



REPÚBLICA DEL ECUADOR

Escuela Politécnica Nacional

" E S C I E N T I A H O M I N I S S A L U S "

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

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

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

- Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.
- Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.
- No se podrá obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

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

Respeto hacia sí mismo y hacia los demás.

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**MODELAMIENTO DE LOS TRANSFORMADORES DE
DISTRIBUCIÓN PARA ESTUDIOS DE ARMÓNICOS,
COMPORTAMIENTO DE LAS PROTECCIONES DE
SOBRECORRIENTE, PÉRDIDAS DE ENERGÍA Y DISMINUCIÓN
DEL TIEMPO DE VIDA, APLICADO EN LA EMPRESA ELÉCTRICA
AMBATO S.A.**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
ELÉCTRICO**

HERNÁNDEZ GAVILANES RUBÉN DARÍO

ruben_2409@hotmail.es

DIRECTOR: DR. ING. GABRIEL BENJAMÍN SALAZAR YÉPEZ

gabriel.salazar@epn.edu.ec

CODIRECTOR: ING. MARIO IVÁN MORALES PAZMIÑO

imorales@easa.com.ec

Quito, Septiembre 2015

DECLARACIÓN

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

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

Hernández Gavilanes Rubén

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Hernández Gavilanes Rubén Darío, bajo mi supervisión.

Dr. Gabriel Salazar
DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. Mario Morales
CODIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

Primeramente a Dios por haberme dado lo más importante, a mis padres, y por todo lo que he alcanzado hasta ahora.

A mis padres, Livino y Zoila, quienes hacen posible que pueda cumplir esta meta, quienes con su apoyo incondicional, su amor y consejos han sabido guiarme en cada etapa de mi vida, gracias por anteponer sus necesidades a las de sus hijos y gracias también por ser el mejor ejemplo para nuestras vidas. A mis hermanos Edison y Jonathan por compartir la vida conmigo.

Al mis abuelitos Telmo y Luzmila, a mis tíos Cecilia, Jeanette, Mercedes, Marcelo, Jaime y Roberto por estar siempre pendientes de mí, a toda mi familia por el apoyo que me han brindado durante toda mi vida.

Al Dr. Gabriel Salazar por su incondicional ayuda en el desarrollo del proyecto, por sus conocimientos y el tiempo brindado para poder culminarlo, y sobre todo por su amistad, le quedo muy agradecido.

Al Ing. Mario Morales que más que un codirector ha sido un amigo, gracias por la excelente ayuda brindada durante todo el desarrollo del proyecto y por el tiempo dedicado para la ejecución del mismo, por los consejos y el apoyo durante toda esta etapa, gracias por la incansable ayuda en el transcurso del proyecto sobre todo en la fase inicial.

A todas las personas que son parte de mi formación académica, sobre todo a los responsables de mi formación en la Escuela Politécnica Nacional, gracias por los conocimientos impartidos en el transcurso de la carrera.

Al Departamento de Operación y Mantenimiento de la Empresa Eléctrica Ambato, gracias por brindarme la oportunidad de desarrollar este proyecto y por la acogida en sus instalaciones para el desarrollo del mismo.

A todos mis amigos, la familia que uno escoge, gracias por brindarme su sincera amistad y por todos los momentos compartidos que han servido para poder alcanzar esta meta.

Rubén

DEDICATORIA

*Este trabajo lo dedico a mis padres
Livino y Zoila, los causantes de
alcanzar esta etapa de mi vida, los
causantes de que pueda sobresalir
en la vida.*

*A mis hermanos Edison y
Jonathan, sepan que con esfuerzo
todo se logra como lo hemos
demostrado hasta hoy, espero ser
un ejemplo en el transcurso de sus
vidas.*

Rubén

CONTENIDO

Declaración	ii
Certificación	iii
Agradecimientos	iv
Dedicatoria	v
Contenido	vi
Simbología	xi
Resumen	xiii
Presentación	xiv
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo general.....	2
1.2.2 Objetivos específicos	2
1.3 Alcance	3
1.4 Antecedentes del proyecto	3
CAPÍTULO II: CARACTERÍSTICAS DE LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN Y CARGAS ARMÓNICAS.....	5
2.1 Generalidades y componentes de los transformadores de distribución.....	5
2.1.1 Antecedentes.....	5
2.1.2 Listado de partes constructivas de un transformador	5
2.1.3 Partes constitutivas de un transformador	7
2.1.4 Métodos de refrigeración de transformadores	10
2.1.5 Tipos de enfriamiento en transformadores	13
2.1.6 Clasificación de los transformadores	16

2.1.7 Factores que afectan la vida útil de los transformadores	19
2.2 Fuentes y característica de las cargas armónicas	20
2.2.1 Definición de cargas lineales y no lineales	20
2.2.2 Cargas armónicas	21
2.2.3 Características de los armónicos	24
2.2.4 Fuentes de cargas armónicas	24
2.2.5 Transformadores con factor K	29
CAPÍTULO III: INCIDENCIA DE LAS CARGAS ARMÓNICAS EN LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN	31
3.1 Efectos de las cargas armónicas	31
3.1.1 Efectos sobre los sistemas de protección	31
3.1.2 Influencia de los armónicos sobre el efecto piel	32
3.1.3 Efecto sobre los transformadores.....	33
3.1.4 Efectos sobre la potencia y el factor de potencia	33
3.2 Pérdidas por efecto de los armónicos	34
3.2.1 Efectos de la corriente armónica en las pérdidas I^2R	36
3.2.2 Efectos de la corriente armónica en las pérdidas P_{EC}	36
3.2.3 Efectos de la corriente armónica en las pérdidas P_{OSL}	36
3.2.4 Componentes de corriente de carga DC	36
3.2.5 Efecto de las pérdidas sobre la temperatura del aceite	37
3.2.6 Cálculo de las pérdidas debido a corrientes de eddy en el transformador	37
3.2.7 Datos básicos y pérdidas por unidad	40
3.2.8 Pérdidas a una corriente distinta de la nominal	41
3.2.9 Factor armónico de pérdidas por corrientes de eddy en los devanados ..	43
3.2.10 Factor armónico de pérdidas por otros tipos de pérdidas extrañas	43
3.3 Análisis de pérdida de vida en los transformadores	44
3.3.1 Expectativa de vida del aislamiento del transformador	44

3.3.2 Cálculo del envejecimiento	45
CAPÍTULO IV: CARACTERÍSTICAS OPERATIVAS DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN BASADAS EN SUS COMPONENTES TÉRMICOS	
4.1 Condiciones óptimas de operación	50
4.1.1 Limitaciones de corriente y temperatura.....	52
4.1.2 Accesorios y otras consideraciones	52
4.1.3 Condiciones ambientales en el exterior.....	52
4.2 Límites de calentamiento.....	52
4.2.1 Temperatura ambiente	52
4.2.2 Temperatura del agente refrigerante.....	54
4.2.3 Altitud.....	55
4.3 Factores que inciden en la vida útil	55
4.3.1 Sobrecarga de transformadores inmersos en aceite	55
4.3.2 Limitaciones y efectos de superar la potencia nominal	56
4.4 Temperaturas internas del transformador	56
4.5 Cálculo de temperaturas con carga armónica	58
4.5.1 Sobreelevación de temperatura superior del aceite.....	58
4.6 Variación de la temperatura superior del aceite y del punto más caliente de acuerdo a la carga	59
4.7 Interruptor termomagnético del circuito secundario	62
4.7.1 Característica térmica del interruptor termomagnético	65
4.7.2 Condiciones térmicas de derating	68
CAPÍTULO V: MODELAMIENTO DEL TRANSFORMADOR CON SUS COMPONENTES Y CARGAS ELÉCTRICAS.....	
5.1 Modelo del transformador	69
5.2 Carga armónica	71
5.3 Bloque de control del interruptor termomagnético.....	73

5.3.1 Control por sobrecorriente y cortocircuito.....	75
5.3.2 Control por temperatura	76
5.4 Bloque medidor	77
5.5 Esquema general	77
5.6 Diagrama de flujo del programa.....	79
5.6.1 Diagrama de flujo del programa general	79
5.6.2 Diagrama de flujo de la ejecución del programa.....	80
CAPÍTULO VI: ESTUDIO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	83
6.1 Procedimiento para realizar un estudio.....	83
6.1.1 Introducción al programa	83
6.1.2 Visualizaciones y resultados obtenidos.....	86
6.2 Análisis de resultados.....	87
6.2.1 Armónicos por fase	87
6.2.2 Potencia de pérdidas debido a armónicos por fase.....	87
6.2.3 Temperatura de elevación del transformador	87
6.2.4 Disminución del tiempo de vida.....	87
6.3 Ejemplos de caso de estudio	88
6.3.1 Transformador trifásico	88
6.3.2 Transformador monofásico	94
CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	100
7.1 Conclusiones.....	100
7.2 Recomendaciones.....	102
BIBLIOGRAFÍA	104
ANEXO 1: Análisis de resultados para otros casos	106
1.1 Transformador trifásico con carga extra.....	106

1.2	Transformador trifásico con apertura del interruptor termomagnético	111
1.3	Transformador monofásico con carga extra.....	115
1.4	Transformador monofásico con apertura del interruptor termomagnético .	119
ANEXO 2: Curvas de carga semanal		120
ANEXO 3: Datos generales y térmicos de los transformadores analizados.....		126
ANEXO 4: Curvas de disparo del interruptor termomagnético.....		131
ANEXO 5: Temperatura para el análisis armónico		134
ANEXO 6: Manual de usuario del programa “PEATD”		135
6.1	Condiciones de uso del programa	135
6.2	Ingreso al programa.....	136
6.3	Ingreso de datos del transformador	138
6.4	Resultados del programa.....	141
6.4.1	Resultados en el modelamiento	141
6.4.2	Resultados finales.....	143
6.5	Recomendaciones para el uso del programa.....	147

ANEXOS DIGITALES:

Datos de cargas de los transformadores monofásico y trifásico

Resultados de los transformadores analizados con las cargas armónicas

Resultados de apertura y carga extra en los transformadores monofásico y trifásico

SIMBOLOGÍA

S	Potencia aparente
P	Potencia activa
Q	Potencia reactiva
D	Potencia distorsionante
V_1	Voltaje fundamental
I_1	Corriente fundamental
ϕ_1	Factor de potencia fundamental
h	orden de voltaje y corriente armónica
V_h	Voltaje para el armónico h
I_h	Corriente para el armónico h
ϕ_h	Factor de potencia para el armónico h
h_{\max}	Armónico máximo medido
P_{LL}	Pérdidas en la carga
P	Componente I^2R de las pérdidas de carga
P_{EC}	Pérdidas de corriente de Eddy en los bobinados
P_{LL-R}	Pérdidas en la carga en condiciones nominales
P_{OSL}	Otras pérdidas extrañas
P_{EC-R}	Pérdidas de corriente de eddy bajo condiciones nominales
P_{OSL-R}	Otras pérdidas extrañas bajo condiciones nominales
P_{EC-O}	Pérdidas adicionales a la frecuencia nominal sin armónicos
I_R	Corriente fundamental bajo frecuencia y carga nominal
F_{HL}	Factor armónico para pérdidas de eddy en los bobinados
F_{HL-STR}	Factor armónico para otras pérdidas extrañas
F_{AA}	Factor de aceleración de envejecimiento
F_{EQA}	Factor de envejecimiento equivalente
I_{MAX}	Corriente máxima con carga armónica
θ_{TO}	Temperatura superior del aceite
θ_{TO-R}	Temperatura superior del aceite en condiciones nominales
θ_g	Temperatura del hot spot respecto al aceite
θ_{g-R}	Temperatura del hot spot respecto al aceite en condiciones nominales
$\theta_{S/Tamb}$	Sobreelevación de la temperatura del transformador respecto al ambiente

- G Resistencia del bimetá
- T1 Circuito con apertura térmica
- T12 Circuito con apertura termomagnética
- TU Temperatura del bimetá

RESUMEN

En los próximos años se deberán reemplazar las cocinas que funcionan a base de gas licuado de petróleo por cocinas de inducción, estos electrodomésticos cambiarán drásticamente la carga conectada a las redes de distribución por su característica no lineal, ya que sus redes no soportarán el incremento de potencia, además estas cargas generarán corrientes armónicas que se introducen en las redes creando una distorsión en la corriente, introduciendo diferentes problemas en todo el sistema de distribución.

Las cargas no lineales generan corrientes armónicas creando diversos problemas en los elementos de mayor importancia en los sistemas de distribución, los transformadores, éstas cargas pueden causar daños permanentes en el transformador por una sobrecarga prolongada debido a corrientes armónicas ya que éstas elevan la corriente total que circula por los bobinados, los principales problemas a ser analizados en este trabajo son: el incremento de pérdidas, la sobreelevación de temperatura, y la disminución en el tiempo de vida también serán analizados los problemas que causan al sistema de protección interno del transformador, además de datos generales como el factor K y el aumento de la pérdida de vida causada por las cargas armónicas.

El presente proyecto pretende tomar como fuente principal para el estudio los datos obtenidos de un analizador armónico, estos datos representarán la carga armónica que afecta a los transformadores pudiendo añadir cargas extras, posteriormente se procede a obtener los resultados mediante el seguimiento de las normas correspondientes para cada uno de los parámetros que se pretende analizar. El presente estudio se realiza con la ayuda del programa MATLAB/Simulink con la ayuda de una interfaz de usuario (GUI) que permite una mejor interacción entre el usuario y el programa, la programación y los modelos están creados específicamente para éste estudio, se procesa los datos de entrada, se obtiene resultados de cada dato del analizador de red, y se presenta los resultados finales del estudio, de acuerdo a conveniencia del usuario.

PRESENTACIÓN

El apresurado crecimiento en el uso de cargas armónicas en el país causantes del deterioro de la calidad de energía eléctrica se agravará con el ingreso de las cocinas de inducción no solo en el tema de distorsión armónica sino también en la potencia suministrada por la red, por éste motivo las empresas distribuidoras de energía se ven obligadas a crear planes de reforzamiento de sus redes de distribución y sus componentes, sin embargo para obtener resultados favorables se realiza un estudio previo de los elementos a ser reemplazados. El presente estudio se centra en el análisis de los efectos que producen los armónicos sobre los transformadores.

El presente proyecto usa el modelamiento por bloques y programación de ficheros en MATLAB/Simulink, los datos iniciales (mediciones del analizador de armónicos) serán procesados y exportados a los bloques de Simulink, donde una vez que se ejecute el modelamiento obtendremos nuevos datos de salida, estos resultados preliminares una vez procesados en los ficheros darán como resultado final el incremento de pérdidas, elevación de temperatura y disminución del tiempo de vida, para cada dato de medición del analizador, una vez procesados los resultados se presentarán en diferentes formatos.

A continuación se hace una breve descripción del contenido de los capítulos que contiene el documento:

CAPÍTULO I:

Introducción

Consta de la introducción, los objetivos general y específicos planteados para el desarrollo del proyecto, el alcance del mismo y los antecedentes del proyecto.

CAPÍTULO II:

Características de los transformadores de distribución y cargas armónicas

En este capítulo se destacan las generalidades y componentes de los transformadores de distribución, se hace una breve descripción de su clasificación, de los tipos de refrigeración y enfriamiento que poseen, así como de sus principales partes constructivas, y los factores de afectación a la vida útil.

Además se hace una breve introducción a las cargas lineales y no lineales, con esto se toma el tema de las cargas armónicas y sus características, por último se destaca las principales fuentes de cargas armónicas y los principales armónicos que generan cada una.

CAPÍTULO III:

Incidencia de las cargas armónicas en los transformadores de distribución

Se presentan los efectos que producen las cargas armónicas sobre el transformador y sus componentes, así como en la potencia y el factor de potencia, además del incremento de las pérdidas y la elevación de temperatura. Con respecto a la pérdida de vida y la disminución de la misma se realiza el cálculo para los transformadores con aislamientos térmicamente tratados esto con y sin la afectación de armónicos.

CAPÍTULO IV:

Características operativas del transformador de distribución basadas en sus componentes térmicos

En este capítulo se mencionan los componentes del transformador enfocados desde sus características térmicas, así como las condiciones óptimas que éste deben tener para su buen funcionamiento; determinando principalmente la sobreelevación de temperatura y los límites de operación del mismos, también se revisa los factores térmicos que afectan la vida útil del transformador. Se realiza un análisis de la variación de la temperatura en los puntos más sobresalientes del transformador y como varía con relación a la carga, así como las características térmicas del interruptor termomagnético.

CAPÍTULO V:**Modelamiento del transformador con sus componentes y cargas eléctricas**

En este capítulo se desarrollan todos los modelos del transformador: la carga, el medidor, el control del interruptor termomagnético, etc. además se presenta los diagramas de flujo del programa desarrollado según la etapa correspondiente de ejecución del programa.

CAPÍTULO VI:**Modelamiento de un estudio y análisis de resultados**

En este capítulo se presentan ejemplos del estudio de un transformador trifásico y otro monofásico con sus datos, el ingreso al programa y los resultados mostrados al final su ejecución. Se realiza un análisis de cada uno de los resultados obtenidos.

CAPÍTULO VII:**Conclusiones y recomendaciones**

Se presentan las respectivas conclusiones y recomendaciones del proyecto, además se adjunta la bibliografía y anexos, empleados en la realización del proyecto.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

El aumento de la demanda junto con la futura introducción de cocinas de inducción y el actual uso creciente de cargas no lineales, están generando efectos armónicos en la red que han hecho que la Empresa Eléctrica Ambato S.A. realice estudios previos para proyectar sus redes de distribución, para que las mismas puedan soportar el incremento de carga y los efectos provocados por los armónicos. Uno de los principales elementos del sistema eléctrico, y los más afectados por los armónicos serán los transformadores.

Ya que es uno de los elementos de mayor costo e importancia en un sistema eléctrico, se deben tomar medidas pensadas y limitadas frente al cambio que se debe dar a los mismos para sobrellevar los problemas causados por las cargas armónicas. Este proyecto está enfocado a la solución del problema mediante datos armónicos preliminares, estos datos se obtienen con analizadores armónicos conectados en el lado de la carga del transformador, los analizadores tomarán la lectura de corrientes producida por la carga en intervalos regulares durante un tiempo prudencial, para obtener una referencia de la curva de carga que alimenta el transformador.

Si bien las pérdidas en los transformadores son uno de los componentes de mayor importancia dentro del sistema de distribución, los armónicos provocan otro de mayor importancia, el rápido deterioro de vida del transformador, los armónicos generan una elevación de corriente que se convierte en pérdidas y directamente en calentamiento provocando una elevación de la temperatura, que no estaba prevista en el funcionamiento normal del transformador, esta elevación causa un deterioro en los componentes del transformador como son: papel aislante, aceite

aislante, daños en los bobinados, etc. estos deterioros se traducen en una mayor disminución de pérdida de vida.

Mediante el presente proyecto se obtiene datos para la previa solución de estos problemas, el programa entregará datos de pérdidas, sobreelevación de temperatura y disminución del tiempo de vida. Los resultados también se muestran en gráficas en función del tiempo.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar la modelación de los transformadores de distribución para estudio de armónicos, en el programa MATLAB/Simulink, tomando en cuenta los principales aspectos que afecten la modelación; además de aspectos constructivos. Para el análisis del comportamiento de las protecciones de sobre corriente asociadas, incidencia en las pérdidas y reducción del tiempo de vida de los transformadores de distribución.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Clasificar los diferentes tipos de transformadores de distribución y sintetizar los aspectos técnicos de cada uno de ellos.
- Investigar los modelos matemáticos de las partes del transformador frente a armónicos y enlistar las variables de entrada y salida que se deben modelar.
- Desarrollar en MATLAB/Simulink el modelo matemático de cada una de las partes del transformador y la función de transferencia de calor.
- Crear el modelo de cargas con contenido armónico.
- Implementar bloques de medición de voltaje, corriente y temperatura para evaluar el comportamiento de las protecciones de sobre corriente, así como también para realizar el cálculo de las pérdidas y disminución del tiempo de vida.

- Desarrollar una interface de usuario para el ingreso de parámetros y visualizar resultados.

1.3 ALCANCE

Realizar el modelamiento de los diferentes componentes de los transformadores de distribución en MATLAB/Simulink, frente a la introducción de armónicos para el análisis de las protecciones de sobre corriente, incremento en las pérdidas, y disminución de la vida útil del transformador, para la aplicación en el Departamento de Operación y Mantenimiento de la Empresa Eléctrica Ambato Regional Centro Norte.

1.4 ANTECEDENTES DEL PROYECTO

Con el nuevo proyecto de reemplazar las cocinas que funcionan con gas licuado de petróleo por cocinas de inducción se dará un aumento significativo en la demanda de energía eléctrica, este aumento generará incrementos de corriente por lo que se deben hacer cambios estructurales en sus redes de distribución así como en la capacidad de entrega de energía, al incluir este tipo de electrodomésticos también se introducen cargas armónicas al sistema, éstas corrientes distorsionadas crean una serie de problemas en los diferentes elementos del sistema.

Uno de los cambios más notorios será el aumento en la capacidad de los transformadores, las corrientes armónicas causan efectos de aumento en las pérdidas, esto a su vez calentamiento en los diferentes componentes, generando finalmente un deterioro en las partes constructivas, reduciendo el tiempo de vida del transformador.

Es por eso que la Empresa Eléctrica Ambato S.A. decide plantearse la inquietud de obtener datos precisos acorde a la medición de los armónicos en sus redes, y obtener resultados de parámetros de aumento de pérdidas, sobrecalentamiento y reducción del tiempo de vida en el transformador causados por las corrientes armónicas. Con estos resultados la empresa tendrá datos de en cuanto se

incrementará la cargabilidad y sobreelevación de temperatura, para poder realizar un cambio de sus transformadores, ya sea a una mayor capacidad o con factor K, de acuerdo a las consideraciones de solución de la empresa.

Si la empresa desea puede agregar cargas extras a las medidas por el analizador de red, estas cargas deben ser creadas en el modelo de Simulink, éstas cargas extras generarán nuevos datos armónicos, los cuales serán procesados por el programa y estos resultados pueden ser interpretados como una proyección de la demanda, y así tener una mejor idealización de los cambios que se deben realizar en la red de distribución.

Además se puede tener un registro de los resultados obtenidos de los análisis de cada transformador y de las cargas que sirve como una base de datos para la empresa. Para la ejecución del presente proyecto se ha elegido trabajar con el programa MATLAB/Simulink ya que presta mejores opciones de desarrollo con una extensa librería tanto para la parte eléctrica como para los demás sistemas presentados, como en la parte electrónica y en el manejo de datos. Además facilita la comunicación con otros programas tanto en la manipulación de datos como para la extracción de los mismos para la presentación de los resultados.

Otra de las características es que la interfaz de usuario que tiene tanto para crear el programa como para presentar resultados es muy fácil de manipular, sobre todo en la creación de las máscaras del programa, desde ésta se tiene acceso a cualquier otra parte del programa, ya sea para editarlo, obtener datos o guardarlos, de acuerdo a la conveniencia.

CAPÍTULO II

CARACTERÍSTICAS DE LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN Y CARGAS ARMÓNICAS

2.1 GENERALIDADES Y COMPONENTES DE LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

2.1.1 ANTECEDENTES

El aumento de demanda de energía afecta directamente a todos los componentes de una red de distribución en especial a los transformadores que son la base de ésta red, para poder optimizar recursos se debe realizar una gestión eficiente del uso de los mismos y protegerlos ante cualquier eventualidad.

Para esto es necesario reducir la posibilidad de daños en los mismos, hay que tener claro algunos criterios como la cargabilidad del transformador, la capacidad de potencia de entrega del transformador, y el tipo de usuario al que está conectado para poder minimizar los riesgos por sobrecargas que pueden causar el envejecimiento prematuro del equipo, o incluso llevarlo a una condición de falla o daños permanentes.

Ya que el transformador es el elemento de mayor coste en cualquier sistema eléctrico no se debe escatimar recursos en su protección y mantenimiento preventivo para prolongar su vida útil, además de realizar estudios de sobrecarga y fallas para evitar daños o inconvenientes.

2.1.2 LISTADO DE PARTES CONSTRUCTIVAS DE UN TRANSFORMADOR

A continuación se esquematiza cada una de las partes que conforman el transformador.

