30).

$$l_{P2} = d_1 + d_2 \quad (2.30)$$

Sustituyendo las expresiones anteriores en (2.28) da como resultado (2.31)

$$P_2 = \frac{\mu_0 d_1 l_i}{d_1 + d_2} \quad (2.31)$$

Simplificando la anterior expresión se obtiene (2.32).

$$P_2 = \frac{\mu_0 l_i}{\frac{d_1 + d_2}{d_1}} \quad (2.32)$$

Obtenidas las permeancias P_1 y P_2 se busca un equivalente para las permeancias en aire verticales y horizontales dada por (2.33).

$$\frac{1}{P_a} = \frac{1}{P_1} + \frac{1}{P_1} + \frac{1}{P_2} + \frac{1}{P_2} \quad (2.33)$$

Sustituyendo (2.27) y (2.32) en (2.33) se obtiene (2.34).

$$\frac{1}{P_a} = 2 \left(\frac{1}{\frac{\mu_0 l_i}{\frac{d_4 + d_5}{d_2}}} + \frac{1}{\frac{\mu_0 l_i}{\frac{d_1 + d_2}{d_1}}} \right) \quad (2.34)$$

Simplificando la expresión anterior para obtener una permeancia equivalente en aire para el devanado primario de 127V, ventana izquierda, se obtiene (2.35).

$$P_a = \frac{\mu_0 l_i}{2 \left(\frac{d_4 + d_5}{d_2} + \frac{d_1 + d_2}{d_1} \right)} \quad (2.35)$$

Ya obtenida la permeancia en aire y en la sección de la bobina se procede a encontrar una permeancia total dada por la ecuación (2.36).

$$P = P_a + P_w \quad (2.36)$$

La permeancia total en aire para el devanado primario se muestra en la figura 2.12. El cálculo de las permeancias restantes (ventana derecha, adyacente izquierda y adyacente derecha) se efectúa utilizando el mismo procedimiento, siendo los lados adyacentes mostrados en la figura 2.5.

Como es posible observar la permeancia en la ventana izquierda y derecha son la misma, por lo tanto, solamente es necesario calcular una. Cabe señalar que debe ser agregada la longitud correspondiente a los radios (esquinas de los devanados), debido a esto la permeancia obtenida en cada ventana y lado adyacente le es sumado la permeancia total del radio (aire y devanados) mostrada en la figura 2.13.

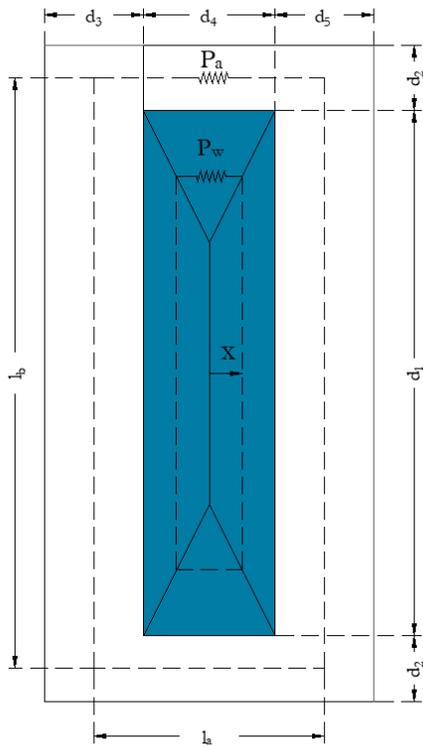


Figura 2.12 Permeancia equivalente en aire y bobinado primario 127 V, ventana derecha del corte A-A'.

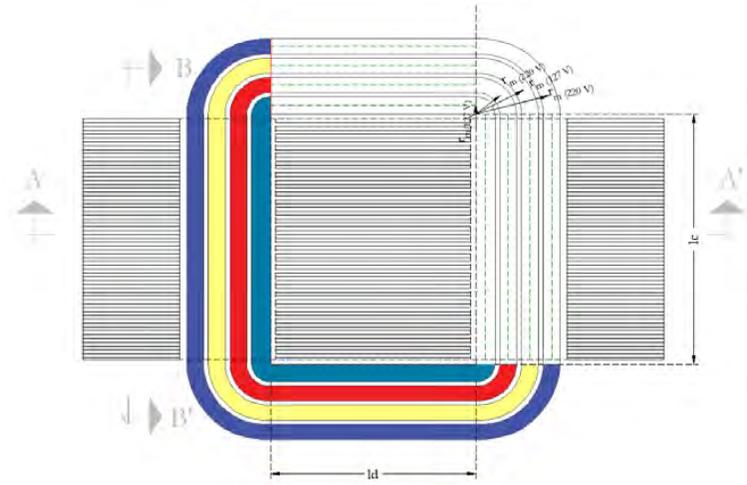


Figura 2.13 Esquema radios de bobinados primarios y secundarios con cotas.

Las dimensiones necesarias para cada uno de estos devanados son mostradas en el apéndice A y los archivos anexados muestran la forma de calcular cada una de las permeancias en el devanado que son mostrados en el apéndice D.

2.6 Permeancia en el núcleo

En la figura 2.14 se muestra el núcleo y la disposición de los devanados en un corte A-A', la línea punteada y acotada muestra las longitudes medias del trayecto del flujo magnético. Debido a la simetría en el núcleo las longitudes medias verticales se les asignó el símbolo l_{mLEG} y las longitudes medias horizontales l_{mYOKE} . Por consiguiente, el flujo magnético es calculado a partir de estas longitudes medias, siendo un flujo magnético promedio que es generado a través de la pierna central y liberado hacia las piernas externas pasando a través de los yugos superiores e inferiores.

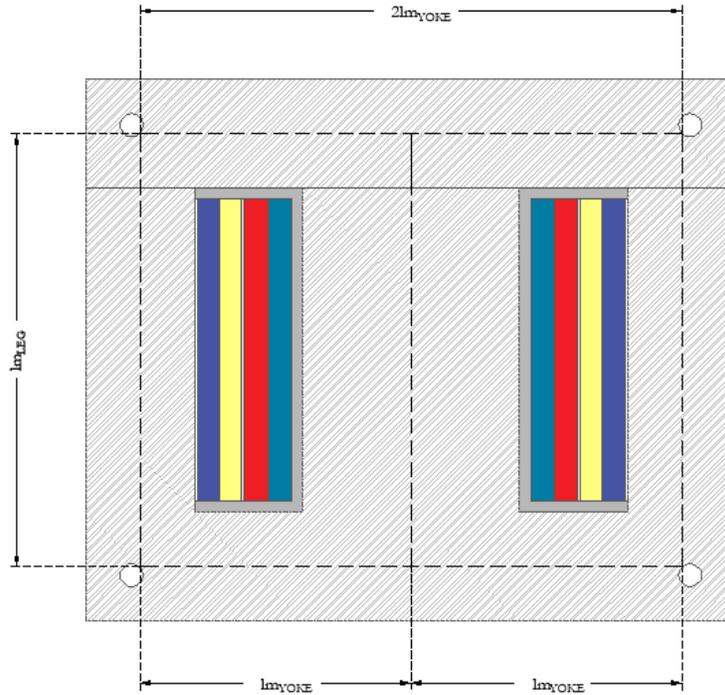


Figura 2.14 Recorrido del flujo magnético, corte A-A'.

Para obtener las permeancias en las piernas externas del núcleo del transformador se utiliza la expresión (2.37), siendo el flujo que pasa a través de la pierna externa la mitad del generado por la pierna central.

$$P_{LEG} = \frac{A_{LEG}\mu_{LEG} (\varphi_{LEG}/A_{LEG})}{l_{m_{LEG}}} \quad (2.37)$$

En el caso de la pierna central el flujo se obtiene en forma similar que la expresión (2.37), pero en este caso cambia la dimensión de la sección, resultando (2.38).

$$P_{CENTRAL_LEG} = \frac{A_{LEG}\mu_{LEG} (\varphi_{LEG}/A_{CENTRAL_LEG})}{l_{m_{LEG}}} \quad (2.38)$$

Para obtener las permeancias de los yugos se procede de forma similar como en las expresiones (2.37) y (2.38), resultando (2.39).

$$P_{YOKE} = \frac{A_{YOKE}\mu_{YOKE} (\varphi_{YOKE}/A_{YOKE})}{l_{m_{YOKE}}} \quad (2.39)$$

De esta manera las permeancias del núcleo quedan resumidas en la figura 2.15, por lo tanto, se obtienen cuatro permeancias iguales en los yugos, dos iguales en las piernas externas y una diferente en la pierna central, siendo esta última la que genera el flujo magnético a través de la trayectoria cerrada del núcleo.

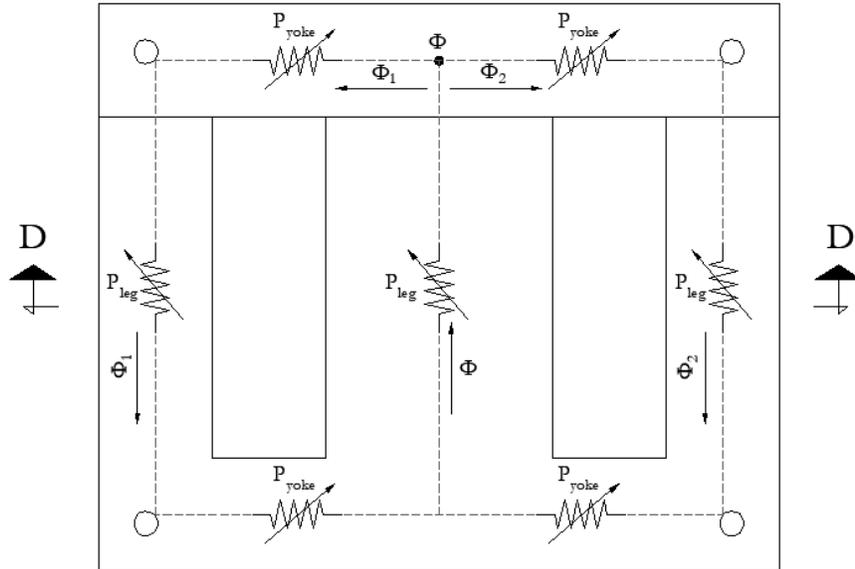


Figura 2.15 Representación de permeancias en el núcleo, corte A-A'.

Las permeancias en el núcleo son consideradas variables y dependen de la curva de saturación obtenida a través pruebas eléctricas, por consiguiente, solamente es necesario obtener una permeancia en la pierna externa, en la central y en el yugo, debido a la simetría que existe en el núcleo.

2.7 Características del núcleo, curva BH

La curva característica B-H perteneciente al núcleo monofásico se presenta en la tabla 2.3, la cual se obtuvo de manera experimental mediante las ecuaciones 2.40 y 2.41.

$$B = \frac{V_1}{\sqrt{2}\pi f N_1 A} \quad (2.40)$$

donde:

- V_p : voltaje eficaz en el devanado primario.
- N_p : número de vueltas del devanado primario.
- A : área de la sección transversal del núcleo.
- f : frecuencia.

$$H = \frac{i_{ex}N_p}{l} \quad (2.41)$$

donde:

- i_{ex} : corriente de excitación.
- l : longitud media de trayectoria del flujo magnético.
- N_p : número de vueltas del primario.

B(H)	H(A/m)
8.191x10 ⁻³	0.285241
0.450509	158.4677
0.657744	200.7258
1.048458	739.5161
1.376101	1320.565
1.433439	1669.194
1.498968	2165.726
1.556305	2852.419
1.597261	3380.645
1.630025	3803.226
1.662789	4225.807
1.703745	4754.032
1.761082	5387.903
1.802038	5810.484
1.908522	7078.226
1.941286	7395.161
2.211592	10564.52

Tabla 2.1 Curva de magnetización del transformador experimental.

2.8 Circuito magnético equivalente

Conocidas las permeancias de fuga en los devanados y las permeancias en el núcleo es posible armar el circuito magnético equivalente mostrado en la figura 2.16. Los resultados obtenidos para las permeancias de fuga en los devanados con tensión de 127 V y 220 V son mostrados en la tabla 2.2 y 2.3 respectivamente.

Debido a esto se agruparon los resultados en las tablas con respecto a los cortes realizados en el transformador, por lo tanto, es mostrada la permeancia de fuga total en una ventana, la cual incluye la permeancia de fuga en aire y del devanado, siendo igual para ambas ventanas. El total de las permeancias para cada corte se muestra con los símbolos P_{TV} y P_{TADY} , siendo agregado el valor de dos radios de permeancia a cada total respectivamente mostrado en las tablas 2.2 y 2.3.

Corte	Primario 127V	Secundario 127V	Símbolo	Total, Primario	Total, Secundario
A-A'	7.058×10^{-9}	6.392×10^{-9}	P_{TV}	1.503×10^{-8}	1.705×10^{-8}
B-B'	5.928×10^{-9}	5.370×10^{-9}	P_{TADY}	1.277×10^{-8}	1.501×10^{-8}
Radio	4.559×10^{-10}	2.134×10^{-9}			

Tabla 2.2 Permeancias de fuga (Wb/A-Vuelta) por corte y total en los devanados primarios y secundarios con tensión de 127 V

Corte	Primario 220V	Secundario 220V	Símbolo	Total, Primario	Total, Secundario
A-A'	5.891×10^{-9}	7.802×10^{-9}	P_{TV}	1.407×10^{-8}	2.271×10^{-8}
B-B'	4.949×10^{-9}	6.554×10^{-9}	P_{TADY}	1.219×10^{-8}	2.022×10^{-8}
Radio	1.145×10^{-9}	3.555×10^{-9}			

Tabla 2.3 Permeancias de fuga (Wb/A-Vuelta) por corte y total en los devanados primarios y secundarios con tensión de 220 V

El circuito magnético equivalente mostrado en la figura 2.16 incluye las permeancias variables del núcleo por efecto de la saturación y las permeancias totales de fuga correspondientes a las dos ventanas y lados adyacentes de la bobina.

El circuito magnético puede ser simplificado en el caso de no existir carga en el lado secundario, resultando el circuito mostrado en la figura 2.17

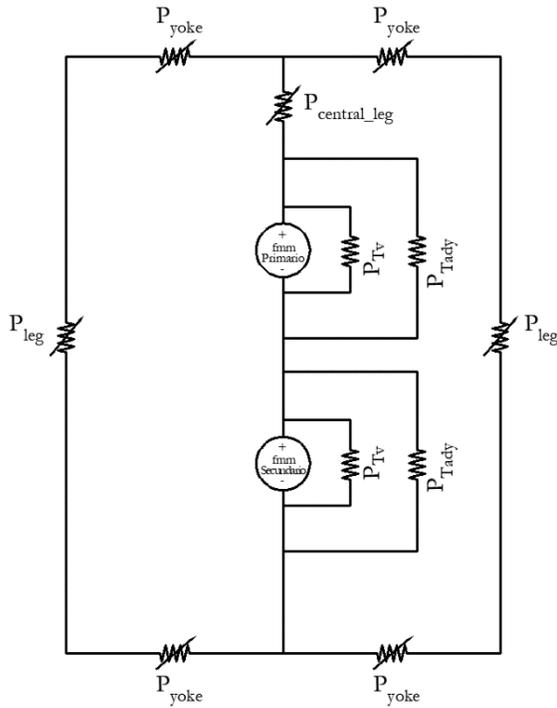


Figura 2.16 Circuito magnético equivalente.

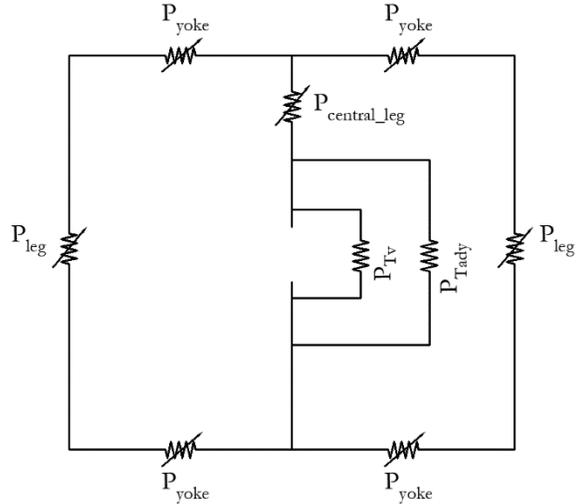


Figura 2.17 Circuito magnético sin carga.

2.9 Permeancia equivalente

Para obtener el circuito magnético equivalente referido al lado primario, mostrado en la figura 2.15, son simplificadas las permeancias externas con los yugos correspondientes, obteniéndose la expresión (2.42) y (2.43).

$$P_{Eq_1} = \frac{P_{yoke} P_{leg}}{2P_{leg} + P_{yoke}} \quad (2.42)$$

$$P_{Eq_2} = \frac{P_{yoke} P_{leg}}{2P_{leg} + P_{yoke}} \quad (2.43)$$

Simplificando las permeancias de fuga adyacentes al núcleo y en el interior del núcleo, ventana izquierda y derecha se obtiene (2.44) y (2.45), como se muestra en la figura 2.15.

$$P_{Eq_3} = P_{Tadyizq} + P_{Tadyder} \quad (2.44)$$

$$P_{Eq4} = P_{Tvizq} + P_{Tvdv} \quad (2.45)$$

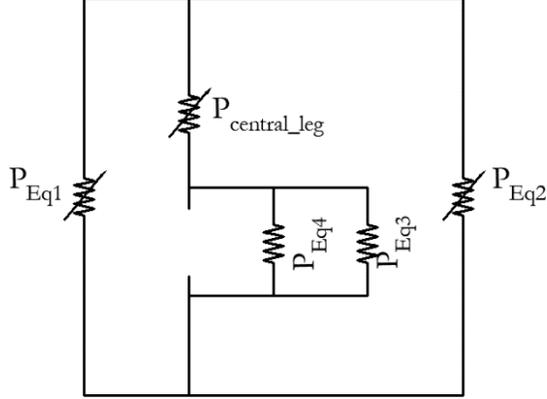


Figura 2.18 Reducción del circuito magnético.

Reduciendo aún más el circuito magnético mostrado en la figura 2.15 se obtiene (2.46). Ya obtenido P_{Eq5} es sumado a la permeancia de la pierna central resultando la expresión (2.47).

$$P_{Eq5} = \frac{2 P_{yoke} P_{leg}}{2P_{leg} + P_{yoke}} \quad (2.46)$$

$$P_{Eq6} = \frac{P_{central_leg} (2P_{leg} P_{yoke})}{P_{central_leg} (2P_{leg} + P_{yoke}) + 2 P_{yoke} P_{leg}} \quad (2.47)$$

Finalmente, la permeancia equivalente referida al lado primario es expresada en P_{Eq7} y sumando P_{Eq3} con P_{Eq4} se obtiene la permeancia $P_{fuga_devanado}$.

Las permeancias de fuga se encuentran en paralelo a P_{Eq6} , por consecuente son sumadas para obtener P_{Eq7} dado por la expresión (2.48). Esta última expresión es muy importante para la realización de las simulaciones, sin embargo, no se debe confundir el circuito eléctrico aproximado con el circuito magnético aproximado, ya que son circuitos totalmente distintos, pero ambos se utilizan en la simulación.

$$P_{Eq7} = \frac{P_{central_leg} (2P_{leg} P_{yoke})}{P_{central_leg} (2P_{leg} + P_{yoke}) + 2 P_{yoke} P_{leg}} + P_{fuga_devanado} \quad (2.48)$$

III

Análisis y simulación de la corriente de vacío, flujo magnético y voltaje inducido

3.1 Introducción

En el presente capítulo se da a conocer el comportamiento de la corriente de vacío, flujo magnético y tensión inducida en un transformador monofásico del tipo acorazado en operación sin carga, bajo una variación del 10% de la tensión nominal en aumento o disminución en estado estable, considerando la saturación del núcleo y utilizando el modelo aproximado del transformador, el cual se modifica para generar dos modelos, uno con pérdidas y otro sin pérdidas para realizar un análisis de magnitudes y distorsiones armónicas totales utilizando un código fuente elaborado con la herramienta Scilab [26].

Las simulaciones se realizaron por medio de una librería a base de funciones mediante la herramienta Scilab para mejorar la fluidez de iteración y reducir el tiempo de ejecución, aunque el tiempo depende de las características del computador. Los parámetros utilizados del transformador monofásico se proporcionan en los apéndices A, B y C, referidos al lado de alta.

La característica del modelo sin pérdidas es considerar la resistencia e inductancia de dispersión del conductor y la inductancia de magnetización, en cambio, el modelo con pérdidas considera la resistencia del conductor y pérdidas del núcleo como la inductancia de magnetización, por lo que la inductancia de dispersión se desprecia y ambos modelos consideran la saturación del núcleo.

Otros de los aspectos importantes que son vistos en este capítulo es conocer el comportamiento de la corriente de vacío, flujo magnético y tensión inducida en un banco trifásico a base de unidades monofásicas en diferentes tipos de conexión las cuales son $Yy0$, $Yy0$ sin neutro aterrizado, $Dy1$, $Dd0$, siendo sometido el banco trifásico en las conexiones mencionadas a una variación de la tensión nominal de un 10%, ya sea en aumento o disminución en estado estable, aplicando los modelos mencionados en el párrafo anterior con la finalidad de analizar las magnitudes y distorsiones armónicas totales.

3.2 Modelo del transformador sin pérdidas

En este apartado se esquematiza el circuito eléctrico equivalente manejado para simular la forma de onda en la corriente en vacío, flujo magnético y tensión inducida, siendo considerada la no linealidad del núcleo y la resistencia e inductancia del conductor como se muestra en la figura 3.1.

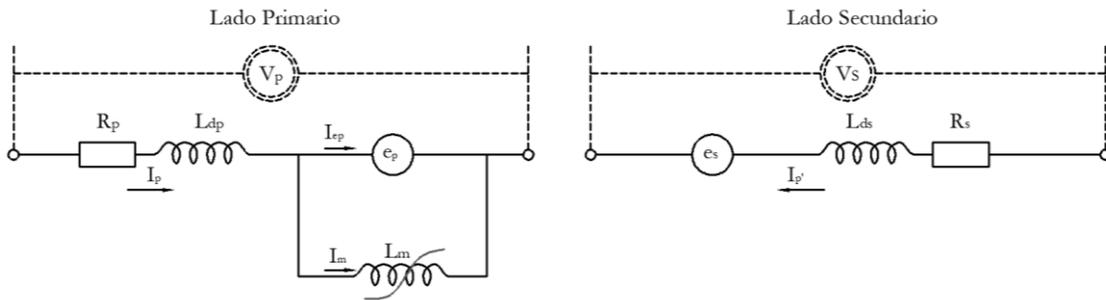


Figura 3.1 Modelo del transformador monofásico sin pérdidas.

3.2.1 Parámetros transformador monofásico 127 V

En este apartado se presentan los parámetros obtenidos mediante pruebas eléctricas a los transformadores monofásicos para los bobinados de 127 V que se muestran en la tabla 3.1, los cuales son utilizados en simulaciones posteriores mediante el programa elaborado en Scilab. Los parámetros pertenecen a la unidad experimental TA y fueron elegidos por encontrarse dentro del promedio respecto a las tres unidades restantes, en el caso de la inductancia de magnetización al ser variable no posee un valor único por depender de la curva BH y del flujo magnético.

Transformador	R_p [Ω]	R_s [Ω]	L_{dp} [mH]	L_{ds} [m Ω]	R_n	N_p/N_s
Primario 127 V	3.29	3.26	1.908	1.988	561	262/249

Tabla 3.1 Parámetros en el transformador monofásico 300 VA, 127 Vca / 127 Vca.

3.3 Modelo del transformador con pérdidas

En este apartado se esquematiza el circuito eléctrico equivalente manejado para simular la forma de onda de la corriente en vacío, flujo magnético y tensión inducida siendo considerada la resistencia del conductor, la no linealidad del núcleo y la resistencia de pérdidas como se muestra en la figura 3.2.

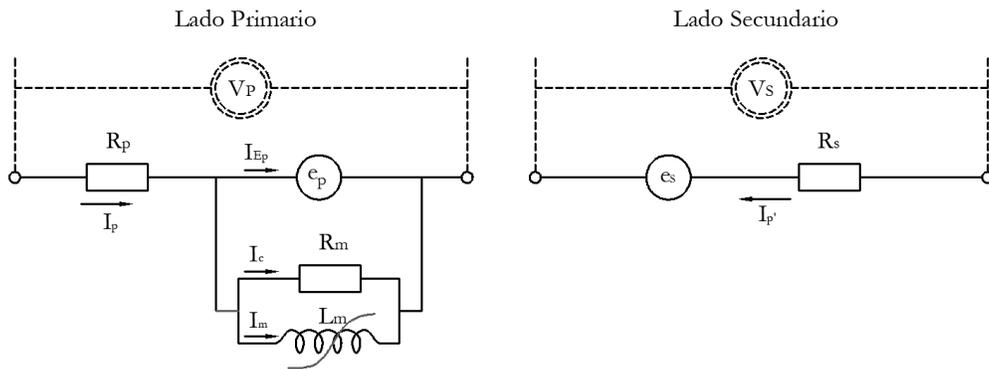


Figura 3.2 Modelo del transformador monofásico con pérdidas.

3.3.1 Parámetros transformador 220 V

En este apartado se presentan los parámetros obtenidos mediante pruebas eléctricas a los transformadores monofásicos para los bobinados de 220 V que se muestran en la tabla 3.2, los cuales son utilizados en simulaciones posteriores mediante el programa elaborado en Scilab. Los parámetros pertenecen a la unidad experimental TA y fueron elegidos por encontrarse dentro del promedio respecto a las tres unidades restantes, en el caso de la inductancia de magnetización al ser variable no posee un valor único por depender de la curva BH y del flujo magnético.

Transformador	Rp [Ω]	Rs [Ω]	Ldp[mH]	Lds[mΩ]	Rn	Np/Ns
Primario 220V	5.86	5.61	7.614	8.012	1344	445/432

Tabla 3.2 Parámetros en el transformador monofásico 300 VA, 220 Vca / 220 Vca.

3.4 Ecuación de estado en vacío

El transformador monofásico modelado se muestra en la figura 3.3 y al aplicar una tensión en sus terminales de su bobinado primario V_p y una intensidad instantánea de corriente I_p que circula alrededor de la bobina se presenta la ecuación (3.1), la cual es la Ley de Faraday.

$$V_p = R_p I_p + \frac{d\lambda_p}{dt} \quad (3.1)$$

Siendo λ_p los enlaces de flujo instantáneo que atraviesan la bobina dada por la ecuación (3.2), la cual considera el flujo de fuga y el flujo que atraviesa la bobina mostrado en la figura 3.4.

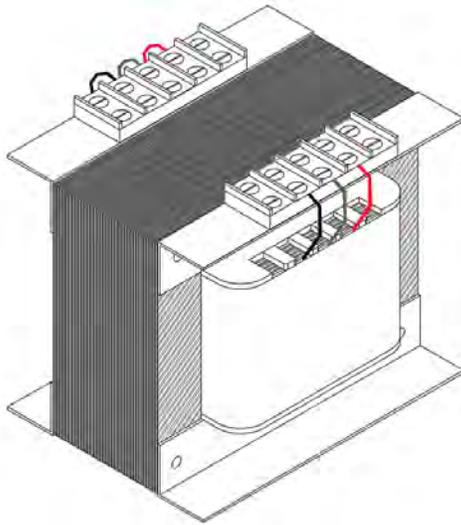


Figura 3.3 Transformador monofásico experimental 127 V/ 127 V, 220 V/220 V.

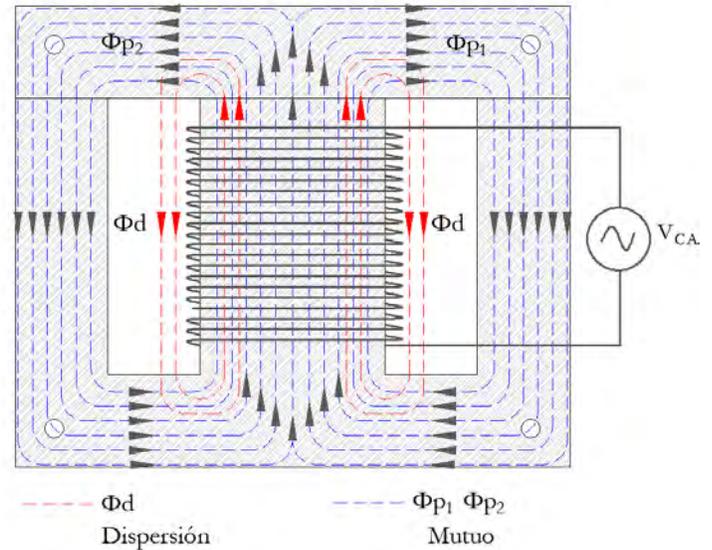


Figura 3.4 Flujo de fuga y mutuo, transformador monofásico.

$$\lambda_p = N_p(\varphi_{p1} + \varphi_{p2} + \varphi_{dp}) \quad (3.2)$$

Sustituyendo la ecuación (3.2) en la (3.1) se obtiene la expresión (3.3).

$$V_p = R_p I_p + N_p \frac{d(\varphi_{p1} + \varphi_{p2} + \varphi_{dp})}{dt} \quad (3.3)$$

Siendo el flujo total expresado en la ecuación (3.4).

$$\varphi = \varphi_{p1} + \varphi_{p2} + \varphi_{dp} \quad (3.4)$$

Sustituyendo la ecuación (3.4) en (3.3) se obtiene la ecuación (3.5).

$$V_p = R_p I_p + N_p \frac{d\varphi}{dt} \quad (3.5)$$

La ecuación (3.6) muestra la relación directa que existe entre el flujo magnético y la corriente que pasa a través de la bobina.

$$I_p(\varphi) = \frac{N_p \varphi}{L_{dp}(\varphi)} \quad (3.6)$$

Sustituyendo la ecuación (3.6) en (3.5) se obtiene la expresión (3.7)

$$V_p = R_p \frac{N_p \varphi}{L_{dp}(\varphi)} + N_p \frac{d\varphi}{dt} \quad (3.7)$$

Siendo el voltaje aplicado de corriente alterna en las terminales de la bobina, la ecuación para el voltaje en las terminales viene dado por la ecuación (3.8).

$$V_p = V_m \sin(\omega t + \phi) \quad (3.8)$$

Despejando $d\varphi/dt$ de la expresión (3.7) y sustituyendo (3.8) se obtiene la primera ecuación de estado que se muestra en (3.9).

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{1}{N_p} \left(V_m \sin(\omega t + \phi) - R_p \frac{N_p \varphi}{L_{dp}} \right) \quad (3.9)$$

La ecuación diferencial de primer orden mostrada en (3.9) es resuelta por medio del método de Runge-Kutta de cuarto orden. En el capítulo 2 se obtuvo una expresión que involucra la permeancia variable del núcleo y la permeancia de fuga, la cual es utilizada para dar solución a la ecuación diferencial (3.9).

Con base a la ecuación de estado (3.9) se muestra más adelante las formas de onda de voltaje y corriente producidas por los transformadores experimentales considerando en cada caso los dos modelos presentados.

Partiendo de la ecuación (3.3) y despreciado el flujo disperso, por ser muy pequeño y considerando la resistencia de pérdidas, se obtiene la expresión (3.10).

$$V_p = R_p \left(\frac{N_p \varphi}{L_m(\varphi)} + \frac{N_p \frac{d(\varphi_p)}{dt}}{R_n} \right) + N_p \frac{d(\varphi_p)}{dt} \quad (3.10)$$

Simplificando la expresión (3.10) se obtiene la expresión (3.11)

$$V_p = \frac{R_p N_p \varphi}{L_m(\varphi)} + \frac{R_p N_p \frac{d(\varphi_p)}{dt}}{R_n} + N_p \frac{d(\varphi_p)}{dt} \quad (3.11)$$

La expresión (3.11) está en función del flujo magnético, al simplificar y agrupar los términos comunes se obtiene la segunda ecuación de estado que se muestra en (3.12).

$$\frac{d(\varphi_p)}{dt} = \frac{V_p - \frac{R_p N_p \varphi}{L_m(\varphi)}}{N_p \left(\frac{R_p + R_n}{R_n} \right)} \quad (3.12)$$

El motivo del desprecio de la inductancia de fuga al considerar las pérdidas en el núcleo fue por la disposición de los devanados y su corta separación que existe entre éstos con respecto al núcleo, al igual que en simulaciones realizadas con el modelo sin pérdidas al considerar y no considerar este elemento inductivo, por no representar una caída de tensión considerable (0.3%) sobre éste facilitando la obtención de la corriente de vacío.

No obstante, la consideración de las pérdidas en el núcleo se hizo con la finalidad de analizar las magnitudes de la corriente, tensión inducida y flujo magnético en un análisis de espectro de frecuencias para ser comparado con el modelo del apartado (3.2). En algunas publicaciones [10] se utilizó el modelo del apartado (3.2) y en otras [12] el modelo del apartado (3.3), pero en ningún momento se realiza una comparación de las magnitudes obtenidas en ambos modelos, ni el grado de deformación de onda, centrándose este análisis en comparar tales magnitudes con la finalidad de determinar qué modelo es adecuado para un análisis de contenido en armónicas al considerar la no linealidad del núcleo.

3.5 Caso 1. Transformador monofásico 127V

La presente simulación muestra la corriente de vacío, flujo magnético y tensión inducida de una unidad monofásica presentada en el capítulo 2 con tensión nominal de trabajo de 127 V, considerando el modelo sin pérdidas del apartado (3.2) y el modelo con pérdidas del apartado (3.3) para un análisis de magnitudes y distorsiones armónicas totales en estado estable al ser incrementada o disminuida la tensión nominal un 10% obtenidas mediante la librería elaborada en Scilab.

3.5.1 Corriente de vacío en unidad monofásica

En la figura 3.5 se muestran las corrientes de vacío generadas con el modelo del apartado (3.2) y en la figura 3.6 se muestran las corrientes generadas con el modelo del apartado (3.3) obtenidas a tensión nominal, al incrementar o disminuir la tensión nominal de trabajo un 10%, siendo también considerado este aumento o disminución como una sobretensión o caída de tensión.

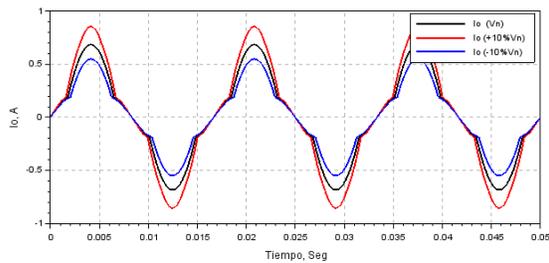


Figura 3.5 Corrientes de vacío en el lado primario del transformador monofásico obtenidas con el modelo sin pérdidas a tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión un 10%.

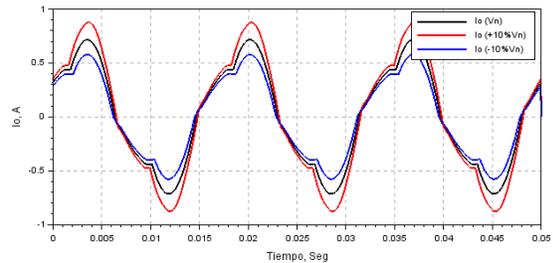


Figura 3.6 Corrientes de vacío en el lado primario del transformador monofásico obtenidas con el modelo de pérdidas a tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión un 10%.

Aplicando un análisis espectral a la corriente de vacío generada a tensión nominal de la figura 3.5, se obtienen las primeras quince armónicas con valor eficaz y ángulos de fase de las figuras 3.7 y 3.8 respectivamente. Al extender el análisis de la corriente de vacío generada a tensión nominal que se muestra en la figura 3.6 se obtiene el espectro de frecuencia y ángulos de fase de las figuras 3.9 y 3.10 respectivamente.

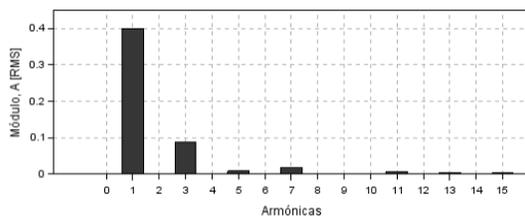


Figura 3.7 Espectro de frecuencias de la corriente de vacío obtenida con el modelo sin pérdidas a tensión nominal.

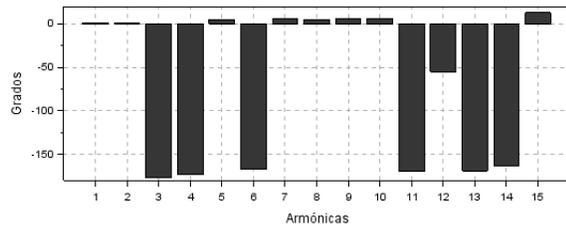


Figura 3.8 Ángulos de fase del espectro de frecuencias de la corriente de vacío obtenida con el modelo sin pérdidas a tensión nominal.

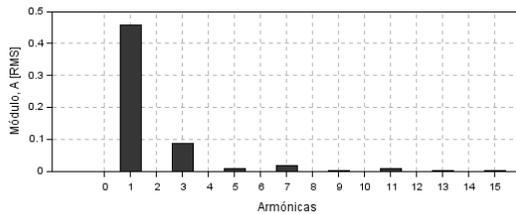


Figura 3.9 Espectro de frecuencias de la corriente de vacío obtenida con el modelo de pérdidas a tensión nominal.

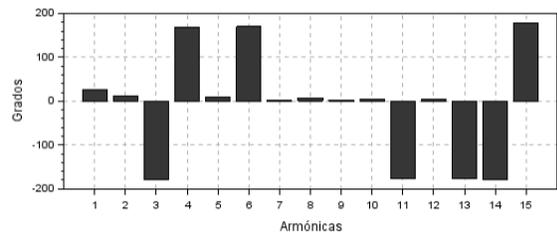


Figura 3.10 Ángulos de fase del espectro de frecuencias de la corriente de vacío obtenida con el modelo con pérdidas a tensión nominal

Los espectros de frecuencias que se muestran en tablas posteriores de la corriente de vacío, flujo magnético y tensión inducida incluyen las primeras ocho armónicas impares, considerando como referencia las fundamentales de ambos modelos.

Al comparar los espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío en ambos modelos a tensión nominal en la tabla 3.3 la magnitud de la fundamental del modelo sin pérdidas es mayor por 13.84pp como las magnitudes de 5ª (0.17pp), 11ª (0.009pp) y 15ª (0.029pp) armónicas, pero las magnitudes de 3ª (0.32pp), 7ª (0.059pp), 9ª (0.109pp) y 13ª (0.079pp) son menor debido a la resistencia de pérdidas. Las corrientes de vacío obtenidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas presentaron un factor de cresta de 1.67 y 1.54 respectivamente, por lo que ambas formas de onda son esbeltas y elevadas en sus crestas y valles. Las magnitudes de las fundamentales del modelo con pérdidas y el modelo sin pérdidas presentaron un ángulo de fase de 30.38 grados y 0.85 grados respectivamente, siendo las diferencias de los ángulos de fase para las magnitudes de 3ª, 5ª, 7ª, 11ª, 13ª y 15ª armónicas de ambos modelos menor a 5pp. Los cinco puntos porcentuales son una limitante para observar el comportamiento en los ángulos de fase para ambos modelos y saber cuánto pueden cambiar en una manera general.

No. Armónicas	Modelo Sin Pérdida THD=22.36%			Modelo Con Pérdida THD= 19.38%		
	Amplitud RMS [A]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]	Amplitud RMS [A]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]
1ª	0.40082	100.000%	0.85	0.45633	100.000%	30.38
3ª	0.08754	21.840%	-177.18	0.08626	18.902%	-177.24
5ª	0.00810	2.020%	5.08	0.00878	1.924%	5.13
7ª	0.01699	4.240%	5.99	0.01675	3.671%	6.00
9ª	0.00104	0.260%	5.70	0.00060	0.132%	5.20
11ª	0.00713	1.780%	-170.56	0.00717	1.572%	-170.67
13ª	0.00301	0.750%	-169.26	0.00269	0.588%	-169.38
15ª	0.00277	0.690%	12.79	0.00289	0.632%	12.73

Tabla 3.3 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas a tensión nominal.

Incrementar un 10% la tensión nominal aumenta principalmente las magnitudes de la fundamental (23.8pp/23.4pp) y 3ª (0.76pp/0.72pp) armónica de los espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, respecto a los espectros de frecuencias obtenidos a tensión nominal. En la tabla 3.4 se muestran los espectros de frecuencias de las corrientes de vacío de ambos modelos cuando se incrementa la tensión nominal.

Al comparar los espectros de frecuencias de la tabla 3.4 la magnitud de la fundamental del modelo de pérdidas es mayor por 10.85pp como las magnitudes de 5ª (0.08pp), 7ª (0.03pp) y 11ª (0.09pp) armónicas, pero las magnitudes 3ª (0.36pp), 9ª (0.06pp), 13ª (0.05pp) y 15ª (0.05pp) armónicas son menor. Las corrientes obtenidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas presentaron un factor de cresta de 1.67 y 1.56 respectivamente, siendo ambas formas de onda esbeltas y elevadas en sus crestas y valles. Las magnitudes de las fundamentales del modelo con pérdidas y el modelo sin pérdidas presentan un ángulo de fase de 26.88 grados y 0.93 grados respectivamente, siendo las diferencias de los ángulos de fase para las magnitudes de 3ª y 11ª armónicas de ambos modelos menor a 5pp.

No. Armónicas	Modelo Sin Pérdida THD=22.85%			Modelo Con Pérdida THD=20.30%		
	Amplitud RMS [A]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]	Amplitud RMS [A]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]
1ª	0.49638	100.000%	0.93	0.55026	100.000%	26.88
3ª	0.11219	22.601%	-176.93	0.11038	20.060%	-179.13
5ª	0.00214	0.432%	9.82	0.00254	0.462%	8.47
7ª	0.01450	2.922%	6.37	0.01465	2.662%	170.11
9ª	0.00940	1.893%	8.22	0.00909	1.652%	2.32
11ª	0.00396	0.798%	-169.39	0.00443	0.805%	-177.27
13ª	0.00690	1.390%	-167.98	0.00666	1.211%	-177.03
15ª	0.00063	0.127%	-169.05	0.00038	0.069%	178.09

Tabla 3.4 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas y el modelo de pérdidas, al incrementar la tensión nominal un 10%.

Disminuir un 10% la tensión nominal reduce principalmente las magnitudes de la fundamental (20.8pp/20.6pp) y 3ª (5.41pp/5.44pp) armónica de los espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, respecto a los espectros de frecuencias obtenidos a tensión nominal. En la tabla 3.5 se muestran los espectros de frecuencias de las corrientes de vacío de ambos modelos al disminuir la tensión nominal un 10%, siendo la fundamental mayor en el modelo de pérdidas por 17.74pp como las magnitudes de 5ª (0.11pp), 7ª (0.08pp) y 13ª (0.07pp), pero las magnitudes de 3ª (0.45pp), 9ª (0.16pp), 11ª (0.09pp) y 15ª (0.06pp) armónicas son menor. Las corrientes de vacío obtenidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas presentaron un factor de cresta de 1.70 y 1.53 respectivamente, siendo las formas de onda son esbeltas y elevadas en sus crestas y valles. Las magnitudes de las fundamentales del modelo con pérdidas y el modelo sin pérdidas presentaron un ángulo de fase de 33.49 grados y 0.1 grados respectivamente, siendo las diferencias de los ángulos de fase para las magnitudes de 3ª, 9ª y 11ª armónicas de ambos modelos menor a 5pp.

No. Armónicas	Modelo Sin Pérdida THD=21.94%			Modelo Con Pérdida THD=18.31%		
	Amplitud RMS [A]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]	Amplitud RMS [A]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]
1ª	0.31715	100.000%	0.10	0.37344	100.000%	33.49
3ª	0.06587	20.770%	-179.42	0.06444	17.257%	-177.46
5ª	0.01779	5.610%	0.94	0.01814	4.858%	4.32
7ª	0.01088	3.430%	0.76	0.01037	2.777%	5.43
9ª	0.00606	1.910%	-178.8	0.00634	1.699%	-172.75
11ª	0.00511	1.610%	-178.98	0.00482	1.291%	-171.59
13ª	0.00244	0.770%	1.88	0.00266	0.713%	10.42
15ª	0.00285	0.900%	1.57	0.00266	0.713%	11.42

Tabla 3.5 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas y el modelo de pérdidas al disminuir la tensión nominal un 10%.

3.5.2 Tensión inducida en unidad monofásica

La forma de onda de la tensión inducida referida al lado primario obtenidas de ambos modelos y a diferentes niveles de tensión se muestran en las figuras 3.11 y 3.12, por lo que a simple vista no es posible apreciar el pequeño contenido armónico presente en estas formas de onda.

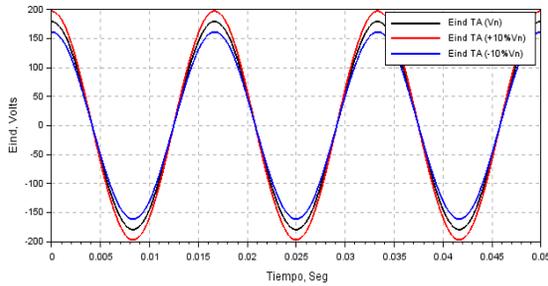


Figura 3.11 Tensiones inducidas en el lado primario obtenidas con el modelo sin pérdidas a tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión un 10%.

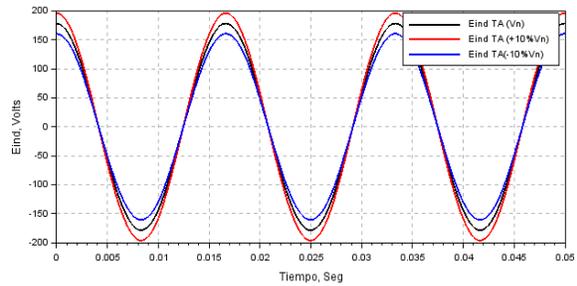


Figura 3.12 Tensiones inducidas en el lado primario obtenidas con el modelo de pérdidas a tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión un 10%.

La comparación de los espectros de frecuencias obtenidos de la tensión inducida en ambos modelos a tensión nominal se muestra en la tabla 3.6, siendo la fundamental menor en el modelo de pérdidas al igual que las magnitudes de 3^a, 5^a, 7^a, 9^a, 11^a, 13^a y 15^a armónicas, debido a la caída de tensión por el incremento de la corriente de vacío. La tensión inducida obtenida del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas presentaron un factor de cresta de 1.415 y 1.412 respectivamente, por lo que ambas formas de onda presentaron un factor de cresta muy aproximado a la de una onda senoidal.

No. Armónicas	Modelo Sin Pérdida THD= 0.322%			Modelo Con Pérdida THD= 0.249%		
	Amplitud RMS [V]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]	Amplitud RMS [V]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]
1 ^a	126.70412	100.000%	90.82	126.25179	100.000%	90.81
3 ^a	0.34464	0.272%	41.21	0.28382	0.225%	10.70
5 ^a	0.03928	0.031%	-143.84	0.02914	0.023%	159.74
7 ^a	0.10263	0.081%	-119.15	0.05448	0.043%	179.14
9 ^a	0.00760	0.006%	-131.09	0.00253	0.002%	125.13
11 ^a	0.06082	0.048%	77.616	0.02407	0.019%	15.69
13 ^a	0.02914	0.023%	82.186	0.00887	0.007%	22.22
15 ^a	0.03041	0.024%	-94.658	0.01014	0.008%	-175.87

Tabla 3.6 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las tensiones inducidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas a tensión nominal.

Incrementar un 10% la tensión nominal aumenta principalmente las magnitudes de la fundamental (9.97pp/9.96pp) y 3^a (0.05pp/0.04pp) armónica de los espectros de frecuencias de las tensiones inducidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, respecto a los espectros de frecuencias obtenidos a tensión nominal. La tabla 3.7 muestra

los análisis espectrales de las tensiones inducidas de ambos modelos al incrementar la tensión nominal, siendo la fundamental menor en el modelo con pérdidas al igual que las magnitudes de 3^a, 5^a, 7^a, 9^a, 11^a, 13^a y 15^a armónicas. Las tensiones inducidas obtenidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas presentaron un factor de cresta de 1.416 y 1.414 respectivamente, por lo que ambas formas se consideran sinusoidales por presentar un factor de cresta muy aproximado al de una onda senoidal.

No. Armónicas	Modelo Sin Pérdidas THD=0.322%			Modelo Con Pérdida THD=0.249%		
	Amplitud RMS [V]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]	Amplitud RMS [V]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]
1 ^a	139.33235	100.000%	90.89	138.87395	100.000%	90.89
3 ^a	0.44168	0.317%	40.76	0.36366	0.262%	9.84
5 ^a	0.01115	0.008%	131.7	0.00836	0.006%	122.28
7 ^a	0.08778	0.063%	-119.39	0.04877	0.035%	177.73
9 ^a	0.06827	0.049%	-110.23	0.02926	0.021%	179.97
11 ^a	0.03344	0.024%	79.39	0.01393	0.010%	21.77
13 ^a	0.06827	0.049%	83.01	0.02229	0.016%	17.21
15 ^a	0.00697	0.005%	85.98	0.00139	0.001%	54.61

Tabla 3.7 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las tensiones inducidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas al incrementar la tensión nominal un 10%.

Disminuir un 10% en la tensión nominal reduce principalmente las magnitudes de la fundamental (9.97pp/9.96pp) y 3^a (0.07pp/0.06pp) armónica de los espectros de frecuencias obtenidos de las tensiones inducidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, respecto a los espectros de frecuencias obtenidos a tensión nominal. En tabla 3.8 se muestran los espectros de frecuencias de las tensiones inducidas de ambos modelos cuando se incrementa la tensión nominal, siendo la fundamental menor en el modelo con pérdidas al igual que las magnitudes de 3^a, 5^a, 7^a, 9^a, 11^a, 13^a y 15^a armónicas. Las tensiones inducidas obtenidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas presentaron un factor de cresta de 1.42 y 1.418 respectivamente, por lo que ambas formas de onda se consideran sinusoidales al presentar un factor de cresta similar al de una onda senoidal.