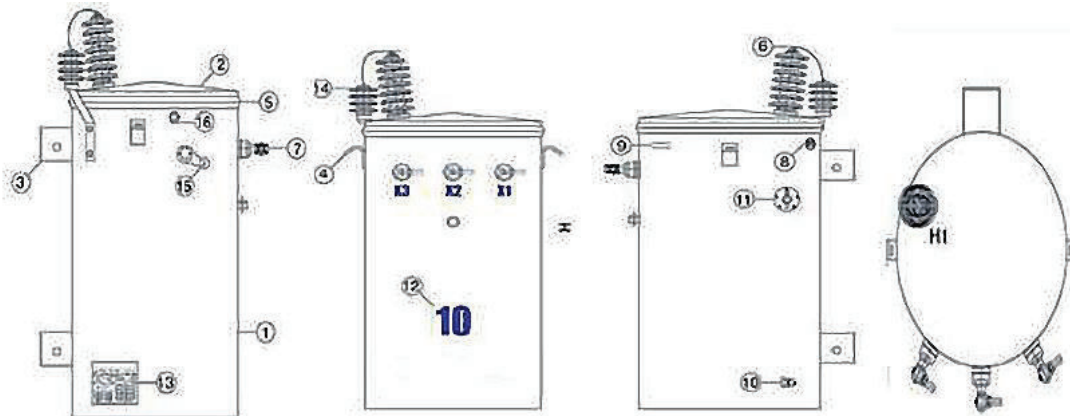


Figura 2.1: Partes de un transformador de distribución [1]

Descripción de los elementos:

Ítem	Cantidad	Descripción
1	1	Cuba del transformador
2	1	Tapa
3	2	Soportes de montaje
4	2	Soportes de izado
5	1	Bandas de cierre
6	1	Pasatapas de medio voltaje
7	3	Pasatapas de bajo voltaje
8	1	Válvula de sobrepresión
9	1	Nivel de aceite
10	1	Conectores a tierra
11	1	Cambiador de derivaciones 5 posiciones
12	1	Indicativo de la potencia del transformador
13	1	Placa de características
14	1	Pararrayos
15	1	Palanca de sobrecarga del Interruptor termomagnético
16	1	Luz de emergencia

Tabla 2.1: Descripción de las partes constructivas de un transformador [1]

2.1.3 PARTES CONSTITUTIVAS DE UN TRANSFORMADOR [1]

Las partes que componen un transformador están clasificadas en cuatro grupos:

- a) Circuito magnético (núcleo)
- b) Circuito eléctrico (bobinados)
- c) Sistema de aislamiento.
- d) Tanques herrajes y accesorios.

a) Circuito Magnético

Sirve para conducir el flujo magnético generado, el cual concatena magnéticamente los circuitos eléctricos del transformador, el circuito magnético es conocido como núcleo, éste se clasifica en dos tipos: de núcleo único y de tipo acorazado.

b) Circuito Eléctrico

El circuito eléctrico está constituido por devanados primario y secundario, estos son cubiertos de cinta aislante, tratadas al vacío, impregnadas de barniz aislante y cocido. La función que desempeñan cada uno de los devanados, da origen al funcionamiento del transformador.

c) Sistema de aislamiento

Los transformadores están constituidos mediante una serie de elementos aislantes, los más destacados son:

- Cartón prensado
- Papel kraft normal o tratado.
- Papel manila y corrugado.
- Cartón prensado de alta densidad.
- Algodón
- Hilos
- Cintas
- Fluidos líquidos dieléctricos, etc.

Este sistema tiene como finalidad aislar los devanados entre si y a tierra. Según la norma IEC 60085-1994 existen siete clases de aislamientos según su temperatura de operación:

CLASE DE AISLAMIENTO POR TEMPERATURA DE OPERACIÓN		
Clase	Temperatura de operación en °C	Descripción de materiales
Y	Hasta 90°C	Papeles y cartones no impregnados, madera, algodón, seda, formaldehído, urea, plástico natural, fibra vulcanizada y varios termoplásticos limitados por su punto de ablandamiento. Como el polietileno reticulado
A	Hasta 105°C	Papel, algodón y seda impregnados con aceite de barniz; materiales moldeados o estratificados con relleno de celulosa; laminas y hojas de acetato de celulosa y otros derivados de celulosa de propiedades semejantes; fibras vulcanizada y madera; policloruro de vinilo; barnices aislantes a base de resinas naturales; asfaltos naturales y fenólicos modificados.
E	Hasta 120°C	Fenol formaldehído y melanina formaldehído moldeada y laminada con materiales celulósicos, polivinil formal, poliuretano, resinas epóxicas y barnices; triacetano de celulosa, polietileno compuesto
B	Hasta 130°C	Fibras inorgánicas y materiales flexibles (tales como: mica, vidrio o asbesto), cubiertos e impregnados con resina orgánica apropiada; epóxicos, formaldehídos, melanina formaldehído y lacas
F	Hasta 155°C	Tejido de fibra de vidrio tratado con resinas de poliéster; mica y papel de mica, aglomerada con resinas de poliéster o con resinas epóxicas. Estratificados a base de tejido de vidrio y resinas epóxicas de gran resistencia térmica; estratificados con amianto-vidrio

H	Hasta 180°C	Aislamientos de elastómeros de siliconas; tejidos de fibra de vidrio, aglomerados con resinas de siliconas; mica y papel de mica, aglomerados con siliconas; estratificados de fibra de vidrio y resinas de siliconas; barnices aislantes a base de resinas de silicona.
C	Arriba de 180°C	Mica pura y estratificados de papel de mica con aglomerante inorgánico, estratificados de amianto y aglomerante inorgánico, porcelana y material escerámicos, vidrio y cuarzo, poliamidas.

Tabla 2.2: Clases de aislamientos según su temperatura de operación [2]

d) Tanques y accesorios

Los transformadores que emplean refrigeración por líquido deben tener necesariamente sus núcleos, devanados y algunos accesorios (herrajes) inmersos en el tanques, entre una temperatura de menos 5°C a una máxima de 110°C en la parte superior del líquido aislante.

- Pasatapas (bushing)

Son elementos del transformador que permiten extraer los conductores del devanado hacia la parte exterior generalmente por la parte superior del tanque, existen dos tipos comunes el de tipo lleno de aceite y el de tipo condensador.

- Dispositivos de protección

Los transformadores deben estar protegidos contra tensiones excesivas y contra sobrecargas peligrosas. Existen tres causas que pueden producir voltajes excesivos entre los terminales del transformador:

- a) Las descargas atmosféricas, estas produce ondas progresivas de frente de onda muy pronunciado, cuando una onda de estos voltajes alcanzan a los terminales del transformador puede atravesar el aislante existente entre espiras, o entre espiras y tanque.
- b) Descargas producidas por maniobra
- c) Frecuencia industrial.

Los transformadores no sólo son provistos con protecciones contra las descargas, también han de considerarse las protecciones contra sobre corriente las cuales le dan los fusibles, estos abren el circuito cuando la corriente es superior a la corriente nominal del transformador.

2.1.4 MÉTODOS DE REFRIGERACIÓN DE TRANSFORMADORES [3]

2.1.4.1 Mecanismos de transferencia de calor

La refrigeración es una parte importante de cualquier sistema de enfriamiento, en el caso del transformador están dados por la transferencia de calor, es decir, la transferencia de energía calorífica causada por la diferencia de temperatura entre dos partes próximas de un cuerpo. La transferencia se puede producir mediante los siguientes mecanismos:

- Conducción térmica

La conducción es el proceso de transmisión de calor que está basado en el contacto directo entre dos cuerpos sin ningún intercambio de materia. Este es un proceso lento por el cual se transmite el calor a través de una sustancia por actividad molecular, el calor transmitido fluye de un cuerpo con mayor temperatura a uno de menor temperatura a esta capacidad que tiene una sustancia para conducir calor se la denomina conductividad térmica.

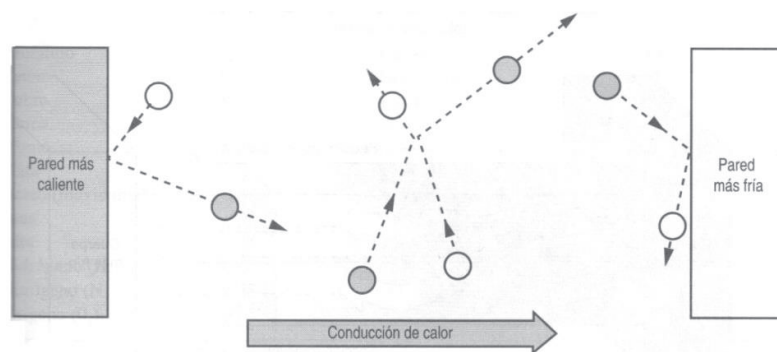


Figura 2.2: Conducción molecular [3]

- Convección

Se produce por intermedio de un fluido líquido o gaseoso que transporta el calor entre zonas con diferentes temperaturas, la convección se produce únicamente por medio de materiales fluidos, la transferencia de calor implica el transporte de

calor de una masa gaseosa o de un fluido por movimientos ascendentes de capas desigualmente calientes de elementos macroscópicos o de porciones calientes y frías.

Estos al calentarse aumentan de volumen y por lo tanto disminuyen su densidad y ascienden desplazando el fluido que se encuentra en la parte superior y que está a menor temperatura, a lo que se le llama convección en sí es al transporte de calor por medio de las corrientes ascendente y descendente del fluido. En el caso de los transformadores los fluidos que podrían presentarse son aire y aceite. La transferencia de calor por convección se puede hacer en dos formas: por convección natural o por convección forzada.

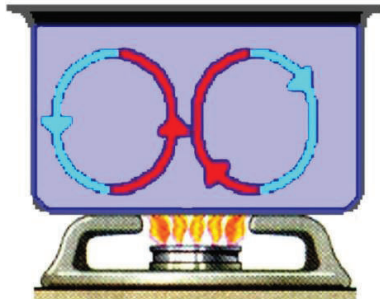


Figura 2.3: Movimiento por convección natural



Figura 2.4: Transformador provisto de radiadores, convección forzada

- Radiación

La radiación es el proceso por el cual la energía se transfiere por medio de ondas electromagnéticas, las sustancias que intercambian calor no tienen que estar en contacto, sino que pueden estar separadas por un vacío. En el caso de los

transformadores la transferencia de calor a través del tanque y los tubos radiadores hacia la atmósfera es por éste método.

Como se indica en la Figura 2.5, una parte de la energía incidente se refleja en cada caso. En el bloque negro la energía es absorbida casi en su totalidad, elevando la temperatura dentro del bloque, mientras que en el otro bloque la mayoría de la energía se refleja almacenando solo un poco, lo que se traduce en menor temperatura para el bloque.

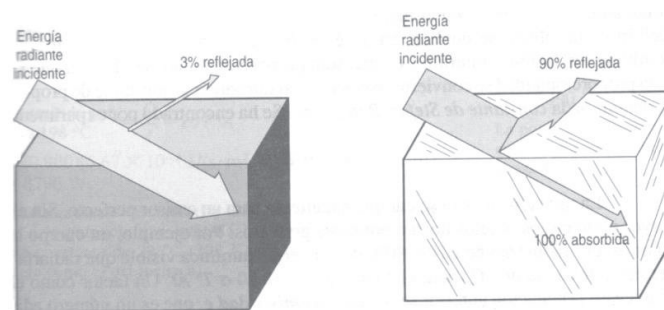


Figura 2.5: Energía incidente en bloques negro de humo y plateado

2.1.4.2 Mecanismos de refrigeración

Todos los transformadores tienen identificado el método de enfriamiento, en los transformadores inmersos en líquido, la identificación está expresada en cuatro letras que conforman un código que se describe a continuación.

Primera letra: Medio de enfriamiento interior en contacto con los devanados:

- O** Aceite mineral o líquido aislante sintético con punto de inflamación menor a 300°C.
- K** Líquido aislante con punto de inflamación mayor a 300°C.
- L** Líquido aislante sintético no inflamable.

Segunda letra: Mecanismo de circulación para el medio de enfriamiento interior

- N** Flujo por convección natural.
- F** Circulación forzada a través del equipo (por ejemplo con bomba refrigerante), flujo por convección natural en los devanados

- D** Circulación forzada a través del equipo, dirigido desde el equipo de enfriamiento hasta al menos dentro del devanado principal.

Tercera letra: Medio enfriamiento exterior

- A** Aire
- W** Agua

Cuarta letra: Mecanismo de circulación para el enfriamiento exterior

- N** Convección natural.
- F** Circulación forzada (ventiladores, bomba).

2.1.5 TIPOS DE ENFRIAMIENTO EN TRANSFORMADORES

2.1.5.1 *Enfriamiento en transformadores secos*

NANA (Natural Air Natural Air)

Transformadores tipo seco con enfriamiento propio, estos transformadores no contienen aceite ni otros líquidos para enfriamiento, el aire es el único medio aislante que rodea el núcleo y las bobinas.

NAFA (Natural Air Forced Air)

Transformadores tipo seco con enfriamiento por aire forzado, el diseño comprende un ventilador que empuja el aire en un ducto colocado en la parte inferior de la unidad, por medio de aberturas en el ducto se lleva el aire a cada núcleo.

NANA /NAFA (Natural Air Natural Air / Natural Air Forced Air)

Transformadores tipo seco con enfriamiento propio, con enfriamiento por aire forzado, su denominación indica que tiene dos regímenes uno por enfriamiento natural y otro contando con la circulación forzada por medio de ventiladores.

2.1.5.2 Enfriamiento de transformadores sumergidos en aceite [4]

ONAN (Oil Natural Air Natural)

Es un transformador sumergido en aceite con enfriamiento natural, en estos transformadores el aceite aislante circula por convección natural dentro de un tanque que tiene paredes lisas o corrugadas, o a su vez provistos de enfriadores tubulares o radiadores desmontables.

ONAN / ONAF (Oil Natural Air Natural / Oil Natural Air Forced)

Transformadores sumergidos en aceite con enfriamiento propio, con enfriamiento a base de aire forzado. Este tipo de transformadores es básicamente una unidad ONAN a la cual se le han agregado ventiladores para aumentar la disipación del calor y por lo tanto, aumentar los kVA de salida.

ONAN / ONAF / OFAF (Oil Natural Air Natural / Oil Natural Air Forced/ Oil Forced Air Forced)

Transformador sumergido en aceite con enfriamiento propio, con enfriamiento a base de aire forzado y a base de aceite forzado. Con este tipo de enfriamiento se trata de incrementar el régimen de operación del transformador tipo ONAN por medio del empleo combinado de bombas y ventiladores. En la construcción se usan radiadores desprendibles con la adición de ventiladores montados sobre dichos radiadores y bombas conectadas a los cabezales de los mismos. El aumento de la capacidad se hace en dos pasos.

OFAF (Oil Forced Air Forced)

Sumergidos en aceite con enfriamiento con aceite forzado como enfriamiento interno y con enfriamiento de aire forzado como externo. El aceite de estas unidades es enfriado al hacerlo pasar por cambiadores de calor o radiadores de

aire y aceite colocados fuera del tanque. Está destinado a usarse únicamente con los ventiladores y las bombas de aceite trabajando continuamente.

ONWF (Oil Natural Water Forced)

Sumergidos en aceite con enfriamiento por agua. Este tipo de transformador está equipado con un cambiador de calor tubular colocado fuera del tanque, el agua de enfriamiento circula en el interior de los tubos y se drena por gravedad o por medio de una bomba independiente. El aceite fluye, estando en contacto con la superficie exterior de los tubos.

OFWF (Oil Forced Water Forced)

Sumergidos en aceite con enfriamiento de aceite forzado con enfriadores de agua forzada. El transformador es prácticamente igual que el OFAF, excepto que el cambiador de calor es del modelo agua-aceite y por lo tanto el enfriamiento del aceite se hace por medio de agua sin tener ventiladores.

Los transformadores de distribución que se usan para este estudio utilizan aceite mineral como medio refrigerante interior y su mecanismo de circulación es por convección natural, mientras que el medio de refrigeración exterior es aire y el mecanismo de circulación también es por convección natural. Por lo tanto el código que utilizan estos transformadores es ONAN.

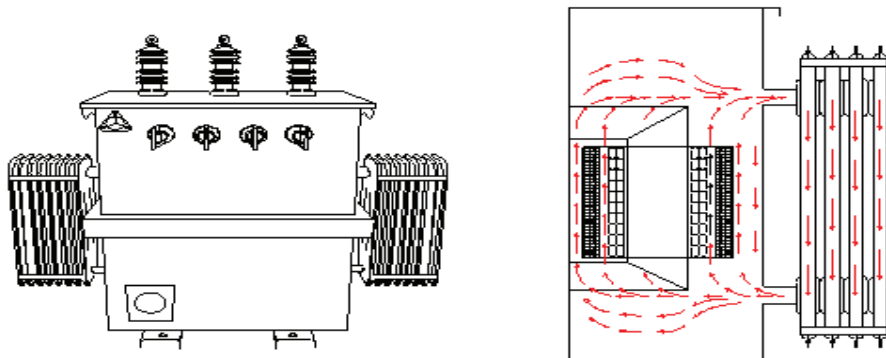


Figura 2.6: Enfriamiento por convección natural [3]

2.1.6 CLASIFICACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES [3]

Existen diversas formas en las que se podría clasificar a los transformadores, se puede tener en cuenta aspectos como: el número de fases, el tipo de refrigeración, el tipo de instalación, la forma del núcleo, tipo de protecciones integradas, etc.

A continuación se presenta una clasificación de los transformadores según los siguientes parámetros:

2.1.6.1 Por su alimentación

Transformador Monofásico

Consta de un devanado primario y un devanado secundario montados sobre un núcleo magnético, el devanado secundario puede estar conformado por un tap central dividiendo el voltaje en valores iguales.

Transformador Trifásico

Consta de seis devanados, tres devanados de bajo voltaje y tres de medio voltaje, cuyas fases se encuentran desplazadas 120° entre sí una de otra.

2.1.6.2 Por el medio refrigerante

Transformador seco

Los transformadores tipo seco son enfriados mediante aire (NANA) y no requieren líquido dieléctrico para su aislamiento o enfriamiento.

Transformadores en aceite

Requieren líquido dieléctrico para su aislamiento y/o enfriamiento. Generalmente son sumergidos en aceite dieléctrico (ONAN).

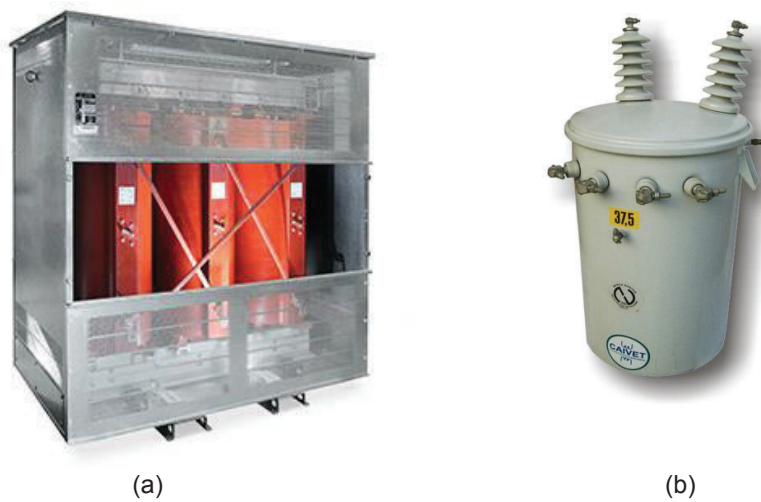


Figura 2.7: (a) Transformador tipo seco. (b) Transformador sumergido en aceite [5]

2.1.6.3 Por sus sistemas de protección

2.1.6.3.1 Transformador convencional

Estos transformadores no poseen protecciones incorporadas. Sus protecciones serán incorporadas en el momento y lugar que se realice el montaje del equipo, generalmente son fusibles tipo NH que son protecciones externas al transformador.

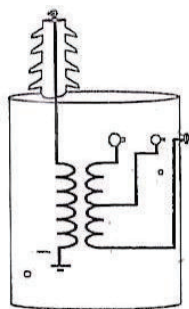


Figura 2.8: Diagrama interno de un transformador convencional [3]

2.1.6.3.2 Transformador auto-protegido [6]

Un transformador auto protegido tiene como característica elementos de protección contra sobre corrientes, para protegerlos y/o aislarlo de la red en caso de una falla.

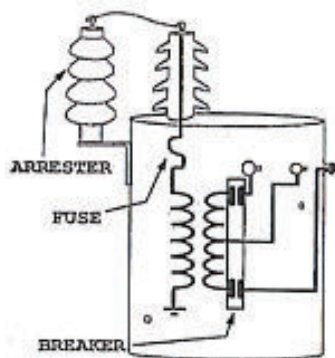


Figura 2.9: Diagrama interno de transformador auto-protégido [3]

Tipos de transformadores auto-protégidos

Transformador auto protegido SP (Surge Protected)

Este esquema de protección SP incluye dispositivo de protección contra sobretensiones transitorias (DPS) además de fusibles de expulsión, no incluye ningún tipo de interruptor en alto o bajo voltaje.

Transformador auto protegido CP (Current Protected)

Este esquema está dispuesto con fusibles de protección internos en el lado de medio voltaje y un interruptor interno que se puede instalar en el circuito de alta o baja tensión (Magnex o Breaker respectivamente), no incluye ningún elemento DPS en este esquema.

Transformador auto protegido CSP (Complete Self Protected)

Este esquema consta del pararrayo que protege de sobretensiones causada por descargas atmosféricas o maniobras de apertura (switches), tiene un fusible de protección en caso de que ocurra una falla interna, y el interruptor provee protección de sobrecarga y cortocircuito en el lado elegido (Breaker o Magnex), generalmente está en el lado de bajo voltaje.

Válvula de sobrepresión

La válvula de sobrepresión es un dispositivo que se encuentra en todos los transformadores, esta se activa mediante presión interna del transformador, cuando la presión ya no puede contenerse en el tanque se acciona este

mecanismo y lo abre permitiendo que la presión almacenada sea liberada al exterior, aliviando la sobrepresión interna.



(a)



(b)

Figura 2.10: (a) Diferentes válvulas de sobrepresión para transformadores

(b) Válvula de sobrepresión en un transformador [3]

2.1.7 FACTORES QUE AFECTAN LA VIDA ÚTIL DE LOS TRANSFORMADORES [3]

A sabiendas de que los transformadores son un de las partes fundamentales dentro de un sistema eléctrico, tanto por su coste como por su importancia es necesario conocer sus características básicas para su correcta utilización, mantenimiento y cuidado, de esta forma podemos evitar grandes problemas que podrían evitar paradas en la producción de una fábrica, trabajos en oficinas, iluminación necesaria para el tránsito, etc.

Es decir a partir del conocimiento del equipo que se va a utilizar, se podrá prevenir inconvenientes en las actividades diarias de la sociedad ya sean

comerciales productivas u hogareñas entre otras consecuencias que afectarían al desarrollo de la sociedad tan dependiente de la energía eléctrica.

2.1.7.1 Defectos en la operación.

Existen varias situaciones por las cuales un transformador puede llegar a tener un fallo, o reducir su tiempo de vida útil de una manera acelerada. Se menciona algunas de estas situaciones y sus correspondientes consecuencias:

- Inadecuados programas de mantenimiento: fallo por pérdida de nivel de aislamiento, pérdida acelerada de vida útil.
- Montaje inadecuado (ventilación por ejemplo): pérdida de vida útil más acelerada.
- Sobretensiones (Operaciones de maniobra): fallo por perforación de aislamientos.
- Sobretensiones (Directas o por rayos): fallo por perforación de aislamientos.
- Sobrecargas: pérdida de vida útil más acelerada.
- Fallas en la red (Líneas a tierra, corto en la red, desbalances de carga): pérdida de vida útil más acelerada, esfuerzos de cortocircuito que provocarían daños en el bobinado hasta causar cortocircuitos entre espiras o contra el núcleo.

2.2 FUENTES Y CARACTERÍSTICA DE LAS CARGAS ARMÓNICAS

2.2.1 DEFINICIÓN DE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES [7]

Cuando se aplica un voltaje sinusoidal directamente a cargas tales como resistencias, inductancias, capacitores o una combinación de ellos, se produce una corriente proporcional que también es sinusoidal, por lo que se les denominan cargas lineales.

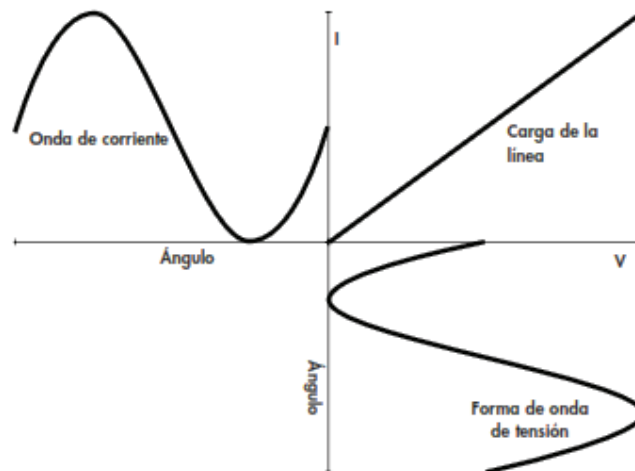


Figura 2.11: Carga lineal: La corriente y el voltaje siempre son proporcionales a lo largo de la línea de su impedancia.

En los circuitos en los que su curva corriente–voltaje no es lineal, el voltaje aplicado no es proporcional a la corriente, resultando una señal distorsionada con respecto a la senoidal.

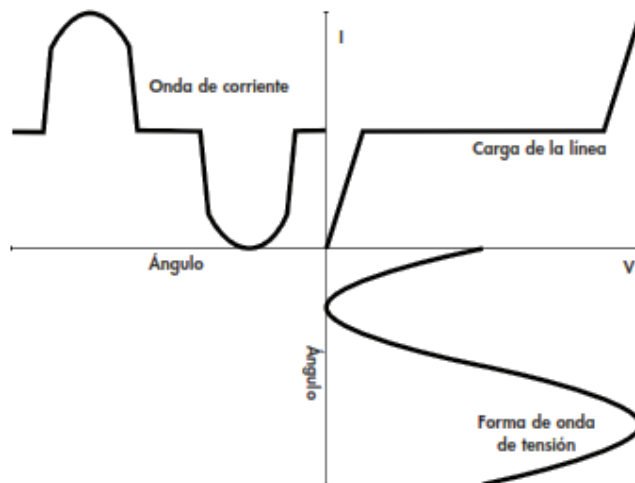


Figura 2.12: Carga no lineal: de una resistencia en la que la corriente y el voltaje no son proporcionales

La distorsión armónica en los sistemas eléctricos es provocada por las cargas no lineales, contaminando la red y afectando incluso a otros usuarios que poseen mayormente cargas lineales.

2.2.2 CARGAS ARMÓNICAS [8]

“Los transformadores se ven afectados por las cargas armónicas principalmente de dos maneras:

El primer efecto: las pérdidas por corrientes parásitas, que normalmente representan un 10% aproximadamente de las pérdidas a plena carga, aumentan con el cuadrado del número de orden del armónico. En la práctica, un claro ejemplo de esto se da cuando un transformador trabajando a plena carga alimentando únicamente a equipos informáticos, las pérdidas totales serían el doble que en caso de una carga lineal equivalente, este efecto se da en cualquier tipo de transformador.

Este incremento en las pérdidas originan una temperatura de funcionamiento mucho más elevada y en consecuencia, una vida útil del equipo más corta por el deterioro que sufre el material aislante, afortunadamente son pocos los transformadores que trabajan a plena carga, pero este efecto debe tomarse en cuenta al seleccionar el equipamiento de una instalación.

El segundo efecto: está relacionado con los armónicos triple-N de los transformadores trifásicos, cuando estos se reflejan en un bobinado en triángulo están todos en fase, así que las corrientes armónicas triple-N circulan por este bobinado. Los armónicos triple-N son absorbidos eficazmente en el bobinado y no se propagan aguas arriba a la línea de suministro, de modo que los transformadores con bobinado en triángulo son útiles como transformadores de aislamiento. Sin embargo, los armónicos que no son triple-N sí pasan aguas arriba del transformador. Deberá tenerse en cuenta la corriente de estos armónicos a la hora de dimensionarlo.”

Para el estudio de las componentes armónicas se usa el teorema de Fourier que define bajo ciertas condiciones analíticas que una función periódica cualquiera puede considerarse integrada por una suma de funciones sinusoidales, incluyendo un término constante en caso de asimetría respecto al eje de las abscisas, siendo la primera armónica, denominada también señal fundamental, del mismo período y frecuencia que la función original y el resto serán funciones

senoidales cuyas frecuencias son múltiplos de la fundamental. Estas componentes son denominadas armónicas de la función periódica original. En la Figura 2.13 se puede ver cada componente de una señal distorsionada.

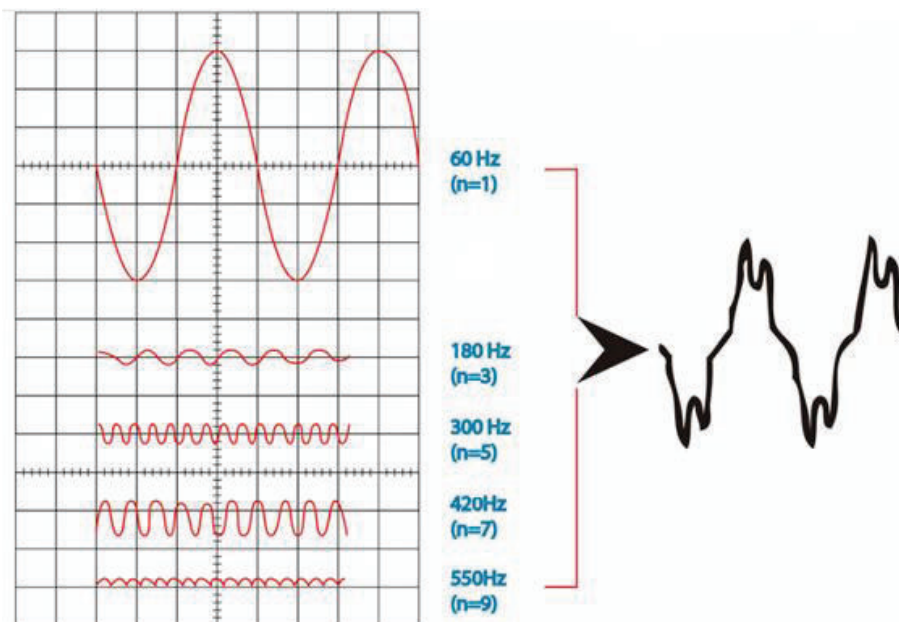
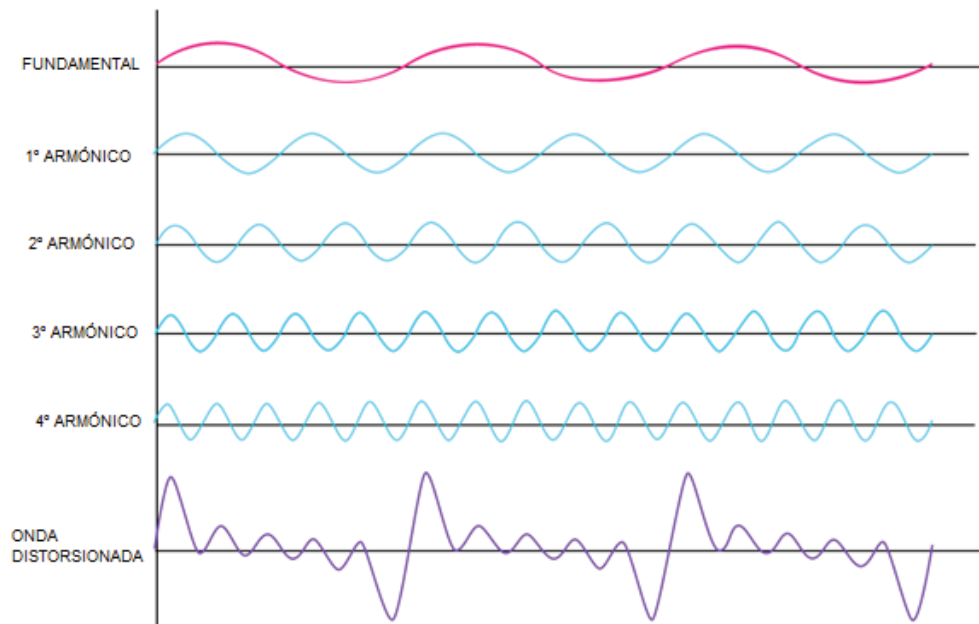


Figura 2.13: Componentes armónicas y su resultado final [7]

2.2.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS ARMÓNICOS

Durante los últimos años ha crecido la preocupación debido al hecho de que la forma de onda de corrientes y voltajes en alimentadores y barras se ha afectado por la aparición de corrientes armónicas en los sistemas eléctricos de potencia; debido principalmente a la introducción masiva de la electrónica de potencia en las redes industriales, así como la introducción creciente de grandes hornos de arco en las industrias usados para fundición de acero, grandes instalaciones de computadoras, equipo electrónico de control, equipos electrónicos domiciliarios y equipos de línea blanca.

Este fenómeno relativamente nuevo por el mayor uso de equipos electrónicos concierne a todas las redes eléctricas de los sectores comercial, industrial y doméstico. Ningún entorno moderno puede escapar a esta distorsión debida a equipos tales como: ordenadores, servidores, climatizadores, variadores de velocidad, lámparas de descarga, rectificadores, sistemas de alimentación ininterrumpida, hornos microondas, televisores, iluminación halógena, etc. Todas estas, cargas se denominan “no lineales” o deformantes.

2.2.4 FUENTES DE CARGAS ARMÓNICAS [9]

Los principales generadores de armónicos son cargas residenciales y comerciales; existe una gran variedad de cargas no lineales con generación de corrientes armónicas que por lo general son pequeñas en tamaño pero muy numerosas.

Ejemplos:

- Computadores y dispositivos periféricos (impresoras, plotters, scanner, etc.) equipados con fuentes conmutadas
- Aparatos de TV con fuentes conmutadas
- Lámparas de descarga gaseosa
- Reguladores de tensión (dimmers, ventiladores, etc.)

- Motores con control electrónico de velocidad (bombas de agua, ascensores, etc.)

Características de las cargas:

- Generalmente con conexión monofásica, bajo consumo y comportamiento distorsionante individual despreciable.
- En forma colectiva (simultánea) y grandes períodos de tiempo provocan gran distorsión (armónicos que generan están en fase con otras cargas y no se compensan en la red).
- Gran parte de estos dispositivos utilizan rectificadores no controlados (diodos) complementados con un gran capacitor de filtrado.

Características de la distorsión armónica [7]:

Para que una onda de corriente o tensión sea considerada como distorsión armónica las deformaciones en la señal deben cumplir con las siguientes condiciones:

- Que la señal tenga valores definidos dentro del intervalo, lo que implica que la energía contenida es finita.
- Que la señal sea periódica, teniendo la misma forma de onda en cada ciclo de la señal de corriente o voltaje.
- Permanente, cuando la distorsión armónica se presenta en cualquier instante de tiempo, es decir, que no es pasajera.

A continuación se citan el tipo de circuitos, y las corrientes típicas que generan, distintos elementos armónicos.

Corrientes armónicas típicas de cargas armónicas:






CORRIENTES ARMÓNICAS TÍPICAS			
Tipo de circuito	Forma de corriente	THD	Ejemplos de aplicación
Rectificadores monofásicos con capacitor de filtrado		150%	TV, lámparas fluorescentes controladas electrónicamente (lámparas de emergencia), computadoras
Rectificadores de 6 pulsos con capacitor de filtrado		80%-90%	Sistemas ininterrumpibles de energía (UPS), convertidores para motores trifásicos (bombas, ventiladores, industria papelera,
Rectificadores de 6 pulsos con capacitor de filtrado e inductancia en serie		40%-70%	
Convertidor de 6 pulsos controlado (tiristores) con inductancia de filtrado		25%-40%	UPS, rectificadores para motores de CC
Convertidor de 12 pulsos controlado (tiristores) con inductancia de filtrado		15%	Rectificadores para control de motores de CC de alta potencia (DC drives)

Tabla 2.3: Circuitos y ejemplos de aplicación que generan corrientes armónicas típicas [9]

Armónicos típicos generados por diferentes cargas:

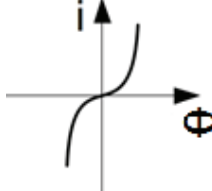
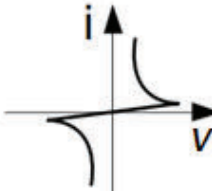
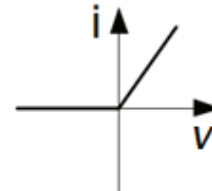
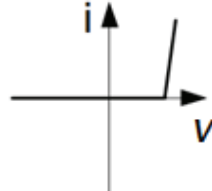
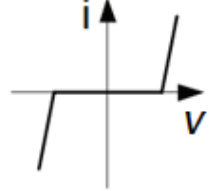
ARMÓNICOS TÍPICOS							
Causa	Carácter	Ejemplo	(I _h /I ₁) [%]				
			h=2	h=3	h=4	h=5	h=7
Saturación		Motores pequeños		3-10		1-5	
		Corriente de magnetización de transformadores $I_1 = I_m = (0.02-0.07)I_n$		25-55		8-30	2-10
Descarga de gas		Lámpara fluorescente	1-2	8-20		2-3	1-2
		Hornos de arco	5-12	6-12	2-5	3-7	1-3
Rectificador media onda con carga resistiva			42		8		
Rectificador media onda con carga capacitiva		Fuentes de suministro (Aparatos de TV)	70-90	40-60	35-50	25-50	12-25
Rectificador onda completa con carga capacitiva		Fuentes de suministro (TV, Computadoras)		65-85		50-80	25-60

Tabla 2.4: Fuentes típicas de armónicos. [9]

2.2.4.1 Potencia fundamental y armónica [7]

Para definir la relación de potencias en cualquier sistema eléctricos se utiliza la relación:

$$S = P + jQ \quad (2.1)$$

Dónde: S: Potencia aparente
 P: Potencia activa
 Q: Potencia reactiva

Su representación fasorial es el triángulo de potencias y muestra que P se ubica en el eje real, mientras Q está en el imaginario, estando ambos en cuadratura y S es la resultante.

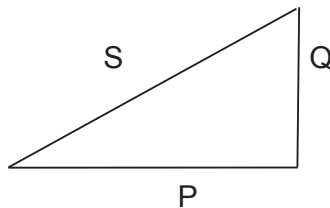


Figura 2.14: Triangulo de potencias

Las cargas no lineales son las que generan la distorsión armónica en corriente, que al fluir por el cableado y el transformador de distribución pueden producir distorsión en voltaje.

Para aquellos sistemas en los que la distorsión de voltaje es nula o mínima y solo existe distorsión armónica de corriente, se usa la pirámide de potencias para considerar tanto los valores fundamentales como los armónicos.

Las siguientes expresiones aplican cuando el voltaje es sinusoidal y la corriente esta distorsionada:

$$\text{Potencia aparente:} \quad S = V * I_{rms} = V * \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2} \quad (2.2)$$

$$\text{Potencia eficaz:} \quad P = P_1 = VI_1 * \cos(\phi_1) \quad (2.3)$$

$$\text{Potencia reactiva:} \quad Q^2 = S^2 - P^2 \quad (2.4)$$

$$\text{Potencia distorsionante:} \quad D = V * \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2} \quad (2.5)$$

Relación entre Potencias:

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

$$S_1^2 = P^2 + Q_1^2$$

$$Q^2 = Q_1^2 + D^2$$

$$S^2 = S_1^2 + D^2$$

$$S^2 = P^2 + Q_1^2 + D^2$$

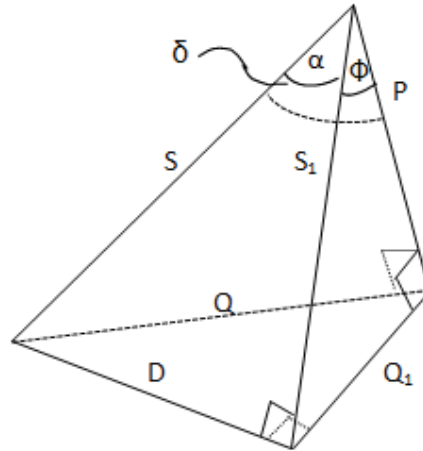


Figura 2.15: Pirámide de potencias

2.2.5 TRANSFORMADORES CON FACTOR K [9][10]

El factor K es la relación entre las pérdidas por corriente de eddy con carga armónica, y éstas pérdidas a la frecuencia fundamental, es decir, a mayor K las pérdidas en el transformador serán K veces el valor para la frecuencia fundamental. Este factor es usado para especificar transformadores para cargas no lineales, éste transformador no elimina la distorsión armónica solo controlan el sobrecalentamiento producido por la carga armónica.

$$\text{Factor } K = \sum_{h=1}^n (I_{h(pu)})^2 * h^2 \quad (2.6)$$

Dónde:

I_h : corriente del armónico de orden h expresado en por unidad

h : orden del armónico

Según el tipo de carga se puede saber que factor K producen, las cargas con un factor K típico son:

K-4:

- Lámparas con balastos
- UPS con filtrado de entrada

- Soldadoras
- Equipos de calentamiento por inducción
- PLCs y controles de estado sólido

K-13:

- Equipos de telecomunicaciones
- UPS sin filtrado de entrada
- Circuitos múltiples de una cadena de prueba de equipos o ensamblaje

K-20:

- Cargas de computadoras
- Variadores de velocidad de estado sólido
- Circuitos multifilares de áreas de cuidado crítico, sala de operaciones y recuperación en hospitales

Los transformadores con factor K son introducidos para trabajar en un ambiente de suministro de corriente no senoidal y específicos para uso con cargas no lineales. Tienen una característica para operar con bajas pérdidas en las frecuencias armónicas. En su construcción se incorporan:

- Sobredimensionamiento de los bobinados.
- Duplicación del conductor del neutro del bobinado secundario para conducir armónicos triples.
- Diseño del núcleo magnético con una densidad de flujo más baja que la normal.
- Conductores paralelos aislados entre sí para reducir las pérdidas por corriente de eddy, o conductores tipo fleje y técnicas de bobinado con transposición de conductores.
- Apantallamiento electromagnético entre bobinados.

CAPÍTULO III

INCIDENCIA DE LAS CARGAS ARMÓNICAS EN LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

3.1 EFECTOS DE LAS CARGAS ARMÓNICAS [11]

Los posibles efectos de los armónicos se subdividen en dos grupos:

- Efectos instantáneos: fallas, malfuncionamiento o rendimiento degradado del dispositivo.
- Efectos a largo plazo: pérdidas adicionales y sobrecalentamiento, resultando en envejecimiento y daño prematuro del equipo.

A continuación se muestran algunos efectos sobre diferentes componentes eléctricos:

3.1.1 EFECTOS SOBRE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN

En el presente trabajo uno de los principales elementos de estudio es el sistema de protección, los armónicos son causantes de numerosos problemas en la operación de estos sistemas, entre ellos la operación incorrecta de fusibles, de interruptores termomagnéticos, y en sistemas digitales de protección.

En ciertos equipos de protección contra sobre tensiones cuyos sistemas estén diseñados para operar con voltajes sinusoidales, estos operan incorrectamente ante la aparición de formas de onda distorsionadas. La mala operación puede causar problemas de sobreprotección del equipo hasta la desprotección del mismo por la no operación ante una eventual falla. Un caso típico es el que se da ante formas de onda que presentan picos agudos, si el dispositivo de medición solo está diseñado para responder ante valores RMS de la forma de onda, los cambios abruptos pudieran pasar sin ser detectados y esto conllevarían a la desprotección del equipo, también pudiese darse el caso contrario es decir el

disparo ante valores no dañinos para el equipo protegido, causando una apertura innecesaria.

3.1.2 INFLUENCIA DE LOS ARMÓNICOS SOBRE EL EFECTO PIEL

Este fenómeno hace que la resistencia efectiva o AC sea mayor que la resistencia óhmica o de DC, debido a la variación de la frecuencia de la corriente eléctrica que circula por éste. Esto se debe a que las concatenaciones de flujo no son de densidad constante a través de todo el conductor, sino que decrecen cerca de la superficie más exterior, disminuyendo la inductancia e incrementando el flujo de corriente. El resultado neto es que el área transversal efectiva del conductor es reducida a medida que la frecuencia es incrementada.

A mayor frecuencia, menor área transversal y mayor resistencia AC. Cuando una corriente de carga armónica está fluyendo en un conductor, la resistencia ante corriente alterna equivalente (R_{AC}) es elevada, aumentando las pérdidas en el cobre I^2R_{AC} .

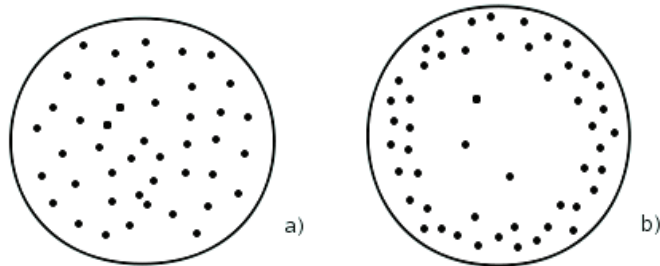


Figura 3.1: Distribución de densidad de corriente

a) corriente continua b) corriente alterna.

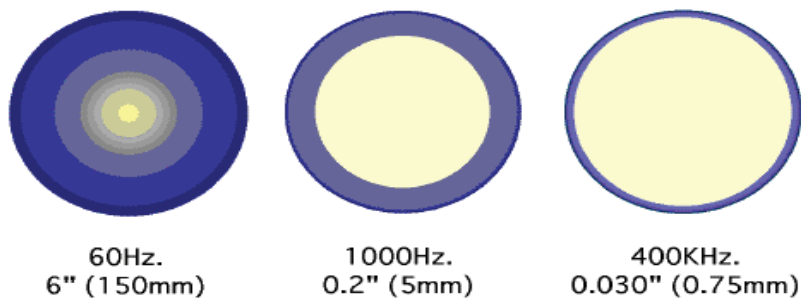


Figura 3.2: Profundidad de penetración de la corriente en el acero (mostrado en azul) dependiendo de la frecuencia

3.1.3 EFECTO SOBRE LOS TRANSFORMADORES

Uno de los efectos más notorios de los armónicos se dan en los transformadores, ya que existe un incremento en las pérdidas por corrientes de eddy, las cuales son inducidas al transformador a través de flujos magnéticos causando pérdidas adicionales que permiten el incremento total de las pérdidas técnicas, generando una elevación de temperatura en el transformador. Con relación a los voltajes armónicos estos incrementan el desgaste sobre los aislamientos tanto internos (papel, aceite, cartón, bobinas, etc.) como externos del transformador (bushings).

Al incluir el efecto de histéresis, la corriente de magnetización no sinusoidal no es simétrica con respecto al valor máximo. La distorsión que se observa (Figura 3.3) se debe a los armónicos triples, pero principalmente debido al 3°, para mantener una alimentación de voltaje es necesario proporcionar una trayectoria para estos armónicos triples, lo que generalmente se logra con el uso de devanados conectados en delta. Los armónicos debidos a la corriente de magnetización se elevan a sus niveles máximos, cuando el sistema tiene muy poca carga y el nivel de tensión es alto, generalmente esto sucede en las madrugadas.

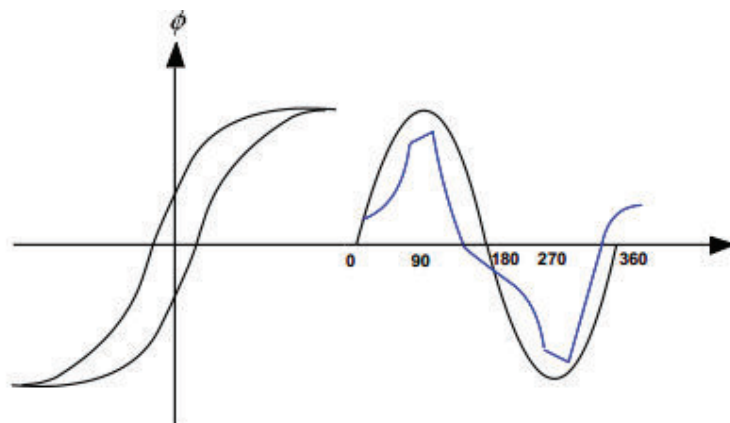


Figura 3.3: Corriente de magnetización vs. tiempo [11]

3.1.4 EFECTOS SOBRE LA POTENCIA Y EL FACTOR DE POTENCIA

La distorsión armónica dificulta el cálculo de la potencia y el factor de potencia, datos importantes para una empresa distribuidora de energía por el hecho de que

son usados para calcular el cobro de la demanda. No existe desacuerdo sobre cómo definir la potencia activa (P) en el caso general o en el caso especial de señales periódicas sinusoidales y no sinusoidales. Para el caso general la potencia eléctrica activa es:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) * i(t) dt \quad W \quad (3.1)$$

Donde T es el tiempo de interés o el tiempo de observación, para el caso de señales periódicas es el tiempo del periodo. Si el voltaje y la corriente son periódicos con el mismo tiempo de periodo T, estos pueden ser expresados como series de Fourier y la potencia se definiría así:

$$P = \sum_h V_h * I_h * \cos \varphi_h \quad W \quad (3.2)$$

Dónde:

h: es el orden de voltaje y corriente armónica

φ_h : es el ángulo de fase entre el voltaje y la corriente para el armónico h.