No. Armónicas	Modelo Sin Pérdidas THD=0.287%			Modelo Con Pérdida THD=0.219%		
	Amplitud RMS [V]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]	Amplitud RMS [V]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]
1 ^a	114.06663	100.000%	90.75	113.69135	100.000%	90.74
3 ^a	0.36159	0.317%	41.88	0.29771	0.262%	11.99
5 ^a	0.00913	0.008%	-134	0.00684	0.006%	172.77
7 ^a	0.07186	0.063%	-120.56	0.03992	0.035%	175.8
9 ^a	0.05589	0.049%	72.27	0.02395	0.021%	17.28
11 ^a	0.02738	0.024%	76.92	0.01141	0.010%	16.56
13 ^a	0.05589	0.049%	-100.21	0.01825	0.016%	178.51
15 ^a	0.00570	0.005%	-95.94	0.00114	0.001%	-176.56

Tabla 3.8 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las tensiones inducidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas al disminuir la tensión nominal un 10%.

3.5.3 Flujo magnético en unidad monofásica

Las formas de onda para el flujo magnético referida al lado primario en la unidad “TA” obtenidas de ambos modelos y a diferentes niveles de tensión se muestran en las figuras 3.13 y 3.14. A simple vista no es posible apreciar el pequeño contenido armónico, por ende, las primeras ocho armónicas impares de los espectros de frecuencias junto con sus ángulos de fase se muestran en tabla 3.9, conservando ambos flujos magnéticos una forma de onda sinusoidal debido al bajo contenido de 3^a, 5^a, 7^a etc. armónicas, menor al 1%, para que no exista una deformación de onda.

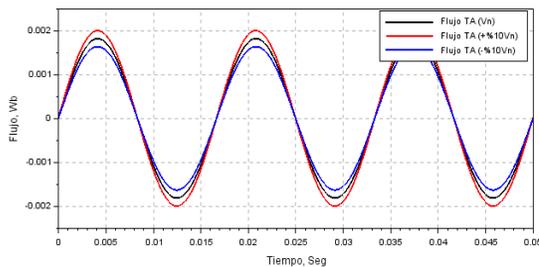


Figura 3.13 Flujos magnéticos en el lado primario obtenidos con el modelo sin pérdidas a tensión nominal y al aumentar o disminuir la tensión un 10%.

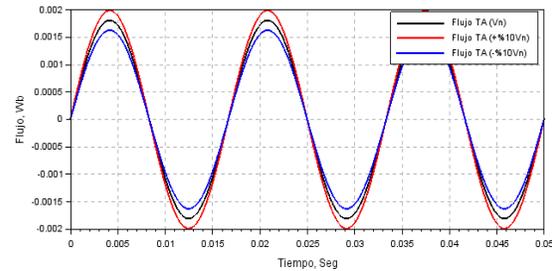


Figura 3.14 Flujos magnéticos en el lado primario obtenidos con el modelo de pérdidas a tensión nominal y al aumentar o disminuir la tensión un 10%.

No. Armónicas	Modelo Sin Pérdidas THD=0.244%			Modelo Con Pérdida THD=0.244%		
	Amplitud RMS [Wb]	Amplitud RMS [%]	Ángulo [Grados]	Amplitud RMS [Wb]	Amplitud RMS [%]	Ángulo [Grados]
1 ^a	1.286x10 ⁻³	100.000%	0.81	1.278x10 ⁻³	100.000%	0.81
3 ^a	9.901x10 ⁻⁷	0.0770%	-37.64	9.901x10 ⁻⁷	0.0775%	-37.26
5 ^a	5.400x10 ⁻⁸	0.0042%	5.80	5.786x10 ⁻⁸	0.0045%	6.05
7 ^a	7.072x10 ⁻⁸	0.0055%	11.55	7.072x10 ⁻⁸	0.0055%	11.23
9 ^a	3.857x10 ⁻⁹	0.0003%	2.74	2.572x10 ⁻⁹	0.0002%	2.28
11 ^a	2.186x10 ⁻⁸	0.0017%	-1.63	2.186x10 ⁻⁸	0.0017%	-1.68
13 ^a	7.715x10 ⁻⁹	0.0006%	1.14	6.429x10 ⁻⁹	0.0005%	1.26
15 ^a	6.429x10 ⁻⁹	0.0005%	5.49	6.429x10 ⁻⁹	0.0005%	5.34

Tabla 3.9 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de los flujos magnéticos del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas a tensión nominal.

Incrementar un 10% en la tensión nominal aumenta principalmente las magnitudes de la fundamental (10pp/9.94pp) y 3^a (0.013pp/0.008pp) armónica de los espectros de frecuencias obtenidos de los flujos magnéticos del molde sin pérdidas y el modelo con pérdidas, respecto a los espectros de frecuencias obtenidos a tensión nominal. En la tabla 3.10 se muestran los espectros de frecuencias de los flujos magnéticos de ambos modelos cuando se incrementa la tensión nominal, conservando ambos flujos magnéticos una forma de onda sinusoidal debido al bajo contenido de 3^a, 5^a, 7^a etc. armónicas, menor al 1%, para que no exista una deformación de onda.

No. Armónicas	Modelo Sin Pérdidas THD=0.249%			Modelo Con Pérdida THD=0.248%		
	Amplitud RMS [Wb]	Amplitud RMS [%]	Ángulo [Grados]	Amplitud RMS [Wb]	Amplitud RMS [%]	Ángulo [Grados]
1ª	1.414x10 ⁻³	100.000%	0.89	1.406x10 ⁻³	100.000%	0.88
3ª	1.273x10 ⁻⁶	0.0900%	-41.59	1.202x10 ⁻⁶	0.0855%	-41.34
5ª	1.414x10 ⁻⁸	0.0010%	2.21	1.697x10 ⁻⁸	0.0012%	2.45
7ª	6.930x10 ⁻⁸	0.0049%	9.50	6.930x10 ⁻⁸	0.0049%	9.35
9ª	3.536x10 ⁻⁸	0.0025%	7.17	3.394x10 ⁻⁸	0.0024%	6.75
11ª	1.131x10 ⁻⁸	0.0008%	0.21	1.273x10 ⁻⁸	0.0009%	0.025
13ª	1.839x10 ⁻⁸	0.0013%	-1.04	1.697x10 ⁻⁸	0.0012%	-0.67
15ª	1.414x10 ⁻⁹	0.0001%	2.91	1.414x10 ⁻⁹	0.0001%	3.68

Tabla 3.10 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de los flujos magnéticos del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas al incrementar la tensión nominal un 10%.

Disminuir un 10% la tensión nominal decrece principalmente las magnitudes de la fundamental (10pp/9.94) y 3ª (0.022pp/0.022pp) armónica de los espectros de frecuencias obtenidos de los flujos magnéticos del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, respecto a los espectros de frecuencias obtenidos a tensión nominal. En la tabla 3.11 se muestran los análisis espectrales de los flujos magnéticos de ambos modelos cuando se disminuye la tensión nominal, conservando ambos flujos magnéticos una forma de onda sinusoidal debido al bajo contenido de 3ª, 5ª, 7ª etc. armónicas, menor al 1%, para que no exista una deformación de onda.

No. Armónicas	Modelo Sin Pérdidas THD=0.241%			Modelo Con Pérdida THD=0.241		
	Amplitud RMS [Wb]	Amplitud RMS [%]	Ángulo [Grados]	Amplitud RMS [Wb]	Amplitud RMS [%]	Ángulo [Grados]
1ª	1.157x10 ⁻³	100.000%	0.75	1.150x10 ⁻³	100.000%	0.74
3ª	7.070x10 ⁻⁷	0.0611%	-33.07	7.070x10 ⁻⁷	0.0615%	-32.61
5ª	1.412x10 ⁻⁷	0.0122%	11.82	1.412x10 ⁻⁷	0.0123%	12.64
7ª	5.207x10 ⁻⁸	0.0045%	8.91	4.860x10 ⁻⁸	0.0042%	8.34
9ª	2.199x10 ⁻⁸	0.0019%	-1.97	2.314x10 ⁻⁸	0.0020%	-2.26
11ª	1.620x10 ⁻⁸	0.0014%	-0.71	1.504x10 ⁻⁸	0.0013%	-0.91
13ª	5.786x10 ⁻⁹	0.0005%	4.70	6.943x10 ⁻⁹	0.0006%	3.97
15ª	5.786x10 ⁻⁹	0.0005%	5.08	5.786x10 ⁻⁹	0.0005%	5.54

Tabla 3.11 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de los flujos magnéticos del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas al disminuir la tensión nominal un 10%.

Las distorsiones armónicas totales de la corriente de vacío, flujo magnético y tensión inducida obtenidas de ambos modelos para los distintos niveles de tensión se muestran en la tabla 3.12. En el modelo sin pérdidas la distorsión armónica total de la corriente de vacío al incrementar la tensión nominal aumenta 0.49pp como en el flujo magnético 0.005pp y en la tensión inducida 0.04pp, respecto a los THD_{Nominal} del modelo sin pérdidas, sin embargo, al disminuir la tensión aplicada la distorsión armónica total de la corriente de vacío disminuye 0.42pp como en el flujo magnético 0.003pp y en la tensión inducida 0.035pp, respecto a los THD_{Nominal} del modelo sin pérdidas. En el modelo con pérdidas al incrementar la tensión nominal, la distorsión armónica total de la corriente de

vacío aumenta 0.92pp como en el flujo magnético 0.004pp y en la tensión inducida 0.032pp, respecto a los $\text{THD}_{\text{Nominal}}$ del modelo con pérdidas, en cambio, al disminuir la tensión nominal la distorsión de la corriente de vacío disminuye 1.07pp como en el flujo magnético 0.003pp y en la tensión inducida 0.075pp, respecto a los $\text{THD}_{\text{Nominal}}$ del modelo con pérdidas.

Tensión	Modelo sin pérdidas			Modelo con pérdidas		
	THD_I	$\text{THD}_{\text{Flujo}}$	THD_{Eind}	THD_I	$\text{THD}_{\text{Flujo}}$	THD_{Eind}
Nominal	22.36%	0.244%	0.322%	19.38%	0.244%	0.249%
Aumento del 10%	22.85%	0.249%	0.362%	20.30%	0.248%	0.281%
Disminución del 10%	21.94%	0.241%	0.287%	18.31%	0.241%	0.219%

Tabla 3.12 Distorsiones armónicas totales obtenidas de la corriente de vacío, flujo magnético y tensión inducida del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, par el transformador monofásico con bobinados de 127 V.

La presencia de pequeñas cantidades porcentuales de armónicas en el flujo magnético mostrados en las tablas 3.9, 3.10 y 3.11, para ambos modelos, no afectan su forma de onda sinusoidal, siendo los porcentajes de la tabla 3.12 los que confirman tal aseveración. El flujo magnético no presentó deformación de onda debido al bajo contenido de 3^a, 5^a y 7^a armónicas no superando el 1% para que perdiera sus características sinusoidales.

El nivel de distorsión armónica total en la corriente de vacío es considerable en comparación con las obtenidas en la tensión inducida y en el flujo magnético, sin embargo, el nivel de distorsión se debe principalmente al contenido de 3^a armónica y en menor medida a la 5^a y 7^a armónica. La distorsión armónica total en la corriente de vacío al aumentar o disminuir la tensión de suministro varía considerablemente en ambos modelos, siendo adecuado considerar la resistencia de pérdida para un análisis de armónicas por reducir el nivel de distorsión armónica total y aproxima a un resultado real.

3.6 Caso 2. Transformador monofásico 220 V

La presente simulación muestra la corriente de vacío, flujo magnético y tensión inducida de una unidad monofásica presentada en el capítulo 2 con tensión nominal de 220 V, siendo considerado el modelo sin pérdidas presentado en el apartado (3.2) y el modelo con pérdidas del apartado (3.3) para un análisis de magnitudes y distorsiones armónicas totales en estado estable al incrementar y disminuir la tensión nominal un 10%.

3.6.1 Corriente de vacío en unidad monofásica

En la figura 3.15 se muestran las corrientes de vacío generadas con el modelo del apartado (3.2) y en la figura 3.16 muestran las corrientes generadas con el modelo del apartado (3.3), obtenidas a tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión un 10%.

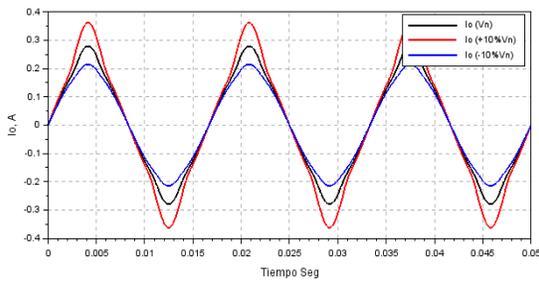


Figura 3.15 Corrientes de vacío en el lado primario del transformador monofásico obtenidas con el modelo sin pérdidas a tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión un 10%.

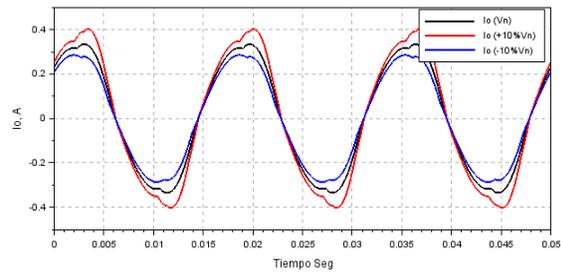


Figura 3.16 Corrientes de vacío en el lado primario del transformador monofásico obtenidas con el modelo de pérdidas a tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión un 10%.

Aplicando un análisis espectral a la corriente de vacío generada a tensión nominal de la figura 3.15, se obtienen los primeros quince armónicas con valor eficaz y ángulos de fase de las figuras 3.17 y 3.18 respectivamente, pero al extender este análisis a la corriente en vacío generada a tensión nominal mostrada en la figura 3.16 se obtiene el espectro de frecuencia y ángulos de fase de las figuras 3.19 y 3.20 respectivamente. Los espectros de frecuencias que se muestran en tablas posteriores de la corriente de vacío, flujo magnético y tensión inducida son únicamente para las ocho primeras armónicas impares.

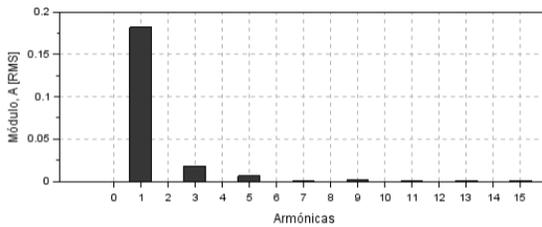


Figura 3.17 Espectros de frecuencia de la corriente de vacío obtenida con el modelo sin pérdidas a tensión nominal.

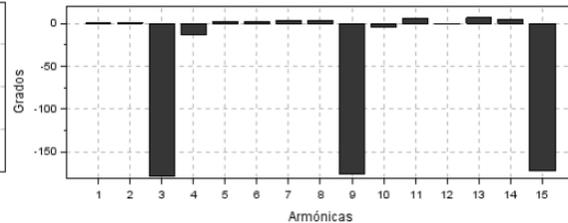


Figura 3.18 Ángulos de fase del espectro de frecuencias de la corriente de vacío obtenida con el modelo sin pérdidas a tensión nominal.

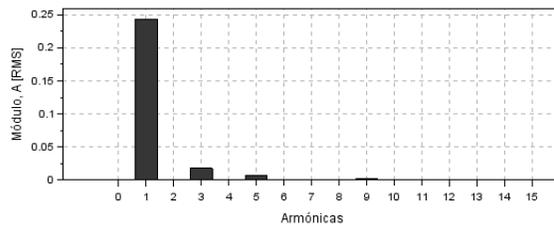


Figura 3.19 Espectros de frecuencia de la corriente de vacío obtenida con el modelo de pérdidas a tensión nominal.

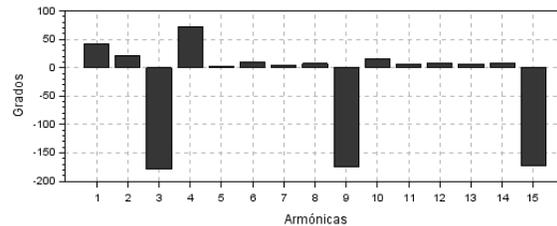


Figura 3.20 Ángulos de fase del espectro de frecuencia de la corriente de vacío obtenida con el modelo de pérdidas a tensión nominal.

Al comparar los espectros de frecuencias obtenidos de la corriente de vacío de ambos modelos a tensión nominal en la tabla 3.13, la magnitud de la fundamental del modelo con pérdidas es mayor por 33.69pp como las magnitudes de 11^a (0.043pp), 15^a (0.022pp) pero las magnitudes de 3^a (0.23pp), 7^a (0.076pp), 9^a (0.016pp) y 13^a (0.027pp) son menor debido a la corriente que circula por la resistencia de pérdidas, pero al ser un

elemento lineal y al sumarse la corriente de ésta a la producida en la inductancia variable se obtiene una nueva corriente con un ángulo de fase distinto. La corriente de vacío obtenida del modelo sin pérdidas presenta un factor de cresta de 1.576, por lo que la forma de onda es esbelta y elevada en sus crestas y valles, en cambio la corriente de vacío obtenida del modelo de pérdidas presenta una forma de onda ancha y plana debido a su factor de cresta de 1.365. Las magnitudes de las fundamentales del modelo con pérdidas y el modelo sin pérdidas presentaron un ángulo de fase de 42.55 grados y 0.50 grados respectivamente, siendo las diferencias de los ángulos de fase para las magnitudes de 3^a, 9^a, 13^a y 15^a armónicas de ambos modelos menor a 5pp. El porcentaje anterior es un limitante para observar el comportamiento y cambio en los ángulos de fase.

No. Armónicas	Modelo Sin Pérdida THD=10.62%			Modelo Con Pérdida THD=7.78%		
	Amplitud RMS [A]	Amplitud RMS [%]	Ángulo [Grados]	Amplitud RMS [A]	Amplitud RMS [%]	Ángulo [Grados]
1 ^a	0.18190	100.000%	0.50	0.24320	100.000%	42.55
3 ^a	0.01814	9.9720%	-178.34	0.01771	7.2810%	-178.5
5 ^a	0.00644	3.5423%	2.68	0.00644	2.6475%	2.83
7 ^a	0.00100	0.5498%	3.37	0.00086	0.3537%	3.84
9 ^a	0.00220	1.2115%	-175.26	0.00217	0.8930%	-175.4
11 ^a	0.00026	0.1435%	5.59	0.00034	0.1389%	6.15
13 ^a	0.00097	0.5314%	6.60	0.00092	0.3793%	6.73
15 ^a	0.00044	0.2429%	-171.88	0.00048	0.1988%	-172.16

Tabla 3.13 Comparación de espectros de frecuencia obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas a tensión nominal.

Incrementar un 10% la tensión nominal aumenta principalmente las magnitudes de la fundamental (22.10pp/22.33pp) y 3^a (7.71pp/7.47pp) armónica de los espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, respecto a los espectros de frecuencias obtenidos a tensión nominal. En la tabla 3.14 se muestran los espectros de frecuencias de las corrientes de vacío de ambos modelos cuando se incrementa la tensión nominal.

Al comparar los espectros de frecuencias de la tabla 3.14 la magnitud de la fundamental del modelo con pérdidas es mayor por 27.78pp como las magnitudes de 11^a (0.043pp) y 13^a (0.022pp) armónicos, pero las magnitudes de 3^a (0.39pp), 5^a (0.067pp), 7^a (0.032pp), 9^a (0.004pp) y 15^a (0.018pp) armónicas son menor. La corriente de vacío obtenida del modelo sin pérdidas presenta un factor de cresta de 1.652, por lo que la forma de onda es esbelta como elevada en sus crestas y valles, pero, la corriente obtenida del modelo con pérdidas presenta una forma de onda ancha y plana debido al factor de cresta de 1.407. Las magnitudes de las fundamentales del modelo con pérdidas y el modelo sin pérdidas presentaron un ángulo de fase de 39.68 grados y 0.54 grados respectivamente, siendo las diferencias de los ángulos de fase para las magnitudes de 3^a, 5^a, 9^a, 11^a y 15^a armónicas de ambos modelos menor a 5pp.

No. Armónicas	Modelo Sin Pérdida THD=15.08%			Modelo Con Pérdida THD=11.50%		
	Amplitud RMS [A]	Amplitud RMS [%]	Ángulo [Grados]	Amplitud RMS [A]	Amplitud RMS [%]	Ángulo [Grados]
1ª	0.22210	100.000%	0.54	0.28381	100.000%	39.68
3ª	0.03216	14.4811%	-178.21	0.03129	11.0258%	-178.32
5ª	0.00961	4.3264%	2.96	0.00946	3.3323%	3.06
7ª	0.00105	0.4715%	2.91	0.00098	0.3441%	3.33
9ª	0.00065	0.2921%	-175.15	0.00064	0.2240%	-175.7
11ª	0.00124	0.5588%	-173.92	0.00128	0.4517%	-174.1
13ª	0.00010	0.0446%	4.39	0.00021	0.0754%	6.81
15ª	0.00132	0.5961%	8.28	0.00128	0.4508%	8.31

Tabla 3.14 Comparación de espectros de frecuencia obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas al incrementar la tensión nominal un 10%

Disminuir un 10% la tensión nominal reduce principalmente las magnitudes de la fundamental (16.76pp/18.25pp) y 3ª (4.72pp/4.70pp) armónica de los espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, respecto a los espectros de frecuencias obtenidos a tensión nominal. En la tabla 3.15 se muestran los espectros de frecuencias de las corrientes de vacío de ambos modelos cuando se disminuye la tensión nominal.

Al comparar los espectros de frecuencias de la tabla 3.15 la magnitud de la fundamental del modelo con pérdidas es mayor por 38.7pp como las magnitudes de 7ª (0.039pp) y 13ª (0.026pp) armónicas, pero las magnitudes de 3ª (0.26pp), 5ª (0.09pp), 9ª (0.06pp), 11ª (0.03pp) y 15ª (0.046pp) armónicas son menor. La corriente de vacío obtenida del modelo sin pérdidas presenta un factor de cresta de 1.553, por lo que la forma de onda es esbelta y elevada en sus crestas y valles, pero el modelo con pérdidas presenta una forma de onda ancha y plana debido a su factor de cresta de 1.357. Las magnitudes de las fundamentales del modelo con pérdidas y el modelo sin pérdidas presentaron un ángulo de fase de 44.75 grados y 0.48 grados respectivamente, siendo las diferencias de los ángulos de fase para las magnitudes de 3ª, 7ª, 9ª, 11ª, 13ª y 15ª armónicas de ambos modelos menor a 5pp.

No. Armónicas	Modelo Sin Pérdida THD=7.39%			Modelo Con Pérdida THD=5.15%		
	Amplitud RMS [A]	Amplitud RMS [%]	Ángulo [Grados]	Amplitud RMS [A]	Amplitud RMS [%]	Ángulo [Grados]
1ª	0.15141	100.000%	0.48	0.21001	100.000%	44.75
3ª	0.00956	6.3128%	-178.41	0.00917	4.3661%	-178.7
5ª	0.00554	3.6578%	2.54	0.00541	2.5749%	2.69
7ª	0.00177	1.1707%	-176.36	0.00183	0.8722%	-176.62
9ª	0.00050	0.3323%	-175.45	0.00040	0.1891%	-176.14
11ª	0.00105	0.6921%	5.38	0.00101	0.4791%	5.54
13ª	0.00051	0.3352%	-173.29	0.00055	0.2604%	-173.58
15ª	0.00019	0.1230%	-172.12	0.00012	0.0820%	-172.69

Tabla 3.15 Comparación de espectros de frecuencia obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas al disminuir la tensión nominal un 10%.

3.6.2 Tensión inducida en unidad monofásica

Las formas de onda de la tensión inducida referida al lado primario en la unidad TA, obtenidas de ambos modelos y a diferentes niveles de tensión se muestran en las figuras 3.21 y 3.22, sin embargo, a simple vista no es posible apreciar el pequeño contenido armónico presente en las formas de onda.

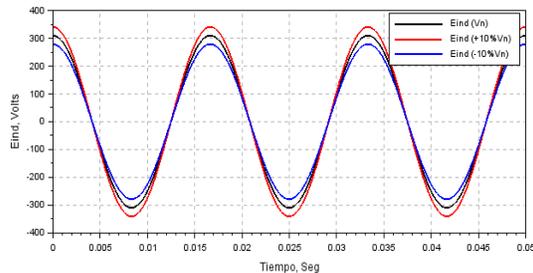


Figura 3.21 Tensiones inducidas en el lado primario obtenidas con el modelo sin pérdidas a tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión un 10%.

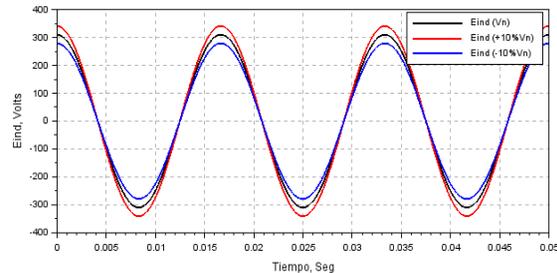


Figura 3.22 Tensiones inducidas en el lado primario obtenidas con el modelo de pérdidas a tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión un 10%.

La comparación de los espectros de frecuencias obtenidos de la tensión inducida de ambos modelos a tensión nominal se muestra en la tabla 3.16, siendo la fundamental menor en el modelo con pérdidas como las magnitudes de 3^a, 5^a, 7^a, 9^a, 11^a, 13^a y 15^a armónicas debido a la caída de tensión por el incremento en la corriente de vacío. Las tensiones inducidas obtenidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas presentaron un factor de cresta de 1.413 y 1.410 respectivamente, por lo que se consideran ambas formas de onda sinusoidales al presentar un factor de cresta muy aproximado al de una onda senoidal.

No. Armónicas	Modelo Sin Pérdida THD=0.152%			Modelo Con Pérdida THD=0.105%		
	Amplitud RMS [V]	Amplitud RMS [%]	Ángulo [Grados]	Amplitud RMS [%]	Amplitud RMS [V]	Ángulo [Grados]
1 ^a	219.45530	100.000%	90.50	219.02297	100.000%	90.50
3 ^a	0.18895	0.0861%	66.29	0.10380	0.0474%	34.95
5 ^a	0.09985	0.0455%	-115.67	0.03775	0.0172%	151.35
7 ^a	0.02085	0.0095%	-119.72	0.00505	0.0023%	117.57
9 ^a	0.05838	0.0266%	83.19	0.01273	0.0058%	32.89
11 ^a	0.00834	0.0038%	-107.3	0.00198	0.0009%	117.76
13 ^a	0.03643	0.0166%	-93.01	0.00549	0.0025%	155.42
15 ^a	0.01909	0.0087%	90.87	0.00285	0.0013%	48.84

Tabla 3.16 Comparación de espectros de frecuencia obtenidos de las tensiones inducidas del modelo sin pérdidas y modelo con pérdidas a tensión nominal.

El incrementar un 10% la tensión nominal aumenta principalmente las magnitudes de la fundamental (9.97pp/9.98pp) y 3^a (0.05pp/0.03pp) armónica de los espectros de frecuencias obtenidos de las tensiones inducidas del modelo sin pérdidas y el modelo con

pérdidas, respecto a los espectros de frecuencias obtenidos a tensión nominal. En la tabla 3.17 se muestran los espectros de frecuencias de las tensiones inducidas de ambos modelos cuando se incrementa la tensión nominal, siendo la fundamental menor en el modelo con pérdidas como las magnitudes de 3^a, 5^a, 7^a, 9^a, 11^a, 13^a y 15^a armónicas. Las tensiones inducidas obtenidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas presentaron un factor de cresta de 1.415 y 1.414 respectivamente, por lo que se consideran sinusoidales ambas formas de onda al presentar un factor de cresta muy similar al de una onda senoidal.

No. Armónicas	Modelo Sin Pérdida THD=0.198%			Modelo Con Pérdida THD=0.121%		
	Amplitud RMS [V]	Amplitud RMS [%]	Ángulo [Grados]	Amplitud RMS [V]	Amplitud RMS [%]	Ángulo [Grados]
1 ^a	241.35887	100.000%	90.53	240.94615	100.000%	90.53
3 ^a	0.33501	0.1388%	63.59	0.18343	0.0761%	24.02
5 ^a	0.14892	0.0617%	-113.43	0.05551	0.0230%	158.4
7 ^a	0.02196	0.0091%	-122.49	0.00579	0.0024%	118.06
9 ^a	0.01714	0.0071%	85.66	0.00362	0.0015%	68.45
11 ^a	0.03982	0.0165%	86.52	0.00748	0.0031%	39.41
13 ^a	0.00362	0.0015%	141.86	0.00121	0.0005%	113.9
15 ^a	0.05744	0.0238%	-89.68	0.00748	0.0031%	168.42

Tabla 3.17 Comparación de espectros de frecuencia obtenidos de las tensiones inducidas del modelo sin pérdidas y modelo con pérdidas al incrementar la tensión nominal un 10%.

Disminuir un 10% la tensión nominal reduce principalmente las magnitudes de la fundamental (9.98pp/9.98pp) y 3^a (0.04pp/0.02pp) armónica de los espectros de frecuencias obtenidos de las tensiones inducidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, respecto a los espectros de frecuencias obtenidos a tensión nominal. En la tabla 3.18 se muestran los análisis espectrales de la tensión inducida de ambos modelos cuando se disminuye la tensión nominal, siendo la fundamental menor en el modelo con pérdidas al igual que las magnitudes de 3^a, 5^a, 7^a, 9^a, 11^a, 13^a y 15^a armónicas. La tensión inducida en ambos presenta un factor de cresta idéntico con valor de 1.414, por lo que ambas formas de onda son sinusoidales, por presentar un factor de cresta muy parecido al de una onda senoidal.

No. Armónicas	Modelo Sin Pérdida THD=0.127%			Modelo Con Pérdida THD=0.097%		
	Amplitud RMS [V]	Amplitud RMS [%]	Ángulo [Grados]	Amplitud RMS [V]	Amplitud RMS [%]	Ángulo [Grados]
1 ^a	197.56340	100.000%	90.48	197.13864	100.000%	90.48
3 ^a	0.09957	0.0504%	70.26	0.05374	0.0273%	50.32
5 ^a	0.08574	0.0434%	-116.2	0.03161	0.0160%	149.52
7 ^a	0.03714	0.0188%	80.78	0.01067	0.0054%	47.31
9 ^a	0.01324	0.0067%	85.51	0.00237	0.0012%	73.10
11 ^a	0.03359	0.0170%	-96.44	0.00593	0.0030%	150.43
13 ^a	0.01916	0.0097%	88.71	0.00316	0.0016%	49.08
15 ^a	0.00810	0.0041%	91.12	0.00079	0.0004%	78.02

Tabla 3.18 Comparación de espectros de frecuencia obtenidos de las tensiones inducidas del modelo sin pérdidas y modelo con pérdidas al disminuir la tensión nominal un 10%.

3.6.3 Flujo magnético en unidad monofásica

La forma de onda del flujo magnético referida al lado primario en la unidad “TA” obtenidas para ambos modelos y a diferentes niveles de tensión se muestran en las figuras 3.23 y 3.24, sin embargo, a simple vista no es posible apreciar el pequeño contenido armónico, por ende, las primeras ocho armónicas impares del análisis espectral junto con sus ángulos de fase se muestran en tabla 3.19, conservando ambos flujos magnéticos una forma de onda sinusoidal debido al bajo contenido de 3^a, 5^a, 7^a etc. armónicas, menor a 1%, para que no exista deformación de onda.

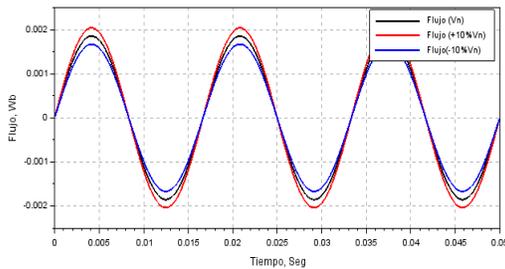


Figura 3.23 Flujos magnéticos en el lado primario obtenidos con el modelo sin pérdidas a tensión nominal y al aumentar o disminuir la tensión un 10%.

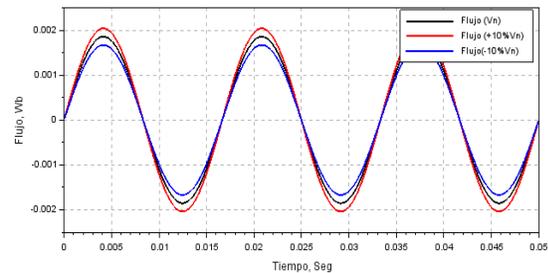


Figura 3.24 Flujos magnéticos en el lado primario obtenidos con el modelo con pérdidas a tensión nominal y al aumentar o disminuir la tensión un 10%.

No. Armónicas	Modelo Sin Pérdida THD=0.233%			Modelo Con Pérdida THD=0.233%		
	Amplitud RMS [Wb]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]	Amplitud RMS [Wb]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]
1 ^a	1.311x10 ⁻³	100.000%	0.50	1.309x10 ⁻³	100.000%	0.50
3 ^a	6.609x10 ⁻⁷	0.0504%	-9.03	3.567x10 ⁻⁷	0.0273%	-8.80
5 ^a	5.691x10 ⁻⁷	0.0434%	4.85	2.098x10 ⁻⁷	0.0160%	5.12
7 ^a	2.465x10 ⁻⁷	0.0188%	2.11	7.082x10 ⁻⁸	0.0054%	2.35
9 ^a	8.786x10 ⁻⁸	0.0067%	0.48	1.574x10 ⁻⁸	0.0012%	0.81
11 ^a	2.229x10 ⁻⁷	0.0170%	2.45	3.934x10 ⁻⁸	0.0030%	2.81
13 ^a	1.272x10 ⁻⁷	0.0097%	3.78	2.098x10 ⁻⁸	0.0016%	4.27
15 ^a	5.377x10 ⁻⁸	0.0041%	3.72	5.246x10 ⁻⁹	0.0004%	3.89

Tabla 3.19 Comparación de espectros de frecuencia obtenidos de los flujos magnéticos del modelo sin pérdidas y modelo con pérdidas a tensión nominal.

El incrementar un 10% la tensión nominal aumenta principalmente las magnitudes de la fundamental (10pp/9.96pp) y 3^a (0.013pp/0.013pp) armónica de los espectros de frecuencias obtenidos de los flujos magnéticos del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, respecto a los espectros de frecuencias obtenidos a tensión nominal. En la tabla 3.20 se muestran los espectros de frecuencias de los flujos magnéticos de ambos modelos cuando se incrementa la tensión nominal, conservando ambos flujos magnéticos una forma de onda sinusoidal debido al bajo contenido de 3^a, 5^a, 7^a etc. armónicas, menor al 1%, para que no exista una deformación de onda.

No. Armónicas	Modelo Sin Pérdida THD=0.233%			Modelo Con Pérdida THD=0.233%		
	Amplitud RMS [Wb]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]	Amplitud RMS [Wb]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]
1 ^a	1.443x10 ⁻³	100.000%	0.53	1.436x10 ⁻³	100.000%	0.53
3 ^a	4.000x10 ⁻⁷	0.0277%	-14.65	4.000x10 ⁻⁷	0.0279%	-14.33
5 ^a	6.70810 ⁻⁸	0.0047%	6.36	6.633x10 ⁻⁸	0.0046%	6.25
7 ^a	5.193x10 ⁻⁹	0.0004%	2.27	4.905x10 ⁻⁹	0.0003%	2.06
9 ^a	2.452x10 ⁻⁹	0.0002%	1.32	2.452x10 ⁻⁹	0.0002%	1.76
11 ^a	3.895x10 ⁻⁹	0.0003%	1.80	4.039x10 ⁻⁹	0.0003%	1.64
13 ^a	2.885x10 ⁻¹⁰	0.0000%	3.26	5.770x10 ⁻¹⁰	0.0000%	3.10
15 ^a	3.029x10 ⁻⁹	0.0002%	3.70	3.029x10 ⁻⁹	0.0002%	4.32

Tabla 3.20 Comparación de espectros de frecuencia obtenidos de los flujos magnéticos del modelo sin pérdidas y modelo con pérdidas al incrementar la tensión nominal un 10%.

La disminución de un 10% en la tensión nominal reduce principalmente las magnitudes de la fundamental (10pp/9.96pp) y 3^a (0.007pp/0.007pp) armónica de los espectros de frecuencias obtenidos de los flujos magnéticos del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, respecto a los análisis espectrales obtenidos a tensión nominal. En la tabla 3.21 se muestran los análisis espectrales de los flujos magnéticos de ambos modelos cuando se disminuye la tensión nominal, conservando ambos flujos magnéticos una forma de onda sinusoidal debido al bajo contenido de 3^a, 5^a, 7^a etc. armónicas, menor al 1%, para que no exista deformación de onda.

No. Armónicas	Modelo Sin Pérdida THD=0.232%			Modelo Con Pérdida THD=0.233%		
	Amplitud RMS [Wb]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]	Amplitud RMS [Wb]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]
1 ^a	1.180x10 ⁻³	100.000%	0.48	1.175x10 ⁻³	100.000%	0.48
3 ^a	9.997x10 ⁻⁸	0.0085%	-4.92	9.997x10 ⁻⁸	0.0085%	-4.68
5 ^a	3.871x10 ⁻⁸	0.0033%	4.98	3.789x10 ⁻⁸	0.0032%	4.60
7 ^a	8.852x10 ⁻⁹	0.0008%	0.31	9.206x10 ⁻⁹	0.0008%	0.72
9 ^a	2.007x10 ⁻⁹	0.0002%	1.41	1.534x10 ⁻⁹	0.0001%	1.88
11 ^a	3.305x10 ⁻⁹	0.0003%	3.18	3.187x10 ⁻⁹	0.0003%	2.73
13 ^a	1.416x10 ⁻⁹	0.0001%	3.18	1.416x10 ⁻⁹	0.0001%	1.92
15 ^a	4.721x10 ⁻¹⁰	0.0000%	3.03	2.361x10 ⁻¹⁰	0.0000%	3.06

Tabla 3.21 Comparación de espectros de frecuencia obtenidos de los flujos magnéticos del modelo sin pérdidas y modelo con pérdidas al disminuir la tensión nominal un 10%.

Las distorsiones armónicas totales de la corriente de vacío, flujo magnético y tensión inducida obtenidas de ambos modelos para los distintos niveles de tensión se muestran en la tabla 3.22. En el modelo sin pérdidas la distorsión armónica total de la corriente de vacío al incrementar la tensión nominal aumenta 4.46pp como en el flujo magnético 0.001pp y en la tensión inducida 0.046pp, respecto a los THD_{Nominal} del modelo sin pérdidas, sin embargo, al disminuir la tensión nominal la distorsión de la corriente de vacío disminuye 3.23pp como en el flujo magnético 0.002pp y en la tensión inducida 0.071pp, respecto a los THD_{Nominal} del modelo sin pérdidas. En el modelo con pérdidas la distorsión armónica total de la corriente de vacío aumenta 3.84pp como en el flujo

magnético 0.001pp y en la tensión inducida 0.016pp, respecto a los $THD_{Nominal}$ del modelo con pérdidas, en cambio, al disminuir la tensión nominal la distorsión de la corriente de vacío disminuye 2.63pp como en el flujo magnético 0.002pp y en la tensión inducida 0.008pp, respecto a los $THD_{Nominal}$ del modelo con pérdidas.

Tensión	Modelo sin pérdidas			Modelo con pérdidas		
	THD_I	THD_{Flujo}	THD_{Eind}	THD_I	THD_{Flujo}	THD_{Eind}
Nominal	10.62%	0.233%	0.152%	7.66%	0.233%	0.105%
Aumento del 10%	15.08%	0.234%	0.198%	11.50%	0.234%	0.121%
Disminución del 10%	7.39%	0.232%	0.127%	5.15%	0.231%	0.097%

Tabla 3.22 Distorsiones armónicas totales obtenidas de la corriente de vacío, flujo magnético y tensión inducida del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, para el transformador monofásico con bobinados de 220 V.

La presencia de pequeñas cantidades porcentuales de armónicas en el flujo magnético mostrados en las tablas 3.19, 3.20 y 3.21, para ambos modelos, no afectan la forma de onda del flujo magnético, siendo los porcentajes de la tabla 3.22 los que confirman tal aseveración, siendo el contenido de 3^a, 5^a, 7^a etc. armónicas menor al 1% ante la sobretensión o pérdida de ésta, sin embargo al rebasar este porcentaje la forma de onda del flujo magnético comienza a perder sus propiedades sinusoidales, por tal motivo es adecuado considerar la resistencia de pérdida en un análisis de armónicas ya que reduce el nivel de distorsión armónica total en la corriente de vacío, flujo magnético y tensión inducida, cuando es considerada la saturación del núcleo.

3.7 Caso 3. Banco trifásico conexión Yy0

En este apartado se muestran las formas de onda de las corrientes de vacío, tensiones inducidas y flujos magnéticos para la conexión trifásica Yy0 aterrizada formada a base de unidades monofásicas con tensión nominal de servicio de 127 V en operación sin carga, considerando el modelo sin pérdidas del apartado (3.2) y el modelo con pérdidas del apartado (3.3), limitándose al estudio a una fase por ser un sistema balanceado para un análisis de magnitudes y distorsiones armónicas totales en estado estable.

Las unidades de transformación experimentales son independientes debido a la disposición en la conexión Yy0 aterrizada, obteniéndose las mismas magnitudes y ángulos de fase de las corrientes de vacío para la “fase a” de esta conexión en el subapartado (3.5.1), al igual que las tensiones inducidas, flujos magnéticos de la unidad “TA” para ambos modelos en los subapartados (3.5.2) y (3.5.3) respectivamente, aunque la única diferencia son los ángulos de desfaseamiento en la tensión aplicada por proceder de un sistema trifásico balanceado y para las fases restantes los análisis presentarían las mismas magnitudes, pero con ángulos de fase distintos debidos a los ángulos de desfaseamiento de la tensión nominal aplicada con 120 grados en adelanto y retraso, de esta manera se muestran únicamente las formas de onda y la distorsión armónica total en la corriente de vacío, tensión inducida y flujo magnético en este apartado.

3.7.1 Corriente de vacío, tensión inducida y flujo magnético en el modelo sin pérdidas

En la figura 3.25 se muestran las corrientes de vacío obtenidas mediante el modelo sin pérdidas para cada una de las fases del banco trifásico en conexión Yy0 aterrizada, para cada fase se muestran tres formas de onda una a tensión nominal y otras dos al incrementar y disminuir la tensión nominal un 10%.

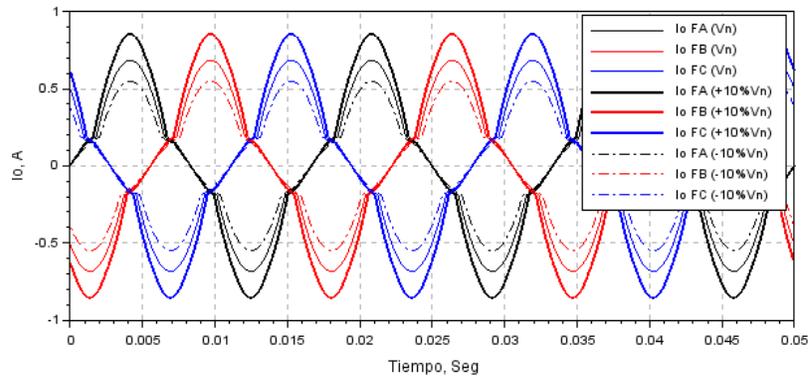


Figura 3.25 Corrientes de vacío en el lado primario del banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aterrizado, obtenidas con el modelo sin pérdidas a tensión nominal como al aumentar y disminuir la tensión nominal un 10%.

El banco trifásico en conexión Yy0 aterrizada alimentado a tensión nominal genera una corriente de vacío con una distorsión armónica total de 22.36%, pero al incrementar la tensión nominal un 10% la distorsión armónica total pasa a un valor de 22.85%, mayor a la obtenida a tensión nominal por una diferencia de 0.49pp, en cambio al ser disminuida la tensión nominal el mismo porcentaje la distorsión armónica total desciende a un valor de 21.9%, menor a la obtenida a tensión nominal por una diferencia de 0.91pp, observándose que ambas diferencias son menores a 1pp.

Las tensiones inducidas obtenidas con el modelo sin pérdidas a tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión un 10% para el banco trifásico en conexión Yy0 aterrizada se muestran en la figura 3.26. Al ser alimentado el banco trifásico a tensión nominal se produce una tensión inducida con una distorsión armónica total de 0.322%, pero al incrementar la tensión nominal un 10% la distorsión armónica total aumenta a un valor de 0.362%, mayor a la obtenida a tensión nominal por una diferencia de 0.04pp, en cambio, al disminuir la tensión nominal un 10% la distorsión armónica total decrece a un valor de 0.287%, menor a la obtenida a tensión nominal por una diferencia de 0.035pp, observándose que ambas diferencias son menores a 1pp.

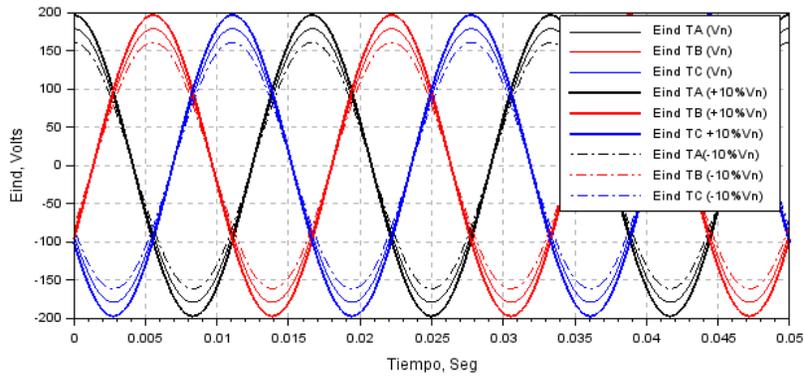


Figura 3.26 Tensiones inducidas en unidades monofásicas en el lado primario del banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aterrizado, obtenidas con el modelo sin pérdidas a tensión nominal y al aumentar o disminuir la tensión nominal un 10%.

Los flujos magnéticos obtenidos mediante el modelo sin pérdidas de las unidades monofásicas que componen el banco trifásico en conexión Yy0 aterrizada se muestran en la figura 3.27, los cuales conservan su forma de onda sinusoidal y no son afectados por la conexión trifásica, por lo tanto, cada flujo magnético generado es independiente, aunque a simple vista presenta un pequeño contenido armónico compuesto principalmente de una 3ª armónica que no es apreciado a simple vista, por lo que es necesario ver estas componentes a través de los espectros de frecuencias.

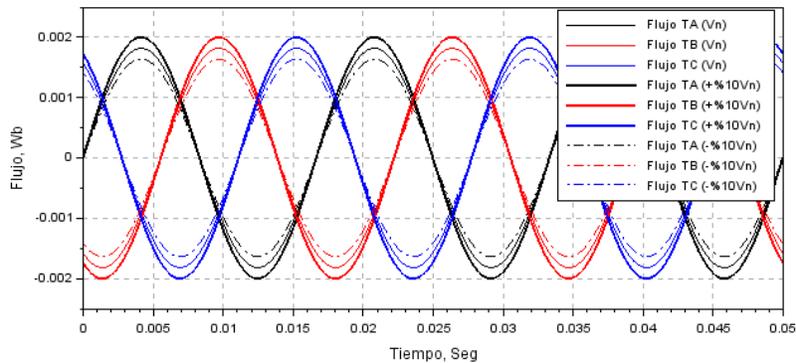


Figura 3.27 Flujos magnéticos en unidades monofásicas del banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aterrizado, obtenidos con el modelo sin pérdidas a tensión nominal y al aumentar o disminuir la tensión nominal un 10%.

La distorsión armónica total del flujo magnético generado a tensión nominal presenta un valor de 0.244%, pero al ser incrementada la tensión nominal un 10% la distorsión armónica total aumenta a un valor de 0.249%, siendo mayor este último resultado al obtenido a tensión nominal por una diferencia de 0.005pp, en cambio al disminuir la tensión nominal un 10% la distorsión armónica total disminuye a un valor de 0.241%, menor a la obtenida a tensión nominal por una diferencia de 0.003pp, sin embargo, ante estas variaciones de tensión el grado de distorsión del flujo magnético no

cambia considerablemente y el contenido de 3^a, 5^a, 7^a etc. armónicas es menor al 1%, por lo que el flujo magnético conserva su forma de onda sinusoidal.

El porcentaje de distorsión total al utilizar el modelo sin pérdidas no cambia considerablemente para la corriente de vacío, tensión inducida y flujo magnético, al aumentar o disminuir la tensión nominal, sin embargo, los porcentajes de distorsión de las corrientes de vacío son altos debido a la presencia principalmente de la 3^a y 7^a armónicas, pero en menor cantidad de 5^a y 9^a armónicas.

3.7.2 Corriente de vacío, tensión inducida y flujo magnético en el modelo con pérdidas

Las corrientes de vacío obtenidas del modelo con pérdidas para el banco trifásico en conexión Yy0 aterrizada se muestran en la figura 3.28, en cada fase se muestran tres formas de onda, una a tensión nominal y otras dos al incrementar o disminuir la tensión un 10%. Debido a la resistencia de pérdidas las formas de onda obtenidas mediante este modelo son distintas a las generadas con el modelo sin pérdidas.

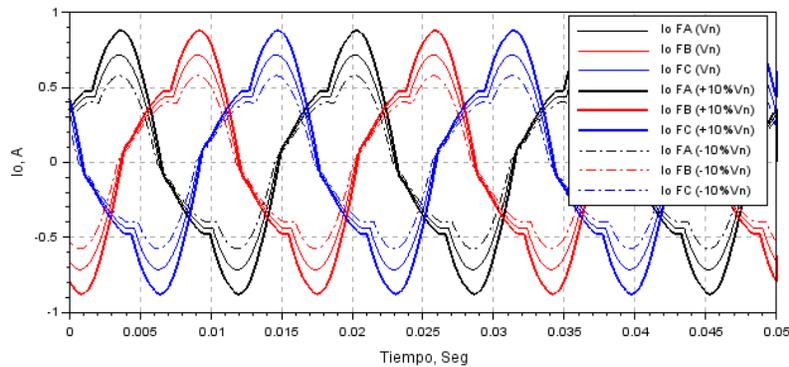


Figura 3.28 Corrientes de vacío en el lado primario del banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aterrizado, obtenidas con el modelo de pérdidas a tensión nominal y al aumentar o disminuir la tensión nominal un 10%.

En el apartado (3.5) se analizaron las corrientes de vacío para una sola fase por ser una unidad monofásica, en cambio la figura 3.26 contiene las tres fases por ser un sistema trifásico balanceado, sin embargo, las corrientes de la “fase a” en la conexión Yy0 aterrizada son las mismas a las mostradas en el apartado (3.5.1) para el modelo con pérdidas, por lo tanto, los flujos magnéticos, tensiones inducidas junto con los espectros de frecuencias son prácticamente iguales los cuales se muestran en los subapartados (3.5.2) y (3.5.3), por tal motivo únicamente se analizan las distorsiones armónicas totales.

La corriente de vacío del modelo con pérdidas a tensión nominal presenta una distorsión armónica total de 19.38% y al incrementar la tensión nominal un 10% la distorsión armónica total aumenta a un valor de 20.30%, mayor a la obtenida a tensión nominal por una diferencia de 0.92pp, en cambio al disminuir la tensión nominal un 10%

la distorsión armónica total decrece a un valor de 18.31%, menor al obtenido a tensión nominal por una diferencia de 1.07pp, sin embargo, una de estas diferencias porcentuales supera el 1%.

Al comparar los porcentajes de distorsión armónica total de la corriente de vacío de ambos modelos se obtuvo menor distorsión al considerar la resistencia de pérdidas, siendo la diferencia entre las distorsiones obtenidas en ambos modelos a tensión nominal de 2.98pp, en aumento de la tensión nominal de 2.55pp y en la disminución de la tensión nominal de 3.63pp con referencia al modelo sin pérdidas.

Las tensiones inducidas obtenidas del modelo con pérdidas para las unidades monofásicas del banco trifásico en conexión Yy0 aterriza al aplicar tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión un 10% se muestran en la figura 3.29.

La tensión inducida en el modelo con pérdidas obtenida a tensión nominal presenta una distorsión armónica total de 0.249%, pero al incrementar la tensión un 10% la distorsión armónica total aumenta a un valor de 0.281%, mayor a la obtenida a tensión nominal por una diferencia de 0.032pp, en cambio, al disminuir la tensión nominal el mismo porcentaje la distorsión armónica total decrece con un valor de 0.219%, menor a la obtenida a tensión nominal por una diferencia de 0.03pp, siendo estas diferencias porcentuales menor al 1%.

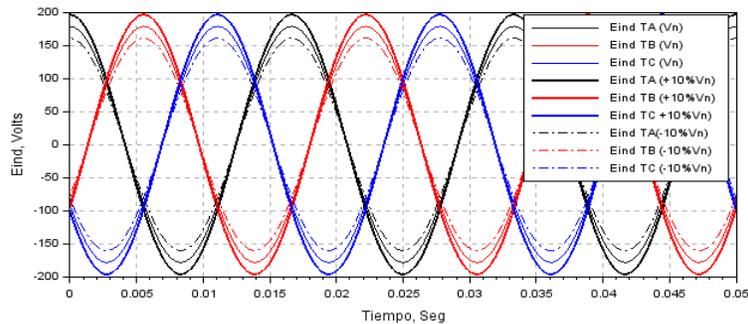


Figura 3.29 Tensiones inducidas en unidades monofásicas en el lado primario del banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aterrizado, obtenidas con el modelo de pérdidas a tensión nominal y al aumentar o disminuir la tensión nominal un 10%.

Al comparar los porcentajes de distorsión armónica total de la tensión inducida en ambos modelos se obtuvo menor distorsión al considerar la resistencia de pérdida, siendo la diferencia entre las distorsiones obtenidas en ambos modelos a tensión nominal de 0.07pp, al aumentar un 10% esta tensión de 0.08pp y al disminuir 10% esta tensión de 0.07pp, siendo la referencia las distorsiones armónicas totales del modelo sin pérdidas.

Los flujos magnéticos obtenidos del modelo con pérdidas a tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión un 10% para cada unidad que se compone el banco trifásico en conexión Yy0 aterrizada, se muestran en la figura 3.30.

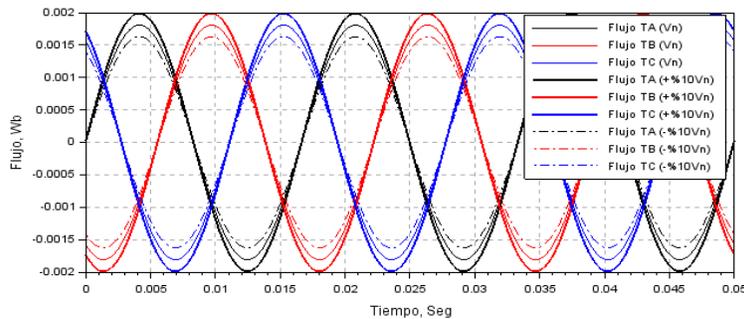


Figura 3.30 Flujos magnéticos en unidades monofásicas del banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aterrizado, obtenidos con el modelo de pérdidas a tensión nominal y al aumentar o disminuir la tensión nominal un 10%.

La distorsión armónica total del flujo magnético generado a tensión nominal presenta un valor de 0.244%, en cambio al incrementar la tensión nominal un 10% la distorsión armónica total presenta un valor de 0.248%, mayor a la obtenida a tensión nominal por una diferencia de 0.004pp, por lo que al disminuir la tensión nominal un 10% la distorsión armónica total es de 0.241%, menor a la obtenida a tensión nominal por una diferencia de 0.004pp, por lo tanto la distorsión armónica total del flujo magnético a tensión nominal no rebasa el 1%, aunque sea incrementada o disminuida la tensión nominal un 10%, conservando el flujo magnético su forma de onda sinusoidal ante este cambio de tensión en estado estable, sin embargo, la componente de 3ª armónica presentes en el flujo son mayor al incrementar o disminuir la tensión nominal con respecto a la 5ª, 7ª, 9ª armónicas.

Al comparar los porcentajes de distorsión armónica total del flujo magnético en ambos modelos se obtuvo una distorsión armónica total similar a tensión nominal, pero al aumentar y disminuir esta tensión un 10% estas diferencias no son apreciables.

El porcentaje de distorsión total al utilizar el modelo con pérdidas no cambia considerablemente en la corriente de vacío, tensión inducida y flujo magnético al incrementar o disminuir la tensión de suministro, sin embargo, los porcentajes de distorsión de las corrientes de vacío son altos debido a la presencia de la 3ª y 7ª armónicas y en menor cantidad de la 5ª y 9ª armónicas.

3.7.3 Comparación de espectros de frecuencias al incrementar o disminuir la tensión nominal.

En este apartado se comparan los resultados obtenidos de ambos modelos en forma general para la corriente de vacío, flujo magnético y tensión inducida, considerando como referencias las fundamentales del modelo sin pérdidas respectivamente al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10%, siendo las tablas del apartado (3.5) una comparación de forma individual al incrementar o disminuir la tensión nominal en estado estable.

La figura 3.31 muestra la comparación de los espectros de frecuencias en ambos modelos a tensión nominal en forma individual de las corrientes de vacío, siendo la fundamental mayor en el modelo con pérdidas por 13.8pp.

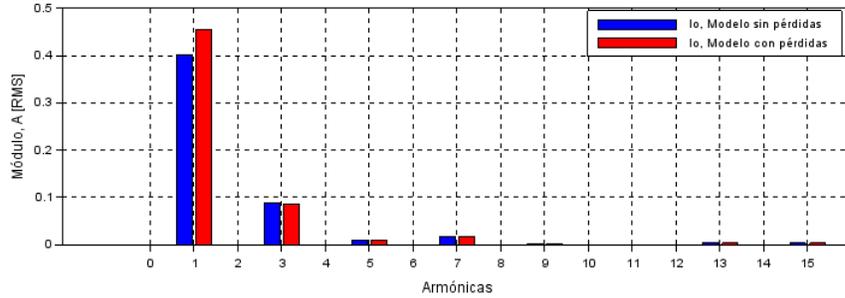


Figura 3.31 Comparación de espectros de frecuencia en las corrientes de vacío de la “fase a” del banco trifásico en conexión Yy0 aterrizada, obtenidos con el modelo de pérdidas y con el modelo sin pérdidas a tensión nominal.

La figura 3.32 muestra la comparación individual de los espectros frecuencia de las corrientes de vacío de ambos modelos, obtenidos al incrementar la tensión de suministro un 10%, siendo mayor la fundamental del modelo con pérdidas por 13.4pp.

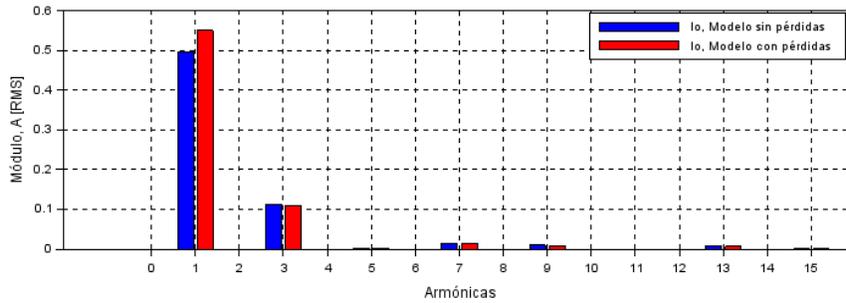


Figura 3.32 Comparación de espectros de frecuencias en las corrientes de vacío de la “fase a” del banco trifásico en conexión Yy0 aterrizada, obtenidas con el modelo de pérdidas y con el modelo sin pérdidas al incrementar la tensión nominal un 10%.

La figura 3.33 muestra la comparación individual de los espectros de frecuencias de las corrientes de vacío obtenidas mediante ambos modelos al disminuir la tensión nominal un 10%, siendo la fundamental del modelo sin pérdidas mayor por 14pp.

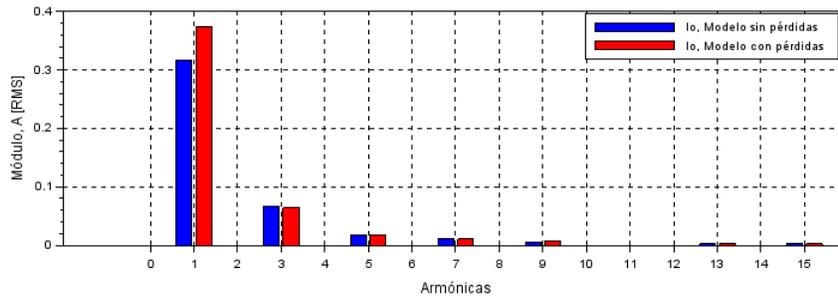


Figura 3.33 Comparación de espectros de frecuencias en las corrientes de vacío de la “fase a” del banco trifásico en conexión Yy0 aterrizada, obtenidos al disminuir la tensión nominal un 10% con el modelo de pérdidas y sin pérdidas en conexión Yy0 aterrizada.

Al comparar las magnitudes de los tres espectros de frecuencias de las tablas 3.3, 3.4 y 3.5, se obtiene la tabla 3.23, en la que se puede observar el comportamiento de los armónicos al incrementar o disminuir la tensión nominal con ambos modelos, considerando como referencia la fundamental del modelo sin pérdidas.

No. Armónicas	Tensión nominal		Aumento (10%)		Disminución (10%)	
	Sin Pérdidas	Con Pérdidas	Sin Pérdidas	Con Pérdidas	Sin Pérdidas	Con Pérdidas
1 ^a	100.000%	113.850%	123.842%	137.285%	79.125%	93.169%
3 ^a	21.840%	21.520%	22.601%	22.237%	16.434%	16.078%
5 ^a	2.020%	2.190%	0.432%	0.512%	4.439%	4.526%
7 ^a	4.240%	4.180%	2.922%	2.951%	2.714%	2.587%
9 ^a	0.260%	0.150%	1.893%	1.831%	1.511%	1.582%
11 ^a	1.780%	1.790%	0.798%	0.892%	1.274%	1.203%
13 ^a	0.750%	0.670%	1.390%	1.342%	0.609%	0.665%
15 ^a	0.690%	0.720%	0.127%	0.076%	0.712%	0.665%

Tabla 3.23 Comparación de magnitudes de los espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, cuando se incrementa o disminuye la tensión nominal un 10%, para el banco trifásico en conexión Yy0.

Al incrementar la tensión nominal un 10%, el espectro de frecuencias obtenido de la corriente de vacío del modelo sin pérdidas difiere, al incrementar la magnitud de la fundamental 23.84pp como las magnitudes de 3^a (0.76pp), 9^a (1.63pp) y 13^a (0.64pp) armónicas, pero se reducen las magnitudes de 5^a (1.58%), 7^a (1.32%), 11^a (0.98%), 15^a (0.56pp) armónicas. El espectro de frecuencias obtenido de la corriente de vacío del modelo de pérdidas al incrementar la tensión nominal difiere, al aumentar magnitud de la fundamental 23.44pp como las magnitudes de 3^a (0.72pp), 9^a (1.68pp) y 13^a (0.672pp) armónicas, pero disminuyen las magnitudes de 5^a (1.68pp), 7^a (1.23pp), 11^a (0.90pp), 15^a (0.64pp) armónicas.

Al disminuir la tensión nominal un 10%, el espectro de frecuencias obtenido de la corriente de vacío del modelo sin pérdidas difiere, al disminuir la magnitud de la fundamental 20.88pp como las magnitudes de 3^a (5.41pp), 7^a (1.53pp), 11^a (0.51pp) y 13^a (0.14pp) armónicas, pero se incrementan las magnitudes de 5^a (2.42pp), 9^a (1.25pp) y 15^a (0.022pp) armónicas. El espectro de frecuencias obtenido de la corriente de vacío del modelo de pérdidas al disminuir la tensión nominal difiere, al disminuir la magnitud de la fundamental 20.68pp como las magnitudes de 3^a (2.99pp), 7^a (0.16pp), 11^a (0.04pp), 13^a (0.005pp) y 15^a (0.055pp) armónicas, pero se incrementan las magnitudes de 5^a (2.336pp) y 9^a (1.43pp) armónicas.

Las tablas 3.6, 3.7 y 3.8 muestran la comparación de manera individual de los espectros de frecuencias de las tensiones inducidas de ambos modelos, sin embargo, para analizar el comportamiento de una manera adecuada al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10%, fue necesario comparar los espectros de frecuencia de cada modelo

cuando varia la tensión con los obtenidos a tensión nominal, considerando como referencia la fundamental del modelo sin pérdidas, obteniéndose la tabla 3.24.

No. Armónica	Nominal		Aumento (10%)		Disminución (10%)	
	Sin Pérdidas	Con Pérdidas	Sin Pérdidas	Con Pérdidas	Sin Pérdidas	Con Pérdidas
1 ^a	100.000%	99.643%	109.967%	109.605%	90.026%	89.679%
3 ^a	0.272%	0.224%	0.317%	0.261%	0.204%	0.167%
5 ^a	0.031%	0.023%	0.008%	0.006%	0.068%	0.047%
7 ^a	0.081%	0.043%	0.063%	0.035%	0.051%	0.027%
9 ^a	0.006%	0.002%	0.049%	0.021%	0.035%	0.016%
11 ^a	0.048%	0.019%	0.024%	0.010%	0.034%	0.013%
13 ^a	0.023%	0.007%	0.049%	0.016%	0.019%	0.007%
15 ^a	0.024%	0.008%	0.005%	0.001%	0.025%	0.007%

Tabla 3.24 Comparación de magnitudes de los espectros de frecuencias obtenidos de las tensiones inducidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, cuando se incrementa o disminuye la tensión nominal un 10%, para el banco trifásico en conexión Yy0.

Al incrementar la tensión nominal un 10%, el espectro de frecuencias obtenido de la tensión inducida del modelo sin pérdidas difiere, al incrementar la magnitud de la fundamental 9.97pp como las magnitudes de 3^a (0.045pp), 9^a (0.043pp) y 13^a (0.026pp) armónicas, pero disminuyen las magnitudes de 5^a (0.023pp), 7^a (0.018pp), 11^a (0.0024pp) y 15^a (0.019pp) armónicas. El espectro de frecuencias obtenido de la tensión inducida del modelo de pérdidas difiere, al incrementar la magnitud de la fundamental 9.96pp como las magnitudes de 3^a (0.037pp), 9^a (0.019pp) y 13^a (0.009pp) armónicas, pero se reducen las magnitudes de 5^a (0.017pp), 7^a (0.008pp), 11^a (0.009pp) y 15^a (0.009pp) armónicas.

Al disminuir la tensión nominal un 10%, el espectro de frecuencias obtenido de la tensión inducida del modelo sin pérdidas difiere, al disminuir la magnitud de la fundamental 9.97pp como las magnitudes de 3^a (0.068pp), 7^a (0.03pp), 11^a (0.014pp) y 13^a (0.004pp) armónicas, pero se incrementan las magnitudes de 5^a (0.037pp), 9^a (0.029pp) y 15^a (0.001pp) armónicas. El espectro de frecuencias obtenido de la tensión inducida del modelo de pérdidas difiere, al disminuir la magnitud de la fundamental 9.96pp como las magnitudes de 3^a (0.057pp), 7^a (0.016pp), 11^a (0.006pp) y 15^a (0.001pp) armónicas, pero aumentan las magnitudes de 5^a (0.024pp), 9^a (0.014pp) armónicas, aunque la magnitud de 13^a armónica no presenta un contenido considerable.

Las tablas 3.9, 3.10 y 3.11 muestran la comparación de manera individual de los espectros de frecuencias de los flujos magnéticos de ambos modelos, en cambio, para analizar el comportamiento de una manera general al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10%, fue necesario comparar los espectros de frecuencia de cada modelo cuando varia la tensión con los obtenidos a tensión nominal, considerando como referencia la fundamental del modelo sin pérdidas, obteniéndose la tabla 3.25.

No. Armónicas	Nominal		Aumento (10%)		Disminución (10%)	
	Sin Pérdidas	Con Pérdidas	Sin Pérdidas	Con Pérdidas	Sin Pérdidas	Con Pérdidas
1ª	100.000%	99.417%	109.998%	109.354%	89.997%	89.474%
3ª	0.077%	0.077%	0.090%	0.085%	0.055%	0.055%
5ª	0.004%	0.005%	0.001%	0.001%	0.011%	0.011%
7ª	0.006%	0.006%	0.005%	0.005%	0.004%	0.004%
9ª	0.000%	0.000%	0.003%	0.002%	0.002%	0.002%
11ª	0.002%	0.002%	0.001%	0.001%	0.001%	0.001%
13ª	0.001%	0.001%	0.001%	0.001%	0.000%	0.001%
15ª	0.001%	0.001%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%

Tabla 3.25 Comparación de magnitudes de los espectros de frecuencias obtenidos de los flujos magnéticos del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, cuando se incrementa o disminuye la tensión nominal un 10%, para el banco trifásico en conexión Yy0.

Al incrementar la tensión nominal un 10%, el espectro de frecuencias obtenido del flujo magnético del modelo sin pérdidas difiere, al incrementar la magnitud de la fundamental 10pp como las magnitudes de 3ª (0.013pp) y 9ª (0.003pp) armónicas, pero se reducen las magnitudes de 5ª (0.003pp), 7ª (0.001pp), 11ª (0.001pp) y 15ª (0.001pp) armónicas, sin embargo, la 13ª armónica no presenta cambio considerable. El espectro de frecuencias obtenido del flujo magnético del modelo de pérdidas difiere, al incrementar la magnitud de la fundamental 9.96pp como las magnitudes de 3ª (0.008pp) y 9ª (0.002pp) armónicas, pero se reducen las magnitudes de 5ª (0.004pp), 7ª (0.001pp), 11ª (0.001pp) y 15ª (0.001pp) armónicas, por lo que la magnitud de 13ª armónica no presenta un contenido apreciable.

Al disminuir la tensión nominal, el espectro de frecuencias obtenido del modelo sin pérdidas difiere, al disminuir la magnitud de la fundamental 10pp como con las magnitudes de 3ª (0.022pp), 7ª (0.002pp), 11ª (0.001pp), 13ª (0.001pp) y 15ª (0.001pp) armónicas, pero se incrementan las magnitudes de 5ª (0.007pp), 9ª (0.002pp) y 15ª (0.001pp) armónicas. En espectro de frecuencias obtenido del flujo magnético del modelo de pérdidas difiere, al disminuir la magnitud de la fundamental 9.94pp, lo mismo sucede con las magnitudes de 3ª (0.022pp), 7ª (0.002pp), 11ª (0.001pp), 13ª (0.001pp) y 15ª (0.001pp) armónicas, pero aumentan las magnitudes de 5ª (0.006pp), 9ª (0.002pp) armónicas, aunque la magnitud de 13ª armónica no presenta un contenido apreciable.

3.8 Caso 4. Banco trifásico conexión Dy1

En este apartado se muestra la simulación de la corriente de vacío, flujo magnético y tensión inducida de un banco trifásico a base de unidades monofásicas en conexión Dy1 en operación sin carga, mediante un código elaborado en Scilab, siendo considerado el modelo sin pérdidas del apartado (3.2) y el modelo con pérdidas del apartado (3.3), limitándose el estudio a una fase por ser un sistema balanceado, para un análisis de magnitudes y distorsiones armónicas totales en estado estable.

3.8.1 Corrientes de vacío en la conexión Dy1

Las corrientes de vacío (línea) obtenidas del modelo sin pérdidas para el banco trifásico en conexión Dy1 se muestran en la figura 3.34, obteniéndose tres formas de onda para cada fase, una a tensión nominal y otras dos al incrementar o disminuir la tensión un 10%.

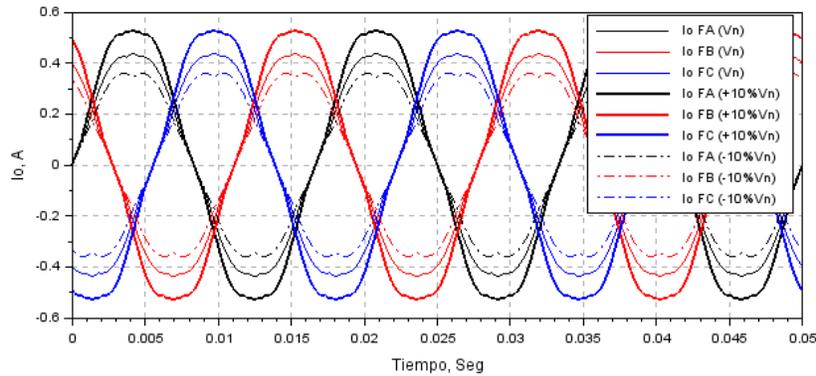


Figura 3.34 Corrientes de vacío (línea) en el lado primario del banco trifásico a base de unidades monofásicas en conexión Dy1, obtenidas con el modelo sin pérdidas a tensión nominal y al aumentar o disminuir la tensión nominal un 10%.

La figura 3.35 muestra los espectros de frecuencias para las primeras quince componentes armónicas de las corrientes de vacío (línea) de la “fase a” de la figura 3.34. Cada espectro de frecuencias contiene principalmente una fundamental y una 5ª armónica, pero no existen componentes de secuencia cero al no existir un hilo de retorno.

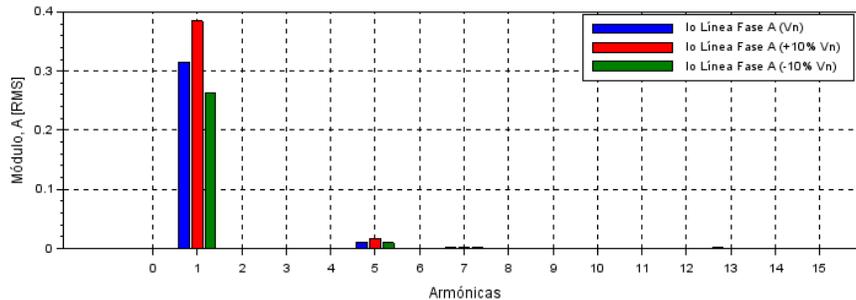


Figura 3.35 Espectros de frecuencias de las corrientes de vacío de la “fase a” del banco trifásico en conexión Dy1, obtenidos con el modelo sin pérdidas.

Las corrientes de vacío obtenidas del modelo con pérdidas para el banco trifásico en conexión Dy1 se muestran en la figura 3.36, obteniéndose tres formas de onda para cada fase, una a tensión nominal y otras dos al incrementar o disminuir la tensión un 10%, sin embargo, las corrientes de línea producidas en ambos modelos son muy distintas, presentando las corrientes obtenidas del modelo con pérdidas una mayor amplitud de onda.

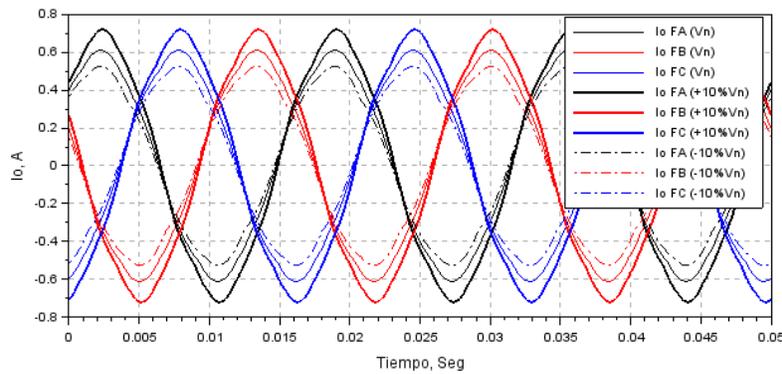


Figura 3.36 Corrientes de vacío (línea) en el lado primario del banco trifásico a base de unidades monofásicas en conexión Dy1, obtenidas con el modelo con pérdidas a tensión nominal y al aumentar o disminuir la tensión nominal un 10%.

La figura 3.37 muestra los espectros de frecuencias para las primeras quince componentes armónicas de las corrientes de vacío (línea) de la “fase a” de la figura 3.36. Cada espectro de frecuencias contiene principalmente una fundamental y una 5ª armónica, pero no existen componentes de secuencia cero al no existir un hilo de retorno.

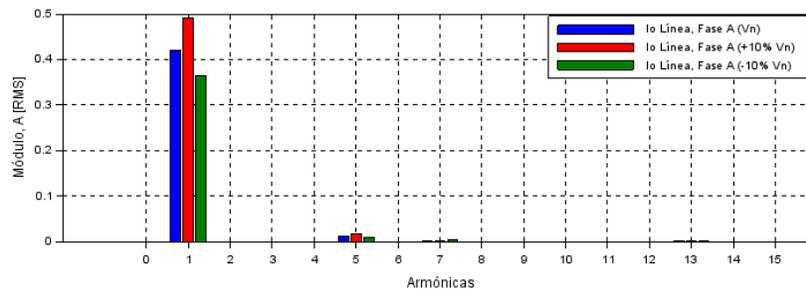


Figura 3.37 Espectros de frecuencias de las corrientes de vacío de la “fase a” del banco trifásico en conexión Dy1, obtenidos con el modelo de pérdidas.

Los espectros de frecuencias que se muestran en tablas posteriores para las corrientes de vacío, flujos magnéticos y tensiones inducidas se presentan en formato porcentual para las primeras ocho armónicas impares. En la tabla 3.26 la magnitud de la fundamental del modelo con pérdidas es mayor por 33.72pp como la magnitud de 11ª (0.042pp) armónica, en cambio, las magnitudes de 5ª (0.003pp), 7ª (0.076pp) y 13ª (0.022pp) armónicas son mayor en el modelo sin pérdidas, por ende, las magnitudes de 3ª, 9ª y 15ª armónicas por el tipo de conexión no pueden circular fuera de la delta, aunque existe un bajo porcentaje de éstas debido al error numérico. La corriente de vacío (línea) en el modelo sin pérdidas presentó un factor de cresta de 1.378, por lo que, la forma de onda ancha y plana en sus crestas y valles, pero el modelo con pérdidas presentó una forma de onda esbelta y elevada debido a su factor de cresta de 1.445. Las magnitudes de las fundamentales del modelo con pérdidas y el modelo sin pérdidas presentaron un ángulo de fase de 42.55 grados y 0.505 grados respectivamente, siendo las diferencias de los ángulos de fase para las magnitudes 5ª, 7ª y 13ª armónicas de ambos modelos menor a 5pp. La corriente de vacío (línea) obtenida a tensión nominal presenta una distorsión

armónica total con el modelo sin pérdidas de 3.603% y el modelo con pérdidas de 2.686%, siendo esta última menor por una diferencia de 0.917pp.

No. Armónicas	Modelo Sin Pérdida THD=3.603%			Modelo Con Pérdida THD=2.686%		
	Amplitud RMS [A]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]	Amplitud RMS [A]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]
1 ^a	0.315010	100.000%	0.505	0.421230	100.000%	42.55
3 ^a	3.150x10 ⁻⁷	0.0001%	0.908	4.100x10 ⁻⁷	0.0001%	16.44
5 ^a	1.121x10 ⁻²	3.5427%	-177.28	1.120x10 ⁻²	2.6477%	-177.44
7 ^a	1.730x10 ⁻³	0.5498%	-176.44	1.490x10 ⁻³	0.3538%	-177.06
9 ^a	5.040x10 ⁻⁷	0.0002%	1.27	5.040x10 ⁻⁷	0.0001%	10.32
11 ^a	4.520x10 ⁻⁴	0.1434%	5.65	5.860x10 ⁻⁴	0.1390%	6.20
13 ^a	1.670x10 ⁻³	0.5312%	6.60	1.600x10 ⁻³	0.3795%	6.72
15 ^a	4.100x10 ⁻⁷	0.0001%	3.77	4.100x10 ⁻⁷	0.0001%	7.87

Tabla 3.26 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas a tensión nominal, para el banco trifásico en conexión Dy1.

El incremento de un 10% de la tensión nominal aumenta principalmente las magnitudes de la fundamental (22.11pp/22.32pp) y 5^a (0.78pp/0.71pp) armónica de los espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío (línea) del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, respecto a los espectros de frecuencias obtenidos a tensión nominal. En la tabla 3.27 se muestran los espectros de frecuencias de las corrientes de vacío de ambos modelos al incrementar la tensión nominal.

Al comparar los espectros de frecuencias de la tabla 3.27 la magnitud de la fundamental del modelo con pérdidas es mayor por 27.79pp como las magnitudes de 11^a (0.018pp) y 13^a (0.051pp) armónicas, en cambio, las magnitudes de 5^a (0.052pp) y 7^a (0.031pp) armónicas son mayor en el modelo sin pérdidas, por ende, las magnitudes de 3^a, 9^a y 15^a armónicas debido al tipo de conexión no pueden circular fuera de la delta, aunque existe un bajo porcentaje de éstas debido al error numérico. La corriente de vacío obtenida del modelo sin pérdidas presenta un factor de cresta de 1.369 por lo que la forma de onda es ancha y plana en sus crestas y valles, pero la corriente de vacío obtenida del modelo con pérdidas presenta una forma de onda esbelta y elevada debido a su factor de cresta de 1.457. Las magnitudes de las fundamentales del modelo con pérdidas y el modelo sin pérdidas presentaron un ángulo de fase de 39.68 grados y 0.54 grados respectivamente, siendo las diferencias de los ángulos de fase para las magnitudes de 5^a, 7^a y 11^a armónicas de ambos modelos menor a 5pp con excepción de la 13^a armónica. La corriente de vacío (línea) obtenida del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas al incrementar la tensión nominal presentaron una distorsión armónica total de 4.361% y 3.363% respectivamente, en cambio esta última fue menor por una diferencia de 0.998pp.

No. Armónicas	Modelo Sin Pérdida THD=4.361%			Modelo Con Pérdida THD=3.363%		
	Amplitud RMS [A]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]	Amplitud RMS [A]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]
1ª	0.38466	100.000%	0.54	0.49154	100.000%	39.68
3ª	3.85x10 ⁻⁷	0.0001%	1.13	3.08x10 ⁻⁷	0.0001%	14.76
5ª	1.66x10 ⁻²	4.3264%	-177.01	1.64x10 ⁻²	3.3322%	-177.14
7ª	1.81x10 ⁻³	0.4715%	-176.96	1.69x10 ⁻³	0.3439%	-177.56
9ª	3.85x10 ⁻⁷	0.0001%	1.51	3.85x10 ⁻⁷	0.0001%	8.93
11ª	2.15x10 ⁻³	0.5588%	-173.91	2.22x10 ⁻³	0.4516%	-174.07
13ª	1.72x10 ⁻⁴	0.0446%	4.77	3.70x10 ⁻⁴	0.0752%	6.59
15ª	3.08x10 ⁻⁷	0.0001%	-2.78	1.00x10 ⁻⁶	0.0002%	8.74

Tabla 3.27 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas al incrementar la tensión nominal un 10%, para el banco trifásico en conexión Dy1.

Disminuir un 10% la tensión nominal reduce principalmente las magnitudes de la fundamental (16.75pp/18.25pp) y 5ª (0.49pp/0.56pp) armónica de los espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío (línea) del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, respecto a los espectros de frecuencias obtenidos a tensión nominal. En la tabla 3.28 se muestran los espectros de frecuencias de las corrientes de vacío de ambos modelos al disminuir la tensión nominal.

Al comparar los espectros de frecuencias de la tabla 3.28 la magnitud de la fundamental del modelo de pérdidas es mayor por 38.69pp, como las magnitudes de 7ª (0.038pp) y 13ª (0.026pp) armónicas, en cambio, las magnitudes de 5ª (0.083pp) y 11ª (0.027pp) armónicas son mayor en el modelo sin pérdidas, sin embargo, la 3ª, 9ª y 15ª armónicas no pueden circular fuera de la delta por ser una corriente de línea y no existir un hilo de retorno. La corriente de vacío obtenidas del modelo sin pérdidas presenta un factor de cresta de 1.368 por lo que la forma de onda es ancha y plana en sus crestas y valles, pero la corriente de vacío obtenida del modelo con pérdidas presenta una forma de onda esbelta y elevada debido al factor de cresta de 1.439. Las magnitudes de las fundamentales del modelo con pérdidas y el modelo sin pérdidas presentaron un ángulo de fase de 44.75 grados y 0.48 grados respectivamente, siendo las diferencias de los ángulos de fase para las magnitudes de 5ª, 7ª, 11ª y 13ª armónicas de ambos modelos menor a 5pp.

No. Armónicas	Modelo Sin Pérdida THD=3.908%			Modelo Con Pérdida THD=2.769%		
	Amplitud RMS [A]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]	Amplitud RMS [A]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]
1ª	0.26226	100.000%	0.48	0.36374	100.000%	44.75
3ª	1.05x10 ⁻⁷	0.0000%	0.87	2.88x10 ⁻⁷	0.0001%	17.82
5ª	9.59x10 ⁻³	3.6575%	-177.43	9.37x10 ⁻³	2.5747%	-177.59
7ª	3.07x10 ⁻³	1.1705%	3.53	3.17x10 ⁻³	0.8720%	3.76
9ª	1.05x10 ⁻⁷	0.0000%	1.87	2.88x10 ⁻⁷	0.0001%	9.12
11ª	1.81x10 ⁻³	0.6918%	5.38	1.74x10 ⁻³	0.4789%	5.53
13ª	8.78x10 ⁻⁴	0.3349%	-173.27	9.47x10 ⁻⁴	0.2602%	-173.55
15ª	1.05x10 ⁻⁷	0.0000%	3.64	2.88x10 ⁻⁷	0.0001%	7.41

Tabla 3.28 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas al disminuir la tensión nominal un 10%, para el banco trifásico en conexión Dy1.

La corriente de vacío obtenida con modelo sin pérdidas a tensión nominal presenta una distorsión armónica total de 3.603%, pero al incrementar esta tensión un 10% la distorsión armónica total aumenta a un valor de 4.361%, mayor a la obtenida a tensión nominal por una diferencia de 0.758pp, en cambio al disminuir la tensión nominal un 10% la distorsión armónica total presenta un valor de 3.908%, mayor a la obtenida a tensión nominal por una diferencia de 0.305pp.

Al ser utilizado el modelo con pérdidas la distorsión armónica total de la corriente de vacío (línea) generada a tensión nominal es de 2.686%, pero al incrementar esta tensión un 10% la distorsión armónica total es de 3.363%, mayor a la obtenida a tensión nominal por una diferencia de 0.677pp, en cambio al disminuir esta tensión un 10% la distorsión armónica total es de 2.769%, mayor a la obtenida a tensión nominal por una diferencia de 0.083pp. Comparando las distorsiones armónicas totales de las corrientes de vacío (línea) obtenidas de ambos modelos se puede observar que al implementar la resistencia de pérdidas se presenta una menor distorsión armónica total.

3.8.2 Tensión inducida en la conexión Dy1

Las tensiones inducidas obtenidas del modelo sin pérdidas para el banco trifásico en conexión Dy1 se muestran en la figura 3.38, obteniéndose tres formas de onda para cada unidad monofásica, una a tensión nominal y otras dos al incrementar o disminuir la tensión un 10%.

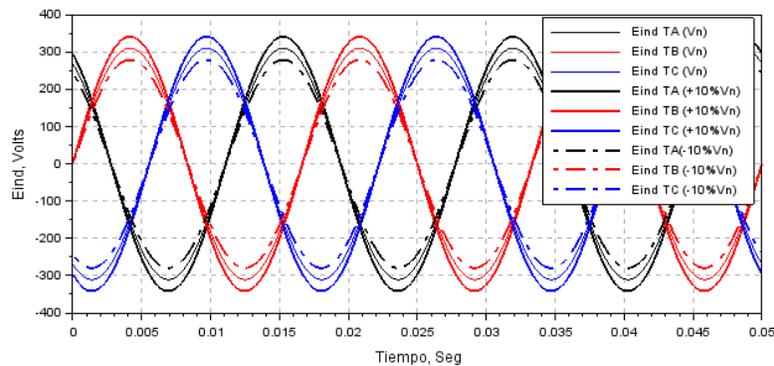


Figura 3.38 Tensiones inducidas en el lado primario del banco trifásico a base de unidades monofásicas en conexión Dy1, obtenidas con el modelo sin pérdidas a tensión nominal y al aumentar o disminuir la tensión nominal un 10%.

La figura 3.39 muestra los espectros de frecuencias para las primeras quince componentes armónicas de las tensiones inducidas de la “unidad TA” de la figura 3.38, sin embargo, el pequeño contenido armónico de 3^a, 7^a, 9^a etc. armónicas en cada uno de los espectros es muy pequeño, por lo que no es posible que sea apreciado a simple vista en la figura 3.39.

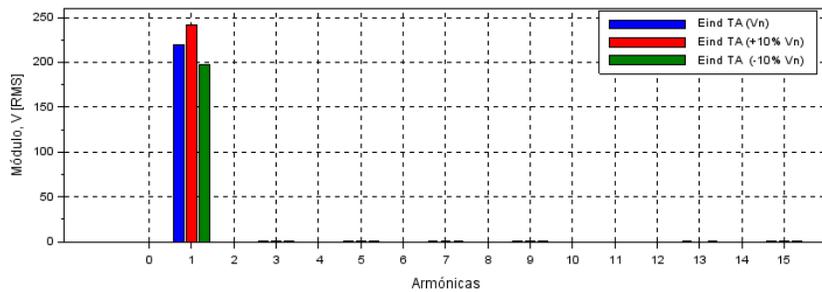


Figura 3.39 Espectros de frecuencias de las tensiones inducidas del transformador “TA” del banco trifásico en conexión Dy1, obtenidas con el modelo sin pérdidas.

Las tensiones inducidas obtenidas del modelo con pérdidas para el banco trifásico en conexión Dy1 se muestran en la figura 3.40, obteniéndose tres formas de onda para cada unidad monofásica, una a tensión nominal y otras dos al incrementar o disminuir la tensión un 10%. Al observar las figuras 3.38 y 3.40 se puede apreciar que ambas tensiones inducidas conservan su forma sinusoidal, sin embargo, las amplitudes de la forma de onda en el modelo con pérdidas son menor debido a la caída de tensión a través del conductor por el aumento de la corriente de vacío.

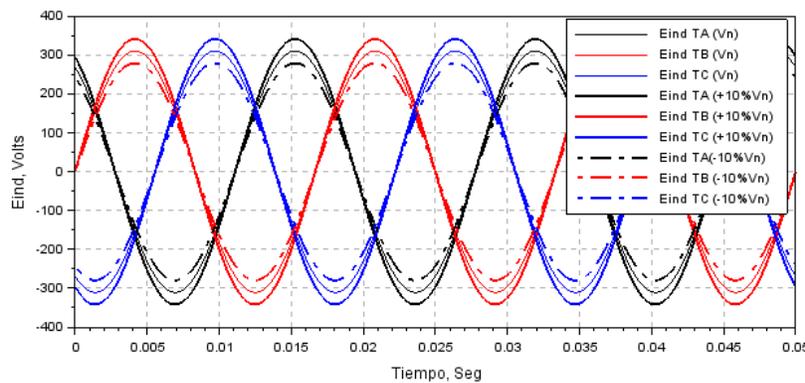


Figura 3.40 Tensiones inducidas en el lado primario del banco trifásico a base de unidades monofásicas en conexión Dy1, obtenidas del modelo con pérdidas a tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10%.

La figura 3.41 muestra los espectros de frecuencias para las primeras quince componentes armónicas de las tensiones inducidas de la “unidad TA” de la figura 3.40, sin embargo, el pequeño contenido armónico de 3^a, 7^a, 9^a etc. armónicas en cada uno de los espectros es muy pequeño, por lo que no es posible que sea apreciado a simple vista en la figura 3.41. En la tabla 3.29 se muestran los espectros de frecuencias de ambos modelos obtenidas de las tensiones inducidas, siendo posible apreciarse el pequeño contenido de componentes de 3^a, 7^a y 9^a armónicas.

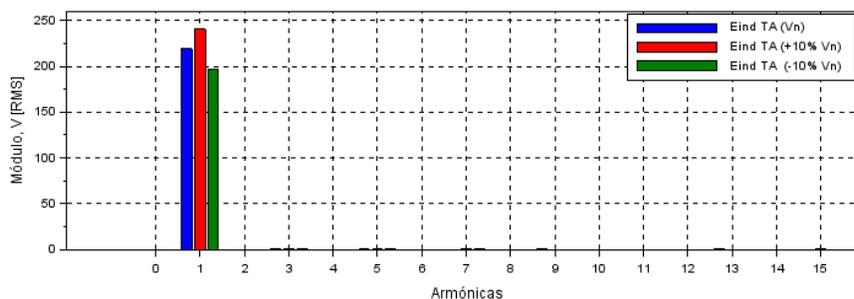


Figura 3.41 Espectros de frecuencias de las tensiones inducidas del transformador “TA” del banco trifásico en conexión Dy1, obtenidas del modelo con pérdidas

Al comparar los espectros de frecuencias de la tabla 3.29 la magnitud de la fundamental del modelo con pérdidas es menor, como las magnitudes de 3^a, 5^a, 7^a, 9^a, 11^a, 13^a y 15^a armónicas, sin embargo, los porcentajes de 3^a, 5^a, 7^a etc. armónicas al ser sumados no superan el 1%, por lo tanto, la tensión inducida conserva su forma sinusoidal, lo cual puede confirmarse con el factor de cresta, el cual presenta un valor de 1.414 para las tensiones inducidas de ambos modelos. Las fundamentales de ambos modelos presentaron un ángulo de fase similar de 120.53 grados, siendo la diferencia de los ángulos de fase para las magnitudes de 3^a, 5^a, 7^a, 9^a, 11^a, 13^a y 15^a armónicas de ambos modelos son mayor a 5pp.

Las tensiones inducidas obtenidas con el modelo sin pérdidas y el modelo de pérdidas presentaron una distorsión armónica total de 0.1968% y 0.1557% respectivamente, siendo esta última menor por una diferencia de 0.041pp.

No. Armónicas	Modelo Sin Pérdida THD=0.1968%			Modelo Con Pérdida THD=0.1557%		
	Amplitud RMS [V]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]	Amplitud RMS [V]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]
1 ^a	219.47531	100.000%	120.53	219.04229	100.000%	120.53
3 ^a	0.18890	0.0861%	148.87	0.10377	0.0474%	123.58
5 ^a	0.09986	0.0455%	78.14	0.03773	0.0172%	176.64
7 ^a	0.02092	0.0095%	148.20	0.00505	0.0023%	162.23
9 ^a	0.05831	0.0266%	-6.53	0.01273	0.0058%	-165.29
11 ^a	0.00836	0.0038%	-172.91	0.00198	0.0009%	172.43
13 ^a	0.03643	0.0166%	-97.82	0.00540	0.0025%	-176.56
15 ^a	0.01914	0.0087%	178.77	0.00283	0.0013%	168.73

Tabla 3.29 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las tensiones inducidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas a tensión nominal, para el banco trifásico en conexión Dy1.

Incrementar un 10% la tensión nominal aumenta principalmente las magnitudes de la fundamental (9.97pp/9.98pp), 3^a (0.05pp/0.03pp) y 5^a (0.02pp/0.01pp) armónicas de los espectros de frecuencias obtenidos de las tensiones inducidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, respecto a los espectros de frecuencias obtenidos a

tensión nominal. En la tabla 3.30 se muestran los espectros de frecuencias de las tensiones inducidas de ambos modelos cuando se incrementa la tensión nominal, conservando ambas tensiones su forma de onda sinusoidal.

Al comparar los espectros de frecuencias de la tabla 3.30 la magnitud de la fundamental del modelo con pérdidas es menor, como las magnitudes de 3^a, 5^a, 7^a, 9^a, 11^a, 13^a y 15^a armónicas, sin embargo, los porcentajes de 3^a, 5^a, 7^a etc. armónicas al ser sumados no superan el 1%, por lo tanto, la tensión inducida conserva su forma sinusoidal y esto se refleja con el factor de cresta siendo de 1.414 para ambas tensiones inducidas. Las magnitudes de las fundamentales del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas presentaron un ángulo de fase similar de 120.56 grados, siendo las diferencias de los ángulos de fase de las magnitudes de 3^a, 5^a, 7^a, 11^a, 13^a y 15^a armónicas de ambos modelos menor a 5pp con excepción de las magnitudes de 9^a armónica.

Las tensiones inducidas obtenidas con el modelo sin pérdidas y el modelo de pérdidas presentaron una distorsión armónica total de 0.2405% y 0.1710% respectivamente, aunque esta última fue menor por una diferencia de 0.07pp.

No. Armónicas	Modelo Sin Pérdida THD=0.2405%			Modelo Con Pérdida THD=0.1710%		
	Amplitud RMS [A]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]	Amplitud RMS [A]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]
1 ^a	241.35887	100.000%	120.56	240.94591	100.000%	120.56
3 ^a	0.33496	0.1388%	148.6	0.18336	0.0761%	116.02
5 ^a	0.14892	0.0617%	67.71	0.05542	0.0230%	-162.64
7 ^a	0.02189	0.0091%	148.81	0.00572	0.0024%	162.1
9 ^a	0.01716	0.0071%	170.32	0.00372	0.0015%	177.19
11 ^a	0.03980	0.0165%	98.82	0.00751	0.0031%	179.68
13 ^a	0.00372	0.0015%	-177.75	0.00126	0.0005%	177.19
15 ^a	0.05740	0.0238%	3.56	0.00751	0.0031%	-161.85

Tabla 3.30 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las tensiones inducidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas al incrementar la tensión nominal un 10%, para el banco trifásico en conexión Dy1.

Disminuir un 10% la tensión nominal reduce principalmente las magnitudes de la fundamental (9.98pp/9.98pp), 3^a (0.04pp/0.02pp) y 5^a (0.01pp/0.003pp) armónicas de los espectros de frecuencias obtenidos de las tensiones inducidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, respecto a los espectros de frecuencias obtenidos a tensión nominal. En la tabla 3.31 se muestran los espectros de frecuencias de las tensiones inducidas de ambos modelos cuando se disminuye la tensión nominal, conservándose la forma de onda sinusoidal de las tensiones inducidas.

Al comparar los espectros de frecuencias de la tabla 3.31 la magnitud de la fundamental del modelo de pérdidas es menor como las magnitudes de 3^a, 5^a, 7^a, 9^a, 11^a, 13^a y 15^a armónicas, siendo la suma porcentual de las magnitudes de 3^a, 5^a, 7^a etc. armónicas menor al 1%, conservando la tensión inducida su forma de onda sinusoidal al

presentar un factor de cresta de 1.414 para ambas tensiones inducidas. Las magnitudes de las fundamentales de ambos modelos presentaron un ángulo de fase de 120.51 grados, siendo las diferencias de los ángulos de fase para las magnitudes de 3^a, 5^a, 7^a, 11^a y 13^a armónicas de ambos modelos mayor a 5pp con excepción de las magnitudes de 9^a y 15^a armónicas. Las tensiones inducidas obtenidas con el modelo sin pérdidas y el modelo de pérdidas al disminuir la tensión nominal un 10% presentaron una distorsión armónica total de 0.1719% y 0.1478% respectivamente, en cambio esta última es menor por una diferencia mínima de 0.024pp.

No. Armónicas	Modelo Sin Pérdida THD=0.1719%			Modelo Con Pérdida THD=0.1478%		
	Amplitud RMS [V]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]	Amplitud RMS [V]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]
1 ^a	197.56337	100.000%	120.51	197.13841	100.000%	120.51
3 ^a	0.09955	0.0504%	149.28	0.05374	0.0273%	132
5 ^a	0.08584	0.0435%	79.80	0.03169	0.0161%	174.72
7 ^a	0.03708	0.0188%	-132.93	0.01073	0.0054%	177.56
9 ^a	0.01332	0.0067%	170.63	0.00233	0.0012%	175.97
11 ^a	0.03361	0.0170%	-149.17	0.00589	0.0030%	170.02
13 ^a	0.01912	0.0097%	147.14	0.00320	0.0016%	168.54
15 ^a	0.00806	0.0041%	177.91	0.00073	0.0004%	174.32

Tabla 3.31 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las tensiones inducidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas al disminuir la tensión nominal un 10%, para el banco trifásico en conexión Dy1.

El incrementar y disminuir la tensión nominal no afecta considerablemente la distorsión armónica total de la tensión inducida al considerar ambos modelos, sin embargo, la distorsión fue menor siempre en el modelo con pérdidas.

3.8.3 Flujo magnético en la conexión Dy1

Los flujos magnéticos obtenidos del modelo sin pérdidas para el banco trifásico en conexión Dy1 se muestran en la figura 3.42, obteniéndose tres formas de onda para cada unidad monofásica, una a tensión nominal y otras dos al incrementar o disminuir la tensión un 10%.

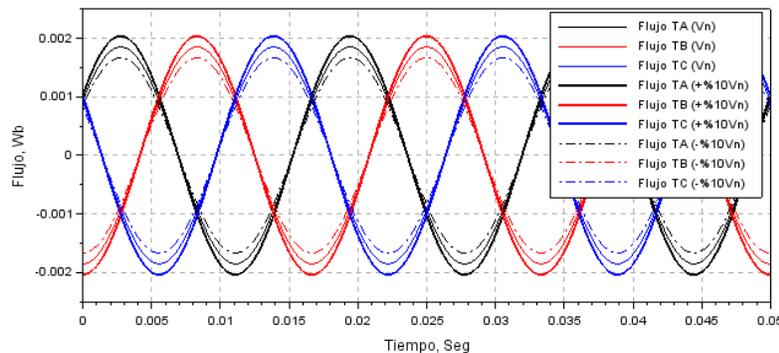


Figura 3.42 Flujos magnéticos en los transformadores monofásicos del banco trifásico en conexión Dy1, obtenidos con el modelo sin pérdidas a tensión nominal y al aumentar o disminuir la tensión nominal un 10%.