V_h e I_h : son los valores RMS del voltaje y la corriente para el armónico h.

En el caso donde el voltaje y la corriente se encuentran completamente a frecuencia fundamental, P puede ser expresada mediante la ecuación familiar:

$$P = V_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad W \quad (3.3)$$

3.2 PÉRDIDAS POR EFECTO DE LOS ARMÓNICOS [12]

Las pérdidas se relacionan directamente con el calor producido por el elemento que está sometido a una corriente, en nuestro caso se puede visualizar en la Figura 3.4 como el calor producido por las pérdidas se dispersan a través de todo el transformador.

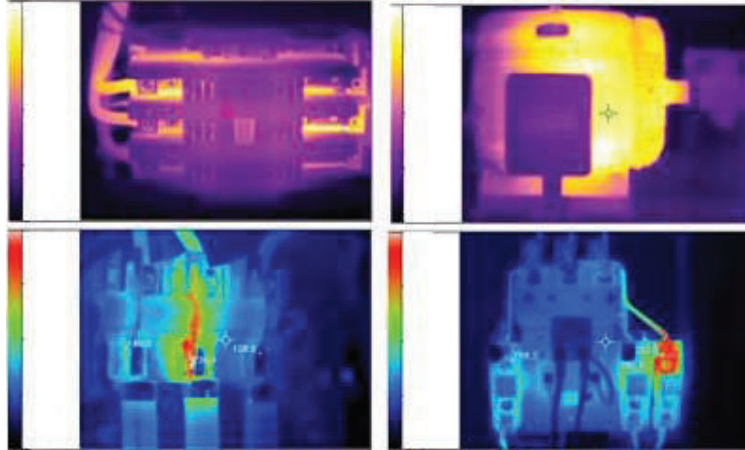


Figura 3.4: Termografías en diferentes partes del transformador [13]

Las pérdidas en un transformador están compuestas por las pérdidas en vacío y pérdidas en carga. A las pérdidas en carga se las subdivide en pérdidas Joule (I^2R) y pérdidas adicionales, éstas a su vez se subdividen en pérdidas por corriente de eddy y por otras pérdidas extrañas (P_{EC} y P_{OSL}). Las pérdidas adicionales son debidas a flujos parásitos en los devanados, núcleo, elementos de fijación, pantallas magnéticas, paredes de la cuba, etc. La precisa determinación de las corrientes parásitas adicionales producidas por las corrientes armónicas es un tema complejo que depende del diseño y construcción del transformador e implica realizar sofisticados análisis computacionales. Las pérdidas adicionales se obtienen como la diferencia entre las pérdidas medidas en carga menos las pérdidas calculadas utilizando la medición de las resistencias.

Las pérdidas totales en carga resultan:

$$P_{LL} = P + P_{EC} + P_{OSL} \quad W \quad (3.4)$$

Siendo:

P_{LL} : pérdidas en la carga en W

P : componente I^2R de las pérdidas en la carga en W

P_{EC} : componente de pérdidas por corriente de eddy en W

P_{OSL} : componente de otras pérdidas extrañas en W

3.2.1 EFECTOS DE LA CORRIENTE ARMÓNICA EN LAS PÉRDIDAS I^2R

Debido a los armónicos el valor eficaz de la corriente se incrementa, por lo tanto las pérdidas en la carga también aumentarán, $P=I^2R$, a mayor corriente las pérdidas P también serán mayores.

3.2.2 EFECTOS DE LA CORRIENTE ARMÓNICA EN LAS PÉRDIDAS P_{EC}

Las pérdidas adicionales por corriente de eddy en los devanados P_{EC} dentro del espectro de frecuencias de potencia, tienden a ser proporcionales al cuadrado de la corriente de carga y al cuadrado de la frecuencia, causa de un anterior incremento de pérdidas. Esta característica es la que puede causar pérdida excesivas en los devanados y por lo tanto un aumento de la temperatura en los bobinados del transformador.

3.2.3 EFECTOS DE LA CORRIENTE ARMÓNICA EN LAS PÉRDIDAS P_{OSL}

El resto de las pérdidas por otras pérdidas extrañas P_{OSL} ya sean estas en el núcleo, partes estructurales, conexiones y piezas, también pueden incrementar con el cuadrado de la corriente pero no con el cuadrado de la frecuencia como las pérdidas en los devanados. Algunos estudios han demostrado que estas pérdidas aumentan en un factor de 0.8 o menos, estas pérdidas afectan en su mayoría a los transformadores sumergidos en líquido.

3.2.4 COMPONENTES DE CORRIENTE DE CARGA DC

Las corrientes armónicas frecuentemente están acompañadas por una componente de corriente continua, la cual podría incrementar ligeramente las pérdidas en el núcleo, pero incrementa de manera considerable la corriente de magnetización y el nivel audible de ruido. Las componentes pequeñas de DC no tienen ningún efecto sobre la capacidad de carga del transformador.

3.2.5 EFECTO DE LAS PÉRDIDAS SOBRE LA TEMPERATURA DEL ACEITE

En un transformador inmerso en aceite la sobreelevación de temperatura en la parte superior del aceite (θ_{TO}), aumentará a medida que aumente las pérdidas debido a las cargas armónicas, cualquier incremento en otras pérdidas extrañas (P_{OSL}) afectará principalmente a la subida del nivel de aceite, si la carga incluye armónicas las mayores pérdidas son causa de mayores sobreelevaciones de temperatura.

Por estas mismas razones los aislantes que están en contacto con los conductores están sometidos a temperaturas que afectan su vida útil.

3.2.6 CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DEBIDO A CORRIENTES DE EDDY EN EL TRANSFORMADOR

Para saber la influencia de los armónicos sobre las pérdidas de eddy en un transformador conectado a una carga no lineal, es necesario conocer estas pérdidas para condiciones nominales (P_{EC-E}), estas pérdidas son el resultado de restar las pérdidas del cobre medidas en la prueba de cortocircuito, menos las pérdidas del cobre calculadas. A continuación se describe el proceso para calcular las pérdidas por corriente de eddy.

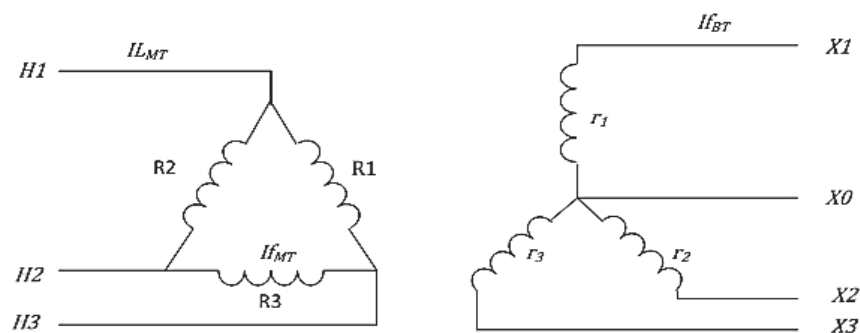


Figura 3.5: Disposición de los terminales de un transformador

Como se puede obtener directamente las mediciones de las resistencias de cada bobinado en el lado de bajo voltaje, las pérdidas nominales en el cobre están dadas por la siguiente ecuación:

$$P_{cu-BT} = (R_{X1-X0} + R_{X2-X0} + R_{X3-X0}) * I_{f_{BT}}^2 \quad W \quad (3.5)$$

Siendo:

P_{cu-BT} : pérdidas del cobre en el lado de bajo voltaje

$R_{X1-X0}, R_{X2-X0}, R_{X3-X0}$: resistencias de cada bobina de bajo voltaje

$I_{f_{BT}}$: corriente de línea de bajo voltaje nominal

En el lado de alto voltaje la resistencia equivalente será la suma de las resistencia de dos bobinados junto con el paralelo del otro bobinado, así si se tiene la medición entre H1_H2, ésta será la suma de R2 más R3 en paralelo con R1. A continuación se describirá el proceso para realizar el cálculo a partir de las resistencias de cada bobinado.

Asumiendo que se tiene la medida de H₁-H₂ entonces:

$$\begin{aligned} H1_H2 &= (R2 + R3) \parallel R1 \quad \Omega \\ H1_H2 &= \frac{(R2 + R3) * R1}{R1 + R2 + R3} \quad \Omega \end{aligned} \quad (3.6)$$

Siendo:

$H1_H2$: medición entre terminales del transformador 1 y 2

$R1, R2$ y $R3$: resistencias de cada bobinado

Asumiendo que:

$$\begin{aligned} R1 &= R2 = R3 \quad \Omega \\ H1_H2 &= \frac{2R1^2}{3R1} \quad \Omega \\ R1 &= \frac{3 * (H1_H2)}{2} \quad \Omega \end{aligned} \quad (3.7)$$

Tomando en cuenta que todas las resistencias son iguales, se puede obtener una media entre las mediciones tomadas de los bobinados, es decir:

$$R_{med} = \frac{H1_H2 + H2_H3 + H3_H1}{3} \quad \Omega \quad (3.8)$$

Obteniendo:

$$R1 = \frac{3}{2} * \frac{H1_H2 + H2_H3 + H3_H1}{3} \quad \Omega$$

$$R = R1 = R2 = R3 = \frac{3 * R_{med}}{2} \quad \Omega \quad (3.9)$$

Siendo:

H1_H2, H2_H3, H3_H1: medición entre cada terminal del bobinado

R_{med}: promedio de las resistencias de cada terminal del bobinado

R: resistencia equivalente para cada bobinado

A partir de esta resistencia se calculará las pérdidas del cobre en el lado de medio voltaje:

$$P_{cu-MT} = 3R * (I_{f_{MT}})^2 \quad W$$

$$P_{cu-MT} = 3R * \left(\frac{I_{L_{MT}}}{\sqrt{3}}\right)^2 \quad W$$

$$P_{cu-MT} = R * I_{L_{MT}}^2 \quad W \quad (3.10)$$

Dónde:

P_{cu-MT}: pérdidas del cobre en el lado de medio voltaje

I_{f_{MT}}: corriente de fase de medio voltaje nominal

I_{L_{MT}}: corriente de línea de medio voltaje nominal

Por último para obtener las pérdidas nominales del cobre (calculada) se debe sumar las pérdidas de bajo voltaje más la de medio voltaje:

$$P_{CU_cal} = P_{cu-BT} + P_{cu-MT} \quad W \quad (3.11)$$

Las pérdidas por efectos de corriente de eddy están dadas por:

$$P_{EC-R} = P_{CU_med} - P_{CU_cal} \quad W \quad (3.12)$$

Dónde:

P_{EC-R} : pérdidas nominales por corriente de eddy

$P_{CU_{med}}$: pérdidas del cobre medidas en la prueba de cortocircuito

$P_{CU_{cal}}$: pérdidas del cobre calculadas

Las ecuaciones anteriores se aplican cuando la corriente del transformador es la nominal, pero generalmente un transformador no trabaja siempre a su capacidad nominal por lo que las pérdidas del cobre a una corriente diferente a la nominal se pueden aproximar con la relación entre el cuadrado de la corriente de carga y la corriente nominal, igualmente con el cálculo de las pérdidas por corriente de eddy nominales, podemos obtener las pérdidas a una corriente diferente a la nominal, a continuación se muestra este fenómeno en las siguientes ecuaciones:

$$P_{CC-0} = P_{CC-R} * \left(\frac{I_L}{I_{f_{BT}}} \right)^2 \quad W \quad (3.13)$$

Pudiendo expresarse de la siguiente manera:

$$P_{CC-0} = P_R * \left(\frac{I_L}{I_{f_{BT}}} \right)^2 + P_{EC-R} * \left(\frac{I_L}{I_{f_{BT}}} \right)^2 \quad W \quad (3.14)$$

Dónde:

P_{CC-0} : Pérdidas de la prueba de cortocircuito a una corriente diferente a la nominal

P_{CC-R} : Pérdidas de la prueba de cortocircuito nominales

P_R : Pérdidas joule (I^2R) a corriente nominal

I_L : Corriente de carga

3.2.7 DATOS BÁSICOS Y PÉRDIDAS POR UNIDAD

Dado que la mayor preocupación en un transformador que trabaja bajo condiciones de carga armónica es la sobreelevación de la temperatura en los devanados, es conveniente considerar la densidad de pérdida en los devanados en una base por unidad (base de la corriente es la corriente nominal, y la base de pérdidas I^2R es la densidad de pérdidas a corriente nominal). El valor de cada

componente armónica se obtiene mediante mediciones. Las pérdidas totales para la condición de carga nominal en p.u. resultan:

$$P_{LL-R}(pu) = 1 + P_{EC-R}(pu) + P_{OSL-R}(pu) \quad (3.15)$$

Dadas las pérdidas por corriente de eddy en los devanados para condiciones nominales (P_{EC-R}) estas pérdidas para cualquier carga con corrientes no sinusoidales se expresa de la siguiente manera:

$$P_{EC} = P_{EC-R} \sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_R} \right)^2 h^2 = P_{EC-R} \left(1 + \sum_{h=2}^{h=h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_R} \right)^2 h^2 \right) \quad W \quad (3.16)$$

Siendo

I_h : el valor eficaz de la corriente para la armónica "h"

I_R : el valor eficaz de la componente fundamental de la corriente para la frecuencia nominal y carga nominal en A.

El valor eficaz de la corriente para cargas con corrientes no sinusoidales está dado por:

$$I_{pu} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} (I_h(p.u.))^2} \quad p.u. \quad (3.17)$$

Finalmente las pérdidas adicionales por corriente de eddy para cualquier carga con corrientes no sinusoidales P_{EC} puede ser escrita en por unidad:

$$P_{EC}(p.u.) = P_{EC-R}(p.u.) \sum_{h=1}^{h=h_{max}} (I_h)^2 h^2 = P_{EC-R}(p.u.) \left(1 + \sum_{h=2}^{h=h_{max}} (I_h)^2 h^2 \right) \quad (3.18)$$

3.2.8 PÉRDIDAS A UNA CORRIENTE DISTINTA DE LA NOMINAL

En las expresiones anteriores se supone que las corrientes corresponden a las nominales del transformador pero no siempre se presenta esto en campo, se

requiere evaluar las pérdidas adicionales en los devanados para una corriente distinta a la nominal y a la frecuencia nominal (P_{EC-0}). Para aclarar el uso de estas expresiones es necesario establecer las siguientes suposiciones:

1. Las pérdidas adicionales por efecto pelicular son proporcionales al cuadrado de la frecuencia. Esta suposición puede ser motivo de otras relaciones para obtener una mayor precisión con conductores pequeños y armónicos bajos, y con mayor error en cambio para conductores grandes y armónicos altos.
2. Las pérdidas adicionales dependen del cuadrado de la corriente en los conductores, se pueden expresar en función del valor eficaz de la corriente de la carga.
3. Para las pérdidas adicionales se aplica el principio de superposición, esto permite sumar directamente las pérdidas debidas a cada armónica.

Las expresiones ya vistas se pueden escribir en forma más general:

$$P_{EC} = P_{EC-0} \sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left(\frac{I_h}{I}\right)^2 h^2 \quad W \quad (3.19)$$

Siendo

I : el valor eficaz de la corriente de carga en Amperios.

I_h : el valor eficaz de la corriente para la armónica "h"

P_{EC} : Pérdidas de eddy con presencia armónica

P_{EC-0} : pérdidas de eddy a corriente medida y a la frecuencia nominal sin la presencia de armónicos.

Extrayendo el valor I de la sumatoria resulta:

$$P_{EC} = P_{EC-0} \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} (I_h)^2 h^2}{I^2} \quad W \quad (3.20)$$

El valor eficaz de la corriente no sinusoidal resulta:

$$I = \sqrt{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} (I_h)^2} \quad A \quad (3.21)$$

Reemplazando se tiene:

$$P_{EC} = P_{EC-0} \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2} \quad W \quad (3.22)$$

3.2.9 FACTOR ARMÓNICO DE PÉRDIDAS POR CORRIENTES DE EDDY EN LOS DEVANADOS

Es conveniente definir un simple factor que pueda ser utilizado para determinar la capacidad de un transformador para funcionar normalmente en determinadas condiciones de carga.

Este factor aplicable a las pérdidas por corriente de eddy en los devanados permite evaluar el calentamiento producido por las corrientes armónicas de la carga, y está dado por la relación entre las pérdidas adicionales totales debidas a las armónicas (P_{EC}) y las pérdidas adicionales a la frecuencia nominal sin las presencia de armónicas (P_{EC-0}):

$$F_{HL} = \frac{P_{EC}}{P_{EC-0}} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2} \quad (3.23)$$

3.2.10 FACTOR ARMÓNICO DE PÉRDIDAS POR OTROS TIPOS DE PÉRDIDAS EXTRAÑAS

Para los transformadores secos que no están dentro de una cuba metálica, el calentamiento debido a otras pérdidas adicionales (fuera de los devanados) no se tiene en cuenta, pero para transformadores sumergidos en líquido refrigerante pueden tener un efecto importante. Las pérdidas adicionales debidas a las conexiones, partes estructurales, cuba, etc., son proporcionales al cuadrado de la corriente de carga y a la frecuencia elevada a la 0.8.

$$P_{OSL} = P_{OSL-R} \sum_{h=1}^{h=hmax} \left(\frac{I_h}{I_R}\right)^2 h^{0.8} \quad W \quad (3.24)$$

Finalmente se tiene que el factor armónico para otras pérdidas extrañas resulta:

$$F_{HL-STR} = \frac{\sum_{h=1}^{h=hmax} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^{0.8}}{\sum_{h=1}^{h=hmax} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \quad \text{ó bien} \quad F_{HL-STR} = \frac{\sum_{h=1}^{h=hmax} \left(\frac{I_h}{I}\right)^2 h^{0.8}}{\sum_{h=1}^{h=hmax} \left(\frac{I_h}{I}\right)^2} \quad (3.25)$$

3.3 ANÁLISIS DE PÉRDIDA DE VIDA EN LOS TRANSFORMADORES [14]

La expectativa de vida de un transformador de acuerdo a la norma IEEE C57.91-1995 es de aproximadamente 180000 horas o 20.55 años, esto es considerando la operación continua del equipo a su capacidad nominal, temperatura ambiente promedio de 30°C, y temperatura nominal de trabajo de 100°C. Pero dado que en el ciclo de carga diaria rara vez el trabajo es continuo a plena carga, esto extiende la expectativa de vida hasta unos 30 años o más, para estudios de efectos armónicos se usa una expectativa de vida de 180000 horas.

3.3.1 EXPECTATIVA DE VIDA DEL AISLAMIENTO DEL TRANSFORMADOR [15]

El deterioro del sistema de aislamiento de un transformador se debe al deterioro que produce la temperatura sobre la celulosa, el deterioro del aislamiento es una función del tiempo, la temperatura, el contenido de humedad, el contenido de oxígeno y contenido de ácidos, la norma IEC 60076-7 se basa únicamente en la temperatura de aislamiento como el parámetro de control.

En la mayoría de los transformadores la temperatura no será uniforme, por ende la porción de aislamiento que está operando a mayor temperatura tendrá mayor deterioro. Por lo complejo de la distribución de temperatura en el sistema de aislación de un transformador, es muy difícil la predicción de la vida útil del

aislamiento. Por eso en la bibliografía existente se denomina con la palabra “vida” a la vida calculada del aislamiento, no la vida real del transformador.

3.3.2 CÁLCULO DEL ENVEJECIMIENTO [12]

Se ha comprobado experimentalmente que el deterioro del aislamiento con el tiempo sigue una adaptación de la teoría de la velocidad de reacción de Arrhenius y está dada por la siguiente expresión:

$$\text{Por unidad de vida} = A * e^{\frac{B}{\theta_H + 273}} \quad (3.26)$$

Donde θ_H es la temperatura del punto más caliente y los valores de las constantes A y B para los transformadores son $A = 9.8 \times 10^{-18}$ y $B = 15000$.

La curva de vida por unidad del aislamiento del transformador de la Figura 3.6 relaciona la vida del aislamiento del transformador por unidad con la temperatura del punto más caliente del bobinado. El uso de esta curva aísla la temperatura como principal variable que afecta la vida térmica. Indica el grado de envejecimiento hasta el cual el nivel de envejecimiento es acelerado por encima de lo normal para temperaturas por encima de una temperatura de referencia de 110°C y se reduce debajo de lo normal para temperaturas debajo de 110°C.

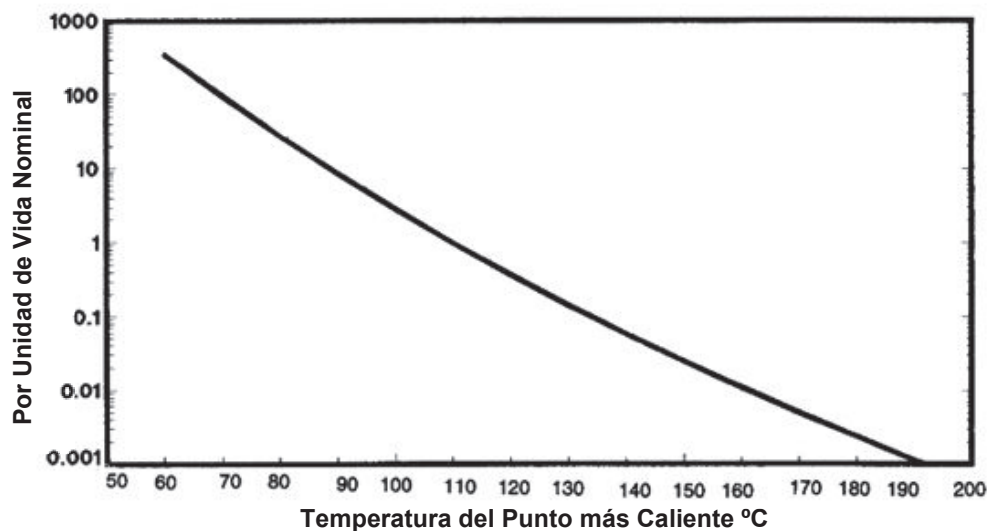


Figura 3.6: Vida del aislamiento del transformador [12]

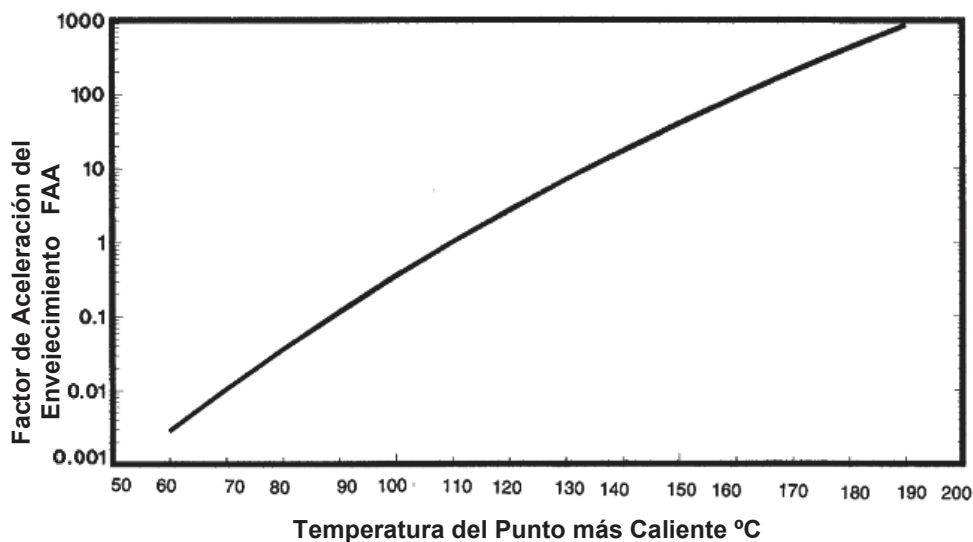


Figura 3.7: Factor de aceleración del envejecimiento [12]

La curva de vida por unidad del aislamiento del transformador de la Figura 3.6 puede usarse de dos maneras:

- Como base para el cálculo de un factor de aceleración de envejecimiento FAA para una carga y temperatura dada.
- Para un perfil de carga variable y temperatura por un periodo de 24 h.

En el ANEXO 2 CURVAS DE CARGA SEMANAL, se puede revisar el perfil de carga para una semana, y de éste perfil se escoge un día típico de carga para el análisis.

La curva de la Figura 3.7 muestra los valores de temperatura del punto más caliente vs el FAA para un sistema de aislación con sobre temperatura de 65°C.