Los espectros de frecuencias de los flujos magnéticos obtenidos con el modelo sin pérdidas a tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10% para la unidad monofásica “TA” se muestran en la figura 3.43, no siendo posible apreciar adecuadamente el pequeño contenido de 3ª, 5ª, 7ª etc. armónicas en cada espectro de frecuencias.

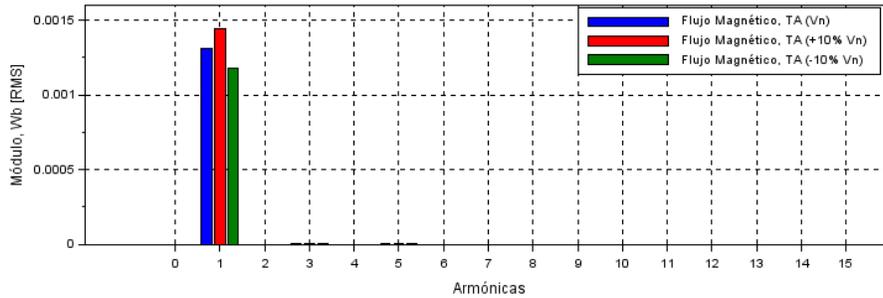


Figura 3.43 Espectro de frecuencia para los flujos magnéticos del transformador “TA” del banco trifásico en conexión Dy1, obtenidas del modelo sin pérdidas

Los flujos magnéticos obtenidos del modelo con pérdidas para el banco trifásico en conexión Dy1 se muestran en la figura 3.44, obteniéndose tres formas de onda para cada unidad monofásica, una a tensión nominal y otras dos al incrementar o disminuir la tensión un 10%.

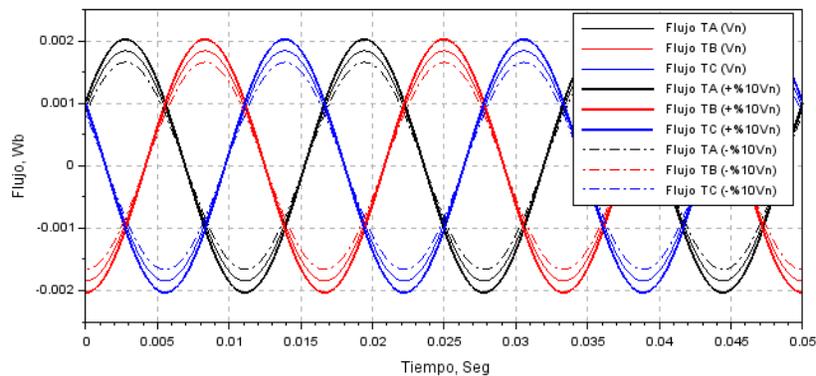


Figura 3.44 Flujos magnéticos en los transformadores monofásicos del banco trifásico en conexión Dy1, obtenidos con el modelo de pérdidas a tensión nominal y al aumentar o disminuir la tensión nominal un 10%.

Los espectros de frecuencias de los flujos magnéticos obtenidos con modelo de pérdidas a tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10% para la unidad monofásica “TA” se muestran en la figura 3.45, no siendo posible apreciar adecuadamente el pequeño contenido de 3ª, 5ª, 7ª etc. armónicas en cada espectro de frecuencias. El pequeño contenido de componentes armónicas impares en los flujos magnéticos es mínimo en cada modelo, por lo que en la tabla 3.32 se comparan los espectros de frecuencias obtenidos de ambos modelos, siendo posible determinar

cuantitativamente la cantidad de 3ª armónica presente en las formas de onda del flujo magnético, la cual es inferior al 0.01% respecto a la fundamental.

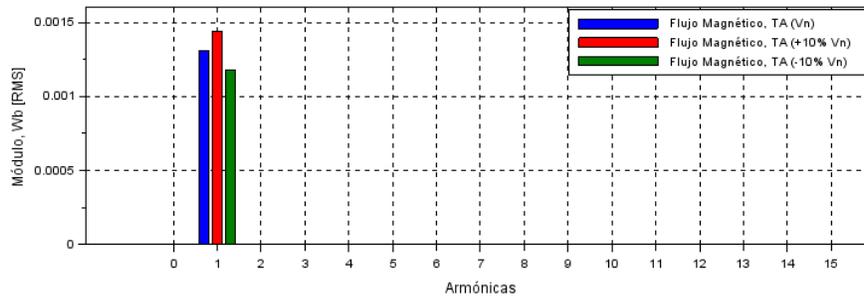


Figura 3.45 Espectros de frecuencias para los flujos magnéticos del transformador “TA” del banco trifásico en conexión Dy1, obtenidos del modelo con pérdidas.

Al comparar los espectros de frecuencias obtenidos de los flujos magnéticos de ambos modelos en la tabla 3.32 la magnitud de la fundamental del modelo de pérdida es menor por una diferencia de 0.38pp como las magnitudes de 7ª, 9ª y 13ª armónicas, en cambio, las magnitudes de 5ª, 11ª y 15ª armónicas son menor en el modelo sin pérdidas. Los flujos magnéticos de ambos modelos contienen pequeñas magnitudes de 3ª, 5ª, 7ª, 9ª armónicas, los cuales al sumarse no superan el 1%, conservando el flujo magnético su forma de onda sinusoidal, por lo que el factor de cresta presente en ambos flujos magnéticos es de 1.414 (onda senoidal). Las magnitudes de las fundamentales del modelo con pérdidas y el modelo sin pérdidas presentaron un ángulo de fase de 30.47 grados, siendo las diferencias de los ángulos de fase para las magnitudes de 3ª, 11ª y 15ª armónicas de ambos modelos mayor a 5pp con excepción de las magnitudes de 3ª, 5ª, 9ª 13ª armónicas.

Los flujos magnéticos obtenidos del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas presenta una distorsión armónica total de 0.2125% y 0.2123% respectivamente, en cambio esta última es menor por una diferencia de 0.0003pp.

No. Armónicas	Modelo Sin Pérdida THD=0.2125%			Modelo Con Pérdida THD=0.2123%		
	Amplitud RMS [Wb]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]	Amplitud RMS [Wb]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]
1ª	1.311x10 ⁻³	100.000%	30.47	1.306x10 ⁻³	100.000%	30.47
3ª	2.000x10 ⁻⁷	0.0153%	9.98	2.000x10 ⁻⁷	0.0153%	9.96
5ª	4.498x10 ⁻⁸	0.0034%	4.3	4.511x10 ⁻⁸	0.0035%	4.17
7ª	4.983x10 ⁻⁹	0.0004%	5.43	4.328x10 ⁻⁹	0.0003%	5.91
9ª	8.524x10 ⁻⁹	0.0007%	6.07	8.393x10 ⁻⁹	0.0006%	5.83
11ª	7.868x10 ⁻¹⁰	0.0001%	5.01	1.049x10 ⁻⁹	0.0001%	5.55
13ª	2.623x10 ⁻⁹	0.0002%	6.03	2.492x10 ⁻⁹	0.0002%	5.87
15ª	1.049x10 ⁻⁹	0.0001%	6.04	1.180x10 ⁻⁹	0.0001%	5.58

Tabla 3.32 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de los flujos magnéticos del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas a tensión nominal, para el banco trifásico en conexión Dy1.

Incrementar un 10% la tensión nominal aumenta principalmente las magnitudes de la fundamental (10pp/9.96pp) y 3ª (0.013pp/0.013pp) armónica de los espectros de frecuencias obtenidos de los flujos magnéticos del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, respecto a los espectros de frecuencias obtenidos a tensión nominal. En la tabla 3.33 se muestran los espectros de frecuencias de los flujos magnéticos de ambos modelos cuando se incrementa la tensión nominal.

Al comparar los espectros de frecuencias de la tabla 3.33 la magnitud de la fundamental del modelo de pérdidas es menor como las magnitudes de 5ª, 7ª y 9ª armónicas. Las magnitudes de 11ª y 13ª armónicas son menores en el modelo sin pérdidas. Los flujos magnéticos de ambos modelos contienen pequeñas magnitudes de 3ª, 5ª, 7ª, 9ª armónicas, los cuales al sumarse no superan el 1%, conservando el flujo magnético su forma de onda sinusoidal, por lo que el factor de cresta presente en ambos flujos magnéticos es de 1.414 (onda senoidal). Las magnitudes de las fundamentales del modelo con pérdidas y el modelo sin pérdidas presentaron un ángulo de fase de 30.50 grados, siendo las diferencias de los ángulos de fase para las magnitudes de 3ª, 5ª, 9ª y 13ª armónicas de ambos modelos menor a 5pp, con excepción de las magnitudes de 7ª, 11ª y 15ª armónicas.

Los flujos magnéticos obtenidos del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas al incrementar la tensión nominal presentaron una distorsión armónica total de 0.2169% y 0.2166% respectivamente, en cambio esta última es menor por una diferencia de 0.0003pp.

No. Armónicas	Modelo Sin Pérdida THD=0.2169%			Modelo Con Pérdida THD=0.2166%		
	Amplitud RMS [Wb]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]	Amplitud RMS [Wb]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]
1ª	1.443x10 ⁻³	100.000%	30.50	1.436x10 ⁻³	100.000%	30.50
3ª	4.000x10 ⁻⁷	0.0277%	9.22	4.000x10 ⁻⁷	0.0279%	9.20
5ª	6.708x10 ⁻⁸	0.0047%	2.66	6.636x10 ⁻⁸	0.0046%	2.77
7ª	5.193x10 ⁻⁹	0.0004%	5.45	4.905x10 ⁻⁹	0.0003%	5.77
9ª	2.452x10 ⁻⁹	0.0002%	5.65	2.452x10 ⁻⁹	0.0002%	5.76
11ª	3.895x10 ⁻⁹	0.0003%	4.87	4.039x10 ⁻⁹	0.0003%	4.82
13ª	2.88x10 ⁻¹⁰	0.0000%	5.90	5.770x10 ⁻¹⁰	0.0000%	5.62
15ª	3.029x10 ⁻⁹	0.0002%	5.18	3.029x10 ⁻⁹	0.0002%	5.60

Tabla 3.33 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de los flujos magnéticos del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas al incrementar la tensión nominal un 10%, para el banco trifásico en conexión Dy1.

Disminuir un 10% la tensión nominal reduce principalmente las magnitudes de la fundamental (10pp/9.96pp) y 3ª (0.007pp/0.007pp) armónica del flujo magnético obtenido del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, respecto a los espectros de frecuencias obtenidos a tensión nominal. En la tabla 3.34 se muestran los espectros de frecuencias de los flujos magnéticos de ambos modelos cuando se disminuye la tensión nominal.

Al comparar los espectros de frecuencias de la tabla 3.34 la magnitud de la fundamental del modelo de pérdidas es menor como las magnitudes de 5ª, 9ª, 11ª y 15ª armónicas, pero las magnitudes de 7ª y 13ª armónicas son menores en el modelo sin pérdidas. Los flujos magnéticos de ambos modelos contienen pequeñas magnitudes de componentes de 3ª, 5ª, 7ª, 9ª armónicas, los cuales al sumarse no superan el 1%, conservando el flujo magnético su forma de onda sinusoidal, por lo que el factor de cresta presente en ambos flujos magnéticos es de 1.414 (onda senoidal). Las magnitudes de las fundamentales del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas presentaron un ángulo de fase de 30.5 grados, siendo las diferencias de los ángulos de fase para las magnitudes de 3ª, 5ª, 9ª, 11ª y 13ª armónicas de ambos menor a 5pp con excepción de las magnitudes de 7ª y 15ª armónicas. Las formas de onda del flujo magnético obtenidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas al disminuir la tensión nominal presentaron una distorsión armónica total de 0.2094% y 0.2093% respectivamente, siendo esta última es menor por una diferencia de 0.0001pp.

No. Armónicas	Modelo Sin Pérdida THD=0.20941%			Modelo Con Pérdida THD=0.20931%		
	Amplitud RMS [Wb]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]	Amplitud RMS [Wb]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]
1ª	1.180x10 ⁻³	100.000%	30.45	1.175x10 ⁻³	100.000%	30.45
3ª	9.997x10 ⁻⁸	0.0085%	10.58	9.997x10 ⁻⁸	0.0085%	10.60
5ª	3.871x10 ⁻⁸	0.0033%	4.34	3.789x10 ⁻⁸	0.0032%	4.37
7ª	8.852x10 ⁻⁹	0.0008%	7.82	9.206x10 ⁻⁹	0.0008%	7.65
9ª	2.007x10 ⁻⁹	0.0002%	6.03	1.534x10 ⁻⁹	0.0001%	5.76
11ª	3.305x10 ⁻⁹	0.0003%	6.73	3.187x10 ⁻⁹	0.0003%	6.13
13ª	1.416x10 ⁻⁹	0.0001%	5.82	1.416x10 ⁻⁹	0.0001%	5.06
15ª	4.721x10 ⁻¹⁰	0.0000%	5.14	2.361x10 ⁻¹⁰	0.0000%	5.59

Tabla 3.34 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de los flujos magnéticos del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas al disminuir la tensión nominal un 10%, para el banco trifásico en conexión Dy1.

3.8.3 Comparación de espectros de frecuencias al incrementar o disminuir la tensión nominal

Las tablas 3.26, 3.27 y 3.28 muestran las comparaciones de manera individual de los espectros de frecuencias de las corrientes de vacío (línea) para ambos modelos, sin embargo, para analizar el comportamiento de una manera adecuada al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10%, fue necesario comparar los espectros de frecuencias de cada modelo cuando varía la tensión con los espectros de frecuencias obtenidos a tensión nominal, considerando como referencia la fundamental del modelo sin pérdidas, obteniéndose la tabla 3.35.

Al incrementar la tensión nominal un 10%, el espectro de frecuencias obtenido de la corriente de vacío del modelo sin pérdida difiere, al aumentar la magnitud de la fundamental 22.10pp como las magnitudes de 5ª (0.783pp) y 11ª (0.416pp) armónicas, pero disminuyen las magnitudes de 7ª (0.078pp) y 13ª (0.486pp) armónicas. El espectro de

frecuencias obtenido de la corriente de vacío del modelo con pérdidas difiere, al aumentar la magnitud de la fundamental 22.32pp como las magnitudes de 5ª (0.718pp) y 11ª (0.391pp) armónicas, pero se reducen las magnitudes de 7ª (0.034pp) y 13ª (0.411pp) armónicas.

Al disminuir la tensión nominal un 10%, el espectro de frecuencias obtenido de la corriente de vacío del modelo sin pérdidas difiere, al disminuir la magnitud de la fundamental 16.75pp como las magnitudes de 5ª (0.498pp) y 13ª (0.252pp) armónicas, pero se incrementan las magnitudes de 7ª (0.424pp) y 11ª (0.433pp) armónicas. El espectro de frecuencias obtenido de la corriente de vacío del modelo con pérdidas difiere, al disminuir la magnitud de la fundamental 18.25pp como las magnitudes de 5ª (0.567pp) y 13ª (0.207pp) armónicas, pero se incrementan las magnitudes de 5ª (0.567pp) y 9ª (0.207pp) armónicas.

No. Armónicas	Tensión nominal		Aumento (10%)		Disminución (10%)	
	Sin Pérdidas	Con Pérdidas	Sin Pérdidas	Con Pérdidas	Sin Pérdidas	Con Pérdidas
1ª	100.000%	133.719%	122.108%	156.039%	83.252%	115.469%
3ª	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%
5ª	3.543%	3.540%	4.326%	4.258%	3.045%	2.973%
7ª	0.550%	0.473%	0.472%	0.439%	0.974%	1.007%
9ª	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%
11ª	0.143%	0.186%	0.559%	0.577%	0.576%	0.553%
13ª	0.531%	0.507%	0.045%	0.096%	0.279%	0.300%
15ª	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%

Tabla 3.35 Comparación de magnitudes de los espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío (línea) del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, cuando se incrementa o disminuye la tensión nominal un 10%, para el banco trifásico en conexión Dy1.

Las tablas 3.13, 3.14 y 3.15 muestran las comparaciones de manera individual de los espectros de frecuencias de las corrientes de vacío (fase) para ambos modelos, sin embargo, para analizar el comportamiento de una manera general al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10%, fue necesario comparar los espectros de frecuencias de cada modelo cuando varia la tensión con los espectros de frecuencias obtenidos a tensión nominal, considerando como referencia la fundamental del modelo sin pérdidas, obteniéndose la tabla 3.36.

Al incrementar la tensión nominal un 10%, el espectro de frecuencias de la corriente de vacío (fase) del modelo sin perdidas difiere, al aumentar la magnitud de la fundamental 22.1pp como las magnitudes de 3ª (7.71pp), 5ª(1.74pp), 7ª (0.027pp), 11ª(0.54pp) y 15ª (0.048pp) armónicas, pero disminuyen las magnitudes de 9ª (0.85pp) y 13ª (0.48pp) armónicas. El espectro de frecuencias obtenido de la corriente de vacío (fase) del modelo con pérdidas difiere, al incrementar la magnitud de la fundamental 22.32pp, como las magnitudes de 3ª (7.46pp), 5ª(1.66pp), 7ª (0.066pp), 11ª (0.52pp) y 15ª (0.44pp) armónicas, pero disminuyen las magnitudes de 9ª (0.84pp) y 13ª (0.13pp).

Al disminuir la tensión nominal un 10%, el espectro de frecuencias obtenido de la corriente de vacío (fase) del modelo sin pérdidas difiere, al disminuir la magnitud de la fundamental 16.76pp como las magnitudes de 3ª (4.71pp), 5ª(0.5pp), 9ª(0.94pp), 13ª (0.25pp) y 15ª(0.14pp) armónicas, pero se incrementan las magnitudes de 7ª (0.423pp) y 11ª (0.434pp) armónicas. El espectro de frecuencias obtenido de la corriente de vacío (fase) del modelo con pérdidas difiere, al disminuir la magnitud de la fundamental 18.25pp como las magnitudes de 3ª (4.70pp), 5ª(0.57pp), 9ª(0.97pp), 13ª (0.2pp) y 15ª(0.2pp) armónicas, pero se incrementan las magnitudes de 7ª (0.53pp) y 11ª (0.37pp) armónicas al disminuir la tensión nominal.

No. Armónicas	Tensión nominal		Aumento (10%)		Disminución (10%)	
	Sin Pérdidas	Con Pérdidas	Sin Pérdidas	Con Pérdidas	Sin Pérdidas	Con Pérdidas
1ª	100.000%	133.700%	122.100%	156.025%	83.238%	115.454%
3ª	9.973%	9.736%	17.680%	17.202%	5.256%	5.041%
5ª	3.540%	3.540%	5.283%	5.201%	3.046%	2.974%
7ª	0.550%	0.473%	0.577%	0.539%	0.973%	1.006%
9ª	1.209%	1.193%	0.357%	0.352%	0.275%	0.220%
11ª	0.143%	0.187%	0.682%	0.704%	0.577%	0.555%
13ª	0.533%	0.506%	0.055%	0.115%	0.280%	0.302%
15ª	0.242%	0.264%	0.726%	0.704%	0.104%	0.066%

Tabla 3.36 Comparación de magnitudes de los espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, cuando se incrementa o disminuye la tensión nominal un 10%, para el banco trifásico en conexión Dy1.

Las tablas 3.29, 3.30 y 3.31 muestran las comparaciones de manera individual de los espectros de frecuencias de las tensiones inducidas para ambos modelos, sin embargo, para analizar el comportamiento de una manera general al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10%, fue necesario comparar los espectros de frecuencias de cada modelo cuando varía la tensión, con los espectros de frecuencias obtenidos a tensión nominal, considerando como referencia la fundamental del modelo sin pérdidas, obteniéndose la tabla 3.37.

No. Armónicas	Nominal		Aumento (10%)		Disminución (10%)	
	Sin Pérdidas	Con Pérdidas	Sin Pérdidas	Con Pérdidas	Sin Pérdidas	Con Pérdidas
1ª	100.000%	99.803%	109.971%	109.783%	90.016%	89.823%
3ª	0.086%	0.047%	0.139%	0.076%	0.045%	0.024%
5ª	0.046%	0.017%	0.062%	0.023%	0.039%	0.014%
7ª	0.010%	0.002%	0.009%	0.002%	0.017%	0.005%
9ª	0.027%	0.006%	0.007%	0.002%	0.006%	0.001%
11ª	0.004%	0.001%	0.016%	0.003%	0.015%	0.003%
13ª	0.017%	0.002%	0.002%	0.001%	0.009%	0.001%
15ª	0.009%	0.001%	0.024%	0.003%	0.004%	0.000%

Tabla 3.37 Comparación de magnitudes de los espectros de frecuencia obtenidos de las tensiones inducidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, cuando se incrementa o disminuye la tensión nominal un 10%, para el banco trifásico en conexión Dy1.

Al incrementar la tensión nominal un 10%, el espectro de frecuencias obtenido de la tensión inducida del modelo sin pérdidas difiere, al incrementar la magnitud de fundamental 9.97pp como las magnitudes de 3ª (0.053pp), 5ª (0.016pp), 11ª (0.012pp) y 15ª (0.015pp) armónicas, pero se reducen las magnitudes de 7ª (0.001pp), 9ª (0.02pp), y 13ª (0.015pp) armónicas. El espectro de frecuencias obtenido de la tensión inducida del modelo con pérdidas difiere, al aumentar la magnitud fundamental 9.98pp como las magnitudes de 3ª (0.029pp), 5ª (0.006pp), 11ª (0.002pp) y 15ª (0.002pp) armónicas, pero se reducen las magnitudes de 9ª (0.004pp) y 13ª (0.001pp) armónicas al disminuir la tensión nominal.

Al disminuir la tensión nominal un 10%, el espectro de frecuencias obtenido de la tensión inducida del modelo sin pérdidas difiere, al disminuir la magnitud de la fundamental 9.98pp como las magnitudes de 3ª (0.041pp), 5ª (0.007pp), 9ª (0.021pp), 13ª (0.008pp) y 15ª (0.005pp) armónicas, pero se incrementan las magnitudes de 7ª (0.007pp) y 11ª (0.011pp) armónicas. El espectro de frecuencias obtenido de la tensión inducida del modelo con pérdidas difiere, al disminuir la magnitud de la fundamental 9.98pp como las magnitudes de 3ª (0.023pp), 5ª (0.003pp), 9ª (0.005pp), 13ª (0.001pp) y 15ª (0.001pp) armónicas, pero se incrementan las magnitudes de 7ª (0.003pp) y 9ª (0.002pp) armónicas.

Las tablas 3.32, 3.33 y 3.34 muestran las comparaciones de manera individual de los espectros de frecuencias de los flujos magnéticos, sin embargo, para analizar el comportamiento de una manera general al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10%, fue necesario comparar los espectros de frecuencias de cada modelo cuando varía la tensión nominal, con los espectros de frecuencias obtenidos a tensión nominal, considerando como referencia la fundamental del modelo sin pérdidas, obteniéndose la tabla 3.38.

No. Armónicas	Nominal		Aumento (10%)		Disminución (10%)	
	Sin Pérdidas	Con Pérdidas	Sin Pérdidas	Con Pérdidas	Sin Pérdidas	Con Pérdidas
1ª	100.000%	99.565%	110.005%	109.524%	90.003%	89.606%
3ª	0.015%	0.015%	0.028%	0.028%	0.008%	0.008%
5ª	0.003%	0.003%	0.005%	0.005%	0.003%	0.003%
7ª	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.001%	0.001%
9ª	0.001%	0.001%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%
11ª	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%
13ª	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%
15ª	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%

Tabla 3.38 Comparación de magnitudes de los espectros de frecuencia obtenidos de los flujos magnéticos del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, cuando se incrementa o disminuye la tensión nominal un 10%, para el banco trifásico en conexión Dy1.

Al incrementar la tensión nominal un 10%, el espectro de frecuencias obtenido del flujo magnético del modelo sin pérdidas difiere, al incrementar la magnitud de la fundamental 10pp como las magnitudes de 3ª (0.013pp) y 5ª (0.002pp) armónicas, pero se reduce la magnitud de 9ª (0.001pp) armónicas, aunque las magnitudes de 7ª, 11ª, 13ª y 15ª

armónicas no son apreciables. El de frecuencias obtenido del flujo magnético del modelo con pérdidas difiere, al incrementar la magnitud de la fundamental 9.96pp como las magnitudes de 3^a (0.013pp) y 5^a (0.002pp) armónicas, pero se reducen las magnitudes de 5^a (0.004pp), 7^a (0.001pp), 11^a (0.001pp) y 15^a (0.001pp) armónicas, aunque la magnitud de 13^a armónica no es apreciable.

Al disminuir la tensión nominal un 10%, el espectro de frecuencias obtenido del flujo magnético del modelo sin pérdidas difiere, al disminuir la magnitud de la fundamental 9.99pp como las magnitudes de 3^a (0.007pp) y 9^a (0.001pp) armónicas, pero se incrementan la magnitud de 7^a (0.007pp) armónica. El espectro de frecuencias obtenido del flujo magnético del modelo con pérdidas difiere, al disminuir la magnitud de la fundamental 9.96pp como las magnitudes de 3^a (0.007pp) y 9^a (0.001pp) armónicas, pero se incrementa la magnitud de 7^a (0.001pp) armónica.

Las distorsiones armónicas totales de la corriente de vacío, flujo magnético y tensión inducida obtenidas de ambos modelos para los distintos niveles de tensión se muestran en la tabla 3.39. En el modelo sin pérdidas la distorsión armónica total de la corriente de vacío al incrementar la tensión nominal aumenta 0.76pp, en el flujo magnético 0.0045pp y en la tensión inducida 0.044pp, respecto a los THD_{Nominal} del modelo sin pérdidas, en cambio, al disminuir la tensión nominal la distorsión de la corriente de vacío disminuye 0.304pp como en el flujo magnético 0.003pp y en la tensión inducida 0.025pp, respecto a los THD_{Nominal} del modelo sin pérdidas. En el modelo con pérdidas la distorsión armónica total de la corriente de vacío al incrementar la tensión nominal aumenta 0.68pp como en el flujo magnético 0.004pp y en la tensión inducida 0.015pp, respecto a los THD_{Nominal} del modelo con pérdidas, por lo que al disminuir la tensión nominal la distorsión en la corriente de vacío disminuye 0.083pp como en el flujo magnético 0.003pp y en la tensión inducida 0.008pp, respecto a los THD_{Nominal} del modelo con pérdidas.

Tensión	Modelo sin pérdidas			Modelo con pérdidas		
	THD _I	THD _{Flujo}	THD _{Eind}	THD _I	THD _{Flujo}	THD _{Eind}
Nominal	3.6032%	0.2125%	0.1968%	2.6860%	0.2123%	0.1557%
Aumento del 10%	4.3607%	0.2170%	0.2405%	3.3625%	0.2167%	0.1710%
Disminución del 10%	3.9075%	0.2094%	0.1719%	2.7694%	0.2093%	0.1478%

Tabla 3.39 Distorsiones armónicas totales obtenidas de la corriente de vacío, flujo magnético y tensión inducida del modelo de pérdidas y el modelo con pérdidas, para el banco trifásico en conexión Dy1.

3.9. Caso 5. Banco trifásico conexión Dd0

En este apartado se muestra las simulaciones de las corrientes de vacío, flujos magnéticos y tensiones inducidas del banco trifásico en conexión Dd0 cuando se incrementa o disminuye la tensión nominal un 10% en estado estable, obtenidas mediante el código fuente creado para la plataforma Scilab, debido a las limitaciones de ATP para simular este tipo de conexión, considerando los modelos de los apartados (3.2) y (3.3), limitando el análisis a la “fase a” por ser un sistema balanceado.

3.9.1 Corrientes de vacío en unidades monofásicas

Las corrientes de vacío obtenidas del modelo sin pérdidas para el banco trifásico en conexión Dd0 se muestran en la figura 3.46, obteniéndose tres formas de onda para cada fase, una a tensión nominal y otras dos al incrementar o disminuir la tensión un 10%.

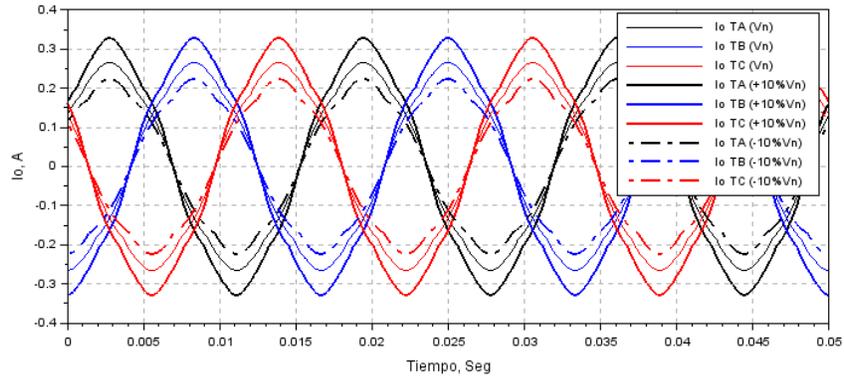


Figura 3.46 Corrientes de vacío (fase) en el lado primario del banco trifásico a base de unidades monofásicas en conexión Dd0, obtenidas con el modelo sin pérdidas a tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión nominal de un 10%.

Las corrientes de vacío de la “unidad TA” que se muestran en la figura 3.46 al obtener sus espectros de frecuencias, los cuales se muestran en la figura 3.47, se componen principalmente de una magnitud fundamental y magnitudes 3^a, 5^a y 7^a armónicas.

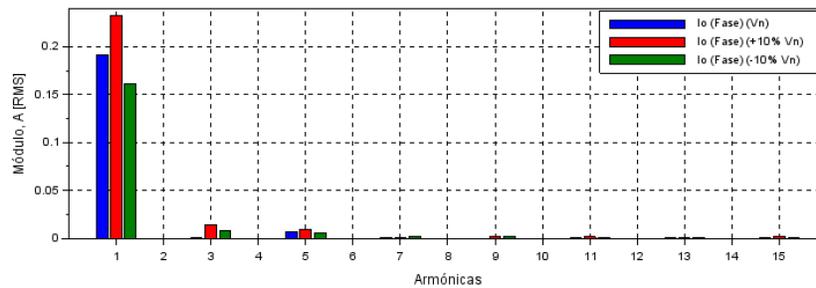


Figura 3.47 Espectros de frecuencias en las corrientes de vacío de la “fase a” del banco trifásico en conexión Dd0, obtenidas con el modelo sin pérdidas.

Las corrientes de vacío obtenidas del modelo con pérdidas para el banco trifásico en conexión Dd0 se muestran en la figura 3.49, obteniéndose tres formas de onda para cada fase, una a tensión nominal y otras dos al incrementar o disminuir la tensión un 10%.

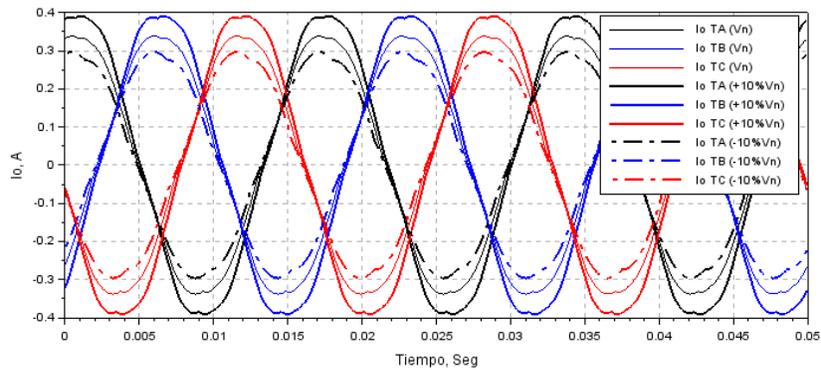


Figura 3.48.- Corrientes de vacío (fase) en lado primario del banco trifásico en conexión Dd0, obtenidas con el modelo sin pérdidas a tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10%.

Las corrientes de vacío de la “unidad TA” que se muestran en la figura 3.48 al obtener sus espectros de frecuencias, los cuales se muestran en la figura 3.49, se componen principalmente de una magnitud fundamental y magnitudes 3^a, 5^a y 7^a armónicas.

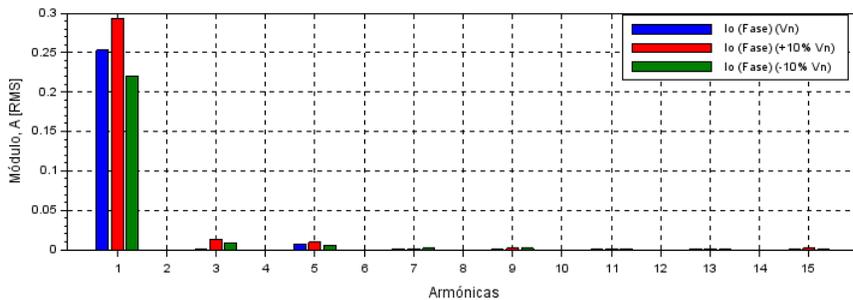


Figura 3.49 Espectros de frecuencias en las corrientes de vacío de la “fase a” del banco trifásico en conexión Dd0, obtenidas con el modelo de pérdidas.

Las magnitudes de las fundamentales de los espectros de frecuencias anteriores aumentan, pero se reducen las magnitudes de 3^a armónica, debido a la corriente de tercera armónica circulante dentro de la delta del lado secundario. Al aplicar la Ley de Lenz, esta corriente de 3^a armónica produce un flujo magnético con la misma componente, pero en el primario aparece una corriente de 3^a armónica (adicional a la corriente de vacío) que cancela el flujo magnético producido por la corriente de 3^a armónica en el secundario, sin embargo, esta cancelación depende del número de vueltas en ambos devanados. Al no presentar el mismo número de vueltas la unidad “TA” el flujo magnético se deforma, debido a que la suma de las corrientes en las deltas debe cumplir la Ley de corriente de Kirchhoff, deformándose la onda del flujo magnético (aplanamiento) y disminuyendo la componente de 3^a armónica.

Los espectros de frecuencias de las figuras 3.47 y 3.49 son comparados en la tabla 3.40, siendo la magnitud de la fundamental del modelo con pérdidas mayor por 31.89pp como las magnitudes de 3^a (0.035pp), 7^a (0.40pp), 9^a (0.01pp) y 11^a (0.041pp) armónicas, en cambio, las magnitudes de 5^a (0.005p), 13^a (0.022pp) y 15^a (0.022pp) armónicas son

mayor en el modelo sin pérdidas. La corriente vacío obtenida del modelo sin pérdidas presentó un factor de cresta de 1.335, por lo que la forma de onda es ancha y un poco aplanada en sus crestas y valles, sin embargo, la corriente de vacío obtenida del modelo de pérdidas presentó una forma de onda ancha, pero con aspecto muy cercano al de una onda sinusoidal debido a su factor de cresta de 1.381. Las magnitudes de las fundamentales del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas presentaron un ángulo de fase de 72.76 grados y 30.67 grados respectivamente, siendo las diferencias de los ángulos de fase para las magnitudes de 5ª armónica de ambos modelos menor a 5pp, con excepción de las magnitudes de 3ª, 7ª, 9ª, 11ª, 13ª y 15ª armónicas.

Las corrientes de vacío obtenidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas a tensión nominal presentaron una distorsión armónica total de 3.597% y 2.716% respectivamente, siendo esta última menor por 0.88pp.

No. Armónicas	Modelo Sin Pérdida THD=3.597%			Modelo Con Pérdida THD=2.716%		
	Amplitud RMS [A]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]	Amplitud RMS [A]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]
1ª	0.19197	100.0%	30.67	0.25320	100.0%	72.76
3ª	1.80x10 ⁻⁴	0.094%	-22.39	2.48x10 ⁻⁴	0.098%	67.94
5ª	6.45x10 ⁻³	3.356%	152.97	6.44x10 ⁻³	2.543%	153.12
7ª	1.00x10 ⁻⁴	0.521%	-143.92	8.60x10 ⁻⁴	0.340%	-147.13
9ª	6.74x10 ⁻⁷	0.000%	12.48	2.95x10 ⁻⁵	0.012%	-66.03
11ª	2.60x10 ⁻⁴	0.136%	-18.69	3.38x10 ⁻⁴	0.133%	-20.54
13ª	9.65x10 ⁻⁴	0.503%	38.41	9.23x10 ⁻⁴	0.364%	39.49
15ª	4.91x10 ⁻⁵	0.026%	60.99	6.16x10 ⁻⁶	0.002%	51.48

Tabla 3.40 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas a tensión nominal, para el banco trifásico en conexión Dd0.

Incrementar un 10% la tensión nominal aumenta principalmente las magnitudes de la fundamental (21.1pp/21.1pp), 3ª (7.31pp/6.82pp) y 5ª (1.65pp/1.57pp) armónicas de los espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, respecto a los análisis espectrales obtenidos a tensión nominal. En la tabla 3.41 se muestran los análisis espectrales de las corrientes de vacío de ambos modelos cuando se incrementa la tensión nominal.

Al comparar los espectros de frecuencias de la tabla 3.41 la magnitud de la fundamental del modelo con pérdidas es mayor por 26.36pp como las magnitudes de 9ª (0.009pp), 11ª (0.017pp) y 13ª (0.049pp) armónicas, en cambio, las magnitudes de 3ª (0.39pp), 5ª (0.065pp), 7ª (0.032pp) y 15ª (0.022pp) armónicas son mayor en el modelo sin pérdidas. La corriente de vacío obtenida con en el modelo sin pérdidas presentó un factor de cresta de 1.492 por lo que la forma de onda es esbelta y elevada en sus crestas y valles, pero la corriente obtenida del modelo con pérdidas presentó una forma de onda ancha y aplanada en sus crestas y valles debido al factor de cresta de 1.323. Las magnitudes de las

fundamentales del modelo con pérdidas y el modelo sin pérdidas presentaron un ángulo de fase de 69.90 grados y 30.72 grados respectivamente, siendo las diferencias de los ángulos de fases para las magnitudes de 3^a, 9^a y 15^a armónicas de ambos modelos mayor a 5pp, con excepción de las magnitudes de 5^a, 7^a, 11^a y 13^a armónicas.

Las corrientes de vacío obtenidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas al incrementar la tensión nominal presentaron una distorsión armónica total de 7.789% y 5.814% respectivamente, aunque esta última menor por una diferencia de 1.98pp.

No. Armónicas	Modelo Sin Pérdida THD=7.789%			Modelo Con Pérdida THD=5.814%		
	Amplitud RMS [A]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]	Amplitud RMS [A]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]
1	0.23250	100.0%	30.72	0.29379	100.0%	69.90
3	1.42x10 ⁻²	6.11%	-85.75	1.33x10 ⁻²	4.54%	-86.37
5	9.61x10 ⁻³	4.13%	153.61	9.46x10 ⁻³	3.22%	153.71
7	1.05x10 ⁻³	0.45%	-144.33	9.75x10 ⁻⁴	0.33%	-147.36
9	1.55x10 ⁻³	0.67%	-80.52	1.57x10 ⁻³	0.53%	-82.41
11	1.24x10 ⁻³	0.53%	158.61	1.28x10 ⁻³	0.44%	159.09
13	9.86x10 ⁻⁵	0.04%	18.85	2.12x10 ⁻⁴	0.07%	34.91
15	1.82x10 ⁻³	0.78%	100.87	1.77x10 ⁻³	0.60%	101.77

Tabla 3.41 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas al incrementar la tensión nominal un 10%, para el banco trifásico en conexión Dd0.

Disminuir un 10% la tensión nominal reduce principalmente las magnitudes de la fundamental (15.90pp/17.30pp) y 5^a (4.28pp/4.45pp) armónica de los espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdida y el modelo con pérdidas, respecto a los espectros de frecuencias obtenidos a tensión nominal. En la tabla 3.42 se muestran los análisis espectrales de las corrientes de vacío de ambos modelos. Al comparar los espectros de frecuencias de la tabla 3.42 la magnitud de la fundamental del modelo de pérdidas es mayor por 36.23pp como las magnitudes de 3^a (0.24pp), 7^a (0.037pp), 9^a (0.068pp), 13^a (0.024pp) y 15^a (0.039pp) armónicas, en cambio, las magnitudes de 5^a (0.08pp) y 11^a (0.025pp) armónicas son mayor en el modelo sin pérdidas. La corriente de vacío obtenida del modelo sin pérdidas presentó un factor de cresta de 1.492, por lo que la forma de onda es esbelta y elevada en sus crestas y valles, pero la corriente obtenida del modelo con pérdidas presentó una forma de onda ancha con un ligero aplanamiento en sus crestas y valles debido a su factor de cresta de 1.388. Las magnitudes de las fundamentales del modelo con pérdidas y el modelo sin pérdidas presentaron un ángulo de fase de 74.97 grados y 30.63 grados respectivamente, siendo las diferencias en los ángulos fase para las magnitudes de 3^a, 5^a, 7^a, 9^a 11^a y 13^a armónicas de ambos modelos menor a 5pp con excepción de la 15^a armónica.

Las corrientes de vacío obtenidas del modelo sin pérdidas y el modelo de pérdidas al disminuir la tensión nominal presentaron una distorsión armónica total de 6.897% y 5.155% respectivamente, siendo esta última menor por una diferencia de 1.74pp.

No. Armónicas	Modelo Sin Pérdida THD=6.897%			Modelo Con Pérdida THD=5.155%		
	Amplitud RMS [A]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]	Amplitud RMS [A]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]
1	0.16148	100.00%	30.63	0.22000	100.00%	74.97
3	8.40×10^{-3}	5.20%	90.63	8.79×10^{-3}	3.99%	91.60
5	5.54×10^{-3}	3.43%	152.71	5.41×10^{-3}	2.46%	152.85
7	1.77×10^{-3}	1.10%	35.64	1.83×10^{-3}	0.83%	36.83
9	1.70×10^{-3}	1.05%	-81.04	1.81×10^{-3}	0.82%	-82.52
11	1.05×10^{-3}	0.65%	-20.77	1.01×10^{-3}	0.46%	-21.29
13	5.08×10^{-4}	0.31%	-134.94	5.47×10^{-4}	0.25%	-137.74
15	3.04×10^{-4}	0.19%	93.09	3.67×10^{-4}	0.17%	98.39

Tabla 3.42 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas al disminuir la tensión nominal un 10%, para el banco trifásico en conexión Dd0.

3.9.1 Flujos magnéticos en unidades monofásicas

Los flujos obtenidos del modelo sin pérdidas para el banco trifásico en conexión Dd0 se muestran en la figura 3.50, obteniéndose tres formas de onda para cada unidad monofásica, una a tensión nominal y otras dos al incrementar o disminuir la tensión un 10%.

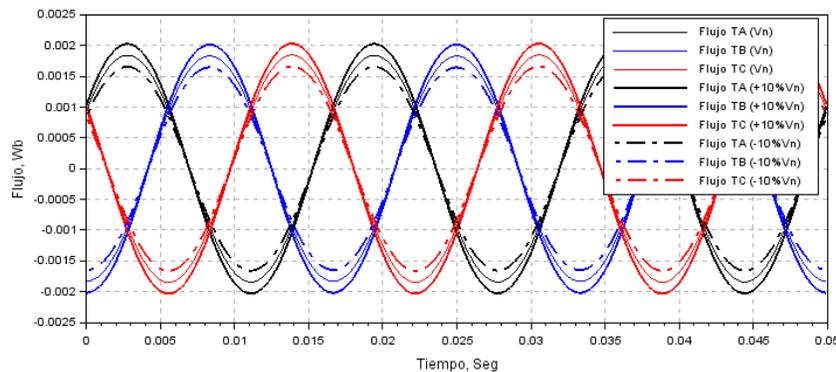


Figura 3.50 Flujos magnéticos de los transformadores monofásicos del banco trifásico en conexión Dd0, obtenidos con el modelo sin pérdidas a tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10%.

Los espectros de frecuencias obtenidos de los flujos magnéticos del modelo sin pérdidas se muestran en la figura 3.51 para la unidad TA. Debido a la conexión delta en el lado secundario al aparecer una corriente de 3ª armónica, la cual produce un flujo magnético de la misma componente, por la Ley de Lenz en el lado primario también aparecerá una corriente de 3ª armónica cuyo flujo magnético es de la misma componente, siendo cancelado el flujo producido por la delta del lado secundario. La cancelación completa de estas corrientes de 3ª armónica depende del número de vueltas de la bobina primaria y secundaria, por consiguiente, para cumplir esta condición el flujo magnético presenta una deformación (aplanamiento de crestas y valles) debido a la componente de 3ª armónica en el flujo magnético.

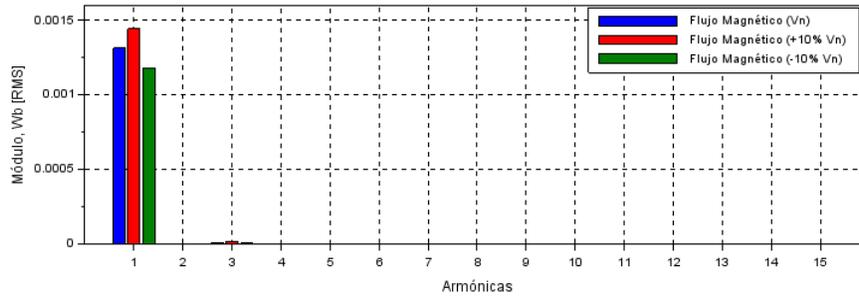


Figura 3.51 Espectros de frecuencia de los flujos magnéticos de la unidad “TA” del banco trifásico en conexión Dd0, obtenidos con el modelo sin pérdidas.

Los flujos obtenidos del modelo con pérdidas para el banco trifásico en conexión Dd0 se muestran en la figura 3.52, obteniéndose tres formas de onda para cada unidad monofásica, una a tensión nominal y otras dos al incrementar o disminuir la tensión un 10%. Los flujos magnéticos de las figuras 3.52 y 3.53 presentaron un ligero aplastamiento en sus crestas y valles que no es apreciable a simple vista.

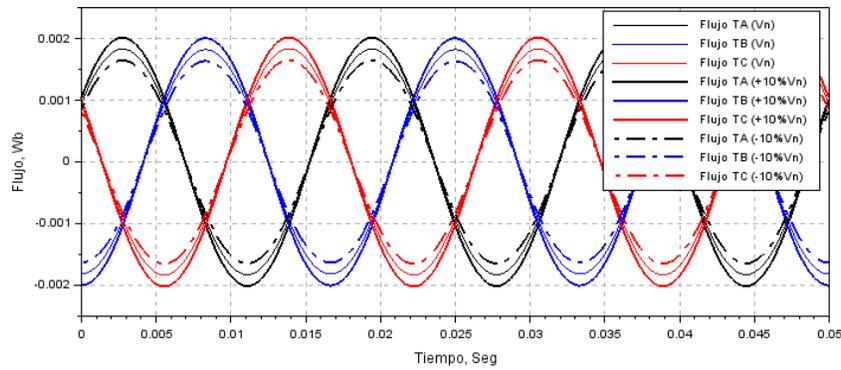


Figura 3.52 Flujos magnéticos de los transformadores monofásicos del banco trifásico en conexión Dd0, obtenidos con el modelo de pérdidas a tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10%.

Los espectros de frecuencias obtenidos de los flujos magnéticos del modelo con pérdidas para la unidad “TA” se muestran en la figura 3.53, los cuales se componen de una magnitud fundamental y una magnitud de 3ª armónica.

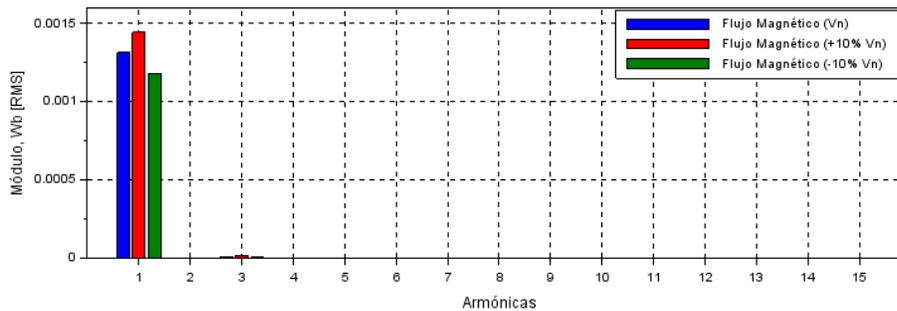


Figura 3.53 Espectros de frecuencias de los flujos magnéticos de la unidad “TA” del banco trifásico en conexión Dd0, obtenidos con el modelo de pérdidas.

Los espectros de frecuencia obtenidos de los flujos magnéticos son comparados en la tabla 3.43, siendo mayor la magnitud de la fundamental del modelo sin pérdidas por 0.15pp como las magnitudes de 7^a, 13^a y 15^a armónicas, pero las magnitudes de 3^a, 5^a y 11^a armónicas son menor. El flujo magnético obtenido del modelo sin pérdidas presenta un factor de cresta de 1.422, por lo que la forma de onda es esbelta y elevada en sus crestas y valles, pero el flujo magnético obtenido del modelo con pérdidas presenta una forma de onda con la misma característica anteriormente mencionados, pero con un factor de cresta de 1.418. Las fundamentales de ambos modelos presentaron un idéntico ángulo de fase de 30.67 grados, pero los ángulos de fase para las magnitudes de 3^a, 5^a, 7^a, 9^a, 11^a, 13^a y 15^a armónicas de ambos modelos no presentaron una diferencia mayor a 5pp.

Los flujos magnéticos obtenidos del modelo sin pérdidas y el modelo de pérdidas a tensión nominal del banco trifásico presentaron una distorsión armónica total de 0.8% y 0.802% respectivamente, siendo esta última mayor por una diferencia de 0.002pp.