La expresión del factor de aceleramiento de envejecimiento muestra la velocidad a la que el envejecimiento del aislamiento del transformador se acelera en comparación con la tasa de envejecimiento a una temperatura de referencia del punto más caliente. La temperatura de referencia más caliente es de 110°C y las expresiones son las siguientes:

- Para papel térmicamente tratado:

$$F_{AA} = e^{\frac{15000}{110+273} - \frac{15000}{\theta_H+273}} \quad (3.27)$$

- Para papeles no térmicamente tratados:

$$F_{AA} = 2^{\frac{\theta_H - 98}{6}} \quad (3.28)$$

A continuación se observa una tabla comparativa entre estos valores para un papel tratado térmicamente y otro no tratado, como se puede observar estos valores son sensibles a la temperatura:

Θ_H °C	Aislamiento para papel no mejorado	Aislamiento para papel mejorado
80	0.125	0.036
86	0.25	0.073
92	0.5	0.145
98	1.0	0.282
104	2.0	0.536
110	4.0	1.0
116	8.0	1.83
122	16.0	3.29
128	32.0	5.8
134	64.0	10.1
140	128.0	17.2

Tabla 3.1: Tabla comparativa de la FAA debido a la temperatura del punto más caliente para los diferentes tipos de papel [15]

Los valores del factor de envejecimiento para el caso de transformadores con temperatura promedio de arrollamiento de 65°C están tabulados en la Tabla 3.2 este factor resulta mayor que 1 para temperaturas del punto más caliente mayores a 110°C y menor que 1 para temperaturas menores a 110°C

La ecuación anterior se puede utilizar para calcular el envejecimiento equivalente del transformador. La vida equivalente (en horas o días) a la temperatura de referencia que se consumirá en un periodo de tiempo dado para un ciclo de temperatura es la siguiente:

$$F_{EQA} = \frac{\sum_{n=1}^N F_{AA_n} \Delta t_n}{\sum_{n=1}^N \Delta t_n} \quad (3.29)$$

Dónde:

F_{EQA} : Factor de envejecimiento equivalente para el periodo total de tiempo.

n: Es el índice del intervalo de tiempo t.

N: Número total de intervalos de tiempo.

F_{AA_n} : Factor de aceleración del envejecimiento para la temperatura que existe durante el intervalo de tiempo Δt_n

Δt_n : Intervalo de tiempo en horas

A continuación se muestran los factores de aceleración del envejecimiento para diferentes temperaturas del transformador:

FACTORES DE ACELERACIÓN DE ENVEJECIMIENTO					
Temperatura °C	Factor de envejecimiento	Temperatura °C	Factor de envejecimiento	Temperatura °C	Factor de envejecimiento
37	0.0000	94	0.1813	152	47.9603
37	0.0001	95	0.2026	153	52.1030
38	0.0001	96	0.2263	154	56.5817
39	0.0001	97	0.2526	155	61.4216
40	0.0002	98	0.2817	156	66.6501
41	0.0002	99	0.3141	157	72.2961
42	0.0002	100	0.3499	158	78.3908
43	0.0002	101	0.3897	159	84.9675
44	0.0003	102	0.4337	160	92.0617
45	0.0003	103	0.4823	161	99.7113
46	0.0004	104	0.5362	162	107.9569
47	0.0004	105	0.5957	163	116.8418
48	0.0005	106	0.6614	164	126.4122
49	0.0006	107	0.7340	165	136.7173
50	0.0007	108	0.8142	166	147.8097
51	0.0008	109	0.9026	167	159.7455

52	0.0009	110	1.0000	168	172.5842
53	0.0011	111	1.1074	169	186.3896
54	0.0012	112	1.2256	170	201.2294
55	0.0014	113	1.3558	171	217.1758
56	0.0016	114	1.4990	172	234.3055
57	0.0019	115	1.6565	173	252.7002
58	0.0021	116	1.8296	174	272.4469
59	0.0024	117	2.0197	175	293.6381
60	0.0028	118	2.2285	176	316.3719
61	0.0032	119	2.4576	177	340.7529
62	0.0037	120	2.7089	178	366.8919
63	0.0042	121	2.9845	179	394.9069
64	0.0048	122	3.2864	180	424.9230
65	0.0054	123	3.6172	181	457.0731
66	0.0062	124	3.9793	182	491.4980
67	0.0071	125	4.3756	183	528.3474
68	0.0080	126	4.8091	184	567.7798
69	0.0091	127	5.2830	185	609.9635
70	0.0104	128	5.8009	186	655.0767
71	0.0118	129	6.3666	187	703.3082
72	0.0134	130	6.9842	188	754.8582
73	0.0152	131	7.6582	189	809.9386
74	0.0172	132	8.3935	190	868.7737
75	0.0195	133	9.1952	191	931.6010
76	0.0220	134	10.0689	192	998.6719
77	0.0249	135	11.0208	193	1070.2523
78	0.0281	136	12.0573	194	1146.6232
79	0.0318	137	13.1856	195	1228.0819
80	0.0358	138	14.4131	196	1314.9428
81	0.0404	139	15.7482	197	1407.5378
82	0.0455	140	17.1995	198	1506.2179
83	0.0513	141	18.7765	199	1611.3536
84	0.0577	142	20.4895	200	1723.3361
85	0.0649	143	22.3494		
86	0.0729	144	24.3679		
87	0.0819	145	26.5578		
88	0.0919	146	28.9326		
89	0.1031	147	31.5069		
90	0.1156	148	34.2963		
91	0.1295	149	37.3177		
92	0.1449	150	40.5890		
93	0.1622	151	44.1297		

Tabla 3.2: Factores de aceleración de envejecimiento [14]

CAPÍTULO IV

CARACTERÍSTICAS OPERATIVAS DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN BASADAS EN SUS COMPONENTES TÉRMICOS

La carga máxima de un transformador está condicionada por limitaciones térmicas y limitaciones económicas. Las limitaciones térmicas, son aquellas en la que la carga produce una elevación de la temperatura interna superior a un nivel crítico que trae como consecuencia un envejecimiento prematuro del aislamiento, y por consecuencia la disminución del tiempo de vida del transformador.

Las limitaciones económicas, están caracterizadas con el costo de las pérdidas técnicas, es decir las pérdidas internas del transformador, si éstas superan de algún modo el rango aceptable el transformador debe de ser reemplazado, este problema se da básicamente en transformadores antiguos. En transformadores afectados por corrientes armónicas, se dan los dos tipos de casos, pues la corriente armónica hace un aumento de pérdidas, y éstas a su vez de temperatura.

4.1 CONDICIONES ÓPTIMAS DE OPERACIÓN [15]

El transformador debe de cumplir ciertos lineamientos que le permitan su correcto funcionamiento en cualquier condición que este sea instalado, a continuación se muestran ciertos parámetros que deben de cumplir para su correcto funcionamiento.

Con los valores de carga más allá del valor de placa, todos los límites individuales establecidos en la Tabla 4.1 no deben excederse y debe tomarse en cuenta las siguientes limitaciones específicas.

Límites de corriente y temperatura de acuerdo a la cargabilidad del transformador	
Tipos de carga	Transformadores de distribución
Carga de ciclo normal	
Corriente (p.u.)	1.5
Temperatura del punto más caliente y las partes metálicas en contacto con el material aislante de celulosa. (°C)	120
Otra temperatura en el punto más caliente de las partes metálicas (en contacto con el aceite, papel aramida, materiales de fibra de vidrio) (°C)	140
Temperatura del aceite en la parte superior (°C)	105
Carga de emergencia de tiempo corto	
Corriente (p.u.)	1.8
Temperatura del punto más caliente y las partes metálicas en contacto con el material aislante de celulosa. (°C)	140
Otra temperatura en el punto más caliente de las partes metálicas (en contacto con el aceite, papel aramida, materiales de fibra de vidrio) (°C)	160
Temperatura del aceite en la parte superior (°C)	115
Carga de emergencia de tiempo extendido	
Corriente (p.u.)	2.0
Temperatura del punto más caliente y las partes metálicas en contacto con el material aislante de celulosa. (°C)	140**
Otra temperatura en el punto más caliente de las partes metálicas (en contacto con el aceite, papel aramida, materiales de fibra de vidrio) (°C)	140**
Temperatura del aceite en la parte superior (°C)	140**
<p>** : La temperatura no debe superar la máxima permitida por el aceite, ya que pueden formarse burbujas de gas, poniendo en peligro la resistencia dieléctrica del transformador, pudiendo ocasionar daños permanentes en el mismo. (revisar 4.1.1)</p> <p>NOTA: Los límites de temperatura y corriente no están destinados a ser validos simultáneamente, la corriente puede ser limitada a un valor menor con el fin de hacer cumplir la limitación de la temperatura y viceversa.</p>	

Tabla 4.1: Límites de corriente y temperatura para el transformador [15]

4.1.1 LIMITACIONES DE CORRIENTE Y TEMPERATURA

Los límites de la corriente de carga, temperatura del punto más caliente, temperatura del aceite en la parte superior y la temperatura de las distintas piezas metálicas no deben exceder los límites anteriores, para una operación normal del transformador. Bajo carga de emergencia de corta y larga duración no se establecen límites para temperatura del punto más caliente, ni para la temperatura del nivel superior del aceite para los transformadores, ya que es impracticable controlar la duración de la carga de emergencia en estos casos.

4.1.2 ACCESORIOS Y OTRAS CONSIDERACIONES

Aparte de los bobinados otras partes del transformador como son los bushings, conexiones de cables, cambiadores de tap y conectores, pueden restringir la operación cuando se sobrecarga el transformador por encima de 1.5 veces la corriente nominal, la expansión del aceite en la cuba del transformador así como la presión generada por éste también son condiciones de restricción

4.1.3 CONDICIONES AMBIENTALES EN EL EXTERIOR

Las condiciones de viento, sol o lluvia pueden afectar a la capacidad de carga de los transformadores de distribución, pero su naturaleza impredecible hace difícil tomar en cuenta estos factores.

4.2 LÍMITES DE CALENTAMIENTO.

Al poner limitaciones de temperatura en el transformador, se hace referencia a la elevación máxima de la temperatura promedio de los devanados con respecto a la temperatura ambiente y la temperatura del punto superior del aceite, esta elevación máxima se establece bajo las condiciones que a continuación se describen.

4.2.1 TEMPERATURA AMBIENTE [14]

La temperatura ambiente es un factor importante en la determinación de la capacidad de carga de un transformador, ya que la temperatura que se genera por efecto de la carga se le debe añadir la temperatura ambiente para determinar la temperatura de operación, basándose en una medición de 24 horas y una temperatura ambiente promedio de 30°C y una máxima de 40°C si no se tiene datos establecidos. Si se pueden realizar mediciones en el ambiente real, tales temperaturas deben ser promediadas sobre 24 horas y, a continuación, utilizados en la determinación de capacidad térmica y de carga del transformador.

La temperatura del aire visto por un transformador, es el aire en contacto con sus radiadores o intercambiadores de calor. En algunas instalaciones el transformador puede estar al aire libre, pero rodeado de edificios o paredes causando amortiguamiento en la distribución de la temperatura, esto puede resultar en la recirculación de aire, y el ambiente debe ser ajustado. La temperatura ambiente probable para cualquier mes puede aproximarse a partir de datos en los informes atmosféricos donde se encuentre el transformador, de estos datos obtenemos dos casos:

- a) **Temperatura media.** Se usa la temperatura diaria promedio del mes involucrado, promediado durante varios años.
- b) **Temperatura máxima diaria.** Se usa el promedio de las temperaturas máximas diarias para el mes involucrado promediado durante varios años.

Estos ambientes se deben utilizar de la siguiente manera:

- Para cargas con esperanza de vida normal, utilice a), la temperatura media en el ambiente durante el mes en cuestión.
- Para cargas de corta duración con sacrificio moderado de la esperanza de vida, se debe usar b), la temperatura máxima diaria para el mes en cuestión.

En caso de que el transformador opere a altitudes mayores a 1000 m.s.n.m., la temperatura promedio del aire refrigerante no deberá exceder los valores de la Tabla 4.2:

Máxima temperatura del aire refrigerante					
Auto-refrigerado sumergido en líquido refrigerante	Metros	1000	2000	3000	4000
	°C	30	28	25	23

Tabla 4.2: Temperatura media máxima permitida del aire refrigerante a la potencia nominal del transformador [14]

4.2.2 TEMPERATURA DEL AGENTE REFRIGERANTE [2]

Los límites térmicos se han estandarizado según la norma IEC 60085-1994 de acuerdo al calentamiento admitido por los materiales aislantes utilizados en la construcción del transformador, descritos a continuación.

- **Clase A**, materiales orgánicos como algodón, seda, papel y fibras semejantes, impregnadas con barnices.
- **Clase Ao**, los mismos materiales anteriores sumergidos en aceite.
- **Clase E**, materiales llamados resistentes al calor, a base de papel baquelizado o barnizado e hilos de esmalte sintético, sin impregnar. Papel impregnado con resinas sintéticas.
- **Clase B**, materiales inorgánicos como mica, amianto, productos de vidrio y sustancias minerales análogas. Impregnados con barnices sintéticos.
- **Clase F**, los materiales de la clase anterior impregnados en siliconas modificadas con barnices orgánicos sintéticos.
- **Clase H**, los mismos materiales de la clase B, pero impregnados con siliconas puras.
- **Clase C**, mica, porcelana, vidrio, cuarzo y sustancias equivalentes incombustibles.

A continuación en la Tabla 4.3 se puede visualizar la temperatura soportada por cada clase de aislamiento:

Clase de aislamiento	A	Ao	E	B	F	H	C
Temperatura a soportar °C	105	115	120	130	155	180	220

Tabla 4.3: Límites de calentamiento de los aislamientos de acuerdo a su clase.[3]

4.2.3 ALTITUD

La altitud para la cual fue diseñado el transformador es dada por el fabricante, y en caso de no conocerse este dato, se supone que está con referencia a 1000 m.s.n.m. Esta condición afecta significativamente a la refrigeración de los transformadores debido a que a mayor altitud la densidad del aire se reduce y disminuye el calentamiento del transformador, cosa que es benéfica para el mismo.

Según la norma IEEE Std C57.91-1995 para los transformadores inmersos en liquido aislante o con enfriamiento por aire, cada 100 metros la temperatura varia 0.4°C aumentando cada vez que se acerca al nivel del mar e incrementando al subir.

4.3 FACTORES QUE INCIDEN EN LA VIDA ÚTIL

Todos los factores que afectan a la temperatura del transformador tienen relación directa con la vida útil, pero son particularmente importantes y no siempre controlables los efectos que produce una sobrecarga, sea que esta provenga de corrientes elevadas o de armónicos.

4.3.1 SOBRECARGA DE TRANSFORMADORES INMERSOS EN ACEITE

[16]

La vida normal de un transformador se basa en considerar su funcionamiento en servicio continuo con su carga nominal, en un medio ambiente cuya temperatura es de 20°C y con una sobreelevación de temperatura del punto caliente de 78°C (temperatura total de 98°C), si este valor se supera debe esperarse una reducción de la vida en el transformador. En esta condición de funcionamiento la

temperatura del punto caliente excede en 13°C el valor de sobreelevación medio de temperatura de 65°C del arrollamiento adoptado en la guía IEC-60354 1991 para transformadores de distribución.

4.3.2 LIMITACIONES Y EFECTOS DE SUPERAR LA POTENCIA NOMINAL [12]

Se considera como vida normal aquella que tendría la máquina funcionando en servicio continuo con su potencia nominal, con ciclos de carga normales y para condiciones normales de temperatura ambiente. La vida de un transformador depende en alto grado de un conjunto de parámetros tales como sobretensiones, cortocircuitos en el sistema y sobrecargas de emergencia, que pueden ocurrir en forma separada o conjunta.

La sobrecarga y/o el funcionamiento con temperaturas ambientes más altas que las normales, introducen un grado de riesgo y un envejecimiento acelerado. Con relación a la corriente armónica se tiene la siguiente ecuación de limitación para estar dentro de un rango normal de uso del transformador.

$$I_{max}(pu) = \sqrt{\frac{P_{LL-R}(pu)}{1 + F_{HL} * P_{EC-R}(pu)}} \quad p.u. \quad (4.1)$$

4.4 TEMPERATURAS INTERNAS DEL TRANSFORMADOR [15]

A continuación se presenta un diagrama simplificado de las principales temperaturas internas presentes en el funcionamiento de un transformador, las hipótesis que se formulan para esta simplificación son principalmente:

- La temperatura aumenta linealmente desde abajo hacia arriba, sin importar el modo de refrigeración del transformador
- El aumento de la temperatura del conductor en cualquier posición hasta el bobinado se supone lineal, paralelo al aumento de la temperatura del aceite con una diferencia constante de g_r .
- El aumento de la temperatura del punto más caliente es mayor que el aumento de la temperatura del conductor en la parte superior del devanado

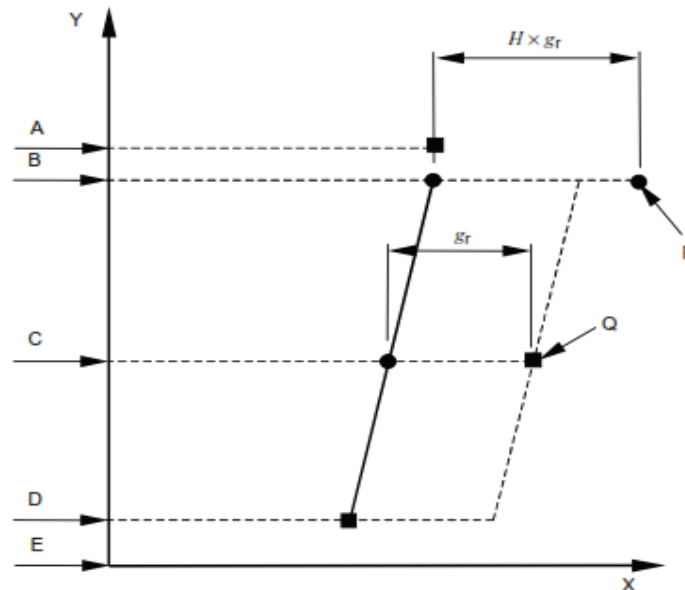


Figura 4.1: Diagrama térmico del transformador [15]

- A** Temperatura superior del aceite como promedio de la temperatura del aceite de salida del tanque (refrigeración) y la temperatura del aceite en la cuba
- B** Temperatura del aceite mezclado en el tanque, en la parte superior del bobinado (a menudo supone que es la misma temperatura que A)
- C** Temperatura del aceite en la mitad del tanque
- D** Temperatura del aceite en la parte baja del tanque
- E** Fondo del tanque
- g_r** Gradiente térmico a corriente nominal entre temperatura media de bobinado y media de aceite
- H** Factor del punto más caliente
- P** Temperatura del punto más caliente
- Q** Temperatura media de los bobinados medida por resistencia
- X-eje** Temperatura
- Y-eje** Posición relativa
- Punto calculado ■ Punto medido

4.5 CÁLCULO DE TEMPERATURAS CON CARGA ARMÓNICA [12]

Según la norma IEEE Std. C57.110-1998 los cálculos térmicos para estudios de armónicos son los de la temperatura superior del aceite (top oil - θ_{TO}), la máxima sobreelevación de temperatura del punto caliente respecto al aceite superior (θ_g), y la temperatura del punto más caliente.

4.5.1 SOBREELEVACIÓN DE TEMPERATURA SUPERIOR DEL ACEITE

Los cálculos de temperatura para un transformador inmerso en aceite son similares a los de un transformador seco, excepto porque debe adicionar el efecto de todas las otras pérdidas adicionales. Para un transformador de distribución auto refrigerado tipo ONAN, la sobreelevación de temperatura respecto al ambiente de la parte superior del aceite es proporcional a las pérdidas armónicas divididas para las totales elevado al exponente 0.8 como se muestra a continuación:

$$\theta_{TO} = \theta_{TO-R} * \left(\frac{P_{LL} + P_{NL}}{P_{LL-R} + P_{NL}} \right)^{0.8} \quad ^\circ\text{C} \quad (4.2)$$

Dónde:

$$P_{LL} = P + F_{HL} * P_{EC} + F_{HL-SRT} * P_{OSL} \quad \text{W} \quad (4.3)$$

θ_{TO} : Sobreelevación de temperatura superior del aceite en $^\circ\text{C}$

θ_{TO-R} : *Sobreelevación de la temperatura superior del aceite para condiciones nominales en $^\circ\text{C}$*

La sobreelevación del punto caliente de devanado (hot-spot) es también proporcional a las pérdidas de carga elevado al exponente 0.8 y puede ser calculado de la siguiente manera:

$$\theta_g = \theta_{g-R} * \left(\frac{P_{LL}(pu)}{P_{LL-R}(pu)} \right)^{0.8} \quad ^\circ\text{C} \quad (4.4)$$

Esta ecuación puede ser expresada también de la siguiente manera:

$$\theta_g = \theta_{g-R} * \left(\frac{1 + F_{HL} * P_{EC}(pu)}{P_{EC-R}(pu)} \right)^{0.8} \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.5)$$

Dónde:

Θ_g : Máxima sobreelevación de temperatura del punto más caliente respecto a la temperatura superior del aceite en $^\circ\text{C}$

Θ_{g-R} : Máxima sobreelevación de temperatura del punto más caliente respecto a la temperatura superior del aceite para condiciones nominales en $^\circ\text{C}$

La sobreelevación de temperatura respecto al ambiente resulta:

$$\theta_{S/Tamb} = \theta_{TO} + \theta_g \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.6)$$

4.6 VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA SUPERIOR DEL ACEITE Y DEL PUNTO MÁS CALIENTE DE ACUERDO A LA CARGA [15]

Según la norma IEC 60076-7 2005 existen dos formas alternativas de describir la temperatura del punto caliente como una función del tiempo, por variación de la corriente de carga y la temperatura ambiente. Como ya se describió anteriormente la temperatura ambiente será el promedio de las temperaturas máximas para el mes estipulado, esto para el caso de análisis de pérdida de vida, así que a continuación se explicará la variación de temperatura por carga.

Para la variación se tomará en cuenta la solución de ecuaciones exponenciales apropiadas para una variación de carga de acuerdo con una función escalón. Cada una de las fases de carga es seguido por un paso de carga disminuyendo o aumentando, ésta estipulación es conveniente para el tipo de datos que se tiene en este estudio (lecturas de carga cada 10 minutos), a continuación se muestra la relación de pasos de carga con las temperaturas en el transformador en función del tiempo.

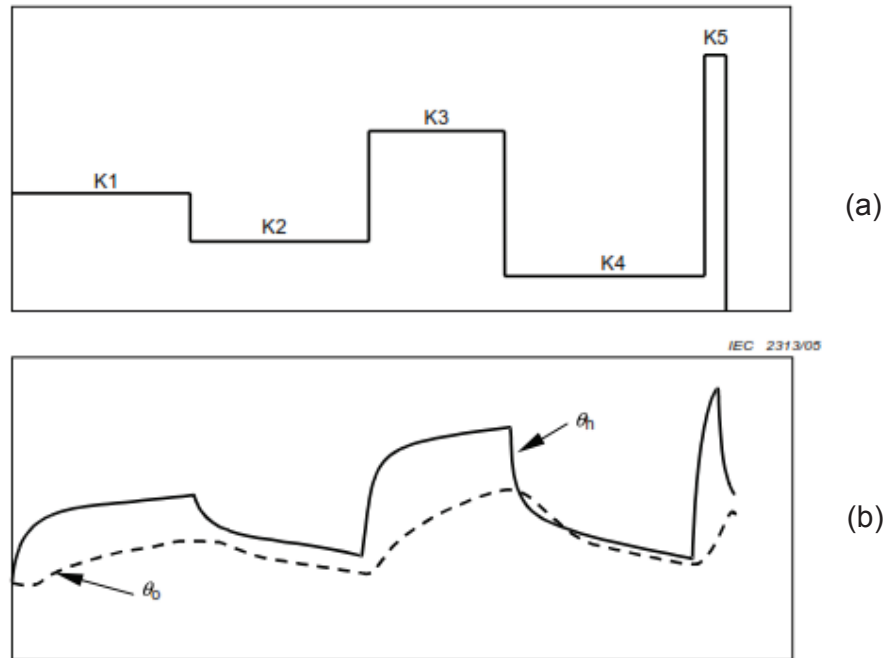


Figura 4.2: a) Variación de la carga mostrada en escalonamientos, b) Variación de la temperatura en el punto más caliente (θ_H) y de la temperatura en el punto superior del aceite (θ_o) [15]

Como ya se analizó anteriormente en la metodología para el cálculo de las temperaturas θ_{T_o} y θ_o , se analizará el comportamiento de esta temperatura a través del tiempo, ya que en el momento de aplicar la carga la temperatura tendrá un tiempo de estabilización que no será inmediato. Ese factor de tiempo para la estabilización de la temperatura lo describen las ecuaciones siguientes:

La función $f_1(t)$ describe el aumento relativo de la elevación de la temperatura del nivel superior del aceite de acuerdo a la unidad del valor de estado estacionario.

$$f_1(t) = (1 - e^{-t/(k_{11} \cdot \tau_o)}) \quad (4.7)$$

La función $f_2(t)$ describe el aumento relativo de la variación de la temperatura del nivel superior del aceite de acuerdo con la unidad del valor de estado estacionario. Modela principalmente el hecho de que se necesita algún tiempo antes de que la circulación del aceite haya adaptado su velocidad para corresponder al aumento del nivel de carga.

$$f_2(t) = k_{21} \left(1 - e^{-t/(k_{22} \cdot \tau_w)}\right) - (k_{21} - 1) * (1 - e^{-t/(\tau_o/k_{22})}) \quad (4.8)$$

La función $f_3(t)$ describe la disminución relativa de la temperatura del nivel superior del aceite a la del ambiente de acuerdo con la unidad de la disminución total.

$$f_3(t) = e^{-t/(k_{11} \cdot \tau_0)} \quad (4.9)$$

A continuación se presenta una tabla de las constantes presentadas por la norma IEC 60076-7 para transformadores de distribución.