No. Armónicas	Modelo Sin Pérdida THD=0.800%			Modelo Con Pérdida THD=0.802%		
	Amplitud RMS [Wb]	Amplitud [%]	No.	Amplitud RMS [Wb]	Amplitud [%]	No.
1	1.311x10 ⁻³	100.0%	30.67	1.309x10 ⁻³	100.0%	30.67
3	9.247x10 ⁻⁶	0.705%	-72.88	9.248x10 ⁻⁶	0.708%	-72.96
5	4.465x10 ⁻⁸	0.003%	5.47	4.477x10 ⁻⁸	0.003%	5.47
7	5.234x10 ⁻⁹	0.000%	5.96	4.544x10 ⁻⁹	0.000%	6.03
9	1.134x10 ⁻⁶	0.086%	67.75	1.134x10 ⁻⁶	0.087%	67.87
11	5.496x10 ⁻¹⁰	0.000%	9.24	7.884x10 ⁻¹⁰	0.000%	9.22
13	3.028x10 ⁻⁹	0.000%	9.76	2.917x10 ⁻⁹	0.000%	9.68
15	2.526x10 ⁻⁷	0.019%	-23.62	2.525x10 ⁻⁷	0.019%	-23.69

Tabla 3.43 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de los flujos magnéticos del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas a tensión nominal, para el banco trifásico en conexión Dd0.

Incrementar un 10% la tensión nominal aumenta principalmente las magnitudes de la fundamental (10pp/9.90pp) y 3^a (1.62pp/1.62pp) armónica de los espectros de frecuencias obtenidos de los flujos magnéticos del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, respecto a los análisis espectrales obtenidos a tensión nominal. En la tabla 3.44 se muestran los análisis espectrales de los flujos magnéticos de ambos modelos cuando se incrementa la tensión nominal.

Al comparar los espectros de frecuencias de la tabla 3.44 la magnitud de la fundamental del modelo con pérdidas es menor como las magnitudes de 5^a y 7^a armónicas, pero las magnitudes de 11^a y 13^a armónicas son mayores en el modelo sin pérdidas, por lo que las magnitudes de la 3^a y 15^a armónicas no presentaron cambio alguno. Los flujos magnéticos obtenidos del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas presentaron un factor de cresta de 1.423 y 1.414 respectivamente, por lo que, las formas de onda son esbeltas y elevadas en sus crestas y valles. Las fundamentales de ambos modelos presentaron un idéntico ángulo de fase de 30.7 grados, siendo las diferencias en los ángulos

de fase para las magnitudes de 3^a, 5^a, 7^a, 9^a, 11^a, 13^a y 15^a armónicas de ambos modelos menor a 5pp.

Los flujos magnéticos obtenidos del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas al incrementar la tensión nominal presentaron una distorsión armónica total de 1.182% y 1.187% respectivamente, siendo esta última mayor por una diferencia de 0.005pp.

No. Armónicas	Modelo Sin Pérdida THD=1.182%			Modelo Con Pérdida THD=1.187%		
	Amplitud RMS [Wb]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]	Amplitud RMS [Wb]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]
1	1.446x10 ⁻³	100.0%	30.70	1.440x10 ⁻³	100.0%	30.70
3	1.634x10 ⁻⁵	1.133%	-77.86	1.634x10 ⁻⁵	1.138%	-77.93
5	6.675x10 ⁻⁸	0.005%	4.15	6.596x10 ⁻⁸	0.005%	4.16
7	5.296x10 ⁻⁹	0.000%	6.00	4.936x10 ⁻⁹	0.000%	6.02
9	3.316x10 ⁻⁷	0.023%	31.92	3.316x10 ⁻⁷	0.023%	32.01
11	4.800x10 ⁻⁹	0.000%	6.90	4.941x10 ⁻⁹	0.000%	6.87
13	2.230x10 ⁻¹⁰	0.000%	6.80	3.911x10 ⁻¹⁰	0.000%	6.82
15	6.678x10 ⁻⁷	0.046%	69.05	6.678x10 ⁻⁷	0.046%	69.16

Tabla 3.44 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de los flujos magnéticos del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas al incrementar la tensión nominal un 10%, para el banco trifásico en conexión Dd0.

Disminuir un 10% la tensión nominal reduce principalmente las magnitudes de la fundamental (9.5pp/9.6pp) y 3^a (1.62pp/1.02pp) armónica de los espectros de frecuencias obtenidos de los flujos magnéticos obtenidos del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, respecto a los espectros de frecuencias obtenidos a tensión nominal. En la tabla 3.45 se muestran los análisis espectrales de los flujos magnéticos de ambos modelos cuando se incrementa la tensión nominal.

Al comparar los espectros de frecuencias que se muestra en la tabla 3.45 la magnitud de la fundamental del modelo de pérdidas es menor como las magnitudes de 7^a, 13^a y 15^a armónicas y las magnitudes de 5^a y 11^a armónicas son mayor en el modelo sin pérdidas, aunque la magnitud de 3^a y 9^a armónicas no presenta un cambio significativo. El flujo magnético obtenido del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas presentaron un factor de cresta similar de 1.414, siendo las formas de onda sinusoidales. Las magnitudes de las fundamentales de ambos modelos presentaron el mismo ángulo de fase de 30.65 grados y los ángulos de fase para las magnitudes de 3^a, 5^a, 7^a, 9^a, 11^a, 13^a y 15^a armónicas de ambos modelos menor a 5pp.

Los flujos magnéticos obtenidos del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas al disminuir la tensión nominal presentaron una distorsión armónica total de 0.56% y 0.561% respectivamente, siendo este último mayor por una diferencia de 0.001pp.

No. Armónicas	Modelo Sin Pérdida THD=0.56%			Modelo Con Pérdida THD=0.561%		
	Amplitud RMS [Wb]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]	Amplitud RMS [Wb]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]
1	1.183x10 ⁻³	100.0%	30.65	1.179x10 ⁻³	100.0%	30.65
3	4.788x10 ⁻⁶	0.406%	-63.21	4.788x10 ⁻⁶	0.407%	-63.37
5	3.782x10 ⁻⁸	0.003%	6.41	3.862x10 ⁻⁸	0.003%	6.37
7	9.261x10 ⁻⁹	0.001%	7.96	8.938x10 ⁻⁹	0.001%	7.87
9	2.073x10 ⁻⁷	0.018%	27.24	2.073x10 ⁻⁷	0.018%	27.24
11	3.139x10 ⁻⁹	0.000%	8.35	3.263x10 ⁻⁹	0.000%	8.49
13	1.576x10 ⁻⁹	0.000%	8.29	1.466x10 ⁻⁹	0.000%	8.46
15	6.477x10 ⁻⁸	0.005%	-1.72	6.476x10 ⁻⁸	0.006%	-1.78

Tabla 3.45 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de los flujos magnéticos del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas al disminuir la tensión nominal un 10%, para el banco trifásico en conexión Dd0.

3.9.2 Tensiones inducidas en unidades monofásicas

Las tensiones inducidas obtenidas del modelo sin pérdidas para el banco trifásico a base de unidades monofásicas en conexión Dd0 se muestran en la figura 3.54, obteniéndose tres formas de onda para cada unidad monofásica, una a tensión nominal y otras dos al incrementar o disminuir la tensión un 10%.

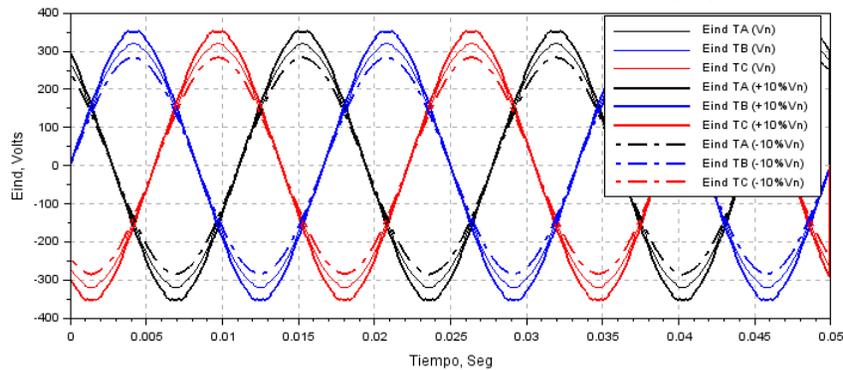


Figura 3.54 Tensiones inducidas de los transformadores monofásicos del banco trifásico en conexión Dd0, obtenidas con el modelo sin pérdidas a tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10%.

Debido a que los flujos magnéticos de las unidades monofásicas presentaron un cambio mínimo en sus crestas y valles, las formas de ondas de las tensiones inducidas se deformaron en mayor medida cuando se incrementó la tensión un 10%. Los espectros de frecuencias obtenidos de las tensiones inducidas del modelo sin pérdidas para la unidad “TA” se muestran en la figura 3.55, los cuales se componen de una magnitud fundamental y una magnitud de 3ª armónica.

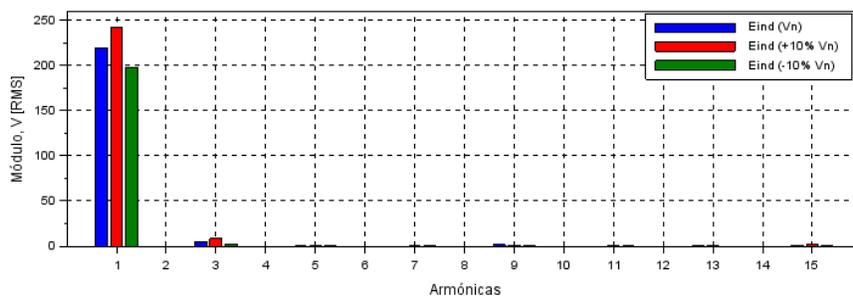


Figura 3.55 Espectro de frecuencias de las tensiones inducidas de la unidad “TA” del banco trifásico en conexión Dd0, obtenidas con el modelo sin pérdidas.

Las tensiones inducidas obtenidas del modelo con pérdidas para el banco trifásico a base de unidades monofásicas en conexión Dd0 se muestran en la figura 3.56, obteniéndose tres formas de onda para cada unidad monofásica, una a tensión nominal y otras dos al incrementar o disminuir la tensión un 10%.

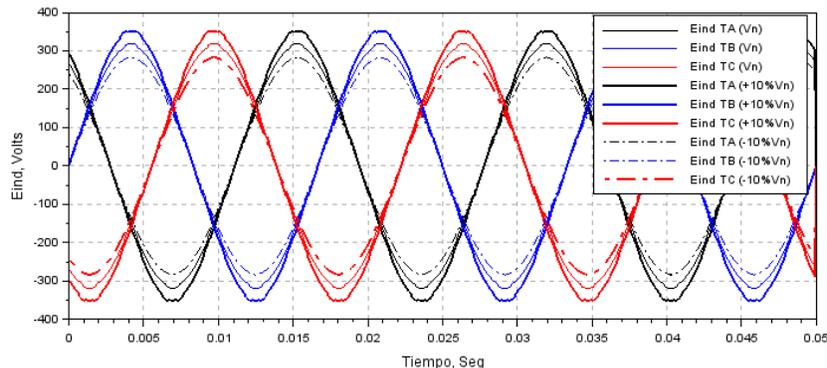


Figura 3.56 Tensiones inducidas de los transformadores monofásicos del banco trifásico en conexión Dd0, obtenidas con el modelo de pérdidas a tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10%.

Los espectros de frecuencias obtenidos de las tensiones inducidas del modelo sin pérdidas para la unidad “TA” se muestran en la figura 3.57, los cuales se componen de una magnitud fundamental y una magnitud de 3ª armónica.

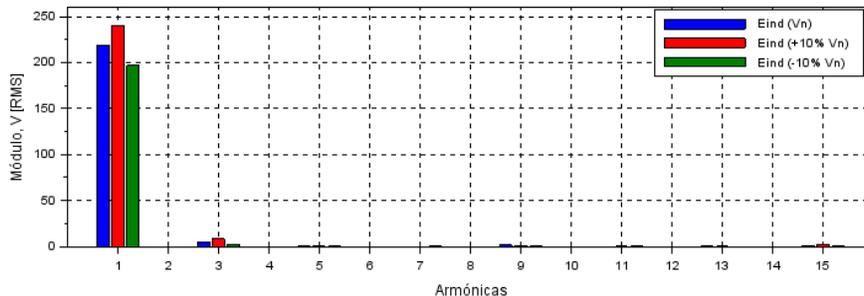


Figura 3.57 Espectro de frecuencias de las tensiones inducidas de la unidad “TA” del banco trifásico en conexión Dd0, obtenidas con el modelo de pérdidas.

Al comparar los espectros de frecuencias de la tabla 3.46 la magnitud de la fundamental del modelo con pérdidas es menor por 0.43pp como las magnitudes de 3^a, 7^a, 9^a y 13^a armónicas, pero son mayor las magnitudes de 5^a, 11^a y 15^a armónicas, sin embargo, la suma del contenido porcentual de 3^a, 5^a, 7^a etc. armónicas rebasa el 1%, por lo que la forma de onda pierde sus características sinusoidales. Las tensiones inducidas obtenidas de ambos modelos presentaron un factor de cresta de 1.373, por lo que ambas formas de onda son anchas, con crestas y valles aplanados. Las magnitudes de la fundamentales de ambos modelos presentaron un ángulo de fase similar de 120.79 grados, siendo las diferencias en sus ángulos de fase para las magnitudes de 3^a, 5^a, 7^a, 9^a, 11^a, 13^a y 15^a armónicas de ambos modelos menor a 5pp.

Las tensiones inducidas obtenidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas a tensión nominal presentaron una distorsión armónica total de 2.236% y 2.246% respectivamente, siendo este último mayor por una diferencia de 0.01pp.

No. Armónicas	Modelo Sin Pérdida THD=2.236%			Modelo Con Pérdida THD=2.246%		
	Amplitud RMS [V]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]	Amplitud RMS [V]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]
1	219.815	100.0%	120.79	218.861	100.0%	120.79
3	4.65092	2.116%	5.26	4.65086	2.125%	5.23
5	0.04020	0.018%	160.96	0.04029	0.018%	160.96
7	0.00510	0.002%	157.36	0.00459	0.002%	158.00
9	1.70618	0.776%	-173.34	1.70617	0.780%	-173.34
11	0.00326	0.001%	178.68	0.00328	0.002%	178.55
13	0.00739	0.003%	-176.33	0.00715	0.003%	-176.43
15	0.62914	0.286%	12.15	0.62916	0.287%	12.17

Tabla 3.46 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las tensiones inducidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas a tensión nominal, para el banco trifásico en conexión Dd0.

Incrementar un 10% la tensión nominal aumenta principalmente las magnitudes de la fundamental (10pp/9.90pp) y 3^a (0.54pp/0.54pp) armónica de los espectros de frecuencias obtenidos de las tensiones inducidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, respecto a los espectros de frecuencias obtenidos a tensión nominal. En la tabla 3.47 se muestran los espectros de frecuencias de las tensiones inducidas de ambos modelos cuando se incrementa la tensión nominal.

Al comparar los espectros de frecuencias de la tabla 3.47 la magnitud de la fundamental del modelo con pérdidas es menor como las magnitudes de 3^a, 7^a, 9^a y 15^a armónicas, pero las magnitudes de 11^a y 13^a armónicas son menores en el modelo sin pérdidas y la suma del contenido porcentual de 3^a, 5^a, 7^a etc. armónicas rebasa el 1%, perdiendo las propiedades sinusoidales los flujos magnéticos. Las tensiones inducidas obtenidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas presentaron un factor de cresta de 1.373 y 1.369 respectivamente, siendo ambas formas de onda con crestas y valles aplanados. Las magnitudes de la fundamentales de ambos modelos presentaron un ángulo

de fase similar de 120.82 grados, siendo las diferencias en los ángulos de fases de las magnitudes de 3^a, 5^a, 7^a, 9^a, 11^a, 13^a y 15^a armónicas de ambos modelos menor de 5pp.

Las tensiones inducidas obtenidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas al incrementar la tensión nominal presentaron una distorsión armónica total de 3.437% y 3.452% respectivamente, siendo este último mayor por una diferencia de 0.015pp.

No. Armónicas	Modelo Sin Pérdida THD=3.437%			Modelo Con Pérdida THD=3.452%		
	Amplitud RMS [V]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]	Amplitud RMS [V]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]
1	241.797	100.0%	120.82	240.747	100.0%	120.82
3	8.21842	3.399%	4.76	8.21829	3.414%	4.73
5	0.05872	0.024%	156.58	0.05804	0.024%	156.45
7	0.00530	0.002%	157.64	0.00499	0.002%	157.90
9	0.49907	0.206%	-174.64	0.49907	0.207%	-174.64
11	0.00842	0.003%	173.74	0.00864	0.004%	173.84
13	0.00527	0.002%	162.39	0.00569	0.002%	163.93
15	1.66481	0.689%	-168.26	1.66479	0.692%	-168.26

Tabla 3.47 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las tensiones inducidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas al incrementar la tensión nominal un 10%, para el banco trifásico en conexión Dd0.

Disminuir un 10% la tensión nominal reduce principalmente las magnitudes de la fundamental (9.50pp/9.60pp) y 3^a (0.54pp/0.34pp) armónica de los espectros de frecuencias obtenidos de las tensiones inducidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, respecto a los espectros de frecuencias obtenidos a tensión nominal. En la tabla 3.48 se muestran los análisis espectrales de las tensiones inducidas de ambos modelos cuando se disminuye la tensión nominal.

Al comparar los espectros de frecuencias de la tabla 3.48 la magnitud de la fundamental del modelo con pérdidas es menor como las magnitudes de 3^a, 5^a, 9^a, 11^a y 15^a armónicas, pero la magnitud de 13^a armónica es menor en el modelo sin pérdidas, pero la suma porcentual del contenido de 3^a, 5^a, 7^a etc. armónicas rebasa el 1% la forma de onda pierde sus propiedades sinusoidales. Las tensiones inducidas obtenidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas presentaron un factor de cresta de 1.385 y 1.386 respectivamente, siendo ambas formas de onda anchas, con crestas y valles aplanados. Las magnitudes de la fundamentales de ambos modelos presentaron un ángulo de fase similar de 120.77 grados, en cambio, siendo las diferencias en los ángulos de fases para las magnitudes de 3^a, 5^a, 7^a, 9^a, 11^a, 13^a y 15^a armónicas de ambos modelos menor a 5pp.

Las tensiones inducidas obtenidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas al disminuir la tensión nominal presentaron una distorsión armónica total de 3.437% y 3.452% respectivamente, siendo esta última mayor por una diferencia de 0.015pp.

No. Armónicas	Modelo Sin Pérdida THD=1.174%			Modelo Con Pérdida THD=1.185%		
	Amplitud RMS [V]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]	Amplitud RMS [V]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]
1	197.834	100.0%	120.77	196.975	100.0%	120.77
3	2.40823	1.217%	6.50	2.40817	1.223%	6.44
5	0.03444	0.017%	164.88	0.03376	0.017%	164.78
7	0.01251	0.006%	173.13	0.01287	0.007%	173.34
9	0.31211	0.158%	-175.21	0.31208	0.158%	-175.29
11	0.00543	0.003%	174.22	0.00524	0.003%	174.28
13	0.00345	0.002%	176.68	0.00351	0.002%	176.44
15	0.16123	0.082%	13.68	0.16122	0.082%	13.51

Tabla 3.48 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las tensiones inducidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas al disminuir la tensión nominal un 10%, para el banco trifásico en conexión Dd0.

3.9.2 Comparación de espectros de frecuencias al incrementar o disminuir la tensión nominal.

Las tablas 3.40, 3.41 y 3.42 muestran las comparaciones de manera individual de los espectros de frecuencias de las corrientes de vacío (fase) para ambos modelos, sin embargo, para analizar el comportamiento de una manera general al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10%, fue necesario comparar los espectros de frecuencias de cada modelo cuando varia la tensión con los espectros de frecuencias obtenidos a tensión nominal, considerando como referencia la fundamental del modelo sin pérdidas, obteniéndose la tabla 3.49.

No. Armónicas	Nominal		Aumento (10%)		Disminución (10%)	
	Sin Pérdidas	Con Pérdidas	Sin Pérdidas	Con Pérdidas	Sin Pérdidas	Con Pérdidas
1	100.0%	131.9%	121.1%	153.0%	84.1%	114.6%
3	0.094%	0.129%	7.399%	6.945%	4.375%	4.577%
5	3.356%	3.354%	5.005%	4.926%	2.885%	2.816%
7	0.521%	0.448%	0.545%	0.508%	0.923%	0.954%
9	0.000%	0.015%	0.809%	0.817%	0.885%	0.940%
11	0.136%	0.176%	0.647%	0.668%	0.546%	0.524%
13	0.503%	0.481%	0.051%	0.110%	0.265%	0.285%
15	0.026%	0.003%	0.945%	0.922%	0.159%	0.191%

Tabla 3.49 Comparación de magnitudes de los espectros de frecuencia obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, cuando se incrementa o disminuye la tensión nominal un 10%, para el banco trifásico en conexión Dd0.

Al incrementar la tensión nominal un 10%, el espectro de frecuencias obtenido de la corriente de vacío del modelo sin pérdidas difiere, al incrementar la magnitud de la fundamental 21.11pp como las magnitudes de 3^a (7.3pp), 5^a (1.65pp), 7^a (0.02pp), 9^a (0.81pp), 11^a (0.51pp) y 15^a (0.92pp) armónicas, pero disminuye la magnitud de 13^a (0.45pp) armónica. El espectro de frecuencias obtenido de la corriente de vacío del modelo con pérdidas difiere, al incrementar la magnitud fundamental 21.15pp como las magnitudes de 3^a (6.82pp), 5^a (1.57pp), 7^a (0.06pp), 9^a (0.80pp), 11^a (0.49pp) y 15^a (0.92pp) armónicas, pero se reduce la magnitud de 13^a (0.37%) armónica.

Al disminuir la tensión nominal un 10%, el espectro de frecuencias obtenido de la corriente de vacío del modelo sin pérdidas difiere, al disminuir la magnitud de la fundamental 15.9pp como las magnitudes de 5ª (0.47pp) y 13ª (0.24pp) armónicas, pero se incrementan las magnitudes de 3ª (4.28pp), 7ª (0.40pp), 9ª (0.88pp), 11ª (0.41pp) y 15ª(0.13pp) armónicas. El espectro de frecuencias obtenido de la corriente de vacío del modelo con pérdidas difiere, al disminuir la magnitud de la fundamental 17.3pp como las magnitudes de 5ª (0.54pp) y 13ª (0.20pp) armónicas, pero se incrementan las magnitudes de 3ª (4.45%), 7ª (0.51pp), 9ª (0.93pp), 11ª (0.35pp) y 15ª(0.19pp) armónicas.

Las tablas 3.46, 3.47 y 3.48 muestran las comparaciones de manera individual de los espectros de frecuencias de las tensiones inducidas para ambos modelos, sin embargo, para analizar el comportamiento de una manera general al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10%, fue necesario comparar los espectros de frecuencias de cada modelo cuando varía la tensión con los espectros de frecuencias obtenidos a tensión nominal, considerando como referencia la fundamental del modelo sin pérdidas, obteniéndose la tabla 3.50.

No. Armónicas	Nominal		Aumento (10%)		Disminución (10%)	
	Sin Pérdidas	Con Pérdidas	Sin Pérdidas	Con Pérdidas	Sin Pérdidas	Con Pérdidas
1	100.0%	99.6%	110.0%	109.5%	90.0%	89.6%
3	0.705%	0.705%	1.246%	1.246%	0.365%	0.365%
5	0.003%	0.003%	0.005%	0.005%	0.003%	0.003%
7	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.001%	0.001%
9	0.086%	0.086%	0.025%	0.025%	0.016%	0.016%
11	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%
13	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%
15	0.019%	0.019%	0.051%	0.051%	0.005%	0.005%

Tabla 3.50 Comparación de magnitudes de los espectros de frecuencia obtenidos de las tensiones inducidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, cuando se incrementa o disminuye la tensión nominal un 10%, para el banco trifásico en conexión Dd0.

Al incrementar la tensión nominal un 10%, el espectro de frecuencias obtenido de la tensión inducida del modelo sin pérdidas difiere, al incrementar la magnitud de la fundamental 10pp como las magnitudes de 3ª (0.54pp), 5ª (0.002pp) y 15ª (0.032pp) armónicas, pero se reduce la magnitud de 9ª (0.061pp) armónica, aunque las magnitudes de 7ª, 11ª y 13ª armónicas no presentaron una diferencia considerable. El espectro de frecuencias obtenido de la tensión inducida del modelo con pérdidas al incrementar la tensión nominal difiere, al incrementar la magnitud de la fundamental 9.96pp, como las magnitudes de 3ª (0.54pp), 5ª (0.002pp) y 15ª (0.032pp), pero se reduce la magnitud de 9ª (0.061pp) y las magnitudes de 11ª y 13ª armónicas no presentaron un cambio apreciable.

Al disminuir la tensión nominal un 10%, el espectro de frecuencias obtenido de la tensión inducida del modelo sin pérdidas difiere, al disminuir la magnitud de la fundamental 10pp, como con las magnitudes de 3ª (0.34pp), 9ª (0.071%) y 15ª (0.014%) armónicas, aunque las magnitudes de 5ª, 7ª, 11ª y 13ª no presentaron una diferencia

considerable. El espectro de frecuencias obtenido de la tensión inducida del modelo con pérdidas al disminuir la tensión nominal difiere, al disminuir la magnitud de la fundamental 9.96pp como las magnitudes de 3ª (0.34pp), 5ª (0.001pp), 9ª (0.071%) y 15ª (0.014%) armónicas, pero se incrementan las magnitudes de 7ª (0.003%) y 11ª (0.002%) armónicas, aunque las magnitudes de 7ª, 11ª y 13ª no presentaron una diferencia apreciable.

La tablas 3.43, 3.44 y 3.45 muestran las comparaciones de manera individual de los espectros de frecuencias de los flujos magnéticos para ambos modelos, sin embargo, para analizar el comportamiento de una manera adecuada al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10%, fue necesario comparar los espectros de frecuencias de cada modelo cuando varía la tensión con los espectros de frecuencias obtenidos a tensión nominal, considerando como referencia la fundamental del modelo sin pérdidas, obteniéndose la tabla 3.51.

Al incrementar la tensión nominal un 10%, el espectro de frecuencias obtenido del flujo magnético del modelo sin pérdidas difiere, al incrementar la magnitud de la fundamental 10pp como las magnitudes de 3ª (1.623pp), 5ª (0.008pp), 11ª (0.002pp) armónicas, sin embargo, el resto de componentes armónicas no es apreciable. El espectro de frecuencias obtenido del flujo magnético del modelo con pérdidas al incrementar la tensión difiere, al incrementar la magnitud de la fundamental 9.96%, como las magnitudes de 3ª (1.623pp), 5ª (0.008pp), 11ª (0.002pp) y 15ª (0.471pp) armónicas, pero se reducen las magnitudes de 9ª (0.549%) y 13ª (0.001pp) armónicas, pero la magnitud de 7ª armónica no presentó cambio alguno. Al disminuir la tensión nominal un 10%, el espectro de frecuencias obtenido del flujo magnético del modelo sin pérdidas difiere, al disminuir la magnitud de la fundamental 10pp como las magnitudes de 3ª (1.02pp), 5ª (0.003pp), 9ª (0.634pp), 13ª (0.002pp) y 15ª (0.213pp) armónicas, pero se incrementan las magnitudes de 7ª (0.003pp) y 11ª (0.001pp). El espectro de frecuencias obtenido del flujo magnético del modelo con pérdidas al disminuir la tensión nominal difiere, al disminuir la magnitud de la fundamental 9.96pp, como las magnitudes de 3ª (1.02pp), 5ª (0.003pp), 9ª (0.634pp), 13ª (0.002pp) y 15ª (0.213pp) armónicas, pero se incrementan las magnitudes de 7ª (0.004%) y 11ª (0.001pp) armónicas.

No. Armónicas	Nominal		Aumento (10%)		Disminución (10%)	
	Sin Pérdidas	Con Pérdidas	Sin Pérdidas	Con Pérdidas	Sin Pérdidas	Con Pérdidas
1	100.0%	99.6%	110.0%	109.5%	90.0%	89.6%
3	2.116%	2.116%	3.739%	3.739%	1.096%	1.096%
5	0.018%	0.018%	0.027%	0.026%	0.016%	0.015%
7	0.002%	0.002%	0.002%	0.002%	0.006%	0.006%
9	0.776%	0.776%	0.227%	0.227%	0.142%	0.142%
11	0.001%	0.001%	0.004%	0.004%	0.002%	0.002%
13	0.003%	0.003%	0.002%	0.003%	0.002%	0.002%
15	0.286%	0.286%	0.757%	0.757%	0.073%	0.073%

Tabla 3.51 Comparación de magnitudes de los espectros de frecuencia obtenidos de los flujos magnéticos del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, cuando se incrementa o disminuye la tensión nominal un 10%, para el banco trifásico en conexión Dd0.

Las distorsiones armónicas totales de la corriente de vacío, flujo magnético y tensión inducida obtenidas de ambos modelos para los distintos niveles de tensión se muestran en la tabla 3.52. En el modelo sin pérdidas la distorsión armónica total de la corriente de vacío al incrementar la tensión nominal aumenta 4.19pp como en el flujo magnético 0.38pp y en la tensión inducida 1.20pp, respecto a los $THD_{Nominal}$ del modelo sin pérdidas, sin embargo, al disminuir la tensión nominal la distorsión en la corriente de vacío aumenta 3.30pp, pero en el flujo magnético se reduce 0.24pp como en la tensión inducida 1.06pp, respecto a los $THD_{Nominal}$ del modelo sin pérdidas. En el modelo con pérdidas al incrementar la tensión nominal, la distorsión armónica total de la corriente de vacío aumenta 10pp como en el flujo magnético 0.39pp y en la tensión inducida 1.21pp de la tensión inducida, respecto a los $THD_{Nominal}$ del modelo con pérdidas, pero al disminuir la tensión nominal la distorsión en la corriente de vacío se incrementa 2.44pp y se reduce en el flujo magnético 0.24pp como en la tensión inducida 1.06pp, respecto a los $THD_{Nominal}$ del modelo con pérdidas.

Tensión	Modelo sin pérdidas			Modelo con pérdidas		
	THD_{If}	THD_{Flujo}	THD_{Eind}	THD_{If}	THD_{Flujo}	THD_{Eind}
Nominal	3.597%	0.800%	2.236%	2.716%	0.802%	2.246%
Aumento del 10%	7.789%	1.182%	3.437%	5.814%	1.187%	3.452%
Disminución del 10%	6.897%	0.560%	1.174%	5.155%	0.561%	1.185%

Tabla 3.52 Distorsiones armónicas totales obtenidas de la corriente de vacío, flujo magnético y tensión inducida del modelo de pérdidas y el modelo con pérdidas, para el banco trifásico en conexión Dd0.

El considerar la resistencia de pérdidas al aplicar tensión nominal disminuye la distorsión armónica total en la corriente de vacío, reduciéndose la componente de tercera armónica en ambos modelos, pero se presenta un pequeño aumento en la distorsión armónica total en el flujo magnético y en la tensión inducida con el modelo de pérdidas, por lo que el flujo magnético y tensión inducida en ambos modelos se ve distorsionado debido a las diferencias del número de vueltas del bobinado primario y secundario.

3.10 Caso 6. Banco trifásico conexión Yy0 con neutro aislado en el lado primario

En este apartado se muestran las simulaciones de la corriente de vacío, flujo magnético y tensión inducida de un banco trifásico a base de unidades monofásicas en operación sin carga con tensión nominal de 127 V, obtenidas por medio del código fuente elaborado en Scilab debido a las limitantes de simulación que existentes en ATP, siendo considerado el modelo sin pérdidas del apartado (3.2) y el modelo con pérdidas del apartado (3.3).

Todos los resultados que se muestran pertenecen al lado primario y al ser un sistema balanceado el análisis se extiende únicamente a la “fase a”, considerando la desconexión del neutro a tierra, para un análisis de magnitudes y distorsiones armónicas totales en estado estable.

3.10.1 Corrientes de vacío conexión Yy0 neutro aislado

Las corrientes de vacío obtenidas del modelo sin pérdidas para el banco trifásico a base de unidades monofásicas en conexión Yy0 con neutro aislado se muestran en la figura 3.58, obteniéndose tres formas de onda para cada fase, una a tensión nominal y otras dos al incrementar o disminuir la tensión un 10%.

El aislar el neutro de la conexión Yy0 trae como consecuencia que las componentes de secuencia cero de la corriente de vacío no pueden retornar por este conductor y para compensar tal ausencia el flujo magnético tiende deformarse.

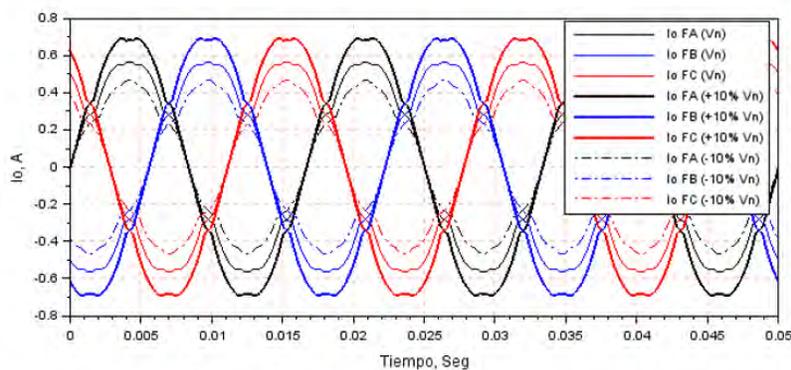


Figura 3.58 Corrientes de vacío para el lado primario del banco trifásico a base de unidades monofásicas en conexión Yy0 con neutro aislado, obtenidas con el modelo sin pérdidas a tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10%.

Los espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío de la “fase a” del banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado de la figura 3.58 se muestran en la figura 3.59, los cuales se componen principalmente de una magnitud fundamental y magnitudes de 5ª, 7ª, 11ª y 13ª armónicas, no existiendo en los espectros de frecuencias componentes de secuencia cero (3ª, 6ª, 9ª etc. armónicas). Al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10% las magnitudes de los espectros de frecuencias del modelo sin pérdidas difieren con el obtenido a tensión nominal, al presentar componentes de 5ª, 7ª, 11ª y 13ª armónicas con mayor y menor magnitud.

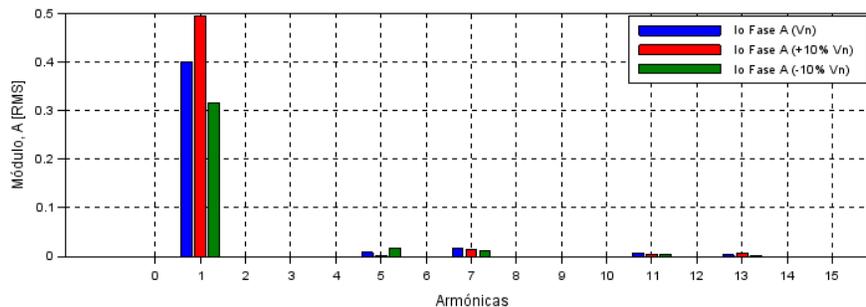


Figura 3.59 Espectros de frecuencia para las corrientes de vacío de la “fase a” del banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado, obtenidas con el modelo sin pérdidas.

Las corrientes de vacío obtenidas del modelo con pérdidas para el banco trifásico a base de unidades monofásicas en conexión Yy0 con neutro aislado se muestran en la figura 3.60, obteniéndose tres formas de onda para cada fase, una a tensión nominal y otras dos al incrementar o disminuir la tensión un 10%.

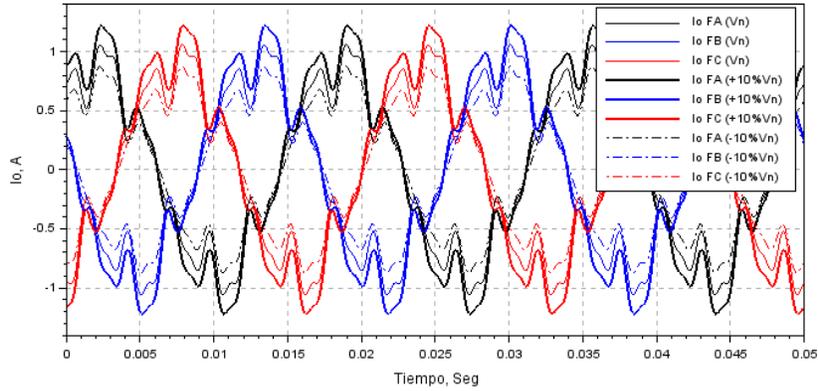


Figura 3.60 Corrientes de vacío para el lado primario del banco trifásico a base de unidades monofásicas en conexión Yy0 con neutro aislado, obtenidas con el modelo de pérdidas a tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10%.

Los espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío de la “fase a” del banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado de la figura 3.60 se muestran en la figura 3.61, los cuales se componen principalmente de una magnitud fundamental y magnitudes de 5^a, 7^a, 11^a y 13^a armónicas, no existiendo en los espectros de frecuencias componentes de secuencia cero (3^a, 6^a, 9^a etc. armónicas). Al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10% las magnitudes de los espectros de frecuencias del modelo con pérdidas difieren con el obtenido a tensión nominal, al presentar componentes de 5^a, 7^a, 11^a y 13^a armónicas con mayor y menor magnitud.

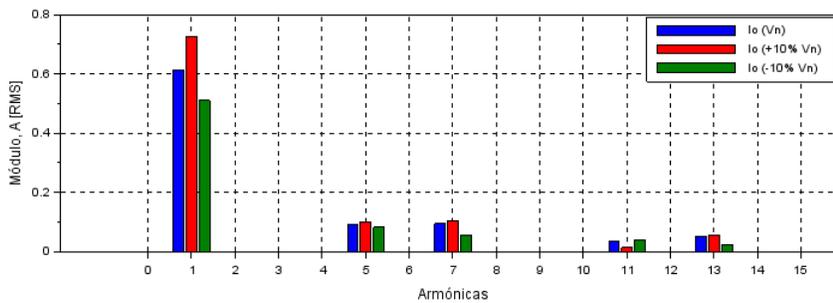


Figura 3.61 Espectros de frecuencias para las corrientes de vacío de la “fase a” del banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado, obtenidas con el modelo de pérdidas.

En la tabla 3.53 se comparan los espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo de pérdidas y el modelo con pérdidas a tensión nominal.

Al comparar los espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío la magnitud de la fundamental del modelo con pérdidas es mayor por 52pp como las magnitudes de 5^a (21pp), 7^a (19pp), 11^a (7pp) y 13^a (12pp) armónicas, pero las componentes de 3^a, 9^a y 15^a armónicas al ser de secuencia cero no son cuantificables. La corriente de vacío obtenida del modelo sin pérdidas presentó un factor de cresta de 1.398, siendo la forma de onda ancha y aplanada en sus crestas y valles, pero la corriente de vacío obtenida del modelo con pérdidas su forma de onda es esbelta y elevada en sus crestas y valles debido al factor de cresta de 1.732. Las magnitudes de las fundamentales del modelo con pérdidas y el modelo sin pérdidas presentaron un ángulo de fase de 48.99 grados y -0.39 grados respectivamente, siendo las diferencias en los ángulos de fases para las magnitudes de 5^a, 7^a, 11^a y 13^a armónicas de ambos modelos mayor de 5pp.

Las corrientes de vacío obtenidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas a tensión nominal presentaron una distorsión armónica total de 5.186% y 24.077%, siendo esta último mayor por una diferencia de 18.89pp.

No. Armónicas	Modelo Sin Pérdida THD=5.186%			Modelo Con Pérdida THD=24.077%		
	Amplitud RMS [A]	Amplitud RMS [%]	Ángulo [Grados]	Amplitud RMS [A]	Amplitud RMS [%]	Ángulo [Grados]
1 ^a	0.40082	100.000%	-0.39	0.61169	100.000%	48.99
3 ^a	0.00000	0.0000%	0.0	0.00000	0.0000%	0.0
5 ^a	0.00812	2.0250%	-2.77	0.09299	15.2015%	157.75
7 ^a	0.01698	4.2360%	-2.82	0.09343	15.2742%	39.93
9 ^a	0.00000	0.0000%	0.0	0.00000	0.0000%	0.0
11 ^a	0.00713	1.7800%	175.47	0.03471	5.6753%	-11.68
13 ^a	0.00299	0.7460%	175	0.05003	8.1790%	-138.29
15 ^a	0.00000	0.0000%	0.0	0.00000	0.0000%	0.0

Tabla 3.53 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas a tensión nominal, para el banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado.

Incrementar un 10% la tensión nominal aumenta principalmente las magnitudes de la fundamental (23.84pp/28.64pp), 5^a (1.59pp/2.9pp) y 11^a (0.98pp/6.18pp) armónicas de los espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, respecto a los espectros de frecuencias obtenidos a tensión nominal. En la tabla 3.54 se muestran los análisis espectrales de las corrientes de vacío de ambos modelos al incrementar la tensión.

Al comparar los espectros de frecuencias en la tabla 3.54 la magnitud de la fundamental del modelo con pérdidas es mayor por 46pp como las magnitudes de 5^a (20pp), 7^a (18pp), 11^a (2pp) y 13^a (10pp) armónicas. La corriente de vacío obtenida del modelo sin pérdidas presentó un factor de cresta de 1.378 siendo la onda ancha y aplanada en sus crestas y valles, pero la corriente de vacío obtenida del modelo con pérdidas es esbelta y elevada en sus crestas y valles debido a su factor de cresta de 1.681. Las

magnitudes de las fundamentales del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas presentaron un ángulo de fase de -0.47 grados y 49.77 grados respectivamente, pero las magnitudes de 5^a, 7^a, 11^a y 13^a armónicas presentaron una diferencia mayor a 5pp en sus ángulos de fase entre ambos modelos.

Las corrientes de vacío obtenidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas al incrementar la tensión nominal un 10% presentaron una distorsión armónica total de 3.504% y 22% respectivamente, siendo este último mayor por 18.5pp.

No. Armónicas.	Modelo Sin Pérdida THD=3.504%			Modelo Con Pérdida THD=22.001%		
	Amplitud RMS [A]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]	Amplitud RMS [A]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]
1 ^a	0.49638	100.000%	-0.47	0.72646	100.000%	49.77
3 ^a	0.00000	0.0000%	0.0	0.00000	0.0000%	0.0
5 ^a	0.00214	0.4320%	-6.78	0.10074	13.8674%	155.88
7 ^a	0.01450	2.9220%	-3.18	0.10398	14.3129%	39.48
9 ^a	0.00000	0.0000%	0.0	0.00000	0.0000%	0.0
11 ^a	0.00396	0.7980%	174.23	0.01231	1.6939%	-2.37
13 ^a	0.00690	1.3900%	173.77	0.05559	7.6515%	-136.72
15 ^a	0.00000	0.0000%	0.0	0.00000	0.0000%	0.0

Tabla 3.54 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas al incrementar la tensión nominal un 10%, para el banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado.

Disminuir un 10% la tensión nominal reduce principalmente las magnitudes de la fundamental (20.88pp/25.28pp), 5^a (2.41pp/) y 11^a (0.5pp/1.40pp) armónicas de los espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, respecto a los espectros de frecuencias obtenidos a tensión nominal. En la tabla 3.55 se muestran los análisis espectrales de las corrientes vacío de ambos modelos al disminuir la tensión nominal.

Al comparar los análisis espectrales de la tabla 3.55 la magnitud de la fundamental del modelo de pérdidas es mayor por 46.34pp como las magnitudes de 5^a (19.86pp), 7^a (18.02pp), 11^a (1.68pp) y 13^a (9.80pp) armónicas. Las corrientes de vacío obtenidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas presentaron un factor de cresta de 1.470 y 1.865 respectivamente, siendo ambas onda esbeltas y elevadas en sus crestas y valles. Las magnitudes de las fundamentales del modelo con pérdidas y el modelo sin pérdidas presentaron un ángulo de fase de 48 grados -0.32 grados respectivamente, siendo las diferencias en los ángulos de fase para las magnitudes de 5^a, 7^a, 11^a y 13^a armónicas de ambos modelos mayor a 5pp.

Las corrientes de vacío obtenidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas al disminuir la tensión nominal un 10% presentaron una distorsión armónica total de 6.917% y 21.591% respectivamente, en cambio este último es menor por una diferencia de 14.63pp.

No. Armónicas	Modelo Sin Pérdida THD=6.917%			Modelo Con Pérdida THD=21.591%		
	Amplitud RMS [A]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]	Amplitud RMS [A]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]
1ª	0.31715	100.000%	-0.32	0.46414	100.000%	48.00
3ª	0.00000	0.0000%	0.0	0.00000	0.0000%	0.0
5ª	0.00137	0.4320%	-2.00	0.06436	13.8674%	161.56
7ª	0.00927	2.9220%	-2.21	0.06643	14.3129%	39.84
9ª	0.00000	0.0000%	0.0	0.00000	0.0000%	0.0
11ª	0.00253	0.7980%	176.42	0.00786	1.6939%	-16.76
13ª	0.00441	1.3900%	-4.44	0.03551	7.6515%	-141.69
15ª	0.00000	0.0000%	0.0	0.00000	0.0000%	0.0

Tabla 3.55 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas al disminuir la tensión nominal un 10%, para el banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado.

3.10.2 Flujo magnético en conexión Yy0 neutro aislado

Los flujos magnéticos obtenidos del modelo sin pérdidas para el banco trifásico a base de unidades monofásicas en conexión Yy0 con neutro aislado se muestran en la figura 3.62, obteniéndose tres formas de onda para cada unidad monofásica, una a tensión nominal y otras dos al incrementar o disminuir la tensión un 10%.

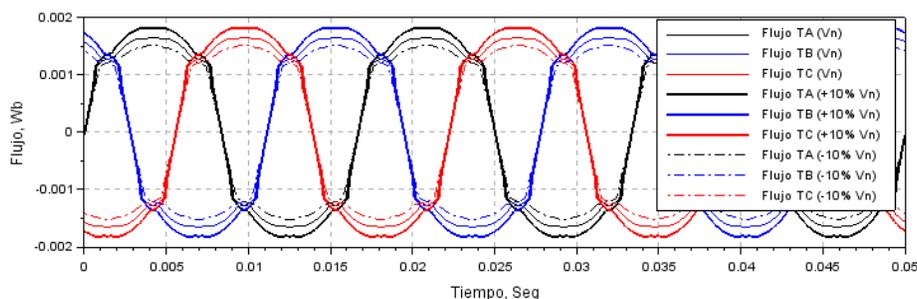


Figura 3.62 Flujos magnéticos de los transformadores monofásicos del banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado, obtenidos con el modelo sin pérdidas a tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10%.

Los espectros de frecuencias obtenidos de los flujos magnéticos de la “unidad TA” del banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado de la figura 3.62 se muestran en la figura 3.63, los cuales se componen principalmente de una magnitud fundamental y magnitudes 3ª, 5ª y 7ª armónicas, pero en menor cantidad de magnitudes de 9ª, 11ª y 15ª armónicas.

Las formas de ondas de los flujos magnéticos de la figura 3.62 de las unidades monofásicas que componen el banco trifásico debido a la no circulación de las componentes de secuencias cero de las corrientes de vacío se deforman tornando sus formas de ondas aplanadas en sus crestas y valles.

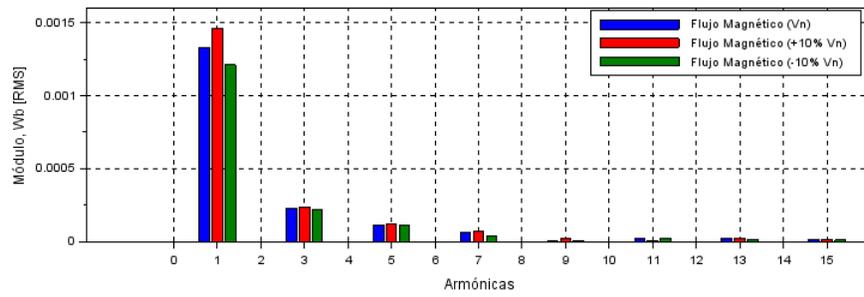


Figura 3.63 Espectros de frecuencias para los flujos magnéticos de la unidad “TA” del banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado, obtenidas con el modelo sin pérdidas.

Los flujos magnéticos obtenidos del modelo con pérdidas para el banco trifásico a base de unidades monofásicas en conexión Yy0 con neutro aislado se muestran en la figura 3.64, obteniéndose tres formas de onda para cada unidad monofásica, una a tensión nominal y otras dos al incrementar o disminuir la tensión un 10%.

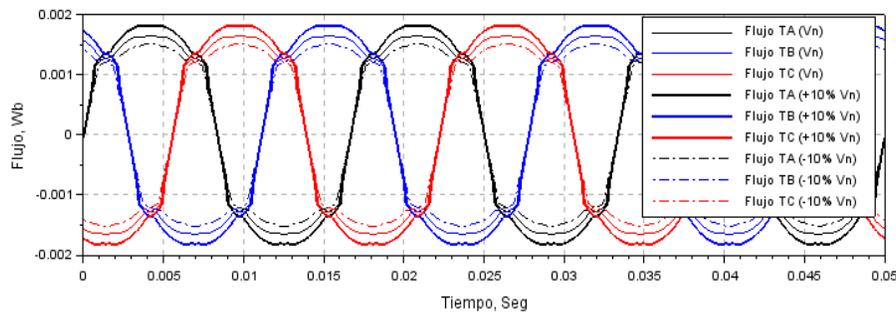


Figura 3.64 Flujos magnéticos de los transformadores monofásicos del banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado, obtenidos con el modelo de pérdidas a tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10%.

Los espectros de frecuencias obtenidos de los flujos magnéticos de la “unidad TA” del banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado de la figura 3.64 se muestran en la figura 3.65, los cuales se componen principalmente de una magnitud fundamental y magnitudes 3^a, 5^a y 7^a armónicas, pero en menor cantidad de magnitudes de 9^a, 11^a y 15^a armónicas.

Las formas de ondas de los flujos magnéticos de la figura 3.64 de las unidades monofásicas que componen el banco trifásico debido a la no circulación de las componentes de secuencias cero de las corrientes de vacío se deforman tornando sus formas de ondas aplanadas en sus crestas y valles.

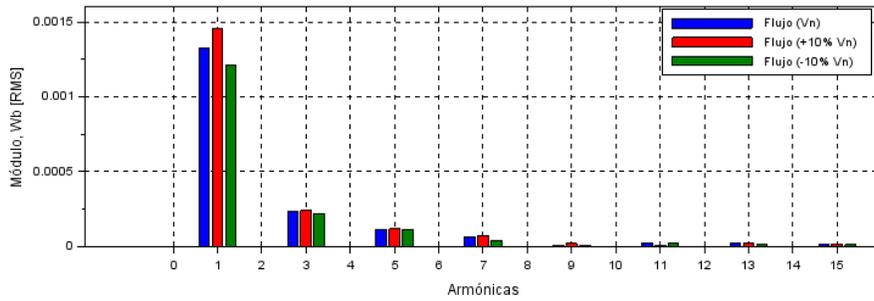


Figura 3.65 Espectros de frecuencias para los flujos magnéticos de la unidad “TA” del banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado, obtenidas con el modelo de pérdidas.

Los espectros de frecuencias de los flujos magnéticos obtenidos a tensión nominal con el modelo sin pérdidas y con el modelo de pérdidas se muestra en la tabla 3.56.

Al comparar los análisis espectrales de la tabla 3.56 la magnitud de la fundamental del modelo con pérdidas es menor por 0.45pp como las magnitudes de 3^a (0.015pp), 7^a (0.038pp), 9^a (0.023pp) y 13^a (0.022pp) armónicas, en cambio las magnitudes de 5^a (0.045pp) y 11^a (0.023pp) armónicas son menores en el modelo sin pérdidas. Los flujos magnéticos obtenidos del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas presentaron un factor de cresta de 1.217 y 1.218 respectivamente, siendo ambas formas de onda anchas y aplanadas en sus crestas y valles. Las magnitudes fundamentales en ambos modelos presentaron un ángulo de fase de -0.40 grado, siendo las diferencias de los ángulos de fase para las magnitudes de 3^a, 5^a, 7^a, 9^a, 11^a, 13^a y 15^a armónicas de ambos modelos menor al 5pp.

Los flujos magnéticos obtenidos del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas a tensión nominal presentaron una distorsión armónica total de 20.194% y 20.627%, en cambio este último es menor por una diferencia de 0.01pp.

No. Armónicas	Modelo Sin Pérdida THD=20.194			Modelo Con Pérdida THD=20.274%		
	Amplitud RMS [Wb]	Amplitud RMS [%]	Ángulo [Grados]	Amplitud RMS [Wb]	Amplitud RMS [%]	Ángulo [Grados]
1 ^a	1.330x10 ⁻³	100.000%	-0.40	1.324x10 ⁻³	100.000%	-0.40
3 ^a	2.304x10 ⁻⁴	17.3290%	-1.22	2.302x10 ⁻⁴	17.3843%	-1.20
5 ^a	1.127x10 ⁻⁴	8.4760%	-2.11	1.133x10 ⁻⁴	8.5561%	-2.08
7 ^a	6.340x10 ⁻⁵	4.7680%	-2.84	6.290x10 ⁻⁵	4.7505%	-2.80
9 ^a	6.901x10 ⁻⁶	0.5190%	-3.53	6.595x10 ⁻⁶	0.4980%	-3.47
11 ^a	2.010x10 ⁻⁵	1.5120%	175.48	2.040x10 ⁻⁵	1.5403%	175.55
13 ^a	2.099x10 ⁻⁵	1.5790%	174.73	2.070x10 ⁻⁵	1.5634%	174.79
15 ^a	1.610x10 ⁻⁵	1.2110%	173.76	1.610x10 ⁻⁵	1.2160%	173.84

Tabla 3.56 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de los flujos magnéticos del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas a tensión nominal, para el banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado.

El incrementar un 10% en la tensión nominal aumenta las magnitudes de la fundamental (9.84pp/9.72pp), 3^a (0.99pp/1.01pp) y 5^a (0.49pp/0.54pp) armónicas de los

espectros de frecuencias obtenidos de los flujos magnéticos del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, respecto a los espectros de frecuencias obtenidos a tensión nominal. En la tabla 3.57 se muestran los análisis espectrales de los flujos magnéticos de ambos modelos al incrementar la tensión nominal.

Al comparar los espectros de frecuencias de la tabla 3.57 la magnitud de la fundamental del modelo con pérdidas es menor por 0.55pp como las magnitudes de 3^a (0.034pp), 5^a (0.007pp), 7^a (0.035pp), 9^a (0.047pp) armónicas son menores en el modelo con pérdidas, en cambio las magnitudes de 11^a (0.08pp), 13^a (0.008pp) y 15^a (0.005pp) armónicas son menor en el modelo sin pérdidas, aunque estas diferencias son muy pequeñas estas se reflejan en la distorsión armónica total. Los flujos magnéticos obtenidos del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas presentaron un factor de cresta de 1.215 y 1.22 respectivamente, siendo ambas formas de onda anchas y aplanadas en sus crestas y valles. Las magnitudes de las fundamentales del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas presentaron un ángulo de fase de -0.48 grados y -0.47 grados respectivamente, siendo las diferencias en los ángulos de fase para las magnitudes de 5^a, 7^a, 11^a y 13^a armónicas de ambos modelos mayor a 5pp, con excepción de la 3^a, 9^a y 15^a armónicas.

Los flujos magnéticos obtenidos del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas al incrementar la tensión nominal un 10% presentaron una distorsión armónica total de 19.18% y 19.24%, en cambio este último es menor por una diferencia de 0.05pp.

No. Armónicas	Modelo Sin Pérdida THD=19.176%			Modelo Con Pérdida THD=19.231%		
	Amplitud RMS [Wb]	Amplitud RMS [%]	Ángulo [Grados]	Amplitud RMS [Wb]	Amplitud RMS [%]	Ángulo [Grados]
1 ^a	1.461x10 ⁻³	100.000%	-0.48	1.453x10 ⁻³	100.000%	-0.47
3 ^a	2.386x10 ⁻⁴	16.3370%	-1.47	2.381x10 ⁻⁴	16.3833%	-1.44
5 ^a	1.166x10 ⁻⁴	7.9840%	-2.56	1.165x10 ⁻⁴	8.0163%	-2.52
7 ^a	7.351x10 ⁻⁵	5.0330%	-3.35	7.3001x10 ⁻⁵	5.0226%	-3.30
9 ^a	1.929x10 ⁻⁵	1.3210%	-4.24	1.861x10 ⁻⁵	1.2803%	-4.17
11 ^a	6.499x10 ⁻⁶	0.4450%	173.61	7.697x10 ⁻⁶	0.5296%	173.92
13 ^a	2.129x10 ⁻⁵	1.4580%	173.49	2.140x10 ⁻⁵	1.4722%	173.61
15 ^a	1.601x10 ⁻⁵	1.0960%	172.28	1.609x10 ⁻⁵	1.1074%	172.41

Tabla 3.57 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de los flujos magnéticos del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas al incrementar la tensión nominal un 10%, para el banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado.

Disminuir un 10% la tensión nominal reduce principalmente la magnitud de la fundamental (8.75pp/8.74pp), 3^a (0.87pp/0.94pp) y 5^a (0.21pp/0.32pp) armónicas de los espectros de frecuencias obtenidos de los flujos magnéticos del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, respecto a los espectros de frecuencias obtenidos a tensión nominal. En la tabla 3.58 se muestran los análisis espectrales de los flujos magnéticos de ambos modelos al disminuir la tensión nominal.

Al comparar ambos análisis de la tabla 3.58 la magnitud de la fundamental del modelo con pérdidas es menor por 0.41pp como las magnitudes de 3^a (0.09pp), 5^a (0.066pp), 7^a (0.15pp), 11^a (0.04pp), 13^a (0.098pp) y 15^a (0.099pp) armónicas, en cambio,

la magnitud de 9ª (0.058pp) armónica es menor en el modelo sin pérdidas. Los flujos magnéticos obtenidos del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas presentaron un factor de cresta de 1.229 y 1.23 respectivamente, siendo ambas formas de onda anchas y aplanadas en sus crestas y valles. Las magnitudes de las fundamentales del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas presentaron un ángulo de fase de -0.32 grados y -0.31 grados respectivamente, siendo las diferencias de los ángulos de fases para las magnitudes de 5ª, 7ª, 11ª, 13ª armónicas de ambos modelos mayor a 5pp, con excepción de las magnitudes de 3ª y 9ª armónica.

Los flujos magnéticos obtenidos al disminuir la tensión nominal con el modelo sin pérdidas y con el modelo de pérdidas presentaron una distorsión armónica total de 20.714% y 20.647%, siendo este último menor por una diferencia de 0.067pp.

No. Armónicas	Modelo Sin Pérdida THD=20.714%			Modelo Con Pérdida THD=20.647%		
	Amplitud RMS [Wb]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]	Amplitud RMS [Wb]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]
1ª	1.213x10 ⁻³	100.000%	-0.32	1.208x10 ⁻³	100.000%	-0.31
3ª	2.188x10 ⁻⁴	18.0330%	-0.98	2.177x10 ⁻⁴	18.0223%	-0.97
5ª	1.099x10 ⁻⁴	9.0580%	-1.74	1.091x10 ⁻⁴	9.0317%	-1.71
7ª	3.940x10 ⁻⁵	3.2470%	-2.33	3.750x10 ⁻⁵	3.1047%	-2.30
9ª	5.096x10 ⁻⁶	0.4200%	177.56	5.800x10 ⁻⁶	0.4801%	177.58
11ª	2.310x10 ⁻⁵	1.9040%	176.51	2.260x10 ⁻⁵	1.8712%	176.56
13ª	1.270x10 ⁻⁵	1.0470%	175.85	1.150x10 ⁻⁵	0.9522%	175.89
15ª	9.803x10 ⁻⁶	0.8080%	174.88	8.602x10 ⁻⁶	0.7121%	174.89

Tabla 3.58 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de los flujos magnéticos del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas al disminuir la tensión nominal un 10%, para el banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado.

Las distorsiones armónicas totales de los flujos magnéticos obtenidos con ambos modelos a tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10% no presentaron un cambio considerable, pero los flujos magnéticos obtenidos con el modelo de pérdidas a tensión nominal y al incrementar esta tensión presentaron una distorsión armónica total mayor respecto a la distorsión armónica total obtenida del modelo sin pérdidas, en cambio al disminuir la tensión nominal la distorsión armónica total del flujo magnético es menor con el modelo de pérdidas por un porcentaje mínimo.

3.10.3 Tensiones inducidas en conexión Yy0 neutro aislado

Las tensiones inducidas obtenidas del modelo sin pérdidas para el banco trifásico a base de unidades monofásicas en conexión Yy0 con neutro aislado se muestran en la figura 3.66, obteniéndose tres formas de onda para cada unidad monofásica, una a tensión nominal y otras dos al incrementar o disminuir la tensión un 10%. Las tensiones inducidas presentaron un alto nivel de contenido armónico debido al aislamiento del neutro y perdieron por completo su forma de onda sinusoidal e incrementando considerablemente el nivel de tensión.

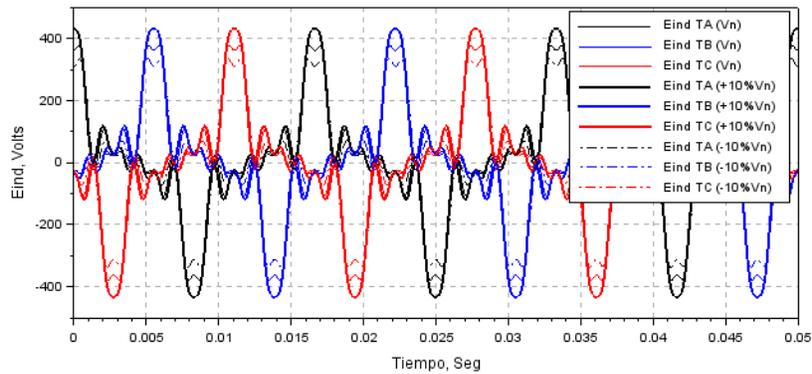


Figura 3.66 Tensiones inducidas de los transformadores monofásicos del banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado, obtenidas con el modelo sin pérdidas a tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10%.

Los espectros de frecuencias obtenidos de los flujos magnéticos de la “unidad TA” del banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado de la figura 3.66 se muestran en la figura 3.67, los cuales se componen principalmente de una magnitud fundamental y de magnitudes de 3^a, 5^a, 7^a, 9^a, 11^a, 13 y 15^a armónicas, sin embargo, las magnitudes de 3^a y 5^a armónicas son mayor a 50 V y las magnitudes de 7^a, 9^a, 11^a, 13^a y 15^a armónicas son menores a 50 V.

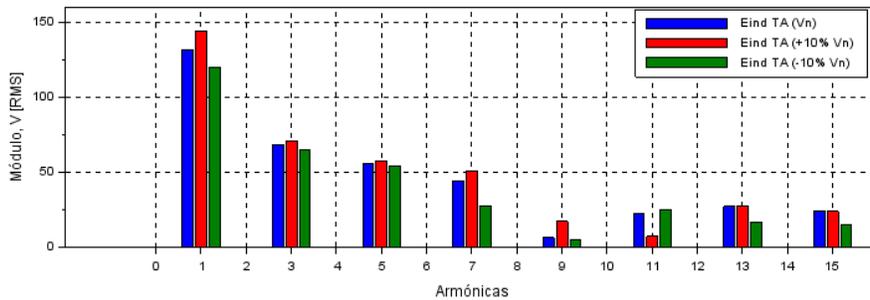


Figura 3.67 Espectros de frecuencias en las tensiones inducidas de la unidad “TA” del banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado, obtenidas con el modelo sin pérdidas.

Las tensiones inducidas obtenidas del modelo con pérdidas para el banco trifásico a base de unidades monofásicas en conexión Yy0 con neutro aislado se muestran en la figura 3.68, obteniéndose tres formas de onda para cada unidad monofásica, una a tensión nominal y otras dos al incrementar o disminuir la tensión un 10%. Las tensiones inducidas presentaron un alto nivel de contenido armónico debido al aislamiento del neutro y perdieron por completo su forma de onda sinusoidal e incrementando considerablemente el nivel de tensión.

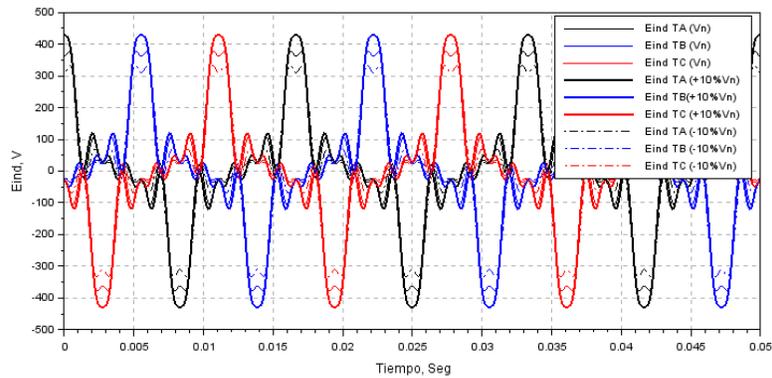


Figura 3.68 Tensiones inducidas de los transformadores monofásicos del banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado, obtenidas con el modelo de pérdidas a tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10%.

Los espectros de frecuencias obtenidos de los flujos magnéticos de la “unidad TA” del banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado de la figura 3.68 se muestran en la figura 3.69, los cuales se componen principalmente de una magnitud fundamental y de magnitudes de 3^a, 5^a, 7^a, 9^a, 11^a, 13 y 15^a armónicas, sin embargo, las magnitudes de 3^a y 5^a armónicas son mayor a 50 V y las magnitudes de 7^a, 9^a, 11^a, 13^a y 15^a armónicas son menores a 50 V.

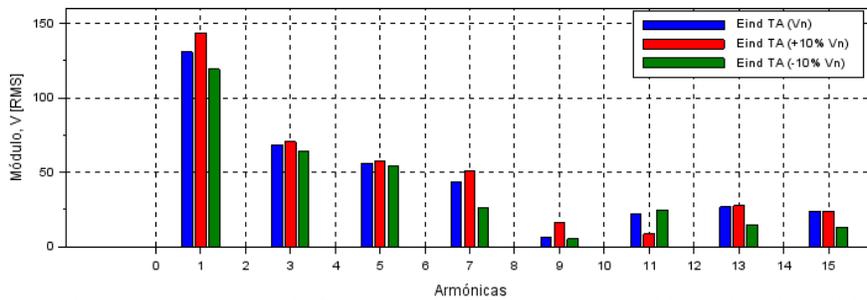


Figura 3.69 Espectros de frecuencias en las tensiones inducidas de la unidad “TA” del banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado, obtenidas con el modelo de pérdidas.

La cuantificación de las primeras quince magnitudes de los análisis espectrales obtenidos de la tensión inducida con el modelo sin pérdidas y con el modelo de pérdidas a tensión nominal se muestran en la tabla 3.59.

Al comparar los espectros de frecuencias de la tabla 3.59 la magnitud de la fundamental en el modelo con pérdidas es menor por 0.095pp como magnitudes de 3^a (0.049pp), 7^a (0.28pp), 9^a (0.55pp), 13^a (0.28pp) y 15^a (0.031pp) armónicas, en cambio, las magnitudes de 5^a (0.23pp) y 11^a (0.27pp) armónica son mayor. Las tensiones inducidas obtenidas del modelo sin pérdida y el modelo con pérdidas presentaron un factor de cresta de 2.477 y 2.463 respectivamente, por lo que ambas formas de onda son esbeltas al igual que elevadas en sus crestas y valles. Las magnitudes de las fundamentales del modelo sin

pérdidas y el modelo con pérdidas presentaron un ángulo de fase de 90.88 grados y 90.85 grados, siendo las diferencias en los ángulos de fases para las magnitudes 3^a, 5^a, 7^a, 9^a, 11^a, 13^a y 15^a de ambos modelos menor a 5pp.

Las tensiones inducidas obtenidas a tensión nominal con el modelo sin pérdidas y con el modelo sin pérdidas presentaron una distorsión armónica total de 82.39% y 82.68%, siendo esta última es menor por una diferencia de 0.29pp.

No. Armónicas	Modelo Sin Pérdida THD=82.386%			Modelo Con Pérdida THD=82.677%		
	Amplitud RMS [V]	Amplitud RMS [%]	Ángulo [Grados]	Amplitud RMS [V]	Amplitud RMS [%]	Ángulo [Grados]
1 ^a	131.324	100.000%	90.88	130.786	100.000%	90.85
3 ^a	68.269	51.9850%	92.59	68.204	52.1498%	92.57
5 ^a	55.666	42.3880%	94.40	55.974	42.7985%	94.36
7 ^a	43.833	33.3780%	96.06	43.455	33.2262%	96.01
9 ^a	6.146	4.6800%	98.11	5.868	4.4864%	98.04
11 ^a	21.846	16.6350%	-80.74	22.198	16.9726%	-80.79
13 ^a	26.958	20.5280%	-79.07	26.580	20.3233%	-79.13
15 ^a	23.846	18.1580%	-77.25	23.805	18.2016%	-77.33

Tabla 3.59 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las tensiones inducidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas a tensión nominal, para el banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado.

Incrementar un 10% la tensión nominal aumenta principalmente las magnitudes de la fundamental (9.85pp/9.72pp), 3^a (1.85pp/1.80pp), 5^a (1.46pp/1.19pp) y 7^a (5.30pp/5.34pp) armónicas de los espectros de frecuencias obtenidos de las tensiones inducidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, respecto a los espectros de frecuencias obtenidos a tensión nominal. En tabla 3.60 se muestran los análisis espectrales de las tensiones inducidas al incrementar la tensión.

Al comparar los análisis espectrales de la tabla 3.60 la magnitud de la fundamental en el modelo con pérdidas es menor por 0.49pp como las magnitudes de 3^a (0.09pp), 5^a (0.034pp), 7^a (0.22pp) y 9^a (0.46pp) armónicas, pero en el modelo con pérdidas las magnitudes de 11^a (0.95pp), 13^a (0.11pp) y 15^a (0.14pp) armónicas son menores. Las tensiones inducidas obtenidas con el modelo sin pérdidas y con el modelo de pérdidas presentaron un factor de cresta de 2.475 y 2.471 respectivamente, por lo que ambas formas de onda son esbeltas como elevadas en sus crestas y valles. La magnitud de las fundamentales del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas presentaron un ángulo de fase de 90.94 grados y 90.93 grados respectivamente, siendo las diferencias en los ángulos de fase para las magnitudes de 3^a, 5^a, 7^a, 9^a, 11^a, 13^a y 15^a armónicas de ambos modelos menor a 5pp.

Las tensiones inducidas obtenidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas al incrementar la tensión nominal presentaron una distorsión armónica total de 79.03% y 79.26% respectivamente, en cambio esta última es mayor por una diferencia de 0.23pp.

No. Armónicas	Modelo Sin Pérdida THD=79.027%			Modelo Con Pérdida THD=79.256%		
	Amplitud RMS [V]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]	Amplitud RMS [V]	Amplitud [%]	Ángulo [Grados]
1ª	144.253	100.000%	90.94	143.546	100.000%	90.93
3ª	70.694	49.007%	92.84	70.563	49.157%	92.81
5ª	57.584	39.919%	94.86	57.534	40.080%	94.82
7ª	50.787	35.207%	96.57	50.473	35.161%	96.51
9ª	17.196	11.921%	98.53	16.537	11.520%	98.47
11ª	7.032	4.875%	-79.59	8.414	5.862%	-79.71
13ª	27.320	18.939%	-77.83	27.485	19.147%	-77.99
15ª	23.660	16.402%	-75.84	23.862	16.623%	-75.96

Tabla 3.60 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las tensiones inducidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas al incrementar la tensión nominal un 10%, para el banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado.

Disminuir la tensión nominal un 10 % reduce principalmente las magnitudes de la fundamental (8.75pp/8.74pp), 3ª (2.61pp/2.82pp), 5ª (1.05pp/1.61pp) y 7ª (12.62pp/13.33pp) etc. armónicas de los espectros de frecuencias obtenidos de las tensiones inducidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, respecto a los espectros de frecuencias obtenidos a tensión nominal. En la tabla 3.61 se muestran los análisis espectrales de las tensiones inducidas de ambos modelos al disminuir la tensión nominal.

Al compararlos análisis espectrales de la tabla 3.61 la magnitud de la fundamental en el modelo con pérdidas es menor por 0.44pp como las magnitudes de 3ª (0.29pp), 5ª (0.36pp), 7ª (1.09pp), 11ª (0.48pp), 13ª (1.24pp) y 15ª (1.42pp) armónicas, pero la magnitud de 9ª (0.48pp) armónica es mayor. Las tensiones inducidas obtenidas con el modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas presentaron un factor de cresta de 2.364 y 2.360 respectivamente, siendo esbeltas y elevadas en sus crestas y valles. Las magnitudes de fundamental del modelo sin pérdidas y modelo con pérdidas presentaron un ángulo de fase de 90.78 y 90.77 grados respectivamente, siendo las diferencias en los ángulos de fase para las magnitudes de 3ª, 5ª, 7ª, 9ª, 11ª, 13ª y 15ª armónicas de ambos modelos menor a 5pp.

Las tensiones inducidas obtenidas al incrementar la tensión nominal con el modelo sin pérdidas y con el modelo de pérdidas presentaron una distorsión armónica total de 79.635% y 79.685% respectivamente, en cambio esta última es mayor por una diferencia de 0.05pp.

No. Armónicas	Modelo Sin Pérdida THD=79.635%			Modelo Con Pérdida THD=78.685%		
	Amplitud RMS [V]	Amplitud RMS [%]	Ángulo [Grados]	Amplitud RMS [V]	Amplitud RMS [%]	Ángulo [Grados]
1ª	119.839	100.000%	90.78	119.312	100.000%	90.77
3ª	64.848	54.113%	92.35	64.497	54.058%	92.33
5ª	54.291	45.303%	94.02	53.862	45.144%	93.98
7ª	27.259	22.746%	95.57	25.943	21.744%	95.53
9ª	4.540	3.788%	-84.16	5.120	4.291%	-84.06
11ª	25.130	20.970%	-81.68	24.556	20.582%	-81.74
13ª	16.262	13.570%	-80.24	14.779	12.387%	-80.29
15ª	14.477	12.080%	-78.45	12.768	10.701%	-78.49

Tabla 3.61 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las tensiones inducidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas al disminuir la tensión nominal un 10%, para el banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado.

3.10.4 Comparación de espectros de frecuencias al incrementar o disminuir la tensión nominal.

Las tablas 3.53, 3.54 y 3.55 muestran las comparaciones de manera individual de los espectros de frecuencias de las corrientes de vacío para ambos modelos, sin embargo, para analizar el comportamiento al aumentar y disminuir la tensión nominal un 10%, fue necesario comparar las magnitudes de los tres espectros de frecuencias considerando como referencia la fundamental del modelo sin pérdidas a tensión nominal de la corriente de vacío, obteniéndose la tabla 3.62.

No. Armónicas	Nominal		Aumento (10%)		Disminución (10%)	
	Sin Pérdidas	Con Pérdidas	Sin Pérdidas	Con Pérdidas	Sin Pérdidas	Con Pérdidas
1ª	100.000%	152.610%	123.843%	181.245%	79.125%	127.328%
3ª	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%
5ª	2.025%	23.199%	0.432%	20.295%	4.438%	20.463%
7ª	4.236%	23.310%	2.922%	20.947%	2.716%	13.992%
9ª	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%
11ª	1.780%	8.661%	0.798%	2.479%	1.277%	10.058%
13ª	0.746%	12.482%	1.390%	11.198%	0.608%	5.938%
15ª	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%

Tabla 3.62 Comparación de magnitudes de los espectros de frecuencia obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, cuando se incrementa o disminuye la tensión nominal un 10%, para el banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado.

Al incrementar la tensión nominal un 10%, el espectro de frecuencias obtenido de la corriente de vacío del modelo sin pérdidas difiere, al incrementar la magnitud de la fundamental 23.84pp como la magnitud de 13ª (0.644pp) armónica, pero disminuyen las magnitudes de 5ª (1.593pp), 7ª (1.314pp) y 11ª (0.982pp) armónicas. El espectro de frecuencias obtenido de la corriente de vacío del modelo con pérdidas cambia, al

incrementar la magnitud de la fundamental 28.63pp, pero se reducen las magnitudes de 5ª (2.904pp), 7ª (2.363pp), 11ª (6.182pp) y 13ª (1.284pp) armónicas.

Al disminuir la tensión nominal, el espectro de frecuencias obtenido de la corriente de vacío del modelo sin pérdidas difiere, la magnitud de la fundamental disminuye 20.88pp, como las magnitudes de 7ª (1.529pp), 11ª (0.509pp) y 13ª (0.13pp) armónicas, pero se incrementa la magnitud de 5ª (2.416pp) armónica. El espectro de frecuencias obtenido de la corriente de vacío del modelo con pérdidas cambia, al disminuir la magnitud de la fundamental 25.28pp como las magnitudes de 5ª (2.736pp), 7ª (9.388pp) y 13ª (6.544pp) armónicas, pero se incrementa la magnitud de 11ª (1.397pp) armónica.

Los espectros de frecuencias del flujo magnético que se muestran en las tablas 3.59, 3.60 y 3.61 de ambos modelos son comparados de manera individual, sin embargo, para analizar el comportamiento al aumentar y disminuir la tensión nominal de manera general son comparadas las magnitudes de los tres espectros de frecuencias considerando como referencia la fundamental del modelo sin pérdidas a tensión nominal del flujo magnético, obteniéndose la tabla 3.63.

No. Armónicas	Nominal		Aumento (10%)		Disminución (10%)	
	Sin Pérdidas	Con Pérdidas	Sin Pérdidas	Con Pérdidas	Sin Pérdidas	Con Pérdidas
1ª	100.000%	99.590%	109.845%	109.307%	91.253%	90.851%
3ª	17.329%	17.313%	16.337%	16.303%	16.456%	16.374%
5ª	8.476%	8.521%	7.984%	7.977%	8.266%	8.205%
7ª	4.768%	4.731%	5.033%	4.998%	2.963%	2.821%
9ª	0.519%	0.496%	1.321%	1.274%	0.383%	0.436%
11ª	1.512%	1.534%	0.445%	0.527%	1.737%	1.700%
13ª	1.579%	1.557%	1.458%	1.465%	0.955%	0.865%
15ª	1.211%	1.211%	1.096%	1.102%	0.737%	0.647%

Tabla 3.63 Comparación de magnitudes de los espectros de frecuencias obtenidos de los flujos magnéticos del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, cuando se incrementa o disminuye la tensión nominal un 10%, para el banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado.

Al incrementar la tensión nominal, el espectro de frecuencias obtenido del flujo magnético del modelo sin pérdidas difiere, al incrementar la magnitud de la fundamental 9.85pp como las magnitudes de 7ª (0.265pp) y 9ª (0.802pp) armónicas, pero disminuyen las magnitudes de 3ª (0.992pp), 5ª (0.492pp), 11ª (1.067pp), 13ª (0.121pp) y 15ª (0.115pp) armónicas. El espectro de frecuencias obtenido del flujo magnético del modelo con pérdidas cambia, al incrementar la magnitud de fundamental 9.72pp como las magnitudes de 7ª (0.267pp) y 9ª (0.778pp) armónicas, pero disminuyen las magnitudes de 3ª (1.010pp), 5ª (0.544pp), 11ª (1.007pp), 13ª (0.092pp) y 15ª (0.109pp) armónicas.

Al disminuir la tensión nominal, el espectro de frecuencias obtenido del flujo magnético del modelo sin pérdidas difiere, al disminuir su magnitud fundamental 8.747pp como las magnitudes de 3ª (0.873pp), 5ª (0.21pp), 7ª (1.805pp), 9ª (0.136pp), 13ª (0.624pp) y 15ª (0.474pp) armónicas, pero aumenta la magnitud de 11ª (0.225pp) armónica. El espectro de frecuencias obtenido del flujo magnético del modelo con pérdidas cambia, al

disminuir la magnitud de la fundamental 8.739pp como las magnitudes de 3^a (0.939pp), 5^a (0.316pp), 7^a (1.91pp), 9^a (0.06pp) 13^a (0.692pp) y 15^a (0.564pp) armónicas, pero se incrementa la magnitud de 11^a (0.166pp) armónica.

Las tablas 3.59, 3.60 y 3.61 muestran las comparaciones de manera individual de los espectros de frecuencias de las tensiones inducidas para ambos modelos, sin embargo, para analizar el comportamiento al aumentar y disminuir la tensión nominal de manera general son comparadas las magnitudes de los tres espectros de frecuencias considerando como referencia la fundamental del modelo sin pérdidas a tensión nominal de la tensión inducida, obteniéndose la tabla 3.64.

No. Armónicas	Nominal		Aumento (10%)		Disminución (10%)	
	Sin Pérdidas	Con Pérdidas	Sin Pérdidas	Con Pérdidas	Sin Pérdidas	Con Pérdidas
1 ^a	100.00%	99.59%	109.85%	109.31%	91.25%	90.85%
3 ^a	51.99%	51.94%	53.83%	53.73%	49.38%	49.11%
5 ^a	42.39%	42.62%	43.85%	43.81%	41.34%	41.01%
7 ^a	33.38%	33.09%	38.67%	38.43%	20.76%	19.75%
9 ^a	4.68%	4.47%	13.09%	12.59%	3.46%	3.90%
11 ^a	16.64%	16.90%	5.35%	6.41%	19.14%	18.70%
13 ^a	20.53%	20.24%	20.80%	20.93%	12.38%	11.25%
15 ^a	18.16%	18.13%	18.02%	18.17%	11.02%	9.72%

Tabla 3.64 Comparación de magnitudes de los espectros de frecuencias obtenidos de las tensiones inducidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, cuando se incrementa o disminuye la tensión nominal un 10%, para el banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado.

Al incrementar la tensión nominal un, el espectro de frecuencias obtenido de la tensión inducida del modelo sin pérdidas difiere, al incrementar la magnitud de la fundamental 9.85pp como las magnitudes de 3^a (1.85pp), 5^a (1.46pp), 7^a (5.30pp), 9^a (8.41pp) y 13^a (0.28pp) armónicas, pero disminuyen las magnitudes de 11^a (11.28pp) y 15^a (0.14pp) armónicas. El espectro de frecuencias obtenido de la tensión inducida del modelo con pérdidas cambia, al incrementar la magnitud de la fundamental 9.72pp como las magnitudes de 3^a (1.80pp), 5^a (1.19pp), 7^a (5.34pp), 9^a (8.12pp), 13^a (0.69pp) y 15^a (0.04pp) armónicas, pero disminuye la magnitud de 11^a (0.04pp) armónica.

Al disminuir la tensión nominal un 10%, el espectro de frecuencia obtenido de la tensión inducida del modelo sin pérdidas difiere, al disminuir la magnitud de la fundamental 8.75pp como las magnitudes de 3^a (2.61pp), 5^a (1.05pp), 7^a (12.62pp), 9^a (1.22pp), 13^a (8.14pp) y 15^a (7.13pp) armónicas, pero se incrementa la magnitud de 11^a (2.5pp) armónica. El espectro de frecuencias obtenido de la tensión inducida del modelo con pérdidas cambia, al disminuir la magnitud de la fundamental 8.74pp como de las magnitudes de 3^a (2.82pp), 5^a (1.61pp), 7^a (13.33pp), 9^a (0.57pp), 13^a (8.99pp) y 15^a (8.40pp) armónicas, pero se incrementa la magnitud de 11^a (1.80pp) armónica.

Las distorsiones armónicas totales de la corriente de vacío, flujo magnético y tensión inducida obtenidas de ambos modelos para los distintos niveles de tensión se muestran en la tabla 3.65. En el modelo sin pérdidas la distorsión armónica total de la corriente de vacío al incrementar la tensión nominal aumenta 8.32pp, pero se reduce en el flujo magnético y la tensión inducida 1.02pp y 3.36pp respectivamente, respecto a los $THD_{Nominal}$ del modelo sin pérdidas, en cambio, al disminuir la tensión nominal un 10% la distorsión en la corriente de vacío se incrementa 1.731pp como en el flujo magnético 0.52pp, pero se reduce en la tensión inducida 2.75pp, respecto a los $THD_{Nominal}$ del modelo sin pérdidas. En el modelo con pérdidas la distorsión armónica total de la corriente de vacío al incrementar la tensión nominal disminuye 2.08pp como en el flujo magnético 1.40pp y en la tensión inducida 7.42pp, respecto a los $THD_{Nominal}$ del modelo con pérdidas, sin embargo, al disminuir la tensión nominal un 10% la distorsión en la corriente de vacío disminuye 2.49pp como en la tensión inducida 3.99pp, pero en el flujo magnético aumenta 0.02pp, respecto a los $THD_{Nominal}$ del modelo con pérdidas.

Tensión	Modelo sin pérdidas			Modelo con pérdidas		
	THD_I	THD_{Flujo}	THD_{Eind}	THD_I	THD_{Flujo}	THD_{Eind}
Nominal	5.186%	20.194%	82.386%	24.077%	20.627%	82.677%
Aumento del 10%	13.504%	19.176%	79.027%	22.001%	19.231%	79.256%
Disminución del 10%	6.917%	20.714%	79.635%	21.591%	20.647%	78.685%

Tabla 3.65 Distorsiones armónicas totales obtenidas de la corriente de vacío, flujo magnético y tensión inducida con el modelo con pérdidas y sin pérdidas, para el banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado.

3.11 Resumen de casos de estudio

Los casos anteriores presentaron resultados significativos al desprestigiar la resistencia de pérdidas en el modelo circuito equivalente del transformador y al ser incluida cuando se incrementa o disminuye la tensión aplicada en un porcentaje de un 10% en estado estable, presentando mayor diferencia la corriente de vacío para todos los casos y en menor medida para el flujo magnético y tensión inducida, siempre que existe una conexión de retorno, resumiendo los casos en lo siguiente:

Caso Yy0 aterrizada. Esta conexión a base de unidades monofásicas presenta una corriente de vacío con una distorsión armónica total muy alta a tensión nominal, siendo de 19.38% y 22.36% para las corrientes obtenidas con el modelo de pérdidas y con el modelo sin pérdidas respectivamente, pero al incluir la resistencia de pérdidas este porcentaje disminuye. El flujo magnético y la tensión inducida obtenidas con ambos modelos a tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión nominal conservan su forma de onda sinusoidal, no obstante, en éstas existen una cantidad muy pequeña de componentes de 3ª y 5ª armónicas menor al 0.4% en relación a la fundamental.

Al incrementar la tensión nominal un 10% las corrientes de vacío obtenidas con el modelo de pérdidas y sin pérdidas presentaron una distorsión armónica total de 20.30% y 22.85% respectivamente, pero, al disminuir la tensión nominal un 10% las corrientes de

vacío obtenidas con el modelo de pérdidas y sin pérdidas presentaron una distorsión armónica total de 18.31% y 21.94% respectivamente.

Caso Dy1. Esta conexión a base de unidades monofásicas las corrientes de vacío presentaron una distorsión armónica total muy alta, siendo de 7.66% y 10.62% para las corrientes obtenidas del modelo con pérdidas y el modelo sin pérdidas respectivamente a tensión nominal, pero cuando se incluye la resistencia de pérdidas este porcentaje se reduce.

Al incrementar la tensión nominal un 10% las corrientes de vacío obtenidas del modelo de pérdidas y el modelo sin pérdidas presentaron una distorsión armónica total de 11.50% y 15.08% respectivamente. En cambio, al disminuir la tensión nominal un 10% las corrientes de vacío obtenidas del modelo de pérdidas y modelo sin pérdidas presentaron una distorsión armónica total de 5.15% y 7.39% respectivamente. Ante el cambio de tensión en estado estable el flujo magnético y la tensión inducida conservan su forma de onda sinusoidal.

Caso Dd0. Esta conexión a base de unidades monofásicas en particular baja la distorsión armónica total para la corriente de vacío (fase) al presentar una menor componente de 3^a armónica, siendo de 2.72% y 3.6% para las corrientes obtenidas del modelo con pérdidas y el modelo sin pérdidas a tensión nominal respectivamente, sin embargo, el flujo magnético y la tensión inducida obtenidos con ambos modelos presentaron una distorsión armónica total de 0.8% y 2.2% respectivamente.

Al incrementar la tensión nominal un 10% las corrientes de vacío obtenidas del modelo con pérdidas y el modelo sin pérdidas presentaron una distorsión armónica total de 5.81% y 7.78% respectivamente. En cambio, al disminuir la tensión nominal un 10% las corrientes de vacío obtenidas del modelo con pérdidas y el modelo sin pérdidas presentaron una distorsión armónica total de 5.15% y 6.89% respectivamente.

Los flujos magnéticos obtenidos del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas al incrementar la tensión presentaron una distorsión armónica total de 1.18%, en cambio, las tensiones inducidas obtenidas con ambos modelos presentaron una distorsión armónica total de 3.4%, no conservando el flujo magnético y tensión inducida la forma de onda sinusoidal.

Caso Yy0 con neutro aislado. Esta conexión presenta cambios considerables en la forma de onda de la corriente de vacío, flujo magnético y tensión inducida debido a la no circulación de las componentes de secuencia de la corriente de vacío. La onda de flujo magnético presenta un aplanamiento en sus crestas y valles, en cambio, la tensión inducida se incrementa considerablemente, siendo la forma de onda esbelta y elevada en sus crestas y valles.

Las corrientes de vacío obtenidas con el modelo sin pérdidas a tensión nominal presentaron una distorsión armónica total de 5.19%, al incrementar o disminuir la tensión

nominal un 10% de 13.50% y 6.92% respectivamente, sin embargo, estos porcentajes cambian con el modelo de pérdidas, siendo de 24.08% a tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10% de 22% y 21.6% respectivamente.

Los flujos magnéticos obtenidos con el modelo sin pérdidas a tensión nominal presentaron una distorsión armónica total de 20.19%, al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10% de 19.18% y 20.71% respectivamente, sin embargo, estos porcentajes cambian con el modelo de pérdidas, siendo de 20.63% a tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10% de 19.23% y 20.65% respectivamente.

Las tensiones inducidas obtenidas con el modelo sin pérdidas a tensión nominal presentaron una distorsión armónica total de 82.39%, al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10% de 79.03% y 79.64% respectivamente, sin embargo, estos porcentajes cambian con el modelo de pérdidas, siendo de 82.68% a tensión nominal y al incrementar o disminuir la tensión nominal un 10% de 79.03% y 79.64% respectivamente.

Debido a la no circulación de las componentes de secuencias cero en la corriente de vacío obtenidas con el modelo sin pérdidas disminuye el grado de distorsión presentando una apariencia mayormente sinusoidal, lo cual propicia que la forma de onda del flujo magnético se distorsione en un porcentaje mayor, debido a que compensa el cambio abrupto experimentado en la corriente de vacío por la desconexión del neutro a tierra, sin embargo, esto depende del voltaje y zona de operación sobre la curva de saturación.

Comparando los espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío a tensión nominal de ambos modelos del banco trifásico en conexión Yy0 con neutro a tierra del apartado (3.5.1) y al compararlos con los obtenidos en el apartado (3.10.1) considerando como referencias las fundamentales de los espectros de frecuencias con neutro a tierra se obtiene la tabla 3.66, siendo posible observar un aumento considerable en las componentes del modelo sin pérdidas cuando no existe una conexión solida a tierra.

No. Armónicas	Modelo sin pérdidas		Modelo con pérdidas	
	Yy0 neutro a tierra	Yy0 neutro aislado	Yy0 neutro a tierra	Yy0 neutro aislado
1 ^a	100.00%	100.00%	100.00%	134.05%
3 ^a	21.84%	0.00%	18.90%	0.00%
5 ^a	2.02%	2.03%	1.92%	20.38%
7 ^a	4.24%	4.24%	3.67%	20.47%
9 ^a	0.26%	0.00%	0.13%	0.00%
11 ^a	1.78%	1.78%	1.57%	7.61%
13 ^a	0.75%	0.75%	0.59%	10.96%
15 ^a	0.69%	0.00%	0.63%	0.00%

Tabla 3.66 Comparación espectro de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío a tensión nominal del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, para el banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado y neutro a tierra.

Las corrientes de vacío obtenidas con el modelo de pérdidas a tensión nominal del banco trifásico en conexión Yy0 con neutro a tierra presentaron una distorsión armónica total de 19.38%, en cambio, al encontrarse el neutro aislado la distorsión aumenta a un valor de 24.07%, siendo esta última mayor por 4.69pp.

Comparando los espectros de frecuencias obtenidos de los flujos magnéticos a tensión nominal de ambos modelos del banco trifásico en conexión Yy0 con neutro a tierra del apartado (3.5.3) y al compararlos con los obtenidos en el apartado (3.10.2) considerando como referencias las fundamentales de los espectros de frecuencias con neutro a tierra se obtiene la tabla 3.67, siendo posible observar un aumento considerable en las componentes de ambos modelos cuando no existe una conexión solida a tierra.

No. Armónicas	Modelo sin pérdidas		Modelo con pérdidas	
	Yy0 neutro a tierra	Yy0 neutro aislado	Yy0 neutro a tierra	Yy0 neutro aislado
1 ^a	100.000%	103.421%	100.000%	103.599%
3 ^a	0.077%	17.916%	0.077%	18.013%
5 ^a	0.004%	8.764%	0.005%	8.865%
7 ^a	0.005%	4.930%	0.006%	4.922%
9 ^a	0.000%	0.537%	0.000%	0.516%
11 ^a	0.002%	1.563%	0.002%	1.596%
13 ^a	0.001%	1.632%	0.001%	1.620%
15 ^a	0.000%	1.252%	0.001%	1.260%

Tabla 3.67 Comparación espectro de frecuencias obtenidos de los flujos magnéticos a tensión nominal del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, para el banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado y neutro a tierra.

Comparando los espectros de frecuencias obtenidos de las tensiones inducidas a tensión nominal de ambos modelos del banco trifásico en conexión Yy0 con neutro a tierra del apartado (3.5.2) y al compararlos con los obtenidos en el apartado (3.10.3) considerando como referencias las fundamentales de los espectros de frecuencias con neutro a tierra se obtiene la tabla 3.68, siendo posible observar un aumento considerable en las componentes de ambos modelos cuando no existe una conexión solida a tierra.

No. Armónicas	Modelo sin pérdidas		Modelo con pérdidas	
	Yy0 neutro a tierra	Yy0 neutro aislado	Yy0 neutro a tierra	Yy0 neutro aislado
1 ^a	100.00%	103.65%	100.00%	103.59%
3 ^a	0.27%	53.88%	0.22%	54.02%
5 ^a	0.03%	43.93%	0.02%	44.34%
7 ^a	0.08%	34.59%	0.04%	34.42%
9 ^a	0.01%	4.85%	0.00%	4.65%
11 ^a	0.05%	17.24%	0.02%	17.58%
13 ^a	0.02%	21.28%	0.01%	21.05%
15 ^a	0.02%	18.82%	0.01%	18.86%

Tabla 3.68 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las tensiones inducidas a tensión nominal del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, para el banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado y neutro a tierra.

IV

Validación de resultados

4.1 Introducción

En el presente capítulo se validan los casos principales realizados en el capítulo 3 con la herramienta de ATP 6.1 (EMTP96) considerando el modelo sin pérdidas que se muestra en el apartado (3.2) y el modelo con pérdidas que se muestra en el apartado (3.3).

La validación de las corrientes de vacío y tensión inducida de ambos modelos se centran en la unidad monofásica con tensión en terminales de 127 V / 220 V, sin embargo, el flujo magnético no es posible de simular en ATP como las conexiones Dd0 y Yy0 (neutro aislado), pero al validar la corriente de vacío y la tensión inducida es posible deducir que el flujo magnético generado es correcto. El único caso donde se valida la corriente de vacío de manera completa al incrementar y disminuir la tensión nominal es para la unidad monofásica con bobinados de 127 V.

Posteriormente la corriente de vacío en la conexión trifásica Dy1 se valida a tensión nominal para ambos modelos, pero la conexión Yy0 con neutro aislado se valida mediante el espectro de frecuencias obtenido de ATP al excluir las componentes de secuencia cero de la corriente y la conexión Dd0 mediante el espectro de frecuencias obtenido de una medición real.

4.2 Transformador monofásico 127 V

En la figura 4.1 se muestra el circuito utilizado en ATP que representa el transformador monofásico en vacío alimentado con una fuente de corriente alterna con dos puntos de medición, uno en el interruptor y otro en el interior de la unidad monofásica, para simular la corriente de vacío.

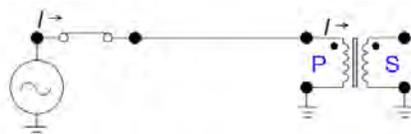


Figura 4.1 Circuito eléctrico en ATP para el transformador monofásico con devanados de 127 V.

Los datos ingresados para la unidad monofásica son mostrados en la figura 4.2, siendo considerando el modelo sin pérdidas y aplicando tensión nominal (127 V), obteniéndose la forma de onda de la corriente de vacío que se muestra en la figura 4.3.

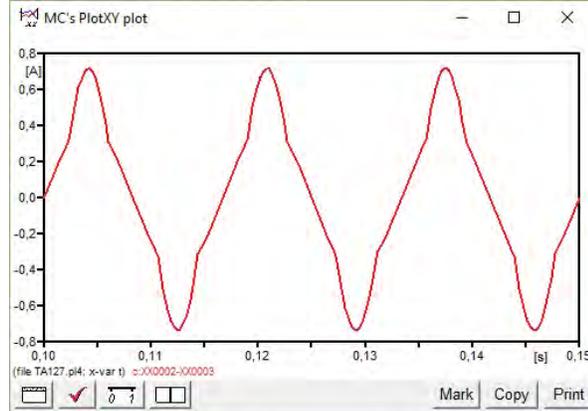
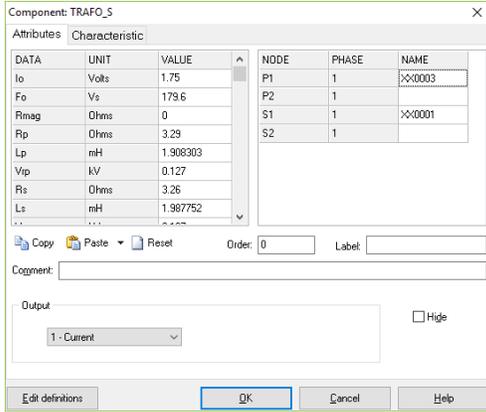


Figura 4.2 Ventana de parámetros del programa ATP para el transformador monofásico de 127 V, considerando el modelo sin pérdidas.

Figura 4.3 Corriente de vacío obtenida con el modelo sin pérdidas a tensión nominal mediante ATP, considerando el modelo sin pérdidas.

4.2.1 Comparación de corriente de vacío con ATP modelo sin pérdidas

La comparación de la corriente obtenida en ATP con la simulada en Scilab se muestra en la figura 4.4, siendo el espectro de frecuencias para las primeras quince armónicas en ambas corrientes mostrado en la figura 4.5, no obstante, las corrientes comparadas son muy similares, pero se presenta una mayor amplitud en la corriente simulada en ATP 6.1(EMTP96) debido a la forma de interpolación sobre la curva de saturación y el método de integración trapezoidal.

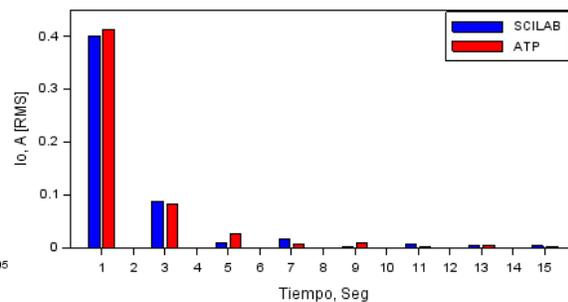
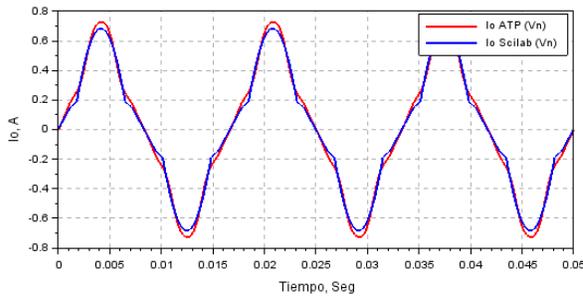


Figura 4.4 Comparación de corrientes obtenidas con el modelo sin pérdidas mediante Scilab y ATP a tensión nominal del transformador monofásico con bobinados de 127 V.

Figura 4.5 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas mediante ATP y Scilab a tensión nominal, ver figura 4.4.

Al comparar los espectros de frecuencia de la tabla 4.1 la magnitud de la fundamental en ATP es mayor por una diferencia de 3.04pp como las magnitudes de 5ª (4.52pp), 9ª (2.03pp) y 13ª (0.36pp) armónicas, en cambio, el espectro de frecuencias obtenido con Scilab presenta una mayor magnitud de 3ª (1.34pp) armónica como de las magnitudes de 7ª (2.67pp), 11ª (1.69pp) y 15ª (0.36pp) armónicas. Al presentar ambos espectros de frecuencia una variación mínima en algunas de sus componentes armónicas, la forma de onda simulada con Scilab presenta una diferencia de 2.89pp respecto a la obtenida con ATP, siendo este porcentaje la suma promedio de las magnitudes individuales comparada con la referencia, la señal obtenida del programa ATP.