Constantes	Transformadores de distribución (ONAN)
Constante k_{11}	1.0
Constante k_{21}	1.0
Constante k_{22}	2.0
Constante de tiempo ζ_0	180
Constante de tiempo ζ_w	4

Tabla 4.4: Tabla de constantes para las funciones de temperatura [15]

Para el presente estudio se usarán las funciones $f_2(t)$ y $f_3(t)$ la primera para elevación de temperatura y la segunda para la disminución de la misma.

A continuación se muestra el comportamiento de estas funciones para un transformador de distribución.

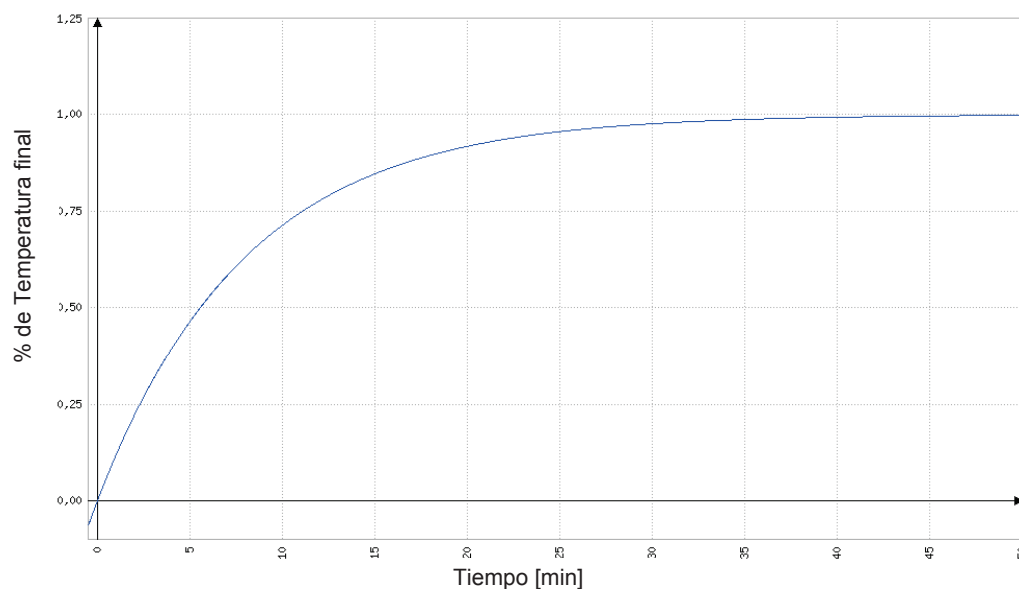


Figura 4.3: Comportamiento de la elevación de la temperatura vs. Tiempo

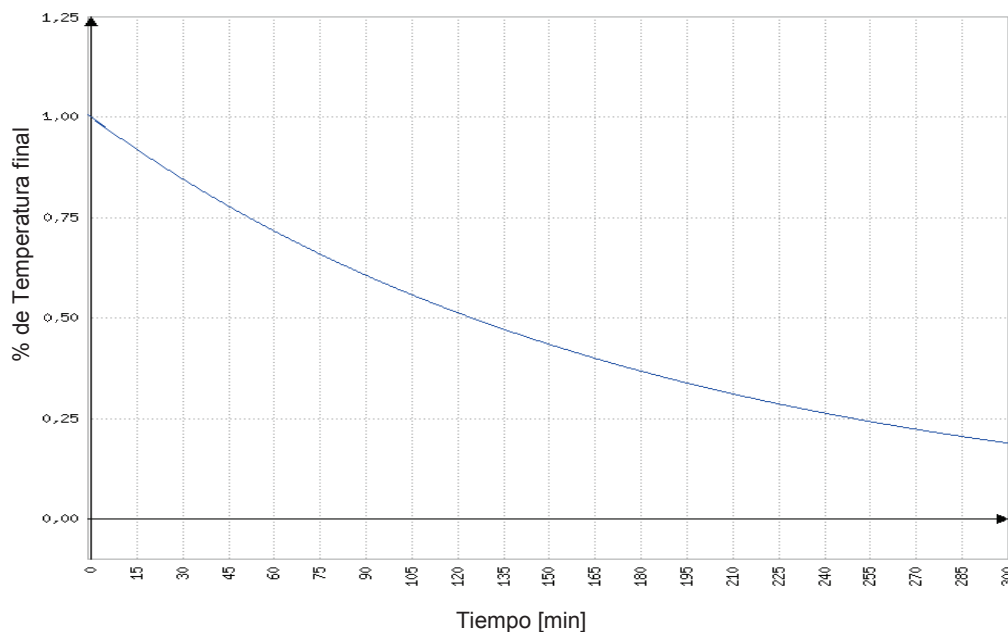


Figura 4.4: Comportamiento de la caída de la temperatura vs. Tiempo

En la

Figura 4.3 se puede observar cómo sube la temperatura conforme incrementa el tiempo, como se puede apreciar a los 20 minutos casi ha llegado a la temperatura final, mientras que a las 30 minutos prácticamente está en la temperatura final, mientras que en la Figura 4.4 se aprecia la disminución de la misma, esta es mucho más lenta que la subida de temperatura, en los primeros 30 minutos apenas ha descendido un 20% de su temperatura inicial.

4.7 INTERRUPTOR TERMOMAGNÉTICO DEL CIRCUITO SECUNDARIO

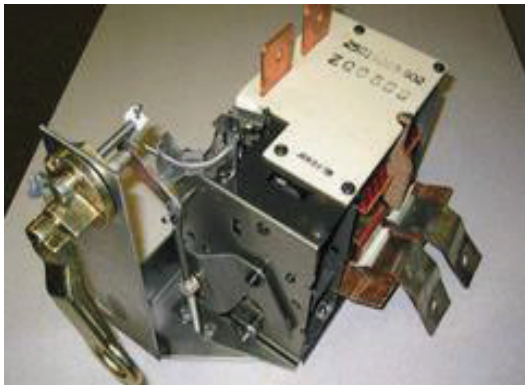
Eléctricamente el interruptor termomagnético se encuentra localizado entre los bushings de baja tensión y el devanado secundario, para proveer protección contra sobrecargas y fallas en el transformador. El interruptor de bajo voltaje se monta directamente sobre la parte activa y sumergido en el líquido aislante, la palanca de operación de sobrecarga sobresale del nivel superior de aceite y sale al exterior mediante una palanca para su activación



a)



b)



c)

Figura 4.5: Interruptor termomagnético para transformadoras de distribución: (a) Interruptor para transformadores de 5 a 50 kVA, (b) Interruptor para transformadores de 75 a 167 kVA, (c) Interruptor para transformadores trifásicos [17]

La operación del interruptor termomagnético se da por deflexión de elementos bimetálicos en serie con las salidas de bajo voltaje calentados por la combinación de la temperatura producida por la corriente en los bimetálicos y la temperatura del aceite, la apertura es simultánea en todos los polos del interruptor

termomagnético. El interruptor de circuito secundario de bajo voltaje posee interruptores con mecanismos térmicos (bimetal) para todos los breaker y disparo magnético para algunos transformadores de 25kVA y para todos mayores a 37.5 kVA (monofásicos o trifásicos)

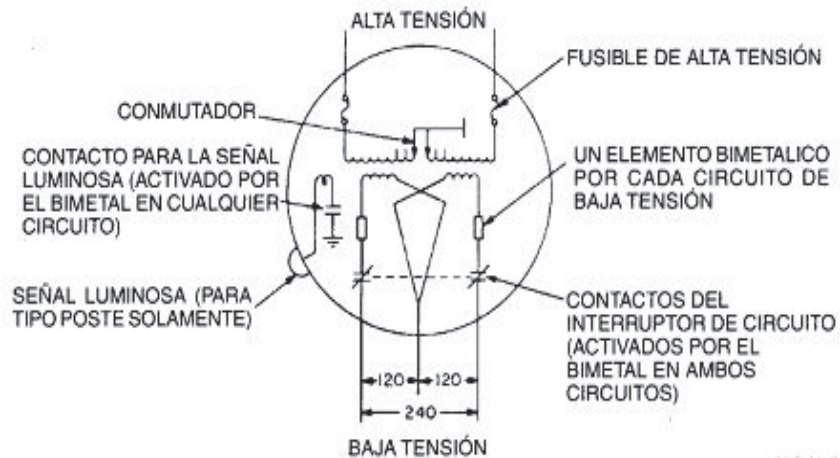


Figura 4.6: Diagrama de conexión del Interruptor termomagnético [17]

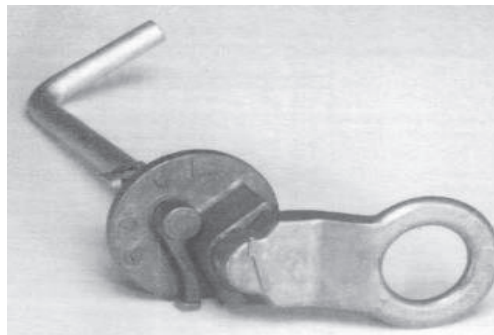


Figura 4.7: Palanca de activación de sobrecarga para el interruptor termomagnético [17]

Los interruptor con disparo magnético ofrecen mejor funcionamiento en coordinación con el fusible, mejor capacidad de interrupción de falla, y menor fuerza de cortocircuito en las bobinas del transformador (soplado de bobinas), el circuito de disparo magnético se comporta según una característica tiempo corriente, excepto cuando la corriente del secundario excede de 10 a 15 veces la corriente nominal de bajo voltaje, bajo estas circunstancias el mecanismo magnético toma el lugar del bimetal, causando el disparo inmediato.

Además el interruptor termomagnético posee una característica típica de operación de larga duración de emergencia para los transformadores que se muestra a continuación.

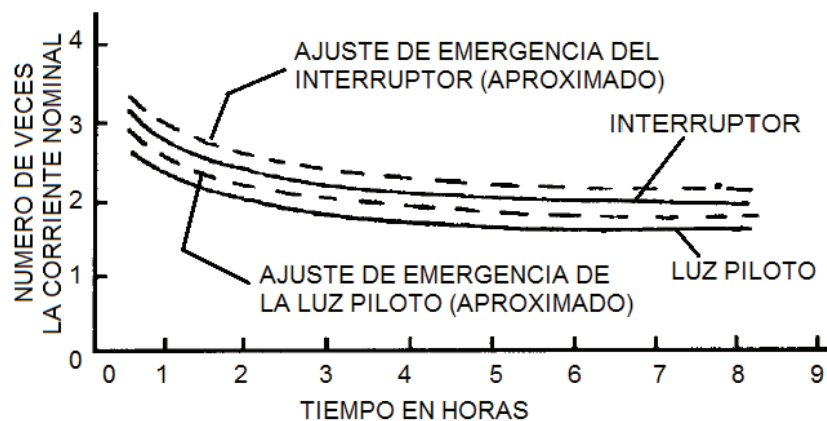


Figura 4.8: Característica típica de larga duración [17]

4.7.1 CARACTERÍSTICA TÉRMICA DEL INTERRUPTOR TERMOMAGNÉTICO

Anteriormente se dijo que el disparo magnético del interruptor está dado por una característica tiempo vs corriente, así mismo la característica térmica del bimetálico está dado mediante ecuaciones en base al cálculo de la temperatura del bimetálico mediante la corriente que circula por el mismo, esta ecuación está caracterizada mediante constantes en base a cada transformador y al interruptor usados, en éste estudio el bimetálico se abre con una corriente que provoque una temperatura igual o superior a 110°C (siendo este valor la suma de la temperatura del bimetálico mas la temperatura superior del aceite).

A continuación se muestran las ecuaciones de las características térmicas del bimetálico y las constantes dependiendo el transformador usado:

Características térmicas para el bimetálico			
Transformador kVA	Ecuación	Tipo	Resistencia del bimetálico (Ω/cm) G
5	(1)	T1	500
7.5	(1)	T1	250
10	(1)	T1	150
15	(1)	T1	70
25	(1)	T1/T12	30
37.5	(2)	T12	30
50	(2)	T12	20

Nota: T1 Interruptor con característica térmica (bimetálico)
T12 Interruptor con característica térmica (bimetálico) y disparo magnético

Tabla 4.5: Constantes para diferentes transformadores [17]

Las ecuaciones que rigen el comportamiento del bimetálico según el tipo de interruptor, T1 o T12, están dadas por las siguientes expresiones:

$$(1) \quad TU = 28 \left(\frac{G}{30} \right)^{0.845} * \left(\frac{I}{200} \right)^{1.692} \quad ^\circ\text{C}$$

$$(2) \quad TU = 8.73 \left(\frac{G}{20} \right)^{0.845} * \left(\frac{I}{200} \right)^{1.692} \quad ^\circ\text{C} \quad (4.10)$$

Dónde:

TU: Temperatura del bimetálico

G: Constante resistiva del bimetálico en Ω/cm

I: Corriente que circula por el bimetálico

A continuación se presenta las figuras de la variación de la temperatura del bimetálico para los diferentes transformadores.

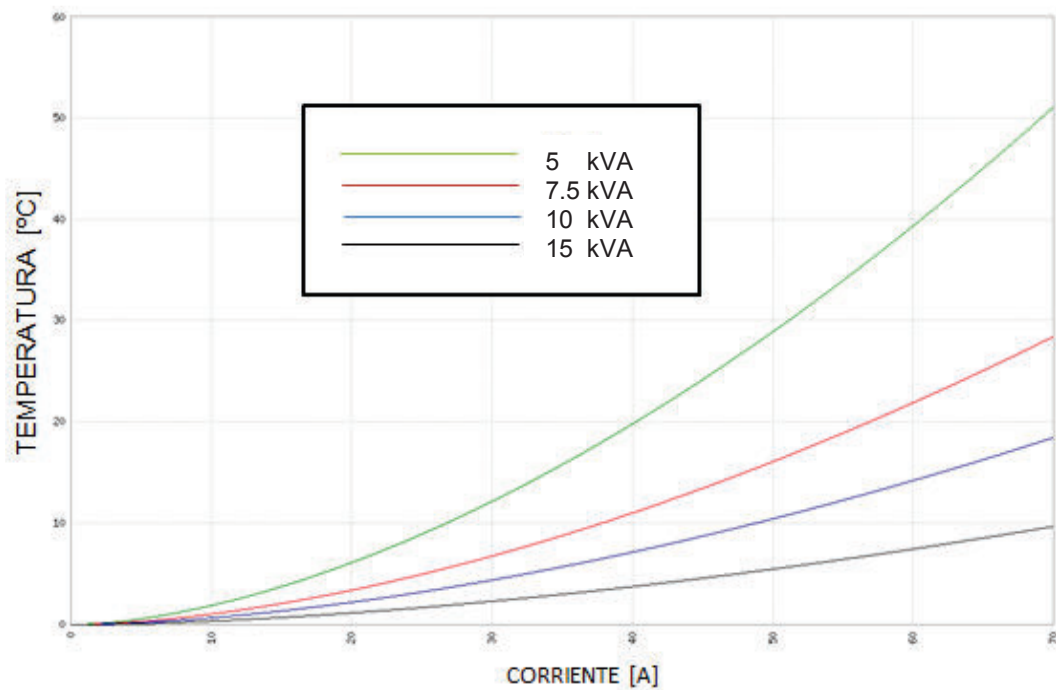


Figura 4.9: Variación de temperatura del bimetalo hasta 15 kVA

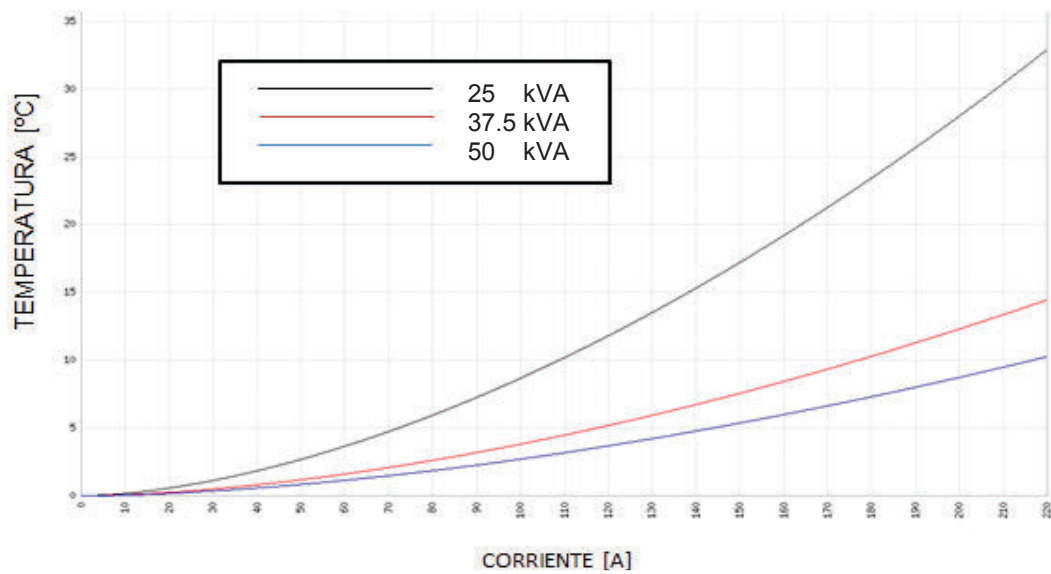


Figura 4.10: Variación de temperatura del bimetalo hasta 50 kVA

Como se puede observar en las figuras mientras mayor sea el transformador menor es la temperatura del bimetalo, esto se debe a que los transformadores de mayor potencia ya tienen incorporado el disparo magnético, que es un respaldo más para la protección.

4.7.2 CONDICIONES TÉRMICAS DE DERATING

La disminución de la potencia térmica del dispositivo de apertura debe ser evaluada en términos de la aplicación dependiendo el rango de temperaturas de aplicación del dispositivo.

Esta característica también se ha tomado en cuenta en el modelamiento del interruptor termomagnético dado que estará sometido a una mayor temperatura, y no operará a su capacidad de diseño sino a una menor, a continuación se muestra la curva de derating, se ha escogido la curva azul de la Figura 4.11 como base para el modelo del interruptor termomagnético.

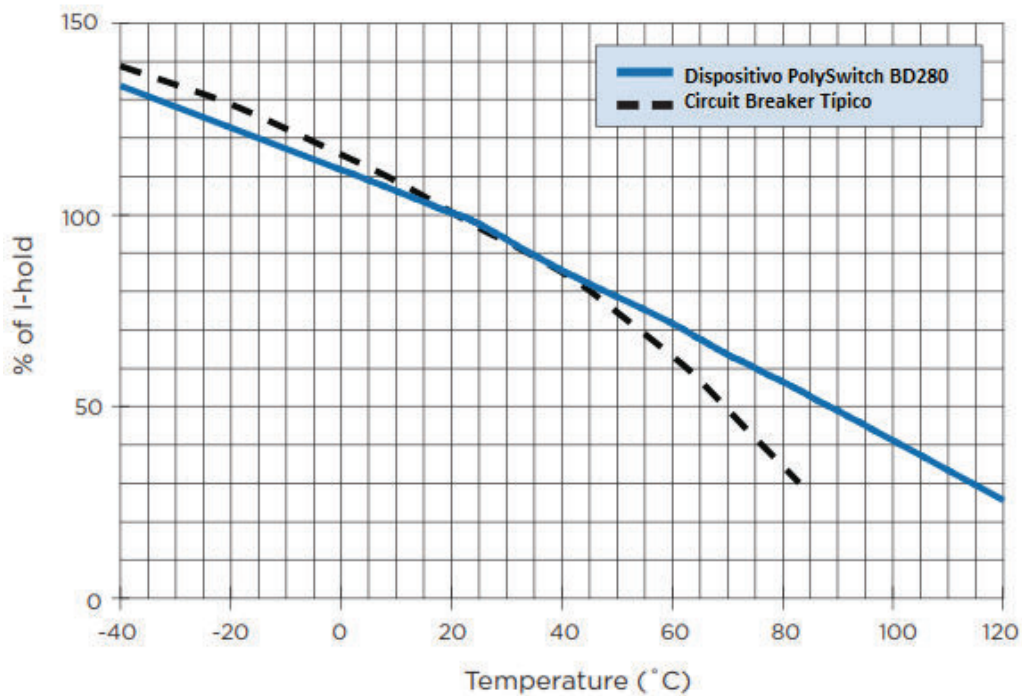


Figura 4.11: Curva de derating del circuito termomagnético por temperatura

CAPÍTULO V

MODELAMIENTO DEL TRANSFORMADOR CON SUS COMPONENTES Y CARGAS ELÉCTRICAS

Se ha escogido modelar en MATLAB/Simulink dado las facilidades que presta intercambiar información con otros programas, además de que permite realizar modelamientos eléctricos e interactuar con la programación, comandando dichos modelamientos y extrayendo información para su procesamiento en ficheros de MATLAB, todo este proceso se llevará a cabo mediante una interfaz de usuario GUI (Guide User Interface), que permitirá una mejor interacción entre el usuario y el programa.

En este capítulo se explicará los diferentes bloques, formulas, desarrollo y modelación del programa, basados en normas y la esquematización de cada bloque para el funcionamiento del programa.

5.1 MODELO DEL TRANSFORMADOR [18]

La modelación del transformador cambia de acuerdo al tipo de estudio que se pretenda realizar, en este caso se analiza el estudio de afectación armónica a los diferentes componentes del transformador, inclusive este análisis tiene una división en el uso de un modelo del transformador dependiendo de la frecuencia máxima a ser analizada. Se crea una división de bajas, medias y altas frecuencias:

- Hasta 3 kHz se considera baja frecuencia
- Desde 3 kHz hasta 20 kHz media frecuencia
- Para frecuencias mayores a 20 kHz son estudios de alta frecuencia

El presente estudio abarca hasta frecuencias de 3 kHz (orden armónico 50), por lo que el modelo del transformador es el de inductancias en serie y paralelo para

estudios de baja frecuencia como se ve en la Figura 5.1, éste modelo no se ve afectado por ningún tipo de capacitancias.

El modelo usado es el siguiente, donde “m” es la relación de transformación:

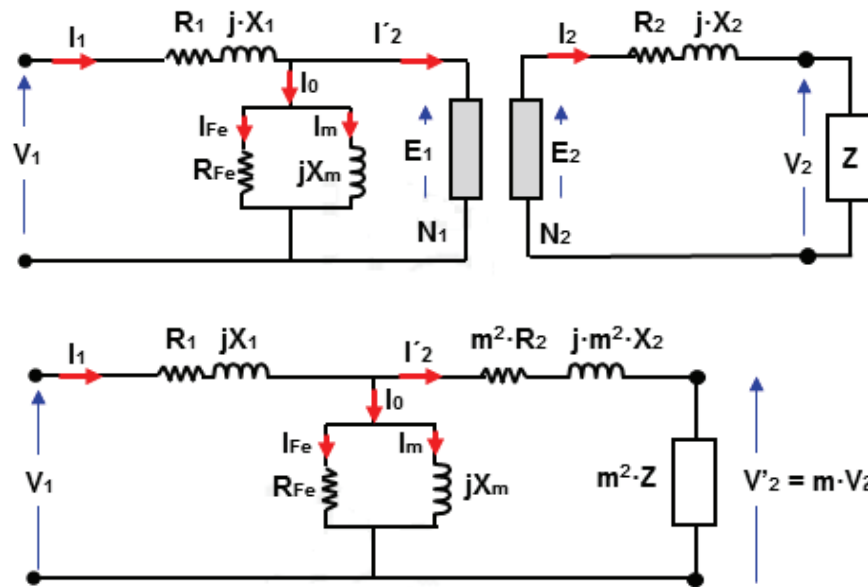


Figura 5.1: Modelo general del transformado para estudios de baja frecuencia

Para la simulación, el bloque usado para transformadores monofásicos con tap central es el que se muestra en la Figura 5.2.

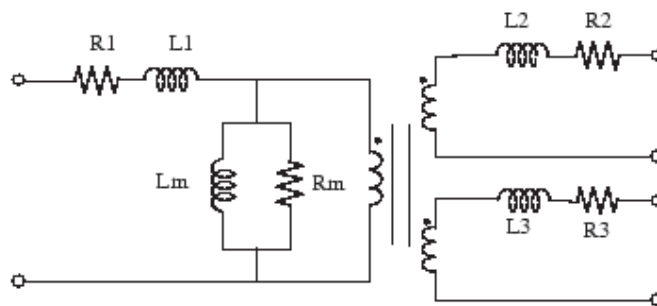


Figura 5.2: Modelo del transformador monofásico con tap central en Simulink

El modelo del transformador trifásico se compone de tres transformadores monofásicos usados en Simulink, es decir solo con dos devanados como se puede apreciar en el final de la Figura 5.1, la conexión usada para el transformador trifásico es Dyn5.

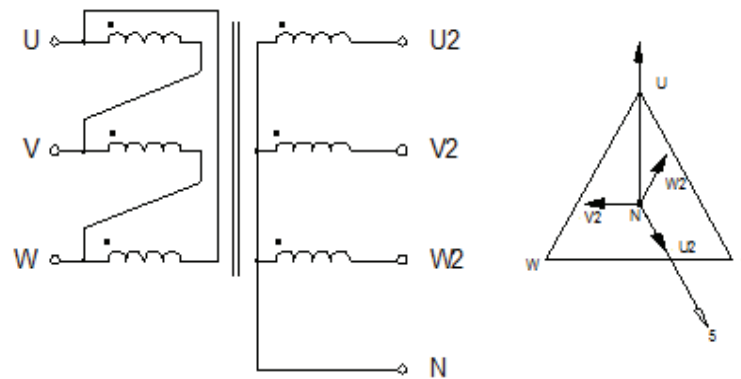


Figura 5.3: Diagrama de un transformador trifásico Dyn5

5.2 CARGA ARMÓNICA

Cualquier forma de onda cíclica puede ser representada por una sucesión de sinusoides de frecuencia múltiples a la fundamental. El circuito equivalente de una carga no lineal se representa mediante una sucesión en paralelo de fuentes de corriente una por cada frecuencia armónica.

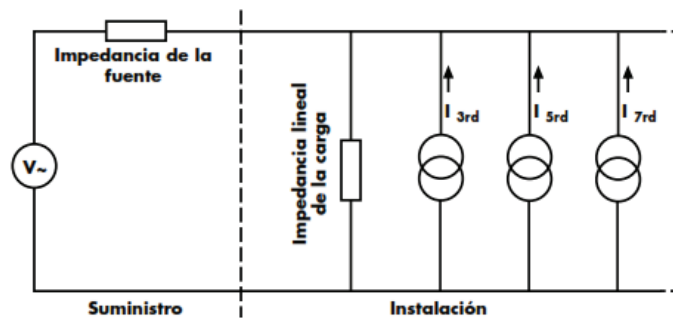


Figura 5.4: Circuito equivalente de una carga no lineal

Esta suma sucesiva de fuentes con amplitud y frecuencia variable está basada en las ecuaciones de series de Fourier, que se describen a continuación:

Siendo $f(t)$ una señal periódica, esta función se puede describir de la siguiente manera:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{2\pi n}{T}t\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n}{T}t\right) \right] \quad (5.1)$$

Dónde:

$$\begin{aligned}
 a_0 &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt \\
 a_n &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) * \cos\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) dt \\
 b_n &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) * \sin\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) dt
 \end{aligned} \tag{5.2}$$

Siendo:

$f(t)$: señal total descompuesta

T : período de la señal total

a_0, a_n, b_n : coeficientes de Fourier

De acuerdo a los datos obtenidos del analizador armónico se obtendrá la amplitud de cada armónico para crear la carga no lineal equivalente, de ser el caso se pueden añadir cargas extras a parte de las medidas por el analizador, pudiendo realizar un estudio de expansión de carga.

Para el caso de los transformadores trifásicos se debe hacer la conexión de tres cargas similares cada una con sus armónicos correspondientes y desfasadas 120 grados una de otra, en éste caso se toma como referencia a la fase A. Las cargas pueden ser conectadas en Delta o en Y según el análisis que se va a realizar, a continuación se muestra las conexiones que se deben hacer a las cargas individuales para formar una carga trifásica.



Figura 5.5: Carga trifásica en conexión Y

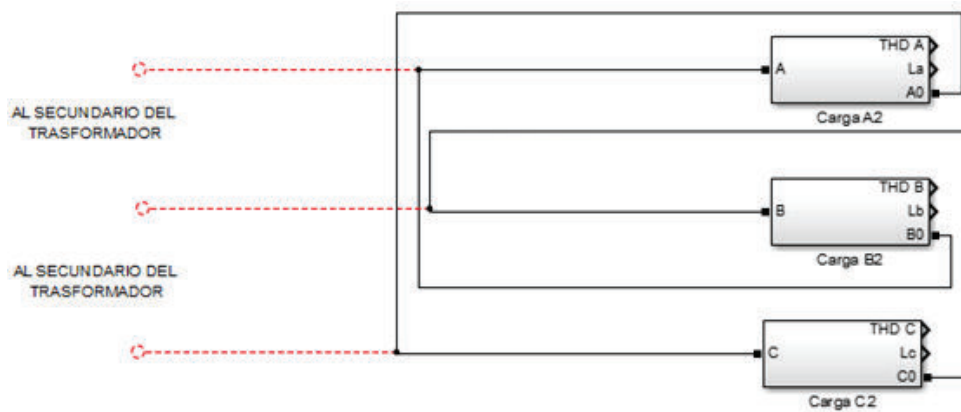


Figura 5.6: Carga trifásica en conexión Delta

5.3 BLOQUE DE CONTROL DEL INTERRUPTOR TERMOMAGNÉTICO



Figura 5.7: Control del interruptor termomagnético

El bloque de control de interruptor termomagnético eléctricamente no tiene conexión eléctrica, este bloque es el que permite la apertura del circuito de bajo voltaje mediante una señal anormal en el lado de la carga.

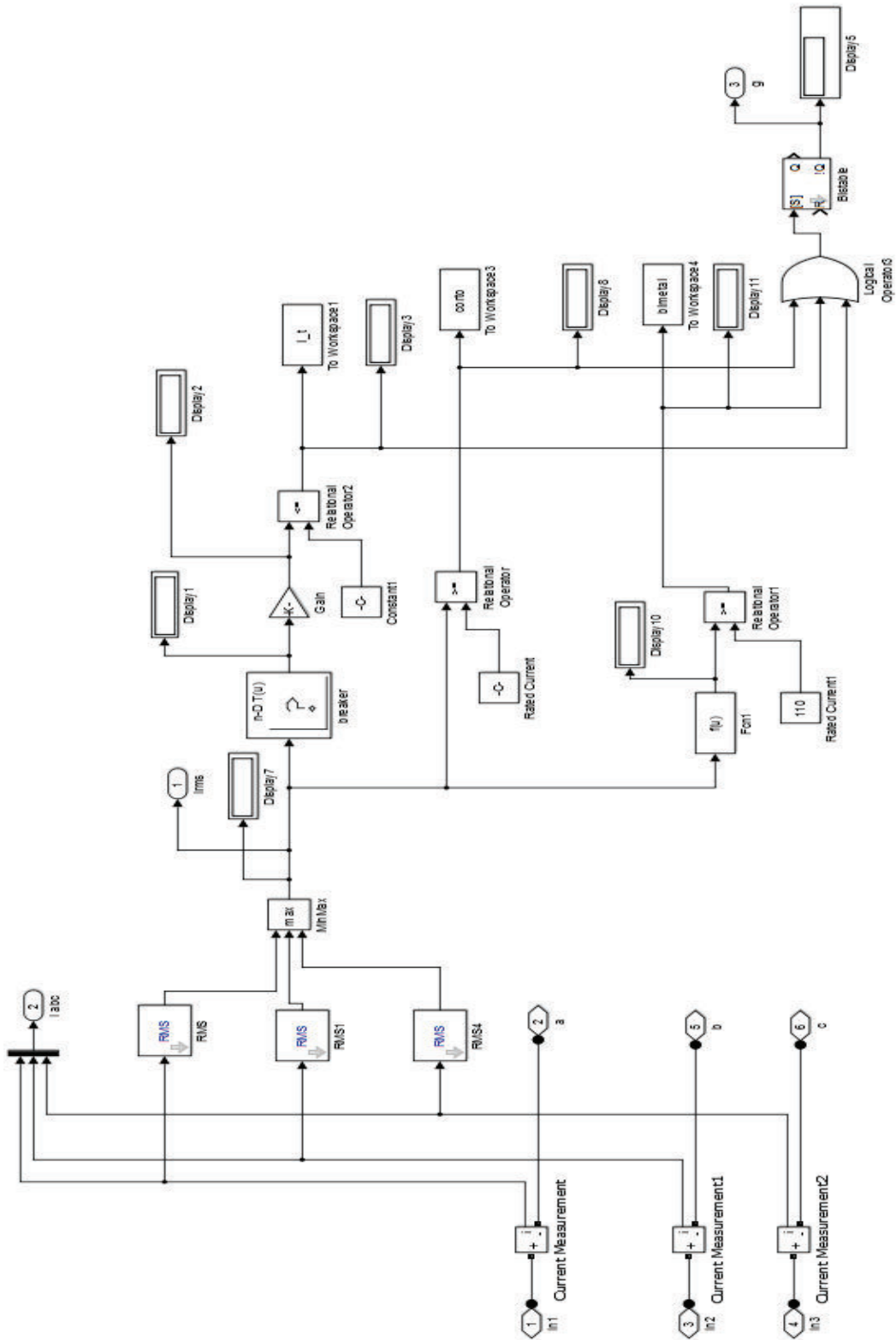


Figura 5.8: Esquema del control del ITM

Este bloque sirve como control de accionamiento del interruptor termomagnético, que desconectará al circuito secundario en presencia de alguna falla, se ha implementado tres controles para el accionamiento del interruptor termomagnético, por sobrecarga, por cortocircuito y por sobre elevación de temperatura, adicionalmente existe el derating de la curva del interruptor es decir la afectación de la temperatura sobre éste, a la entrada se tiene un amperímetro por fase anexo a estos un medidor RMS los cuales van dirigidos a un bloque el cual escoge el valor RMS máximo, este valor será la base para ingresar al sistema de control, a continuación se describen cada uno de estos controles.

En el ANEXO 1 ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA OTROS CASOS se encuentran ejemplos de la funcionalidad del control del interruptor termomagnético, para la simulación con cargas extras, ya que estas pueden provocar un fallo y generar la apertura del sistema de protección.

5.3.1 CONTROL POR SOBRECORRIENTE Y CORTOCIRCUITO

Este control se establece mediante la curva característica corriente-tiempo del interruptor termomagnético, además en esta curva se ha implementado también la de sobrecarga de la Figura 4.8, cabe destacar que esta curva esta implementada para el caso en el cual la palanca de sobrecarga (Figura 4.7) esté activada caso contrario la duración de sobrecarga no podría ser tan alta.

La magnitud de la corriente ingresa a la tabla y nos da el tiempo en el que debería abrirse el interruptor termomagnético con esa corriente, este tiempo pasa por la ganancia que es la de derating calculada anteriormente con la temperatura, compara con el tiempo de duración de la carga y si es mayor a este tiempo envía la señal de apertura para el interruptor. Si existe una corriente de carga mayor a la establecida en las tablas, o una corriente de cortocircuito, se dará la señal de apertura inmediata, sin esperar ningún tiempo de apertura para el interruptor termomagnético.

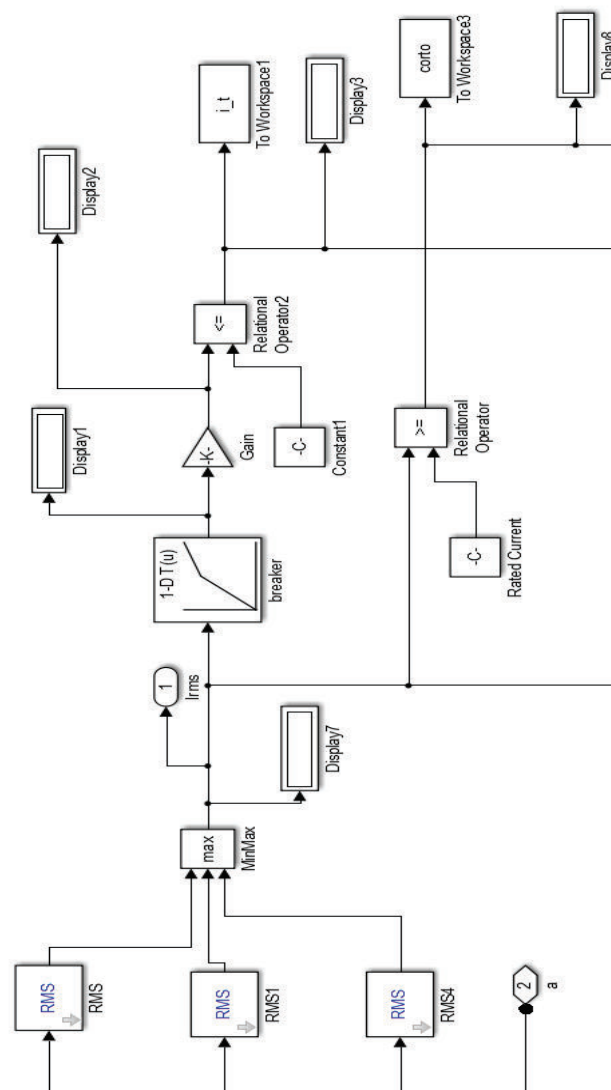


Figura 5.9: Control por sobrecorriente y cortocircuito

5.3.2 CONTROL POR TEMPERATURA

Este control está dado por una sobreelevación de temperatura causada por el bimetal tal como se explica en las ecuaciones (4.10) a la temperatura del bimetal se le suma la del ambiente y la temperatura del aceite, si ésta es mayor a la temperatura de apertura del bimetal (110°C), se enviará la señal de apertura al interruptor. La temperatura está dada en función de la corriente que circula por el

bimetal, es así que también sirve como protección redundante frente a cortocircuitos, ya que genera una temperatura alta y por ende enviará la señal de apertura.

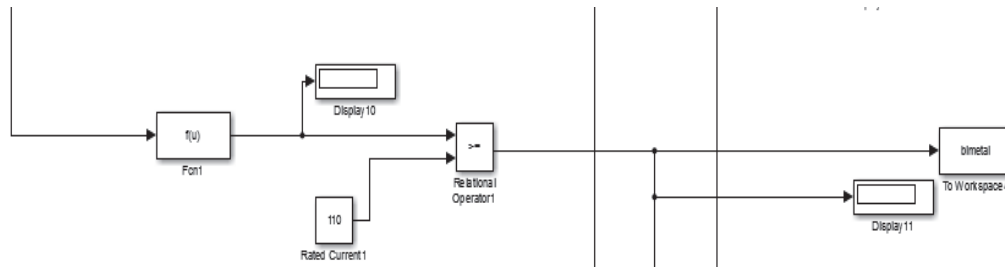


Figura 5.10: Control por temperatura

5.4 BLOQUE MEDIDOR

El bloque de medición creado, parte de diferentes elementos que ofrecen las librerías de Simulink.

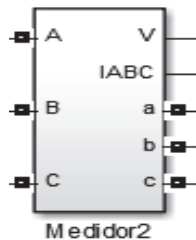


Figura 5.11: Medidor Implementado

Los bloques medidores permiten tomar datos de entrada y salida, a diferencia del medidor convencional que viene por defecto en el Simulink, este cuenta con medidas de corriente y voltaje en función del tiempo y valores RMS, además de potencias del transformador.

5.5 ESQUEMA GENERAL

El esquema general está representado por todos los bloques que conforman el programa de Simulink, y los ficheros con los cuales se realizan los diferentes cálculos y presentación de resultados, a continuación se muestra el esquema general.