Las corrientes de vacío obtenidas con el modelo sin pérdidas a tensión nominal mediante Scilab y ATP presentaron una distorsión armónica total de 22.36% y 21.11% respectivamente, por consiguiente, una variación porcentual mínima en las armónicas no altera significativamente la distorsión total.

No. Armónica	Scilab Magnitud (RMS)	Scilab Magnitud (%)	Fasor Grados	ATP Magnitud (RMS)	ATP Magnitud (%)	Fasor Grados
1ª	0.40090	97.05%	0.85	0.41309	100.00%	0.65
3ª	0.08754	21.19%	-177.18	0.08202	19.85%	-177.71
5ª	0.00812	1.97%	5.02	0.02681	6.49%	3.80
7ª	0.01698	4.11%	5.99	0.00596	1.44%	4.21
9ª	0.00105	0.25%	5.70	0.00941	2.28%	-173.76
11ª	0.00714	1.73%	-170.56	0.00015	0.04%	19.22
13ª	0.00299	0.72%	-169.26	0.00444	1.08%	8.78
15ª	0.00275	0.67%	12.799	0.00130	0.31%	-169.18

Tabla 4.1 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas a tensión nominal, mediante Scilab y ATP para el transformador monofásico con bobinados de 127 V.

Al incrementar la tensión nominal un 10%, las corrientes obtenidas del modelo sin pérdidas mediante ATP y Scilab se comparan en la figura 4.6, siendo los espectros de frecuencias para las primeras quince armónicas de ambas corrientes mostrado en la figura 4.7.

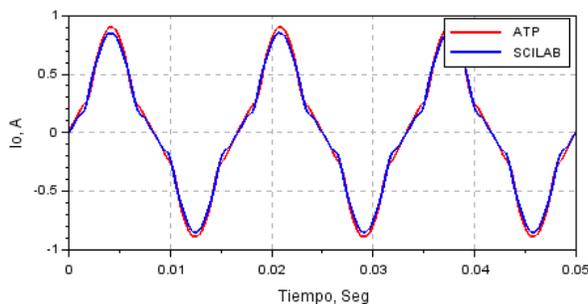


Figura 4.6 Comparación de corrientes obtenidas con el modelo sin pérdidas mediante Scilab y ATP al incrementar la tensión nominal un 10% del transformador monofásico con bobinados de 127 V.

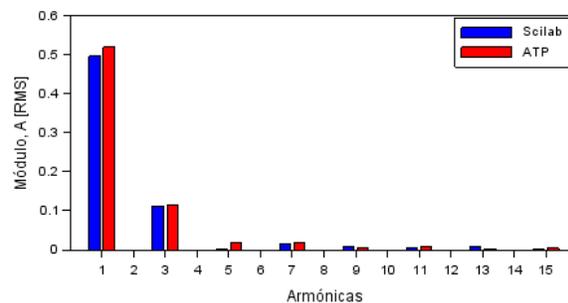


Figura 4.7 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas mediante ATP y Scilab al incrementar un 10% la tensión nominal, ver figura 4.6.

Al comparar las los espectros de frecuencias de la tabla 4.2 la magnitud de la fundamental en ATP es mayor por una diferencia de 4.48pp como las magnitudes de 5ª (6.09pp), 9ª (0.44pp) y 15ª (0.18pp) armónicas, en cambio, el espectro de frecuencias obtenido con Scilab presenta una mayor magnitud de 3ª (1.65pp) armónica como de las magnitudes de 7ª(1.35pp), 11ª (0.69pp) y 13ª(0.24pp) armónicas. Al presentar ambos espectros de frecuencias una variación mínima en algunas de sus componentes armónicas, la forma de onda simulada con Scilab presenta una diferencia de 6.12pp respecto a la obtenida con ATP.

No. Armónica	Scilab Magnitud (RMS)	Scilab Magnitud (%)	Fasor Grados	ATP Magnitud (RMS)	ATP Magnitud (%)	Fasor Grados
1ª	0.49679	95.52%	0.93	0.52010	100.00%	0.71
3ª	0.11182	21.50%	-176.93	0.11396	19.85%	-177.52
5ª	0.00208	0.40%	9.82	0.01828	6.49%	4.40
7ª	0.01453	2.79%	6.37	0.01741	1.44%	5.07
9ª	0.00955	1.84%	8.22	0.00534	2.28%	-172.81
11ª	0.00379	0.73%	-169.39	0.00702	0.04%	-172.11
13ª	0.00685	1.32%	-167.98	0.00227	1.08%	10.15
15ª	0.00067	0.13%	-169.05	0.00385	0.31%	10.79

Tabla 4.2 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas al incrementar la tensión nominal un 10%, mediante Scilab y ATP para el transformador monofásico con bobinados de 127 V.

Las corrientes de vacío obtenidas con el modelo sin pérdidas al incrementar la tensión nominal un 10% mediante Scilab y ATP presentaron una distorsión armónica total de 22.85% y 22.54% respectivamente, por lo tanto, una variación porcentual mínima en las armónicas no altera significativamente la distorsión total.

Al disminuir la tensión nominal un 10%, las corrientes obtenidas con el modelo sin pérdidas mediante Scilab y ATP se comparan en la figura 4.8, siendo los espectros de frecuencias para las primeras quince armónicas de ambas corrientes mostrado en la figura 4.9.

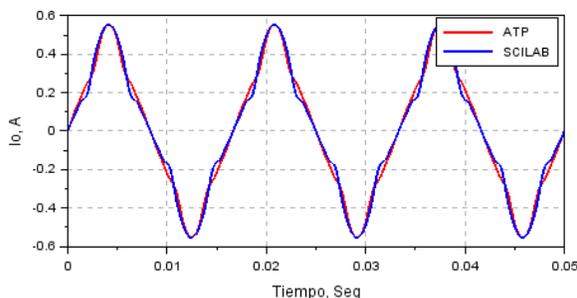


Figura 4.8 Comparación de corrientes obtenidas con el modelo sin pérdidas mediante Scilab y ATP al disminuir la tensión nominal un 10% del transformador monofásico con bobinados de 127 V.

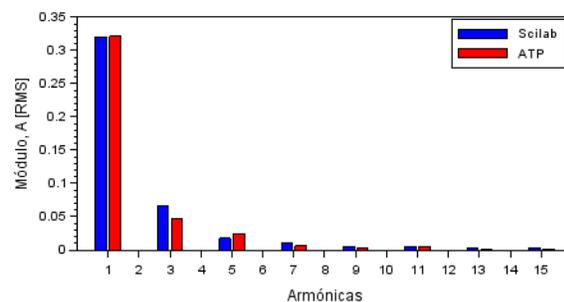


Figura 4.9 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas mediante ATP y Scilab al disminuir un 10% la tensión nominal, ver figura 4.8.

Al comparar las los espectros de frecuencias de la tabla 4.3 la magnitud de la fundamental en ATP es mayor por una diferencia de 0.35pp como las magnitudes de 5ª (1.03pp), 9ª (0.49pp) y 13ª (0.37pp) armónica, en cambio, el espectro de frecuencias obtenido con Scilab presenta una mayor magnitud de 3ª (0.84pp) armónica como de las magnitudes de 7ª (2.08pp), 11ª (1.60pp) y 15ª(0.62pp) armónicas. Al presentar ambos espectros de frecuencias una variación mínima en algunas de sus componentes armónicas, la forma de onda simulada con Scilab presenta una diferencia de 5.22pp respecto a la obtenida con ATP

No. Armónica	Scilab Magnitud (RMS)	Scilab Magnitud (%)	Fasor Grados	ATP Magnitud (RMS)	ATP Magnitud (%)	Fasor Grados
1ª	0.31996	99.65%	0.78	0.32108	100.00%	0.55
3ª	0.06642	20.69%	-177.38	0.04670	19.85%	-178.01
5ª	0.01754	5.46%	4.28	0.02480	6.49%	3.21
7ª	0.01131	3.52%	5.43	0.00607	1.44%	-175.30
9ª	0.00576	1.79%	-172.64	0.00370	2.28%	-174.93
11ª	0.00527	1.64%	-171.45	0.00475	0.04%	6.61
13ª	0.00228	0.71%	10.39	0.00132	1.08%	-171.71
15ª	0.00299	0.93%	11.50	0.00170	0.31%	-171.35

Tabla 4.3 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas al disminuir la tensión nominal un 10%, mediante Scilab y ATP para el transformador monofásico con bobinados de 127 V.

4.2.2 Comparación de corriente de vacío con ATP modelo con pérdidas

Al considerar las pérdidas del núcleo y despreciar la inductancia de fuga (1×10^{-8} mH) al ingresar una cantidad muy cercada a cero en la ventana de atributos de ATP, véase la figura 4.10, se obtiene la corriente de vacío de la figura 4.11, sin embargo, el programa ATP no acepta una inductancia idéntica a cero marcando error de simulación.

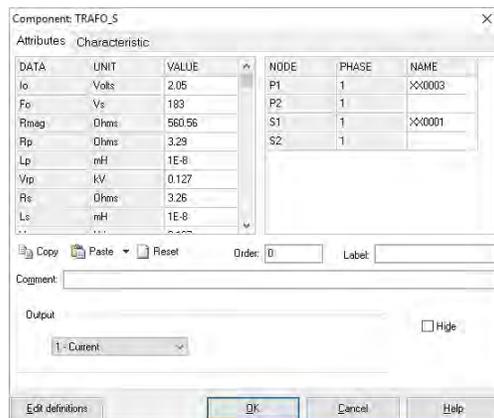


Figura 4.10 Ventana de parámetros del programa ATP para el transformador monofásico de 127 V, considerando el modelo con pérdidas.

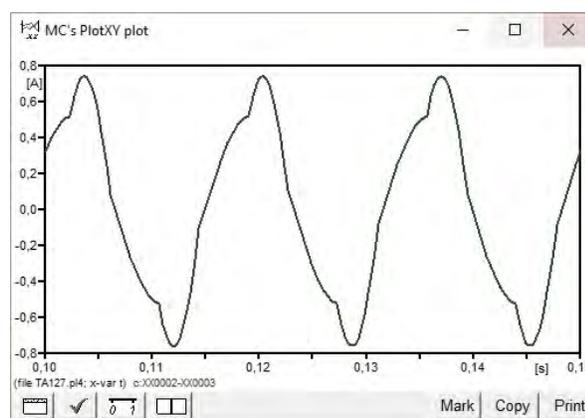


Figura 4.11 Corriente de vacío obtenida con el modelo sin pérdidas a tensión nominal mediante ATP, considerando el modelo con pérdidas.

La comparación de las corrientes obtenidas mediante ATP y Scilab se muestran en la figura 4.12, siendo el espectro de frecuencias de ambas corrientes mostrado en la figura 4.13, no obstante, las corrientes comparadas son muy similares, sin embargo, posee una amplitud mayor la corriente simulada en ATP debido a la forma de interpolación sobre la curva de saturación.

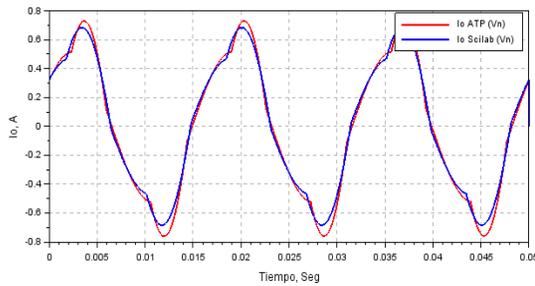


Figura 4.12 Comparación de corrientes obtenidas con el modelo de pérdidas mediante Scilab y ATP a tensión nominal del transformador monofásico con bobinados de 127 V.

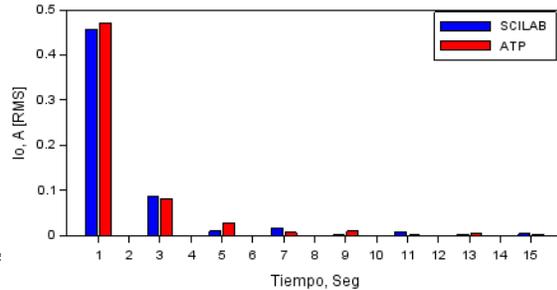


Figura 4.13 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo con pérdidas mediante ATP y Scilab a tensión nominal, ver figura 4.12.

Al comparar las los espectros de frecuencias de la tabla 4.4 la magnitud de la fundamental en ATP es mayor por una diferencia de 3.03pp como las magnitudes de 3^a (0.57pp), 5^a (0.06pp), 7^a (0.11pp), 9^a (0.01pp), 11^a (0.05pp), 13^a (0.02pp) y 15^a (0.02pp) armónicas. Al presentar ambos espectros de frecuencias una variación mínima en algunas de sus componentes armónicas, la forma de onda simulada con Scilab presenta una diferencia de 3.10pp respecto a la obtenida con ATP.

Las corrientes de vacío obtenidas del modelo de pérdidas mediante Scilab y ATP presentaron una distorsión armónica total de 19.38% y 18.42% respectivamente, por consiguiente, una variación porcentual mínima en las armónicas no altera significativamente la distorsión total.

No. Armónica	Scilab Magnitud (RMS)	Scilab Magnitud (%)	Fasor Grados	ATP Magnitud (RMS)	ATP Magnitud (%)	Fasor Grados
1 ^a	0.45634	96.97%	29.74	0.47060	100.00%	29.25
3 ^a	0.08624	18.33%	-177.24	0.08164	18.90%	-177.71
5 ^a	0.00877	1.86%	5.13	0.02666	1.92%	3.80
7 ^a	0.01673	3.56%	5.99	0.00590	3.67%	4.23
9 ^a	0.00059	0.12%	5.20	0.00937	0.13%	-173.77
11 ^a	0.00717	1.52%	-178.12	0.00015	1.57%	18.52
13 ^a	0.00268	0.57%	-178.24	0.00441	0.59%	8.79
15 ^a	0.00291	0.62%	12.73	0.00130	0.64%	-169.28

Tabla 4.4 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo con pérdidas a tensión nominal, mediante Scilab y ATP para el transformador monofásico con bobinados de 127 V.

Al incrementar la tensión nominal un 10% las corrientes obtenidas con el modelo de pérdidas mediante Scilab y ATP se comparan en la figura 4.14, siendo los espectros de frecuencias para las primeras quince armónicas de ambas corrientes mostrado en la figura 4.15.

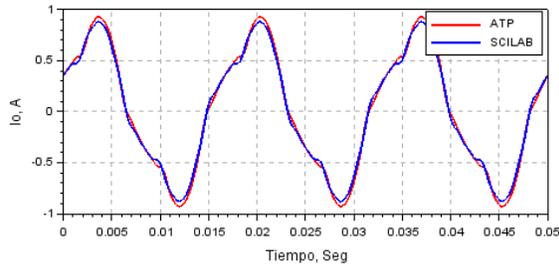


Figura 4.14 Comparación de corrientes obtenidas con el modelo de pérdidas mediante Scilab y ATP al incrementar la tensión nominal un 10% del transformador monofásico con bobinados de 127 V.

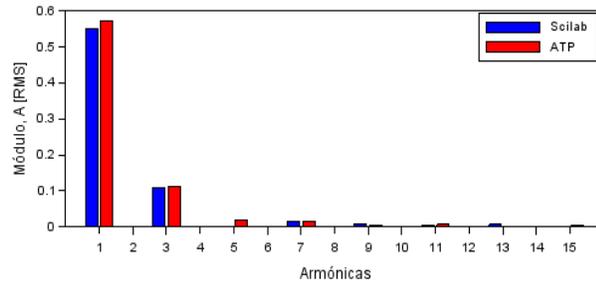


Figura 4.15 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo con pérdidas mediante ATP y Scilab al incrementar la tensión nominal un 10%, ver figura 4.14.

Al comparar las los espectros de frecuencias de la tabla 4.5 la magnitud de la fundamental en ATP es mayor por una diferencia de 3.93pp como las magnitudes de 3ª (0.79pp), 5ª (0.02pp), 7ª (0.01pp), 9ª (0.07pp), 11ª (0.03pp), 13ª (0.05pp) y 15ª (0.01pp) armónicas. Al presentar ambos espectros de frecuencias una variación mínima en algunas de sus componentes armónicas, la forma de onda simulada con Scilab presenta una diferencia de 5.69pp respecto a la obtenida con ATP.

Las corrientes de vacío obtenidas con el modelo de pérdidas al incrementar la tensión nominal un 10% mediante Scilab y ATP presentaron una distorsión armónica total de 20.25% y 20.30% respectivamente, por consiguiente, una variación porcentual mínima en las armónicas no altera significativamente la distorsión total.

No. Armónica	Scilab Magnitud (RMS)	Scilab Magnitud (%)	Fasor Grados	ATP Magnitud (RMS)	ATP Magnitud (%)	Fasor Grados
1ª	0.55055	96.07%	27.649	0.57307	100.00%	26.231
3ª	0.11001	19.20%	-176.98	0.11278	19.98%	-177.53
5ª	2.481x10 ⁻³	0.43%	9.4347	1.881x10 ⁻²	0.45%	4.3442
7ª	0.014674	2.56%	6.3802	0.01702	2.67%	5.0216
9ª	9.249x10 ⁻³	1.61%	8.2184	5.665x10 ⁻³	1.68%	-172.88
11ª	4.257x10 ⁻³	0.74%	-169.55	6.81710 ⁻³	0.77%	-172.17
13ª	6.618x10 ⁻³	1.15%	-168.11	2.516x10 ⁻³	1.20%	10.00
15ª	4.164x10 ⁻⁴	0.07%	-171.02	3.726x10 ⁻³	0.08%	10.69

Tabla 4.5 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas al incrementar la tensión nominal un 10%, mediante Scilab y ATP para el transformador monofásico con bobinados de 127 V.

Al disminuir la tensión nominal un 10%, las corrientes obtenidas con el modelo con pérdidas mediante Scilab y ATP se comparan en la figura 4.16, siendo los espectros de frecuencias para las primeras quince armónicas de ambas corrientes mostrado en la figura 4.17.

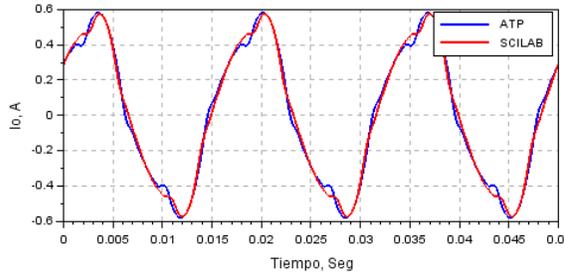


Figura 4.16. Comparación de corrientes obtenidas con el modelo de pérdidas mediante Scilab y ATP al disminuir la tensión nominal del transformador monofásico con bobinados de 127 V.

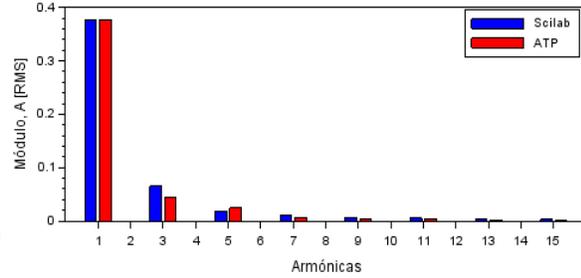


Figura 4.17 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo con pérdidas mediante ATP y Scilab al disminuir la tensión nominal un 10%, ver figura 4.16.

Al comparar las los espectros de frecuencias de la tabla 4.6 la magnitud de la fundamental en ATP es mayor por una diferencia de 0.29pp como la magnitud de 5ª (0.014pp) armónica, en cambio, el espectro obtenido con Scilab presenta una mayor magnitud de 3ª (5.26pp) armónica como de las magnitudes de 7ª (1.17pp), 9ª (0.74pp), 11ª (0.08pp), 13ª (0.27pp) y 15ª (0.36pp) armónicas. Al presentar ambos espectros de frecuencias una variación mínima en algunas de sus componentes armónicas, la forma de onda simulada con Scilab presenta una diferencia de 4.77pp respecto a la obtenida en ATP.

Las corrientes de vacío obtenidas del modelo con pérdidas al disminuir la tensión nominal un 10% mediante Scilab y ATP presentaron una distorsión armónica total de 18.31% y 13.85% respectivamente, existiendo un porcentaje alto de diferencia entre ambas distorsiones debido a la 3ª armónica del modelo en Scilab.

No. Armónica	Scilab Magnitud (RMS)	Scilab Magnitud (%)	Fasor Grados	ATP Magnitud (RMS)	ATP Magnitud (%)	Fasor Grados
1ª	0.37610	99.71%	27.64	0.3772	100.00%	26.23
3ª	0.065011	17.24%	-176.98	0.04518	11.98%	-177.53
5ª	0.017919	4.75%	9.4347	0.024428	6.48%	4.3442
7ª	0.010794	2.86%	6.3802	6.37×10^{-3}	1.69%	5.0216
9ª	6.04×10^{-3}	1.60%	8.2184	3.25×10^{-3}	0.86%	-172.88
11ª	4.97×10^{-3}	1.32%	-169.55	4.65×10^{-3}	1.23%	-172.17
13ª	2.51×10^{-3}	0.67%	-168.11	1.51×10^{-3}	0.40%	10
15ª	2.81×10^{-3}	0.74%	-171.02	1.44×10^{-3}	0.38%	10.69

Tabla 4.6 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas al disminuir la tensión nominal un 10%, mediante Scilab y ATP para el transformador monofásico con bobinados de 127 V.

Finalmente se resumen los niveles de distorsión armónica total en la tabla 4.7, siendo posible comparar la distorsión armónica total de las corrientes de vacío obtenidas de ambos modelos mediante ATP y Scilab al incrementar y disminuir la tensión nominal.

THD ₁	Scilab Sin pérdidas	Scilab Con pérdidas	ATP Sin pérdidas	ATP Con pérdidas
Nominal	22.36%	19.38%	21.11%	18.42%
Alta	22.85%	20.30%	22.50%	20.25%
Baja	21.94%	18.31%	16.69%	13.85%

Tabla 4.7 Comparación de distorsiones armónicas totales obtenidas de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas, mediante Scilab y ATP para el transformador monofásico con bobinados de 127 V cuando se incrementa o disminuye la tensión nominal un 10%.

4.2.3 Comparación de la tensión inducida en ATP modelo sin pérdidas

En este subapartado únicamente se comparará la tensión inducida de ambos modelos aplicando tensión nominal. Las tensiones inducidas obtenidas con el modelo sin pérdidas mediante ATP y Scilab se muestran en las figuras 4.18 y 4.19.

Como es posible apreciar la tensión inducida en ATP presenta oscilación debido al método de integración trapezoidal cuando se diferencian corrientes o tensiones respecto al tiempo de paso, siendo estos elementos la inductancia de fuga e inductancia de magnetización, por lo que Scilab no presenta estas oscilaciones debido al método de integración de Runge-Kutta de orden 4.

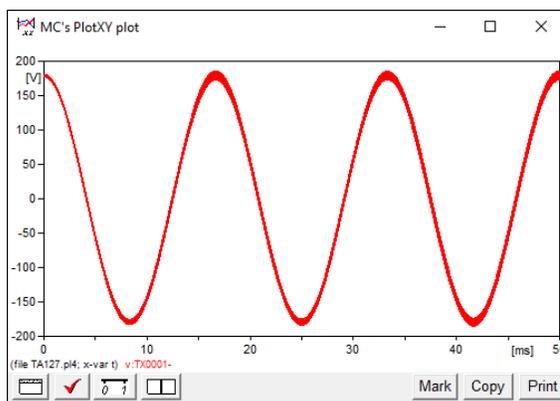


Figura 4.18. Tensión inducida obtenida con el modelo sin pérdidas a tensión nominal mediante ATP.

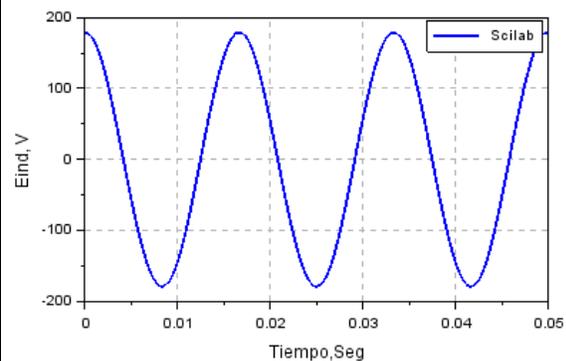


Figura 4.19. Tensión inducida obtenida con el modelo sin pérdidas a tensión nominal mediante Scilab.

Los espectros de frecuencias obtenidos de las tensiones inducidas con el modelo sin pérdidas mediante ATP y Scilab se muestran en la tabla 4.8. Al comparar los espectros de frecuencias la magnitud de la fundamental en Scilab es mayor por una diferencia de 0.011%, pero las diferencias porcentuales de las magnitudes de 3^a, 5^a, 7^a, 9^a, 11^a, 13^a y 15^a armónicas son mínimas, siendo las magnitudes de armónicas pares despreciables en el modelo de Scilab, por manejar cantidades menores a 1×10^{-6} , en cambio, ATP maneja cantidades mayores a 1×10^{-4} existiendo un bajo contenido de componentes armónicas pares.

No. Armónica	Scilab Magnitud (RMS)	Scilab Magnitud (%)	Fasor Grados	ATP Magnitud (RMS)	ATP Magnitud (%)	Fasor Grados
1 ^a	126.70400	100.01%	90.821	126.6926	100.00%	90.625
2 ^a	0.00000	0.0000%	92.078	0.001381	0.0011%	32.461
3 ^a	0.34439	0.2718%	41.209	0.32704	0.2581%	35.742
4 ^a	0.00000	0.0000%	89.478	0.00104	0.0008%	110.08
5 ^a	0.03956	0.0312%	-143.84	0.12872	0.1016%	-128.71
6 ^a	0.00000	0.0000%	90.691	0.00141	0.0011%	140.09
7 ^a	0.10210	0.0806%	-119.15	0.03878	0.0306%	-118.95
8 ^a	0.00000	0.0000%	100.94	0.00072	0.0006%	-19.60
9 ^a	0.00759	0.0060%	-131.09	0.06802	0.0537%	69.38
10 ^a	0.00000	0.0000%	107.68	0.00087	0.0007%	-16.22
11 ^a	0.06110	0.0482%	77.616	0.00170	0.0013%	66.25
12 ^a	0.00000	0.0000%	94.243	0.00098	0.0008%	167.74
13 ^a	0.02961	0.0234%	82.186	0.04471	0.0353%	-100.52
14 ^a	0.00000	0.0000%	91.585	0.00055	0.0004%	175.76
15 ^a	0.03092	0.0244%	-94.658	0.01200	0.0095%	84.09

Tabla 4.8 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las tensiones inducidas del modelo sin pérdidas a tensión nominal, mediante Scilab y ATP para el transformador monofásico con bobinados de 127 V.

Considerando como referencia las tensiones inducidas obtenidas mediante ATP, la tensión inducida obtenida con el modelo sin pérdidas mediante Scilab a tensión nominal presenta una diferencia de 0.001%, en cambio al incrementar la tensión nominal un 10% la diferencia es de 0.053pp y al disminuir la tensión nominal un 10% la diferencia es de 0.102pp, siendo las tensiones inducidas obtenidas con Scilab muy similares a las obtenidas con ATP cuando se considera el modelo sin pérdidas, pero estas últimas muestran un porcentaje considerable de componentes armónicos pares debido al método de integración trapezoidal.

Las oscilaciones presentes en la tensión inducida debido al método trapezoidal realizan un pequeño salto sobre la curva de saturación dentro del modelo de ATP, aunque es mínimo en la corriente de vacío y en la tensión inducida, se hace notar esta diferencia al comparar ambas formas de onda, sin embargo, esta oscilación disminuye cuando se incluye la resistencia de pérdidas, en la tensión inducida simulada en ATP.

4.2.4 Comparación de tensiones inducidas con ATP modelo sin pérdidas

Las tensiones inducidas obtenidas del modelo con pérdidas a tensión nominal mediante ATP y Scilab se muestran en las figuras 4.20 y 4.21. En este caso la tensión inducida del modelo ATP no presenta oscilación, debido a la resistencia de pérdidas en el modelo del transformador monofásico, aunque para poder correr la simulación al restringir la inductancia de fuga se ingresa un valor muy pequeño de $1e-8$.

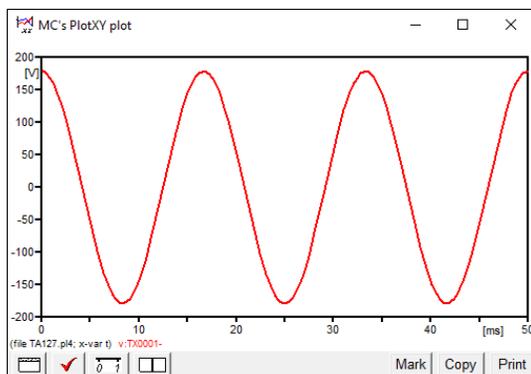


Figura 4.20. Tensión inducida obtenida con el modelo de pérdidas a tensión nominal mediante ATP.

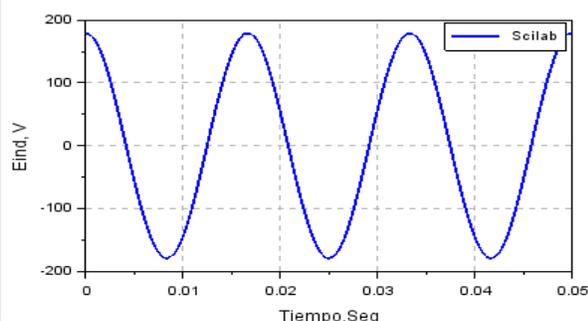


Figura 4.21. Tensión inducida obtenida con el modelo de pérdidas a tensión nominal mediante Scilab.

Al comparar los espectros de frecuencias de la tabla 4.9 las magnitudes de la fundamental en ATP y Scilab no presentaron una diferencia considerable, aunque el espectro de frecuencias de ATP presenta una magnitud mayor de 5ª (0.047pp) armónica, como de 9ª (0.023pp) y 13ª (0.004pp) armónicas, en cambio, el espectro de frecuencias de Scilab presenta una magnitud mayor de 3ª (0.012pp) armónica como de las magnitudes de 7ª (0.028pp), 11ª (0.018pp) y 15ª (0.004pp) armónicas.

No. Armónica	Scilab Magnitud (RMS)	Scilab Magnitud (%)	Fasor Grados	ATP Magnitud (RMS)	ATP Magnitud (%)	Fasor Grados
1ª	126.250	100.00%	90.82	126.250	100.00%	90.63
3ª	0.28368	0.225%	10.70	0.26831	0.213%	2.56
5ª	0.02879	0.023%	93.89	0.08755	0.069%	-176.48
7ª	0.05505	0.044%	179.14	0.01931	0.015%	-176.42
9ª	0.00189	0.002%	125.13	0.03066	0.024%	6.48
11ª	0.02361	0.019%	15.69	0.00048	0.000%	-171.84
13ª	0.00884	0.007%	22.23	0.01434	0.011%	-171.47
15ª	0.00960	0.008%	-175.87	0.00424	0.003%	84.09

Tabla 4.9 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las tensiones inducidas del modelo con pérdidas a tensión nominal, mediante Scilab y ATP para el transformador monofásico con bobinados de 127 V.

4.3 Transformador monofásico 220 V

El modelo monofásico con devanados de 220 V es validado con ATP por medio del circuito de la figura 4.22 y la medición de la corriente de vacío para la unidad monofásica en ATP se realiza en el interruptor.

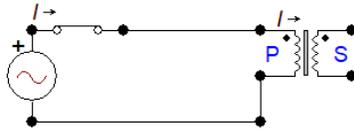


Figura 4.22 Circuito eléctrico en ATP para el transformador monofásico con devanados de 220 V.

4.3.1 Corrientes de vacío en ATP

Al considerar el modelo sin pérdidas, la ventanada de atributos de la unidad monofásica en ATP de la figura 4.23 se le coloca un valor de cero para la resistencia de pérdidas, siendo considerado la resistencia del conductor e inductancia de fuga, obteniéndose como resultado la corriente que se muestra en la figura 4.24.

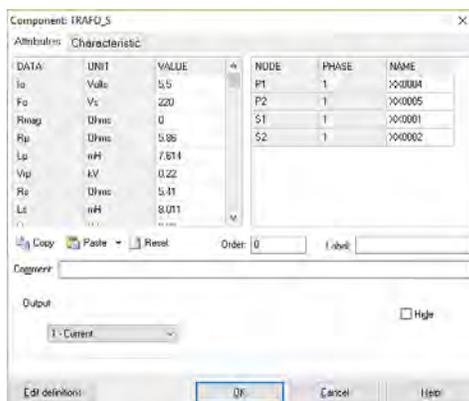


Figura 4.23 Ventana de parámetros del programa ATP para el transformador monofásico de 220 V, considerando el modelo sin pérdidas.

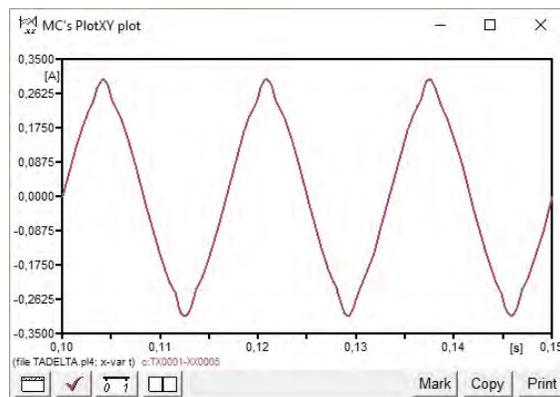


Figura 4.24 Corriente de vacío obtenida a tensión nominal mediante ATP considerando el modelo sin pérdidas.

Al considerar las pérdidas en el núcleo y despreciar la inductancia de fuga, con un valor de $1e-8$ mH en la ventana de atributos del programa ATP, que se muestra en la figura 4.25, se obtiene la forma de onda de la corriente de vacío de la figura 4.26

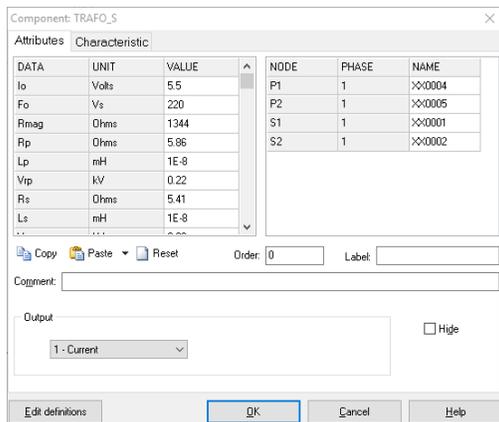


Figura 4.25 Ventana de parámetros del programa ATP para el transformador monofásico de 220 V, considerando el modelo con pérdidas.

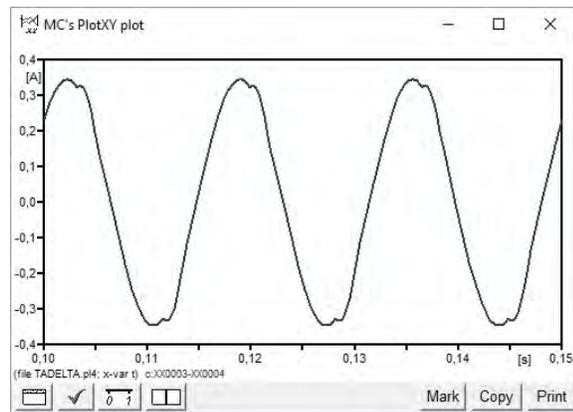


Figura 4.26 Corriente de vacío obtenida a tensión nominal mediante ATP considerando el modelo de pérdidas.

4.3.2 Comparación de corrientes ATP y Scilab

La comparación de la corriente obtenida en ATP con la simulada en Scilab se muestra en la figura 4.27, siendo el espectro de frecuencias para las primeras quince armónicas en ambas corrientes mostrado en la figura 4.28. No obstante, las corrientes comparadas son muy similares, pero los espectros de frecuencias muestran pequeñas variaciones que son comparadas en la tabla 4.10.

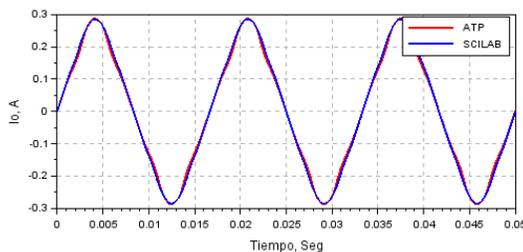


Figura 4.27. Comparación de corrientes obtenidas con el modelo sin pérdidas mediante Scilab y ATP a tensión nominal del transformador monofásico con bobinados de 220 V.

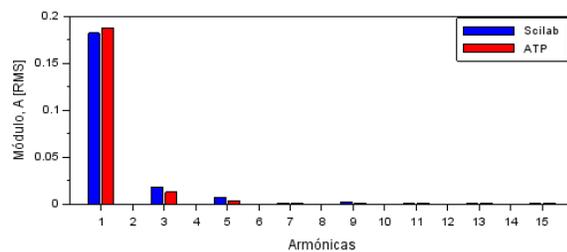


Figura 4.28 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas mediante ATP y Scilab a tensión nominal, ver figura 4.27.

Al comparar los espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas mediante ATP y Scilab en la tabla 4.10, la magnitud de la fundamental de ATP es mayor por una diferencia de 3.64pp como las magnitudes de 7^a (0.14pp) y 11^a (0.17pp) armónicas, en cambio, Scilab presenta una magnitud mayor de 3^a (2.99pp) armónica como de las magnitudes de 5^a (1.78pp), 9^a (0.80pp), 13^a (0.49pp) y 15^a (0.04pp) armónicas. Al presentar ambos espectros de frecuencias una variación mínima en algunas de sus componentes armónicas, la forma de onda simulada con Scilab presenta una diferencia de 1.94pp respecto a la obtenida con ATP.

Las corrientes de vacío obtenidas del modelo sin pérdidas a tensión nominal mediante Scilab y ATP presentaron una distorsión armónica total de 10.62% y 5.22%, siendo la diferencia entre ambos porcentajes de distorsión de 3.79pp.

No. Armónica	Scilab Magnitud (RMS)	Scilab Magnitud (%)	Fasor Grados	ATP Magnitud (RMS)	ATP Magnitud (%)	Fasor Grados
1ª	0.18190	96.36%	0.50	0.18878	100.00%	0.30
3ª	0.01814	9.61%	-178.34	0.01250	6.62%	-178.99
5ª	0.00644	3.41%	2.68	0.00307	1.63%	1.63
7ª	0.00100	0.53%	3.37	0.00127	0.67%	2.08
9ª	0.00220	1.17%	-175.26	7.05x10 ⁻⁴	0.37%	-177.23
11ª	0.00026	0.14%	5.59	6.31x10 ⁻⁴	0.33%	-176.67
13ª	0.00097	0.51%	6.60	4.11x10 ⁻⁵	0.02%	3.97
15ª	0.00044	0.23%	-171.88	3.58x10 ⁻⁴	0.19%	4.53

Tabla 4.10 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas a tensión nominal, mediante Scilab y ATP para el transformador monofásico con bobinados de 220 V.

En el caso del modelo con pérdidas del transformador monofásico la corriente obtenida en ATP con la simulada en Scilab se muestran en la figura 4.29, siendo el espectro de frecuencias para las primeras quince armónicas en ambas corrientes mostrado en la figura 4.30. No obstante, las corrientes comparadas son muy similares, pero los espectros de frecuencias muestran pequeñas variaciones que son comparadas en la tabla 4.11.

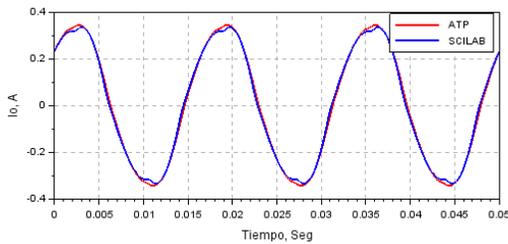


Figura 4.29 Comparación de corrientes obtenidas con el modelo de pérdidas mediante Scilab y ATP a tensión nominal del transformador monofásico con bobinados de 220 V.

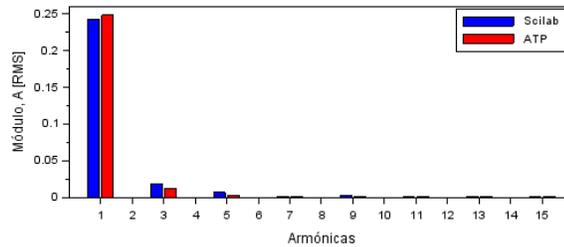


Figura 4.30 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas mediante ATP y Scilab a tensión nominal, ver figura 4.29.

La tabla 4.11 muestra la comparación de los aspectos de frecuencia obtenidos de las corrientes de vacío mediante ATP y Scilab siendo la magnitud de la fundamental en ATP mayor por una diferencia de 2.27pp, incluyendo las magnitudes de 7ª (0.15pp) y 11ª (0.11pp) armónicas, en cambio, Scilab presenta una magnitud mayor de 3ª (2.16pp) armónica como de las magnitudes de 5ª (1.35pp), 9ª (0.58pp), 13ª (0.20pp) y 15ª (0.05pp) armónicas. Al presentar ambos espectros de frecuencias una variación mínima en algunas de sus componentes armónicas, la forma de onda simulada con Scilab presenta una diferencia de 1.68pp respecto a la obtenida con ATP.

No. Armónica	Scilab Magnitud (RMS)	Scilab Magnitud (%)	Fasor Grados	ATP Magnitud (RMS)	ATP Magnitud (%)	Fasor Grados
1ª	0.24320	97.73%	42.55	0.24886	100.00%	41.21
3ª	0.01771	7.12%	-178.5	0.01234	4.96%	-179
5ª	0.00644	2.59%	2.83	0.00308	1.24%	1.64
7ª	0.00086	0.35%	3.84	0.00125	0.50%	2.09
9ª	0.00217	0.87%	-175.4	7.19x10 ⁻⁴	0.29%	-177.26
11ª	0.00034	0.14%	6.15	6.15x10 ⁻⁴	0.25%	-176.7
13ª	0.00092	0.37%	6.73	4.30x10 ⁻⁴	0.17%	3.97
15ª	0.00048	0.19%	-172.16	3.36x10 ⁻⁴	0.14%	4.52

Tabla 4.11 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo con pérdidas a tensión nominal, mediante Scilab y ATP para el transformador monofásico con bobinados de 220 V.

Finalmente se resumen los niveles de distorsión armónica total en la tabla 4.12, siendo posible comparar la distorsión armónica total de las corrientes de vacío obtenidas de ambos modelos mediante ATP y Scilab al incrementar y disminuir la tensión nominal.

THD _I	Scilab Sin pérdidas	ATP Sin pérdidas	Scilab Con pérdidas	ATP Con pérdidas
Nominal	10.62%	7.00%	7.66%	5.13%
Alta	15.08%	12.18%	11.50%	9.15%
Baja	7.39%	5.22%	5.15%	3.81%

Tabla 4.12 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las tensiones inducidas del modelo con pérdidas a tensión nominal, mediante Scilab y ATP para el transformador monofásico con bobinados de 220 V.

4.4 Banco trifásico conexión Dy1

El banco trifásico a base de unidades monofásicas en conexión Dy1 del lado primario se muestra por medio del circuito de la figura 4.31, presentando las mismas características cada unidad monofásica, siendo nombradas como TA, TB y TC.

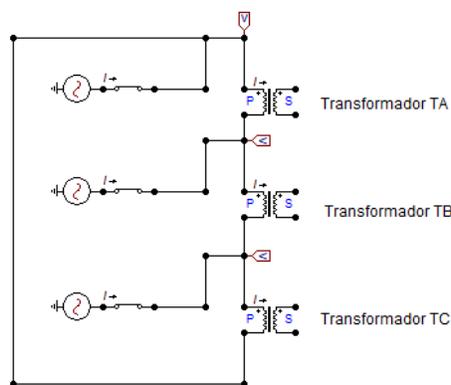


Figura 4.31 Circuito eléctrico en ATP para el banco trifásico en conexión Dy1.

Las corrientes de línea para cada fase del banco trifásico en conexión Dy1 obtenidas del modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas a tensión nominal se muestran en las figuras 4.32 y 4.33 respectivamente, designando un color a cada fase, siendo rojo para la “fase a”, azul para la “fase B” y verde para la fase “fase C”.

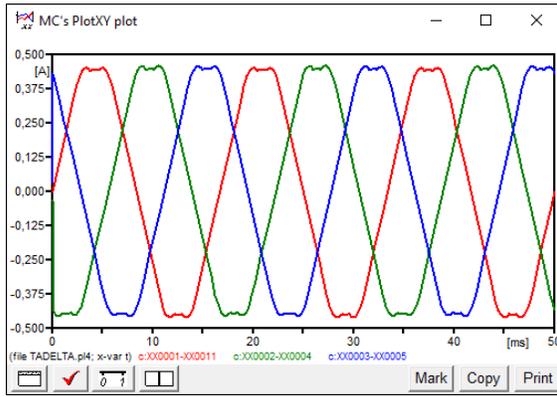


Figura 4.32 Corriente de vacío (línea) del banco trifásico en conexión Dy1, obtenidas con el modelo sin pérdidas a tensión nominal.

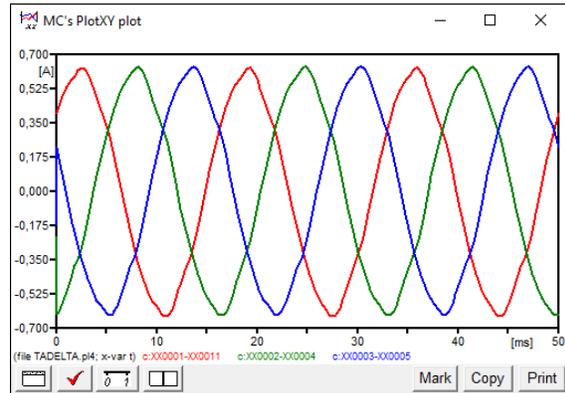


Figura 4.33 Corriente de vacío (línea) del banco trifásico en conexión Dy1, obtenidas con el modelo con pérdidas a tensión nominal.

4.4.1 Comparación de corrientes ATP y Scilab

La comparación de la corriente de vacío (línea) obtenida con ambos modelos mediante ATP y Scilab se muestran en las figuras 4.34 y 4.35, con sus respectivos espectros de frecuencias que se muestran en las figuras 4.36 y 4.37. Las corrientes de vacío (fase) y la tensión inducida en la unidad monofásica para la conexión Dy1 son similar a las que se muestra en el apartado (4.3).

Las corrientes de vacío obtenidas mediante Scilab con el modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas presentaron una diferencia de 6.89pp y 4.5pp respectivamente en referencia a las obtenidas con ATP.

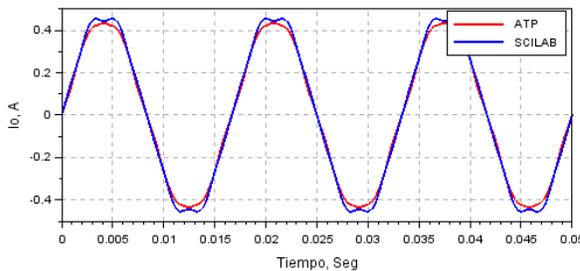


Figura 4.34 Comparación de corrientes (línea) del banco trifásico en conexión Dy1, obtenidas con el modelo sin pérdidas mediante Scilab y ATP a tensión nominal.

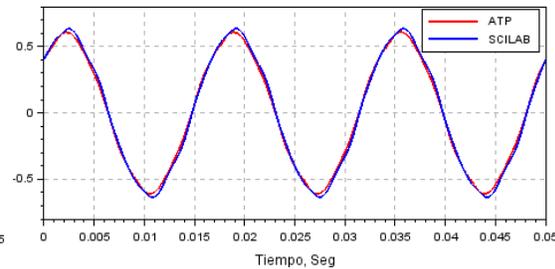


Figura 4.35 Comparación de corrientes (línea) del banco trifásico en conexión Dy1, obtenidas con el modelo con pérdidas mediante Scilab y ATP a tensión nominal.

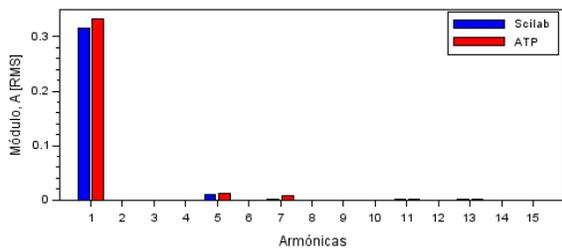


Figura 4.36 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío (línea) del banco trifásico en conexión Dy1, ver figura 4.34.

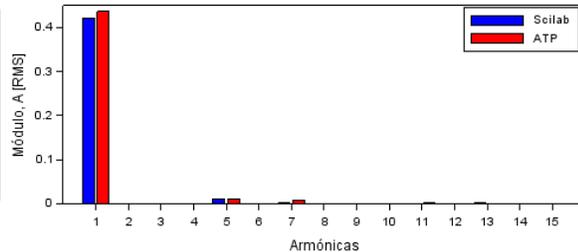


Figura 4.37 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío (línea) del banco trifásico en conexión Dy1, ver figura 4.35.

Al comparar los espectros de frecuencias que se muestran en la figura 4.36 en la tabla 4.13, la magnitud de la fundamental en ATP es mayor por una diferencia de 5.52pp, como las magnitudes de 5^a (0.12pp), 7^a (1.79pp) y 11^a (0.16pp) armónicas, en cambio Scilab presenta una magnitud mayor de 13^a armónica, por una diferencia de 0.26pp.

No. Armónica	Scilab Magnitud (RMS)	Scilab Magnitud (%)	Fasor Grados	ATP Magnitud (RMS)	ATP Magnitud (%)	Fasor Grados
1 ^a	0.31501	94.48%	0.51	0.33340	100.00%	0.30
3 ^a	3.15x10 ⁻⁷	0.00%	0.908	3.832x10 ⁻⁶	0.00%	0.41
5 ^a	1.12x10 ⁻²	2.22%	-177.28	1.161x10 ⁻²	3.48%	-178.32
7 ^a	1.7310 ⁻³	0.34%	-176.44	7.707x10 ⁻³	2.31%	2.32
9 ^a	5.0410 ⁻⁷	0.00%	1.27	1.456x10 ⁻⁶	0.00%	1.00
11 ^a	4.5210 ⁻⁴	0.09%	5.65	9.868x10 ⁻⁴	0.30%	-176.21
13 ^a	1.6710 ⁻³	0.33%	6.60	7.977x10 ⁻⁴	0.24%	-176
15 ^a	4.1010 ⁻⁷	0.00%	3.77	1.754x10 ⁻⁷	0.00%	-172.11

Tabla 4.13 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío (línea) del modelo sin pérdidas a tensión nominal, mediante Scilab y ATP para el banco trifásico en conexión Dy1.

La corriente de vacío (línea) obtenida con el modelo sin pérdidas a tensión nominal mediante Scilab y ATP presenta una distorsión armónica total de 3.60% y 4.23% respectivamente, siendo mayor esta última por una diferencia del 0.63pp.

Al comparar los espectros de frecuencias que se muestran en la figura 4.37 en la tabla 4.14, la magnitud de la fundamental en ATP es mayor por diferencia de 3.37pp como las magnitudes de 5^a (0.02pp), 7^a (1.40pp), 11^a (0.12pp) armónicas, en cambio Scilab presenta una magnitud mayor de 13^a armónica por una diferencia de 0.21%.

La corriente de vacío (línea) obtenida con el modelo de pérdidas a tensión nominal mediante Scilab y ATP presenta una distorsión armónica total de 2.69% y 3.17% respectivamente, siendo mayor esta última por una diferencia del 0.48pp.

No. Armónica	Scilab Magnitud (RMS)	Scilab Magnitud (%)	Fasor Grados	ATP Magnitud (RMS)	ATP Magnitud (%)	Fasor Grados
1ª	0.42123	96.63%	42.55	0.43594	100.00%	40.65
3ª	4.10E-07	0.00%	16.44	4.747E-4	0.11%	36.60
5ª	1.12E-02	2.57%	-177.44	0.01130	2.59%	-178.33
7ª	1.49E-03	0.34%	-177.06	7.594E-3	1.74%	2.31
9ª	5.04E-07	0.00%	10.32	1.517E-6	0.00%	12.79
11ª	5.86E-04	0.13%	6.20	1.120E-3	0.26%	-176.27
13ª	1.60E-03	0.37%	6.72	6.674E-4	0.15%	-176.07
15ª	4.10E-07	0.00%	7.87	1.605E-7	0.00%	145.23

Tabla 4.14 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío (línea) del modelo con pérdidas a tensión nominal, mediante Scilab y ATP para el banco trifásico en conexión Dy1.

4.5 Banco trifásico conexión Dd0

El programa ATP se encuentra limitado para simular una conexión trifásica Dd0 a base de unidades monofásicas considerando la saturación del núcleo, siendo necesario evaluar los resultados obtenidos mediante una medición real, la cual nos aproxima al comportamiento de las corrientes de vacío, pero al no considerar la histéresis esta corriente puede diferir dependiendo del ancho del ciclo de histéresis, pero la corriente obtenida del modelo sin pérdidas se aproxima siendo la diferencia 14.8% para ambas formas de onda.

En la figura 4.38 se muestra la comparación de la onda simulada con la medida y la figura 4.39 muestra la comparación de los espectros de frecuencias, aunque las magnitudes de 3ª, 5ª, 7ª armónicas son menores en el modelo con pérdidas, la fundamental es mayor, siendo la tabla 4.15 la muestra ambas diferencias. Prácticamente el modelo aproxima el comportamiento de la corriente de vacío que circula a través de las unidades monofásicas para la conexión Dd0, pero el contenido de 3ª armónica no se anula por completo como en la simulación, pero son magnitudes diferentes debido al efecto de la histéresis que presenta un lazo amplio en el transformador experimental. La corriente de vacío medida presenta un factor de cresta de 1.793, siendo la forma de onda esbelta y elevada en sus crestas y valles, en cambio, la corriente simulada con Scilab presenta una forma de onda ancha y plana en sus crestas y valles debido al factor de cresta de 1.381.

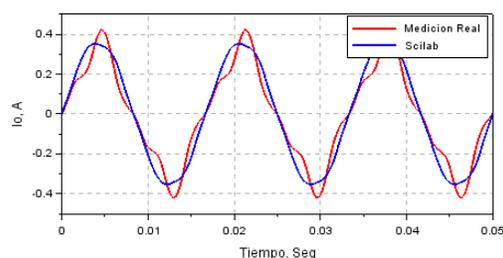


Figura 4.38 Comparación de corrientes de vacío (fase) del banco trifásico en conexión Dd0, mediante Scilab (modelo con pérdidas) y una medición real.

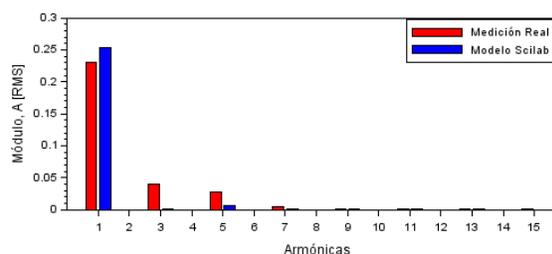


Figura 4.39 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío (fase) del banco trifásico en conexión Dy1, modelo Scilab y medición real, ver figura 4.38.

No. Armónica	Scilab Magnitud (RMS)	Scilab Magnitud (%)	Fasor Grados	Medición Real (RMS)	Medición Real (%)	Fasor Grados
1ª	0.2300	110.09%	-0.25	0.2532	100.00%	0.35
3ª	0.0471	0.11%	142.01	2.48x10-4	20.43%	67.94
5ª	0.0259	2.80%	-71.72	6.44x10-3	11.26%	153.12
7ª	2.75x10-3	0.37%	-169.31	8.60x10-4	1.20%	-147.13
9ª	5.01x10-4	0.01%	125.7	2.95x10-5	0.22%	-66.03
11ª	8.22x10-4	0.15%	-167.2	3.38x10-4	0.36%	-20.54
13ª	1.20x10-4	0.40%	-38.99	9.23x10-4	0.05%	-39.49
15ª	5.52x10-4	0.00%	-21.75	6.16x10-6	0.24%	51.48

Tabla 4.15 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío (fase) del modelo con pérdidas (Scilab) y una medición real a tensión nominal, para el banco trifásico en conexión Dd0.

4.6 Banco trifásico conexión Yy0 neutro aislado.

Para verificar la corriente del banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado considerando la saturación del núcleo, se evalúan los resultados obtenidos por medio de los espectros de frecuencias del apartado (4.2.1) comparándolos en la tabla 4.16, debido a la limitación de ATP, por lo que se extraen las componentes de secuencia cero para ambos espectros de frecuencias resultado las figuras 4.40 y 4.41, presentando una diferencia del 3.28pp la corriente de vacío simulada con Scilab..

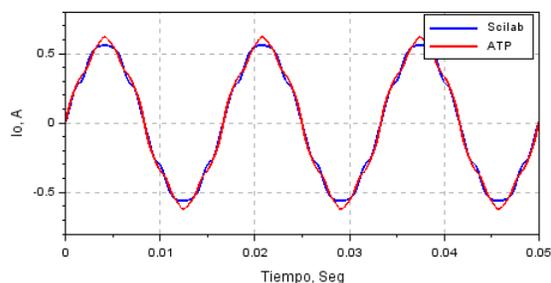


Figura 4.40 Comparación de corrientes vacío del banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado, obtenidas mediante Scilab (modelo con pérdidas) y una medición real a tensión nominal.

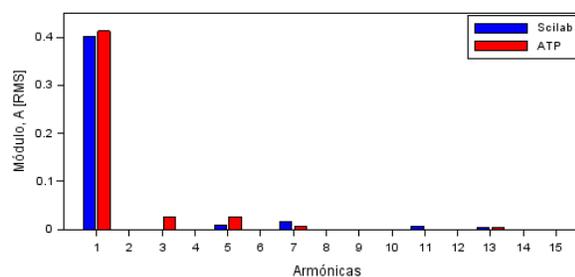


Figura 4.41 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado, ver figura 4.40.

No. Armónica	Scilab Magnitud (RMS)	Scilab Magnitud (%)	Fasor Grados	ATP Magnitud (RMS)	ATP Magnitud (%)	Fasor Grados
1ª	0.40090	97.05%	0.85	0.41309	100.00%	0.65
3ª	0	0	0	0	0	0
5ª	0.00812	1.97%	5.02	0.02681	6.49%	3.80
7ª	0.01698	4.11%	5.99	0.00596	1.44%	4.21
9ª	0	0	0	0	0	0
11ª	0.00714	1.73%	-170.56	0.00015	0.04%	19.22
13ª	0.00299	0.72%	-169.26	0.00444	1.08%	8.78
15ª	0	0	0	0	0	0

Tabla 4.16 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío del modelo sin pérdidas a tensión nominal, mediante Scilab y ATP para el banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado.

4.7 Comprobación de la corriente de vacío, medición real y simulación, transformador monofásico 127 V.

En este apartado son comprobadas las corrientes de vacío a tensión nominal para el bobinado de 127 V del transformador monofásico, mediante una medición real y por medio de una simulación utilizando el modelo con pérdidas, siendo la figura 4.42 la que muestra la comparación de ambas formas de onda y la figura 4.43 la que contiene ambos espectros de frecuencias. La corriente de vacío obtenida de la simulación presenta una diferencia de 6.27pp respecto a la corriente medida, debido al amplio lazo de histéresis, el cual aumenta las magnitudes de la 3ª y 5ª armónicas.

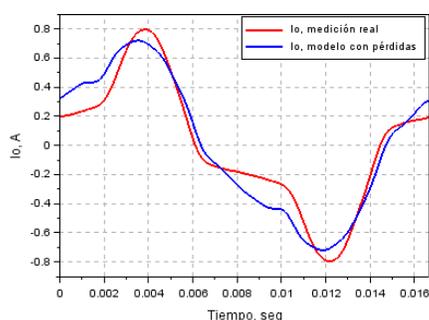


Figura 4.42 Comparación de corrientes de vacío del transformador monofásico con bobinado de 220V obtenidas a tensión nominal mediante una medición real y el modelo con pérdidas.

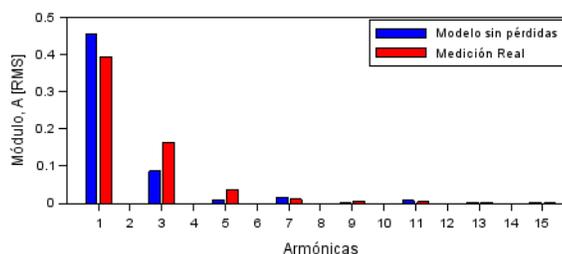


Figura 4.43 Comparación de espectros de frecuencias de las corrientes de vacío obtenidas a tensión nominal mediante Scilab modelo sin pérdidas y ATP del transformador monofásico de 127 V.

La tabla 4.17 muestra la comparación de las magnitudes de ambos espectros de frecuencias siendo la referencia la medición real, presentando mayor magnitud fundamental la corriente del modelo de pérdidas por una diferencia de 15.38pp, pero la medición real presenta una mayor magnitud de 3ª armónica con una diferencia de 19.92pp con respecto al modelo simulado, por lo tanto la distorsión armónica total de la corriente en la medición real es de 42.52% y la del modelo con pérdidas de 19.37%.

No. Armónica	Scilab Magnitud (RMS)	Scilab Magnitud (%)	Fasor Grados	Medición Real (RMS)	Medición Real (%)	Fasor Grados
1ª	0.45634	115.38%	29.74	0.3955	100.00%	25.64
3ª	0.08624	21.81%	-177.24	0.16506	41.73%	-165.63
5ª	0.00877	2.22%	5.13	0.03607	9.12%	14.18
7ª	0.01673	4.23%	5.99	0.01056	2.67%	-2.37
9ª	0.00059	0.15%	5.20	0.00524	1.32%	-176.23
11ª	0.00717	1.81%	-178.12	0.00367	0.93%	-176.23
13ª	0.00268	0.68%	-178.24	0.00290	0.73%	-16.13
15ª	0.00291	0.74%	12.73	0.00137	0.35%	71.56

Tabla 4.17 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío (fase) del modelo con pérdidas (Scilab) y una medición real a tensión nominal, para el transformador monofásico con bobinados de 127 V.

4.8 Comprobación de la corriente de vacío, medición real y simulación, transformador monofásico 220 V.

En este apartado son comprobadas las corrientes de vacío a tensión nominal para el bobinado de 220 V del transformador monofásico, mediante una medición real y por medio de una simulación utilizando el modelo con pérdidas, siendo la figura 4.44 la que muestra la comparación de ambas formas de onda y la figura 4.45 la que contiene ambos espectros de frecuencias. La corriente de vacío obtenida de la simulación presenta una diferencia de 17.95pp respecto a la corriente medida, debido al amplio lazo de histéresis, el cual aumenta las magnitudes de la 3ª y 5ª armónicas.

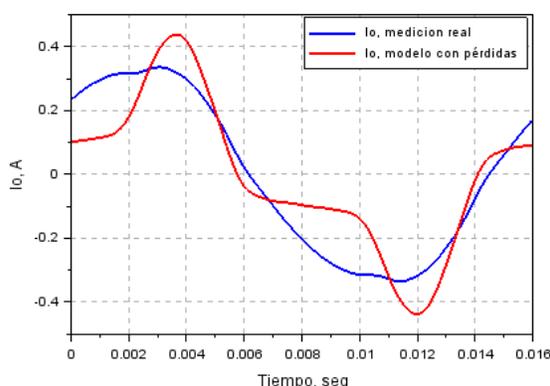


Figura 4.44 Comparación de corrientes de vacío del transformador monofásico con bobinado de 220V obtenidas a tensión nominal mediante una medición real y el modelo con pérdidas.

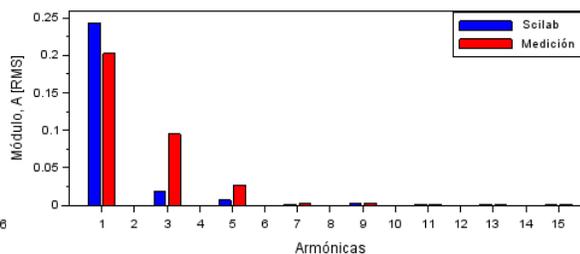


Figura 4.45 Comparación de espectros de frecuencias de las corrientes de vacío obtenidas a tensión nominal mediante Scilab modelo sin pérdidas y ATP del transformador monofásico de 220 V.

La tabla 4.18 muestra la comparación de las magnitudes de ambos espectros de frecuencias siendo la referencia la medición real, presentando mayor magnitud fundamental la corriente del modelo de pérdidas por una diferencia de 15.38pp, pero la medición real presenta una mayor magnitud de 3ª armónica con una diferencia de 17.2pp con respecto al modelo simulado, por lo tanto la distorsión armónica total de la corriente en la medición real es de 42.52% y la del modelo con pérdidas de 17.37%.

No. Armónica	Scilab Magnitud (RMS)	Scilab Magnitud (%)	Fasor Grados	ATP Magnitud (RMS)	ATP Magnitud (%)	Fasor Grados
1ª	0.24320	97.73%	42.55	0.20263	100.00%	41.21
3ª	0.01771	7.12%	-178.5	0.09522	4.96%	-179
5ª	0.00644	2.59%	2.83	0.02630	1.24%	1.64
7ª	8.6x10 ⁻⁴	0.35%	3.84	2.06x10 ⁻³	0.50%	2.09
9ª	2.17x10 ⁻³	0.87%	-175.4	2.52x10 ⁻³	0.29%	-177.26
11ª	3.40x10 ⁻⁴	0.14%	6.15	8.66x10 ⁻⁴	0.25%	-176.7
13ª	9.20x10 ⁻⁴	0.37%	6.73	1.46x10 ⁻³	0.17%	3.97
15ª	4.80x10 ⁻⁴	0.19%	-172.16	6.23x10 ⁻⁴	0.14%	4.52

Tabla 4.18 Comparación de espectros de frecuencias obtenidos de las corrientes de vacío (fase) del modelo con pérdidas (Scilab) y una medición real a tensión nominal, para el transformador monofásico con bobinados de 220 V.



Conclusiones

5.1 Conclusiones

En un estudio de componentes armónicas en transformadores monofásicos con núcleo saturable es recomendable considerar el modelo con pérdidas para obtener un resultado consistente al de una medición real, lo cual depende de la esbeltez del lazo de histéresis del transformador monofásico.

Los porcentajes de THD obtenidos de las corrientes de vacío y tensiones inducidas del transformador monofásico a tensión nominal y al aumentar o disminuir la tensión nominal un 10% fueron menores para el modelo con pérdidas, sin embargo, los flujos magnéticos presentaron similitud en sus distorsiones armónicas totales.

La magnitud de la fundamental como de las magnitudes de 3^a, 5^a, 7^a etc. armónicas de los espectros de frecuencias obtenidas de las corrientes de vacío, tensiones inducidas y flujos magnéticos del transformador monofásico cuando se incrementa o disminuye la tensión nominal un 10%, aumentan o se reducen en una proporción no lineal debido a las características del núcleo (curva de saturación).

La inductancia de fuga no afecta en forma porcentual significativa [15] el aumento de la distorsión armónica total en la corriente de vacío, tensión inducida y flujo magnético, corroborado por medio de simulaciones previas.

Los flujos magnéticos y tensiones inducidas obtenidas con ambos modelos para banco trifásico en conexión Yy0 aterrizada no presentaron deformación de onda, debido al bajo contenido de 3^a, 5^a, 7^a etc. armónicas, menor a 0.1%, cuando se aplicó tensión nominal como el aumento y disminución de la tensión en un 10%, pero las corrientes de vacío principalmente presentaron contenido de 3^a (17%-22%), 5^a (0.5%-6%) y 7^a (2%-6%) armónicas en ambos modelos cuando se aumentó y disminuyó la tensión nominal un 10%.

Comparando los espectros de frecuencias del banco trifásico con neutro a tierra con los espectros de frecuencias obtenidos cuando se aísla el neutro se obtuvo lo siguiente:

- A tensión nominal, los flujos magnéticos obtenidos de ambos modelos del banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado pierden por completo sus propiedades sinusoidales, incrementando circunstancialmente el contenido de fundamental (3.5%) como de las componentes de 3^a (18%),

5ª (9%) y 7ª (4%) armónicas, siendo las formas de onda aplanadas en sus crestas y valles. Las tensiones inducidas de ambos modelos presentaron deformación de onda, siendo esbeltas y elevadas en sus crestas y valles, debido al incremento de la fundamental (3.5%) como de las componentes de 3ª (54%), 5ª (44%), 7ª (34%), 9ª (4%) etc. armónicas, debido aislamiento del neutro que impide la circulación de las componentes de secuencia cero de las corrientes de vacío, pero si pueden circular las componentes de secuencia positiva y negativas, las cuales son las magnitudes de 5ª (2%/20.4%), 7ª (4.2%/20.5%), 11ª (1.8%/7.6%) etc. armónicas para el modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas respectivamente.

- Al incrementar la tensión nominal un 10%, los flujos magnéticos obtenidos de ambos modelos del banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado pierden por completo sus propiedades sinusoidales, incrementando circunstancialmente el contenido de fundamental (3.3%) como de las componentes de 3ª (17%), 5ª (8%) y 7ª (5%) armónicas, siendo las formas de onda aplanadas en sus crestas y valles. Las tensiones inducidas de ambos modelos presentaron deformación de onda, siendo esbeltas y elevadas en sus crestas y valles, debido al incremento de la fundamental (3.5%) como de las componentes de 3ª (50%), 5ª (41%), 7ª (36%), 9ª (12%) etc. armónicas, debido aislamiento del neutro y la no circulación de las componentes de secuencia cero de las corrientes de vacío, pero si pueden circular las componentes de secuencia positiva y negativa, las cuales son las magnitudes de 5ª (0.43%/18.31%), 7ª (2.92%/18.9%), 11ª (0.8%/2.24%) para el modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas respectivamente.
- Al disminuir la tensión nominal un 10%, los flujos magnéticos obtenidos de ambos modelos del banco trifásico en conexión Yy0 con neutro aislado pierden por completo sus propiedades sinusoidales, incrementando circunstancialmente el contenido de fundamental (5%) como de las componentes de 3ª (19%), 5ª (10%) y 7ª (3%) armónicas, siendo las formas de onda aplanadas en sus crestas y valles. Las tensiones inducidas de ambos modelos presentaron deformación de onda, siendo esbeltas y elevadas en sus crestas y valles, debido al incremento de la fundamental (5%) como de las componentes de 3ª (57%), 5ª (47%), 7ª (24%), 9ª (4%) etc. armónicas, debido aislamiento del neutro y la no circulación de las componentes de secuencia cero de las corrientes de vacío, pero si pueden circular las componentes de secuencia positiva y negativa, las cuales son las magnitudes de 5ª (0.43%/17.23%), 7ª (2.92%/17.79%), 11ª (0.8%/2.1%) para el modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas respectivamente.

La conexión Dd0 reduce principalmente la componente de tercera armónica en las corrientes de vacío de las unidades monofásicas, existiendo deformación de los flujos magnéticos y tensiones inducidas en sus crestas y valles, lo cual depende de la relación de transformación. Los THD _{flujos magnéticos} del banco trifásico en conexión Dd0 cuando se incrementó la tensión nominal un 10% presentaron un valor de 1.18% y 1.19% para el modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas respectivamente, pero a tensión nominal y al disminuir la tensión nominal un 10% estos porcentajes fueron menor a 1%. Los THD _{tensiones inducidas} del banco trifásico en conexión Dd0 cuando se incrementó la tensión nominal un 10% llegó a un valor de 3.44% y 3.45% para el modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas respectivamente, pero estos valores a tensión nominal fueron de 2.24% y 2.25% para el modelo sin pérdidas y el modelo con pérdidas respectivamente, sin embargo, al disminuir la tensión un 10% estos porcentajes fueron para el modelo sin pérdidas de 1.17% y el modelo con pérdidas de 1.19%.

5.2 Aportaciones

Un modelo programado en Scilab para un análisis cuantitativo de la corriente de excitación, flujo magnético y tensión inducida por medio de espectros de frecuencias cuando se presenta una sobretensión o en caso contrario una caída de tensión de un 10%, en un banco trifásico a base de unidades monofásicas para las conexiones Yy0 con y sin neutro aterrizado, Dy1, Dd0, considerando en estos la saturación del núcleo.

5.3 Trabajos futuros

Implementar el modelado de histéresis (Jiles-Atherton) en el programa realizado para el caso de un transformador monofásico basado en la dualidad para el estudio de la corriente de excitación.

Comparación del modelado de histéresis (Jiles-Atherton) con el lazo de histéresis de una medición real.

Estudio del comportamiento de histéresis y corriente de excitación con el modelo de pérdidas en la conexión delta-delta sin carga basado en la dualidad.

Estudio para análisis de transitorios en baja frecuencia considerando la histéresis y curva de saturación basado en la dualidad ante una falla trifásica en el núcleo.

Apéndice A

Dimensiones en devanados

En este apartado se muestran las dimensiones ocupadas para el cálculo de la permeancia de fuga correspondientes a los cuatro devanados; no obstante, las variables manejadas son las mismas para cada devanado lo que hace más sencillo el manejo de esta información.

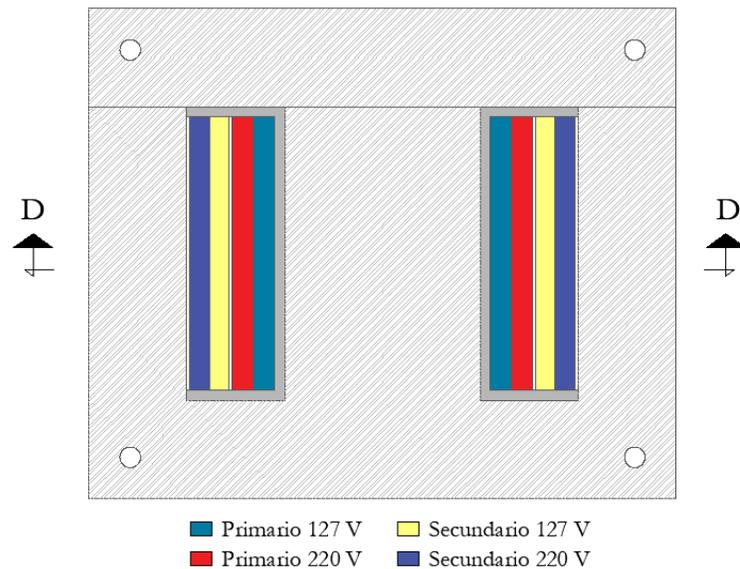


Figura A1 Corte A-A', Núcleo y devanados primarios y secundarios transformador monofásico 127 V/ 220 V

Los devanados mostrados en las siguientes páginas poseen una clave característica para su distinción, en las figuras posteriores se muestran tablas adjuntas con la letra “D” mayúscula cuyo significado es devanado y un número en su lado posterior del 1 al 4, cuyo significado es la clasificación en los devanados primarios y secundarios para los niveles de tensión de 127V y 220V. Siguiendo el orden descrito los devanados se encuentran de interior a exterior siendo los siguientes: primario 127V (1), primario 220V (2), secundario 127V (3), secundario 220V (4) que se muestra en la figura A.1.

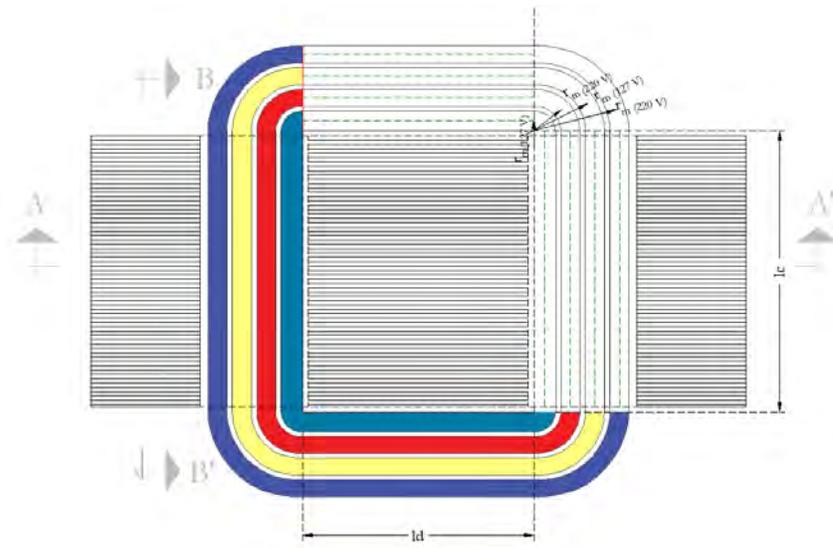


Figura A2 Detalle bobinados primarios y secundarios

En la siguiente lista se muestra el símbolo y la descripción para cada una de estas variables.

Símbolos	Descripción
d_1	Longitud vertical ocupada en el devanado (primario, secundario)
d_2	Separación entre el devanado y el carrete.
d_3	Separación entre devanados y aislante dieléctrico clase A.
d_4	Longitud horizontal ocupada en el devanado (primario, secundario)
d_5	Superación entre devanados y aislante dieléctrico clase A.
l_a	Longitud media horizontal de H en aire.
l_b	Longitud media vertical de H en aire.
l_c	Longitud vertical del carrete.
l_d	Longitud horizontal del carrete.
l_{rm}	Longitud radial promedio en el devanado.
r_m	Radio medio, medido desde la esquina externa del carrete.
l_{prom}	Perímetro del todo el devanado ($2l_c+2l_d+4l_{rm}$)
l_{rm1}	Longitud radial entre devanados primarios 127 V y 220 V.
r_{m1}	Radio medio, medido desde la esquina externa del carrete.
l_{rm2}	Longitud radial entre devanados secundario 127 V/ primario 220 V.
r_{m2}	Radio medio, medido desde la esquina externa del carrete.
l_{rm3}	Longitud radial entre devanado secundario 127 V y primario 220 V.

A.1.1 Dimensiones en devanado primario y secundario 127 V

En la figura A3 y A4 se muestran las cotas del devanado primario y secundario desde el Corte A-A' de la figura A1 y las tablas A1 y A2 proporcionan la información referente a las cotas de cada devanado, incluyendo las dimensiones de los aislantes que existe entre los devanados y espacios de aire (radios y longitudes).

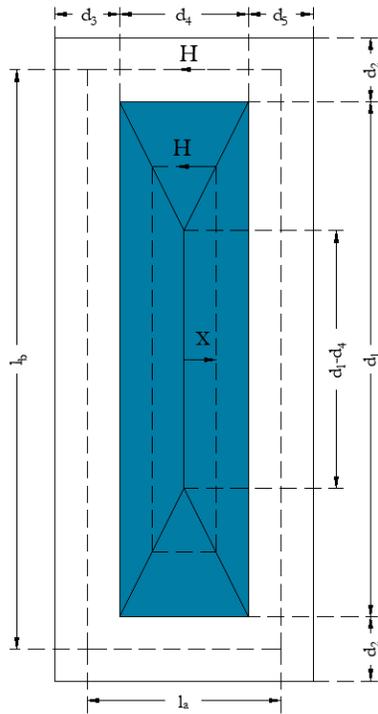


Figura A3 Cotas del bobinado primario de 127 V.

Dimensiones (cm)					D1		
d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅	Primario 127 V		
5.3	0.2	0.463	0.4	0.2			
Devanado Radial							
l _a	l _b	l _c	l _d	l _m	r _m	l _{prom}	
0.732	5.5	5.00	4.2	0.323	0.2063	19.695	
Espacio en Devanados							
l _{m1}	r _{m1}	l _{m2}	r _{m2}	l _{m3}	r _{m3}		
0.157	0.1	0.997	0.6344	2.169	1.381		

Tabla A1 Dimensiones promedio devanado primario de 127 V

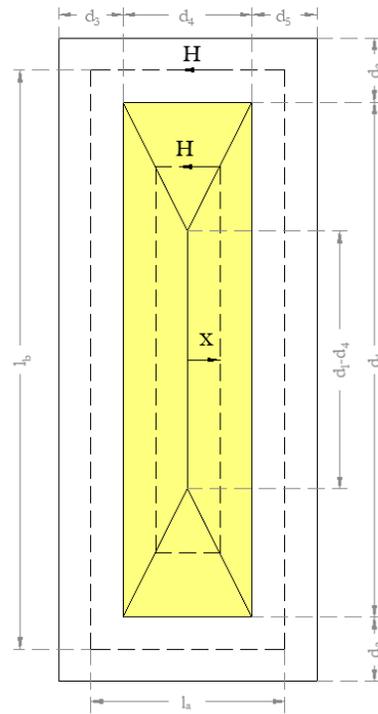


Figura A4 Cotas del bobinado secundario de 127 V.

Dimensiones (cm)					D2		
d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅	Secundario 127 V		
5.3	0.2	0.45	0.375	0.463			
Devanado Radial							
l _a	l _b	l _c	l _d	l _m	r _m	l _{prom}	
0.832	5.5	5.00	4.2	1.669	1.063	25.08	
Espacio en Devanados							
l _{m1}	r _{m1}	l _{m2}	r _{m2}	l _{m3}	r _{m3}		
0.157	0.1	0.997	0.6344	2.169	1.381		

Tabla A2 Dimensiones promedio devanado secundario de 127 V

A.1.2 Dimensiones en devanado primario y secundario 220 V

En la figura A5 y A6 se muestran las cotas del devanado primario y secundario desde el Corte A-A' de la figura A1 y las tablas A3 y A4 proporcionan la información referente a las cotas de cada devanado, incluyendo las dimensiones de los aislantes que existe entre los devanados y espacios de aire (radios y longitudes).

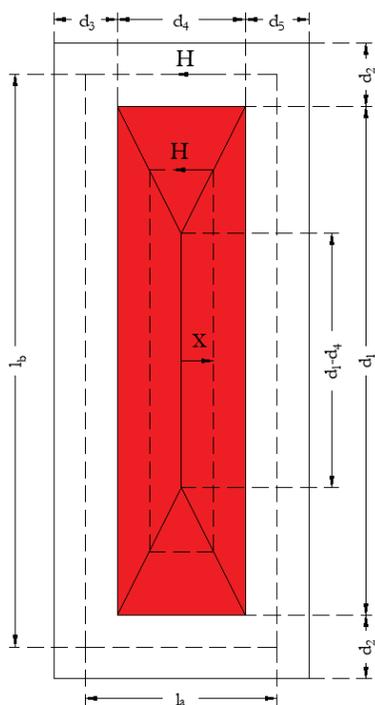


Figura A5 Cotas del bobinado primario de 220 V.

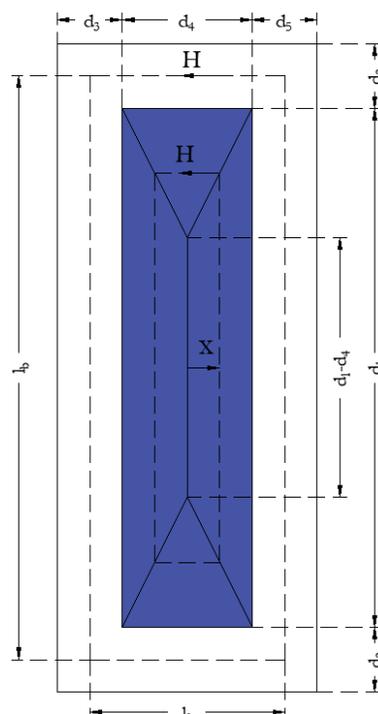


Figura A6 Cotas del bobinado secundario de 220 V.

Dimensiones (cm)					D3 Primario 220 V		
d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅			
5.3	0.2	0.425	0.413	0.613			
Devanado Radial							
l _a	l _b	l _c	l _d	l _m	r _m	l _{prom}	
0.932	5.5	5.00	4.2	0.9719	0.6188	22.29	
Espacio en Devanados							
l _{im1}	r _{m1}	l _{im2}	r _{m2}	l _{im3}	r _{m3}		
0.157	0.1	0.324	0.2063	1.63	1.038		

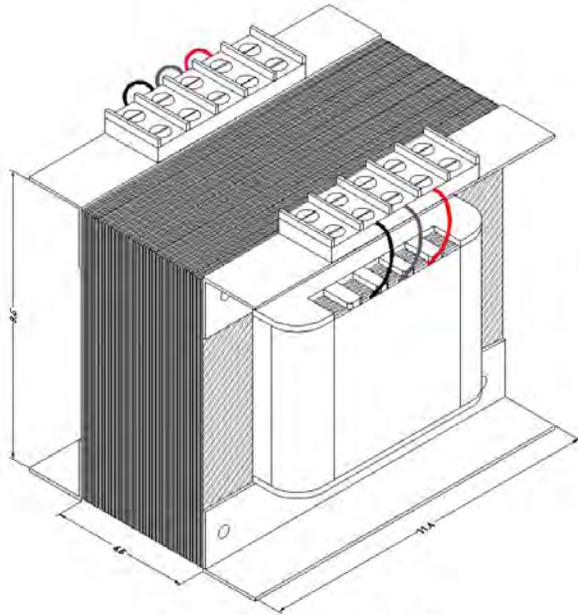
Tabla A3 Dimensiones promedio devanado primario de 220 V

Dimensiones (cm)					D4 Secundario 220 V		
d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅			
5.3	0.2	0.05	0.4	0.425			
Devanado Radial							
l _a	l _b	l _c	l _d	l _m	r _m	l _{prom}	
0.638	5.5	5.00	4.2	2.278	1.450	27.51	
Espacio en Devanados							
l _{im1}	r _{m1}	l _{im2}	r _{m2}	l _{im3}	r _{m3}		
0.157	0.1	0.324	0.2063	1.63	1.038		

Tabla A4 Dimensiones promedio devanado secundario de 220 V

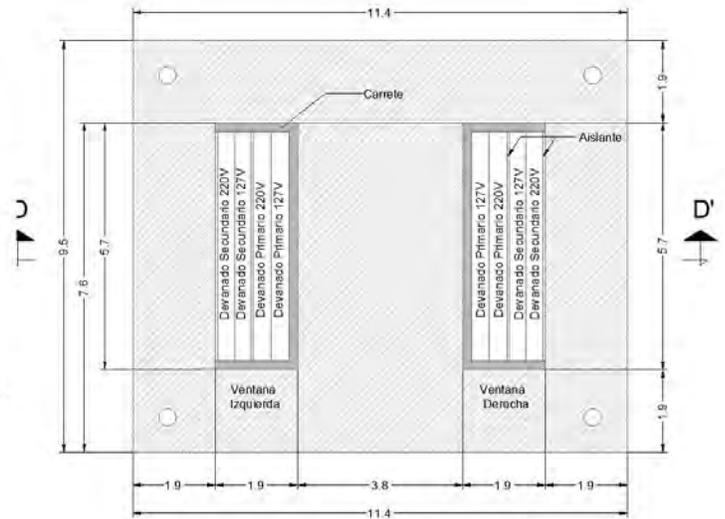
Apéndice B

Dimensiones transformador



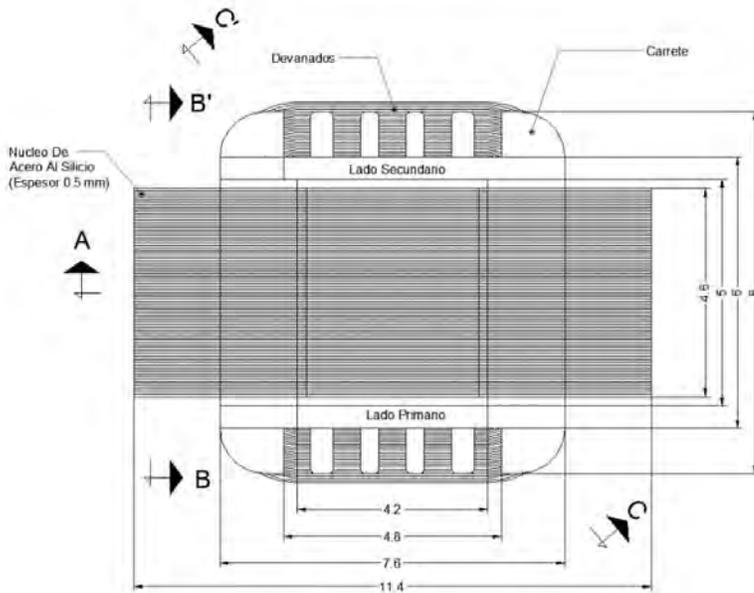
ISOMÉTRICO TRANSFORMADOR

Cotas: mm



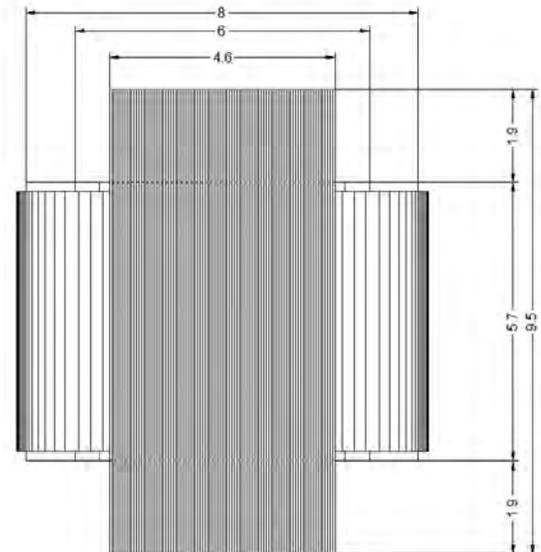
CORTE A-A'

Cotas: cm



PLANTA TRANSFORMADOR 300VA

Cotas: cm



CORTE B-B'

Cotas: cm

Apéndice C

Pruebas de impedancia, pérdidas

En este apéndice se muestran las pruebas de corto circuito y circuito abierto realizadas a los devanados de los transformadores modelados. También se adjunta la curva de saturación utilizada en estas simulaciones.

C.1.1 Prueba de Circuito Abierto

En la tabla C1 se muestran las pruebas de circuito abierto en los tres transformadores a modelar, tanto del lado de alta como el de baja. Sin embargo, de todas estas pruebas fue elegido el valor que se encontrará entre ambos valores obtenidos para la realización de la simulación con respecto a lado “H”. Al ser un devanado prácticamente artesanal algunos de los datos son variantes debido a factores ambientales y de construcción.

Las pruebas mostradas son tanto de lado de alta “H” como en el lado de baja “X” para ambos devanados y para cada uno de los transformadores experimentales.

Prueba de Circuito Abierto											Modelo		
Transformador	Vn	Lado	Lado C.O	Vco[V]	Ico[A]	P[W]	S[VA]	Q[VAR]	FpTotal	FpDesp	Rn	Xm	Fp
TA	127	H	X	127.5	0.51	29	64	51	0.45	0.5	560.56	279.32	0.45
TB	127	H	X	127.1	0.4	25	51	39	0.5	0.55	646.18	364.92	0.49
TC	127	H	X	127.2	0.53	28	55	67	0.43	0.48	577.85	263.83	0.42
TA	220	H	X	220	0.35	38	76	60	0.51	0.54	1273.68	722.71	0.49
TB	220	H	X	220	0.3	36	66	48	0.55	0.61	1344.44	874.95	0.55
TC	220	H	X	220	0.33	34	73	58	0.47	0.5	1423.53	754.52	0.47
TA	127	X	H	127.6	0.45	23	56	46	0.41	0.45	707.90	309.47	0.40
TB	127	X	H	127.3	0.31	17	39	32	0.44	0.47	953.25	455.03	0.43
TC	127	X	H	127	0.47	24	59	49	0.41	0.45	672.04	295.12	0.40
TA	220	X	H	220	0.32	32	71	56	0.46	0.5	1512.50	771.84	0.45
TB	220	X	H	220	0.3	36	66	48	0.55	0.61	1344.44	874.95	0.55
TC	220	X	H	220	0.31	28	67	56	0.42	0.45	1728.57	778.30	0.41

Tabla C1. Pruebas de circuito abierto

C.1.2 Prueba de Impedancia

En la tabla C2 se muestran las pruebas de corto circuito en los tres transformadores a modelar, tanto del lado de alta como en el de baja. Sin embargo, solamente fue eligió un promedio de los tres transformadores en las simulaciones en el lado de alta “H”. Al ser un devanado prácticamente artesanal algunos de los datos son variantes debido a factores ambientales y de construcción.

Prueba de Corto Circuito

Transformador	Vn	Lado	Lado C.C	Vcc[V]	Icc[A]	P[W]	S[VA]	Q[VAR]	Fptotal	FpDesp	Req	Xeq	Fp
TA	127	H	X	8.1	2.34	18	18.25	3	0.98	0.99	3.29	1.08	0.95
TB	127	H	X	8.1	2.39	19	19.24	3	0.98	0.98	3.33	0.65	0.98
TC	127	H	X	8	2.35	18	18.25	3	0.98	0.99	3.26	0.98	0.96
TA	220	H	X	8.5	1.37	11	11.18	2	0.96	0.98	5.86	2.04	0.94
TB	220	H	X	8.1	1.32	10	10.19	2	0.96	0.96	5.74	2.17	0.94
TC	220	H	X	8.6	1.37	11	11.18	2	0.96	0.96	5.86	2.25	0.93
TA	127	X	H	8.1	2.34	18	18.24	3	0.98	0.98	3.29	1.04	0.95
TB	127	X	H	8.4	2.9	19	19.24	3	0.98	0.99	2.26	1.81	0.78
TC	127	X	H	8.2	2.39	19	19.24	3	0.98	0.99	3.33	0.84	0.97
TA	220	X	H	8.7	1.4	11	11.18	2	0.96	0.98	5.61	2.67	0.90
TB	220	X	H	8.2	1.3	10	10.19	2	0.96	0.98	5.92	2.18	0.94
TC	220	H	X	8.4	1.37	11	11.18	2	0.96	0.98	5.86	1.80	0.96

Tabla C2. Prueba de impedancia

Apéndice D

Códigos Scilab

Los códigos fuentes utilizados para obtener las corrientes de vacío en las unidades monofásica 127 V/220 V para la plataforma Scilab 6.0 se encuentran en el repositorio siguiente <https://github.com/jacometoss/>

Apéndice E

Método de Runge-Kutta

En este apéndice se muestra el método de Runge-Kutta de orden 4 que sirve para dar solución aproximada y más exacta a las ecuaciones de estado del capítulo 2. En este método es necesario de un intervalo de tiempo, una ecuación diferencial de primer orden y una condición inicial para determinar las constantes.

$$y' = f(x, y) \quad (G.1)$$

donde

$$k_1 = f(x_i, y_i) \quad (G.2)$$

$$k_2 = f\left(x_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{h}{2}k_1\right) \quad (G.3)$$

$$k_3 = f\left(x_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{h}{2}k_2\right) \quad (G.4)$$

$$k_4 = f(x_i + h, y_i + hk_3) \quad (\text{G.5})$$

al determinar las constantes es posible dar solución a la expresión (G.6)

$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{6} (k_i + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (\text{G.6})$$

Referencias

- [1] L. F. Blume, "Influence of transformer connections on operation," *Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 33, no. 5, pp. 753-770, 1914.
- [2] L. F. Curtis, "The effect of delta and star connections upon transformer wave forms," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. XXXIII, no. 2, pp. 1273-1282, 1914.
- [3] J. F. Peters, "Harmonics in transformer magnetizing currents," *Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 34, no. 8, pp. 1657-1673, 1915.
- [4] L. N. Robinson, "Phenomena accompanying transmission with some types of star transformer connections — II," *Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 36, no. 12, pp. 967-997, 1917.
- [5] P. Kemp and H. P. Young, "Polyphase transformer magnetizing-current wave-forms," *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 63, no. 345, pp. 877-895, 1925.
- [6] F. Brailsford and V. R. Mazza, "Magnetic flux distribution in transformer laminations," *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 8, no. 96, pp. 552-553, 1962.
- [7] J. D. Lavers, P. P. Biringer and H. Hollitscher, "The effect of third harmonic flux distortion on the core losses in thin magnetic steel laminations," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 96, no. 6, pp. 1856-1862, 1977.
- [8] T. Nakata, N. Takahashi and M. Nakano, "Transverse Fluxes and Magnetic Characteristics of Three-Phase Transformer Core with Ducts," *IEEE Translation Journal on Magnetism in Japan*, vol. 2, no. 6, pp. 537-538, 1987.

- [9] Y. Hu, R. Tang and X. Wang, "The analysis and calculation of the magnetic flux density distributions in a 3-phase roll-iron core transformer," in *Electrical Machines and Systems, 2003. ICEMS 2003. Sixth International Conference on*, Beijing, China, China, 2003.
- [10] B. Kawkabani, G. Rosselet and J.-J. Simond, "Combined Analytical-Numerical Approach for the Modeling and Analysis of Three-phase Transformers," in *IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 - 32nd Annual Conference on*, Paris, France, 2006.
- [11] S. H. Hosseinian and B. Vahidi, "Transformer no-load current wave shape considering core loss," in *TENCON 2007 - 2007 IEEE Region 10 Conference*, Taipei, Taiwan, 2007.
- [12] P. S. Moses and M. A. Masoum, "Distortions in three-phase transformer magnetizing currents with nonsinusoidal conditions considering magnetic hysteresis and leg-flux coupling effects," in *Power Engineering Conference (AUPEC), 2011 21st Australasian Universities*, Brisbane, QLD, Australia, 2011.
- [13] T. D. Kefalas and A. G. Kladas, "Mixed Si-Fe Wound Cores Five Legged Transformer: Losses and Flux Distribution Analysis," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 48, no. 4, pp. 1609-1612, 2012.
- [14] F. Marketos, D. Marnay and N. Triunfante, "Experimental and Numerical Investigation of Flux Density Distribution in the Individual Packets of a 100 kVA Transformer Core," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 48, no. 4, pp. 1677-1680, 2012.
- [15] M. Freiburg and F. Jenau, "Measurement and computation of the excitation curve and loss angle of instrument voltage transformers," in *Power Engineering Conference (UPEC), 2013 48th International Universities'*, Dublin, Ireland, 2014.
- [16] G. Shilyashki, H. Pfützner and G. Trenner, "Inhomogeneity and Local Distortions of Magnetic Flux in a Single-Phase Transformer Core Package," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 52, no. 11, 2016.
- [17] S. J. Chapman, "Corriente de magnetización en un transformador real," in *Máquinas Eléctricas*, 5 ed., DF, Ciudad de Mexico: McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V, 2012, pp. 61-63.
- [18] S. V. Kulkarni and S. A. Khaparde, "Magnetic Characteristics," in *Transformer Engineering Design and Practice*, New York, Marcel Dekker, Inc., 2004, pp. 35-75.
- [19] E. Ras, "Teoría del transformador monofásico de potencia," in *Transformadores de potencia de medida y protección*, 7 ed., Barcelona, Marcombo, S. A., 1994, pp. 20-27.

- [20] E. E. Staff, "Fenómenos de armónicos en los circuitos trifásicos," in *Circuitos Magnéticos y Transformadores*, Barcelona, Editorial Reverté S. A., 1965, pp. 540-577.
- [21] J. Arrillaga, B. C. Smith, N. R. Watson and A. R. Wood, *Power System Harmonic Analysis*, 2nd ed., John Wiley & Sons Inc Print, 2013.
- [22] J. C. Das, *Power System Harmonics and Passive Filter Designs*, Wiley-IEEE Press , 2015.
- [23] J. C. Das, *Understanding Symmetrical Components for Power System Modeling*, Wiley-IEEE Press, 2017.
- [24] R. F. N. Pérez, "The Tendency of the Crest Factor Helps Detect Nascent Events; Electronic Circuit, Software and Applications to Signals from Diverse Fields," *Revista UNAM*, vol. 15, no. 1, 2012.
- [25] M. Elleuch and M. Poloujadoff, "A contribution to the modeling of three phase transformers using reluctances," *IEEE Transactions on Magnetics* , vol. 32, no. 2, pp. 335-343, 1996.
- [26] O. Zulieta Morales, *Modelado y simulación de la corriente de irrupción en transformadores*, Ciudad de Mexico: Universidad Nacional Autónoma de México, 2017.
- [27] T. Ahmed , S. Scott and P. Steve, "Calculation of a Tape-Wound Transformer Leakage Inductance Using the MEC Model," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 30, no. 2, pp. 541-549, 2015.
- [28] C. X.S. and P. Neudorfer, "Digital model for transient studies of a three-phase five-legged transformer," *IEE Proceedings C - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 139, no. 4, pp. 351 - 358, 1992.
- [29] Scilab Enterprises, "Scilab Official Website," Scilab, [Online]. Available: <https://www.scilab.org>. [Accessed 21 10 2018].