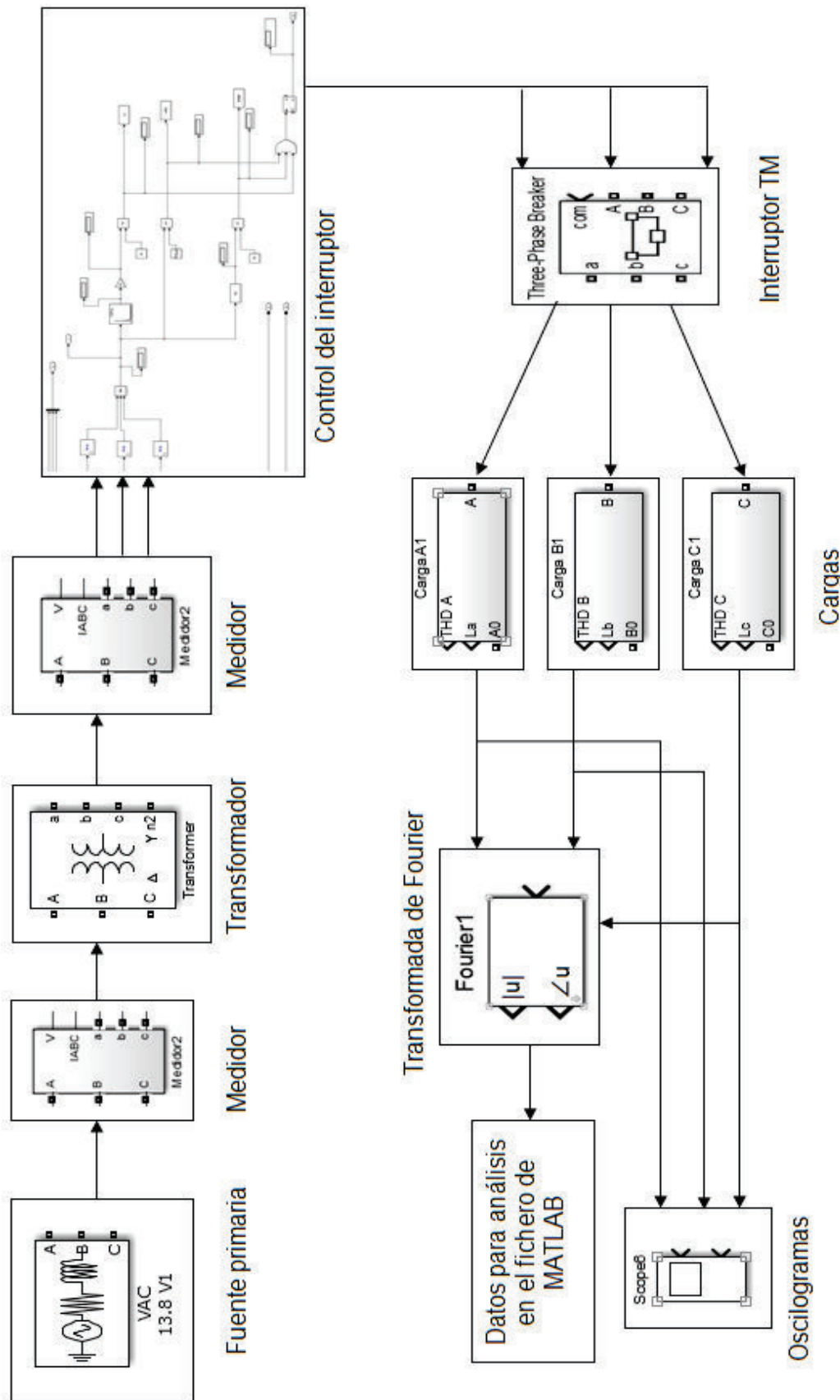


Figura 5.12: Esquema general de simulación

5.6 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA

5.6.1 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA GENERAL

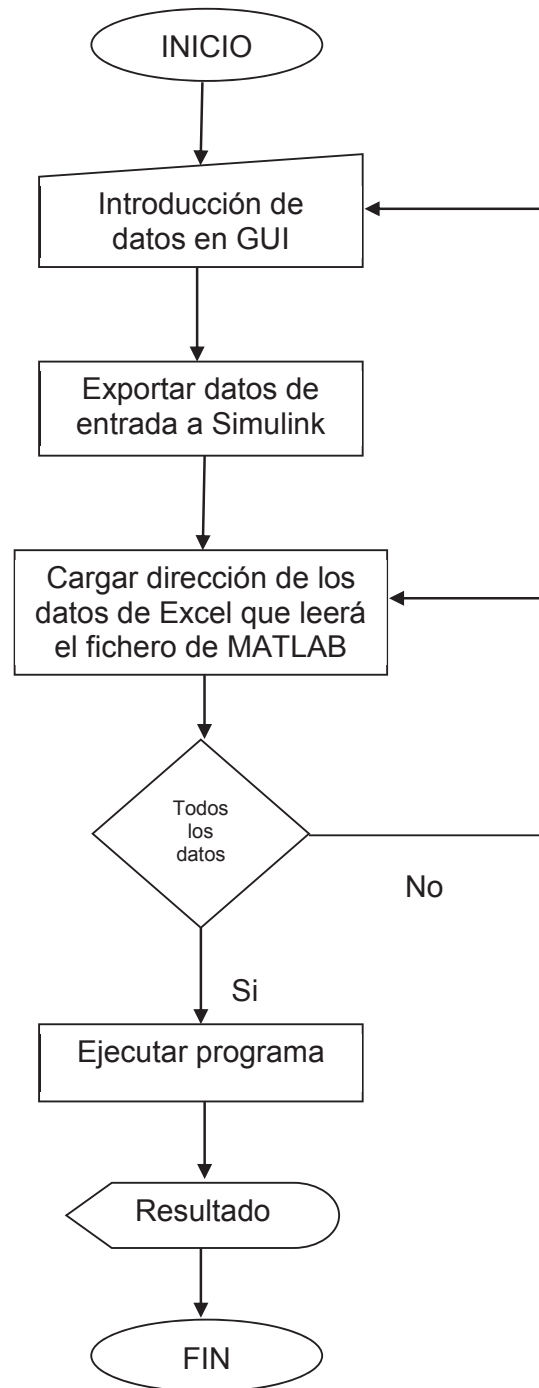
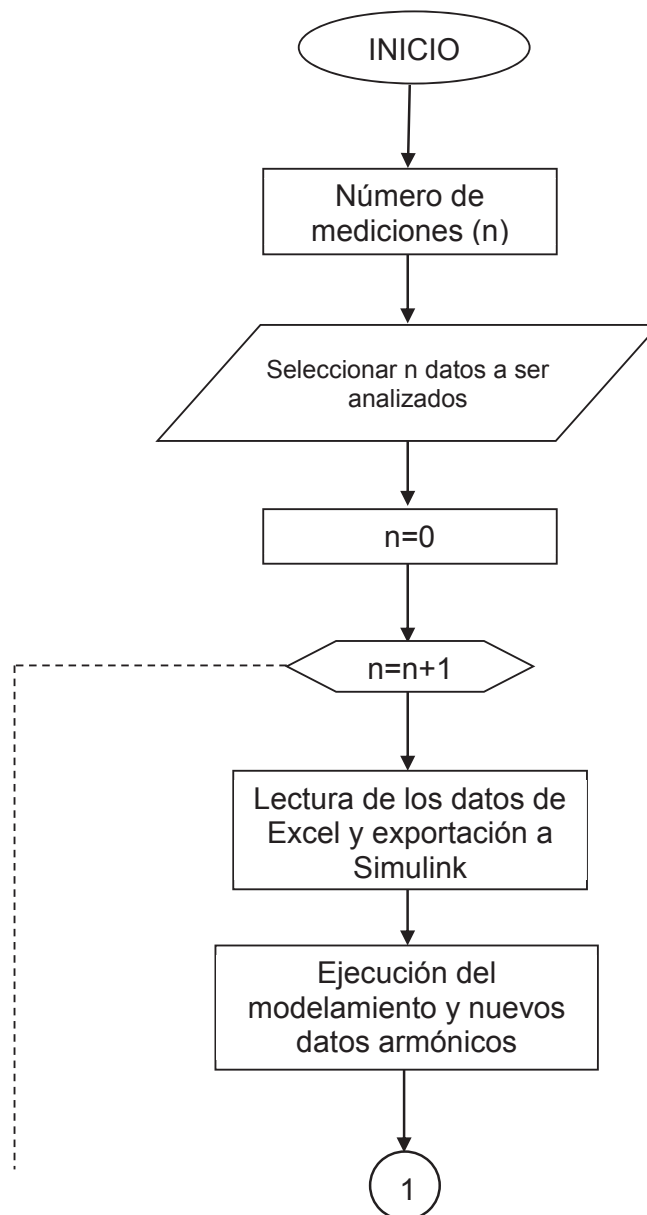
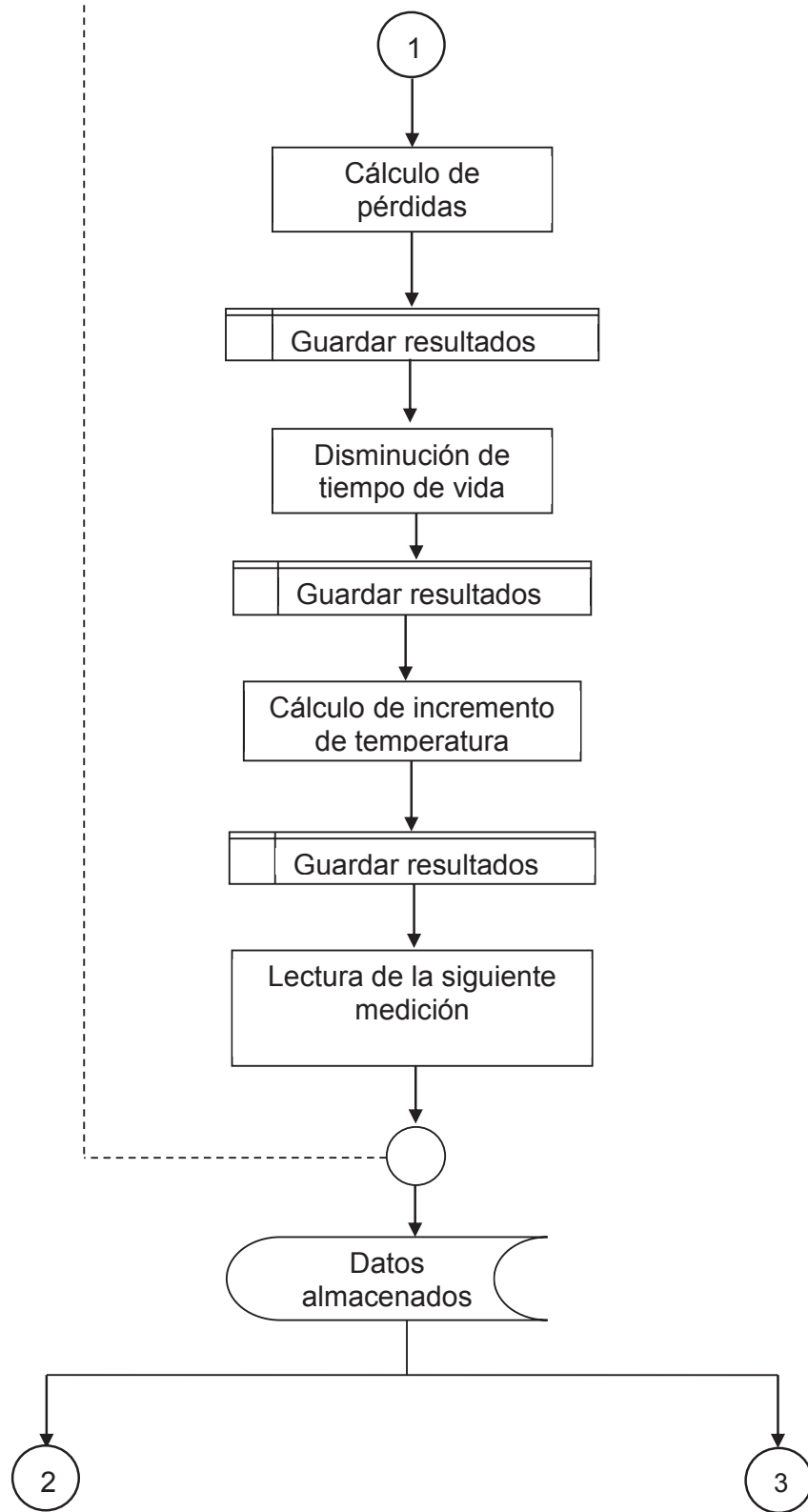


Figura 5.13: Diagrama de flujo del programa general

En éste diagrama general, se muestran los pasos que se ejecutarán para la obtención de resultados, las etapas para la correspondiente ejecución son: el ingreso de datos en la interfaz de usuario, la exportación a los respectivos bloques de Simulink para la ejecución del programa, la ruta del archivo de Excel, y por último comprobar que los datos de entrada al programa estén debidamente cargados. Una vez comprobado lo anterior, los datos serán leídos uno por uno y procesados para obtener los resultados finales.

5.6.2 DIAGRAMA DE FLUJO DE LA EJECUCIÓN DEL PROGRAMA





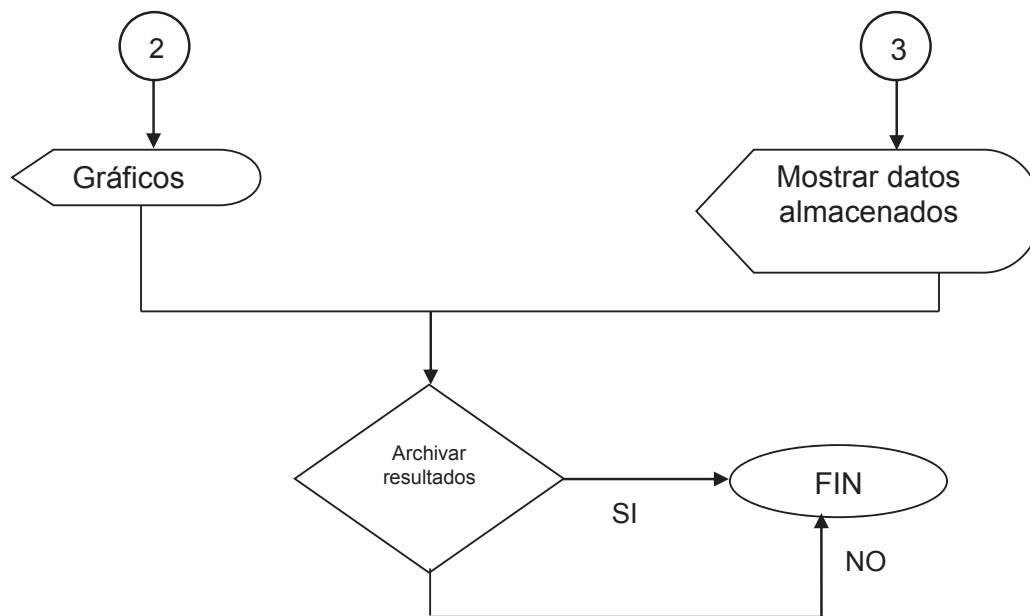


Figura 5.14: Diagrama de flujos para la ejecución del programa

Este diagrama de flujo muestra la ejecución del programa luego de la lectura de datos y posterior exportación hacia un archivo de Excel. Luego de estos pasos previos el usuario puede elegir cuantos datos tomados por el analizador serán procesados por el programa.

El programa ejecutará uno por uno los datos tomados por el analizador, de preferencia en un periodo de 24 horas según indica la norma IEEE Std C57.91-1995, estos datos se exportan a cada fuente de Simulink y se ejecuta el modelo, obteniendo nuevos datos armónicos en caso de que se agregue carga extra a la información del analizador. Con estos nuevos datos armónicos por fase se realiza los cálculos que se plantearon en el proyecto, como pérdidas, sobreelevación de temperatura, pérdida de vida, etc. causada por los armónicos, estos datos se irán guardando conforme sean calculados. Una vez terminado este proceso con los primeros datos del analizador se continúa con los siguientes hasta llegar a los “n” datos que se serían analizados. Al final con los datos guardados, se puede visualizar gráficamente los resultados, o en una lista de los mismos, estos podrán ser guardados si así lo desea el usuario.

CAPÍTULO VI

ESTUDIO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se dará una breve explicación de los parámetros que se debe seguir para realizar un estudio en cualquier transformador, desde el ingreso de los datos adecuados hasta la obtención y análisis de cada uno de los resultados.

6.1 PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR UN ESTUDIO

6.1.1 INTRODUCCIÓN AL PROGRAMA

El programa está conformado por procesos de envío y recepción de datos desde los ficheros de programación a Simulink y viceversa, haciendo que los datos sean generados y guardados para luego ser exportados a Excel y mostrar sus resultados.

La página principal que se muestra al inicio del programa es la siguiente:



Figura 6.1: Ingreso de datos principales del transformador

En esta primera ventana se debe elegir el tipo de transformador que va a ser analizado.

- Tipo de transformador: monofásico o trifásico
- Tipo de protección: autoprotegido o normal

Posteriormente se deberá ingresar los parámetros básicos del transformador:

- Potencia
- Niveles de voltaje en los bobinados
- Resistencia de los bobinados
- Pérdidas técnicas
- Temperatura a la que se realizó la prueba
- Temperatura de la medición de armónicos
- Tiempo entre cada medición de carga
- Número de datos que van a ser analizados

Figura 6.2: Ventana de ingreso de datos

A continuación se selecciona el archivo que carga los datos de los armónicos, el cual nos permite elegir un archivo en particular del transformador que va a ser analizado. Una vez ingresados los datos preliminares se ejecuta el programa el cual extrae los datos del analizador medición por medición y los exporta a los diferentes bloques de Simulink.

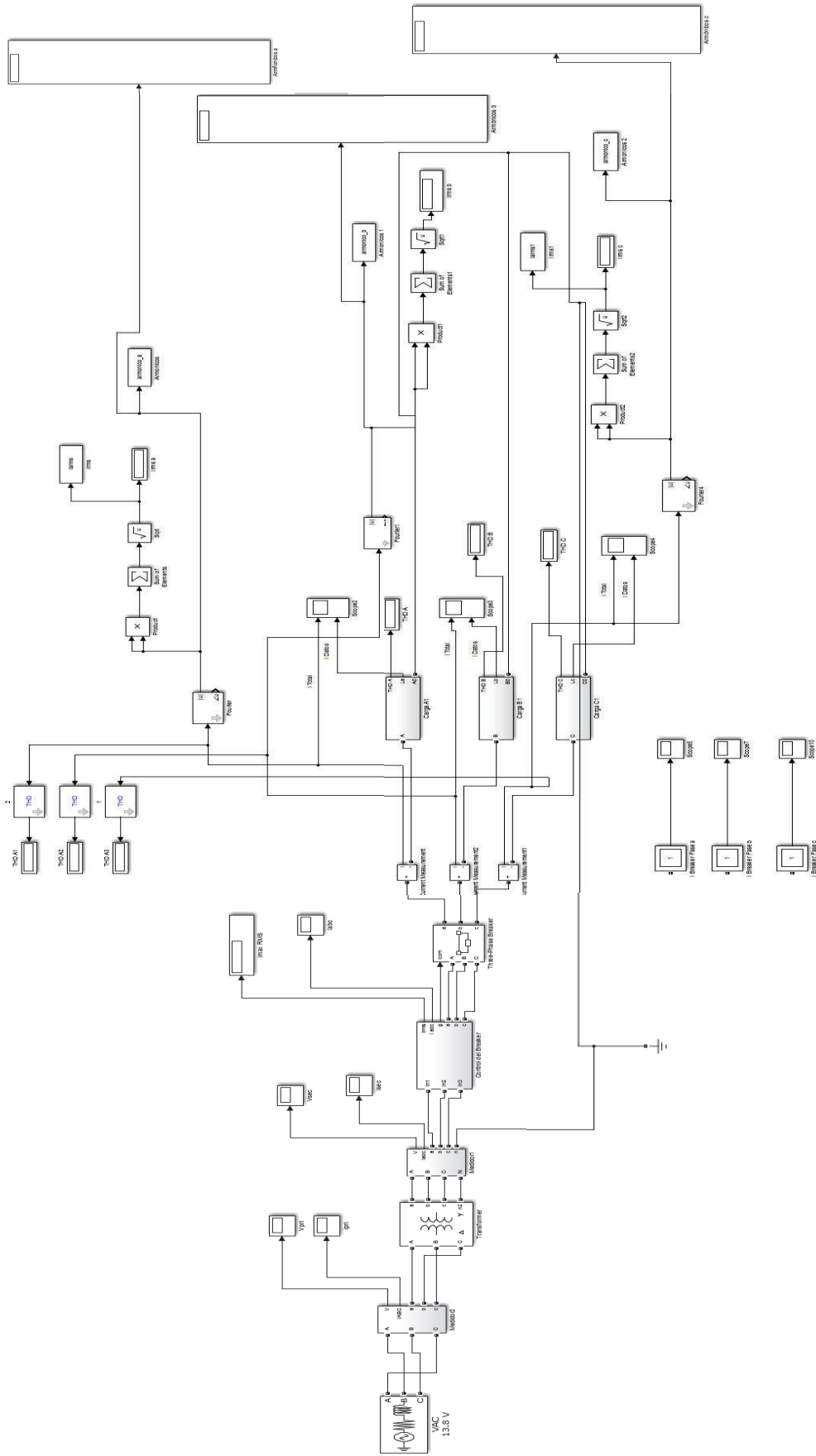


Figura 6.3: Modelo del transformador en Simulink

Con cada uno de los datos de medición se ejecuta el modelo en Simulink, ya sea solo con las cargas registradas en el analizador o con cargas extras que pueden ser añadidas por el usuario, si no existen cargas extras los datos de los armónicos serán los mismos que obtuvo el analizador de red, el esquema para la obtención de armónicos se muestra en la Figura 6.4.

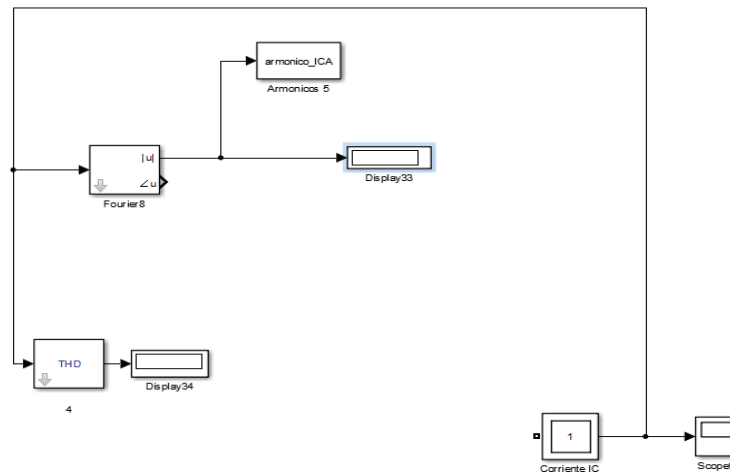


Figura 6.4: Bloque de obtención de armónicos

Luego de adquirir los resultados de los armónicos estos serán exportados como datos al programa del fichero, el cual determina las pérdidas, elevación de temperatura, y deterioro de tiempo de vida, causadas por la inclusión de armónicos en el sistema, y si es el caso la señal de apertura del interruptor termomagnético.

6.1.2 VISUALIZACIONES Y RESULTADOS OBTENIDOS

En el programa se obtienen visualizaciones de datos y resultados, se puede obtener visualizaciones de armónicos por fase, mientras que los resultados que se tiene del programa son:

- Potencias de pérdidas debido a armónicos
- Gráfico en el dominio del tiempo de las pérdidas
- Temperatura de elevación del transformador
- Disminución del tiempo de vida
- Datos generales

6.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se presenta cada uno de los resultados que se obtienen del programa.

6.2.1 ARMÓNICOS POR FASE

Los armónicos por fase pueden ser listados o pueden presentarse en un gráfico de barras de acuerdo a la interpretación que le parezca más adecuada al usuario, además, estos datos también pueden ser exportados a un archivo de Excel para su base de datos. Cabe destacar que se presenta el armónico más alto por cada fase, en un diagrama de barras.

6.2.2 POTENCIA DE PÉRDIDAS DEBIDO A ARMÓNICOS POR FASE

Se presentan cuadros de resultados de las pérdidas que provocan la presencia de armónicos en el sistema, así como de las pérdidas sin armónicos. Estos datos se presentan en un diagrama comparativo de estos dos valores.

Se realiza una curva de pérdidas con cada uno de los resultados de las lecturas de armónicos, esta curva puede ser visualizada en la máscara de resultados del GUI. Además se muestra el porcentaje de incremento de pérdidas debido a corrientes armónicas con relación a una carga sin armónicos.

6.2.3 TEMPERATURA DE ELEVACIÓN DEL TRANSFORMADOR

Consta de dos resultados de temperatura, del punto más caliente del transformador, y la temperatura del punto superior del aceite, estas dos temperaturas son obtenidas para las cargas del transformador con y sin armónicos, haciendo una curva comparativa de cada una de éstas.

6.2.4 DISMINUCIÓN DEL TIEMPO DE VIDA

Se muestra FAA del transformador afectado por los armónicos, así como el porcentaje de deterioro de tiempo de vida afectado en el transformador.

6.3 EJEMPLOS DE CASO DE ESTUDIO

6.3.1 TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

A continuación se presenta un caso de estudio de un transformador trifásico Dyn5 con los siguientes datos:

Nº de transformador:	618
Potencia:	112.5 kVA
Alto voltaje:	13800 V
Bajo voltaje:	120/208 V
Resistencia de AV	H1-H0: 16.86 Ω H2-H3: 13.23 Ω H3-H1: 17.8 Ω
Resistencia de BV	X1-X0: 0.0027 Ω X2-X0: 0.0031 Ω X3-X0: 0.0025 Ω
Prueba de CA	342 W
Prueba de CC	1270 W
Temperatura de prueba	18 °C

El transformador se ubica en el sector de Ficoa una parte comercial que presenta problemas de cargas armónicas. Se toman los datos armónicos desde el 02/09/2014 al 09/09/2014, estas mediciones se hacen en periodos de 10 minutos, en total 144 datos para completar la carga diaria según especifica la norma IEEE Std. C57.91-1995.

Una vez ejecutado el programa los resultados obtenidos para el transformador son los siguientes:

ARMÓNICOS DE CORRIENTE A			
h	Fase a	Fase b	Fase c
1	172.99730	237.9963	222.6966
2	0	0	0
3	27.15716	23.0828	25.8296
4	0	0	0
5	10.20289	7.3752	10.0177
6	0	0	0
7	6.74171	5.9454	2.8928
6	0	0	0
9	4.14651	2.1395	2.0019
8	0	0	0
11	3.10811	2.1379	0.8892
12	0	0	0
13	2.24281	1.4240	1.7768
14	0	0	0
15	1.72373	0.2371	0.4440
16	0	0	0
17	0.51616	0.0003	0,4433
18-49	0	0	0

Tabla 6.1: Armónicos producidos por la carga

A continuación se muestra los gráficos de barras de cada uno de los armónicos por fase.

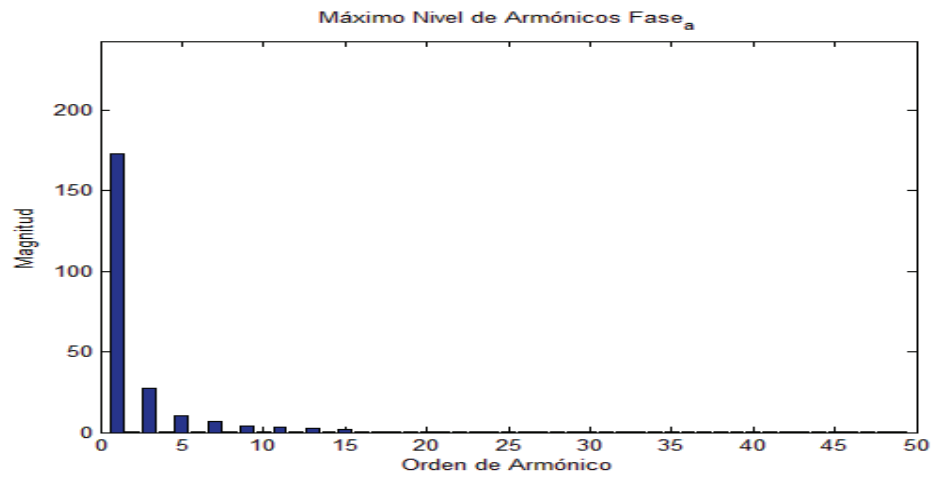


Figura 6.5: Armónicos máximos en la fase a

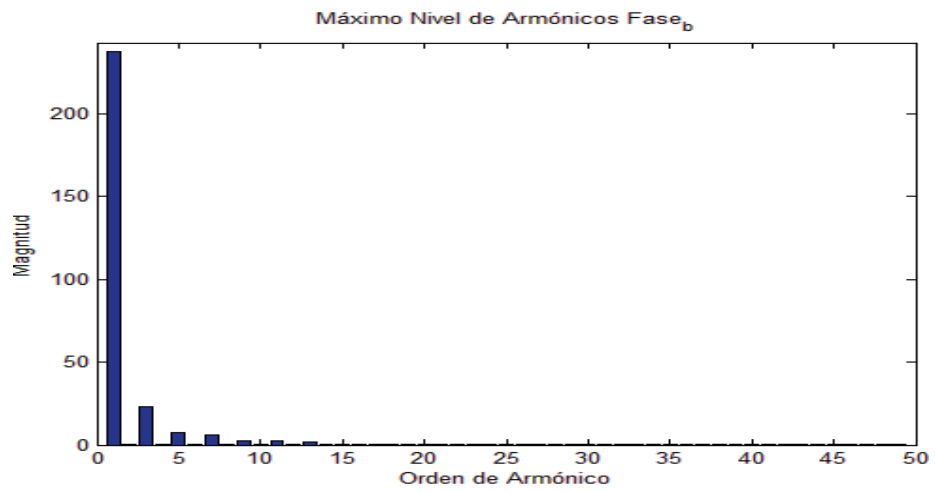


Figura 6.6: Armónicos máximos en la fase b

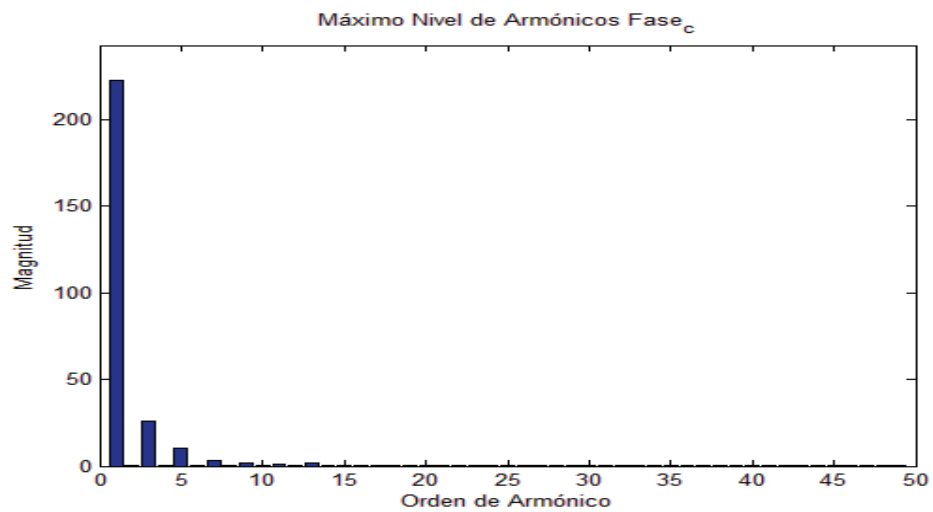


Figura 6.7: Armónicos máximos en la fase c

En el siguiente análisis se muestran los datos de temperatura con y sin armónicos junto con las pérdidas en el transformador en ambos casos, a continuación se muestran resultados obtenidos para un caso en particular:

Tabla de datos para la medición 49 con 56% de cargabilidad		
Parámetro	Con Armónicos	Sin Armónicos
Temperatura superior del aceite °C	28.91	27.06
Temperatura del punto más caliente °C	59.19	56.48
Pérdidas en el transformador W	1134.9	1044.9

Tabla 6.2: Comparación de parámetros con y sin armónicos

En las siguientes gráficas se observan las temperaturas del transformador en los caso de una carga con y sin armónicos, esta información se contrasta con el gráfico de la cargabilidad del transformador, simplemente para visualizar una relación en la que a mayor carga mayor elevación de temperatura.

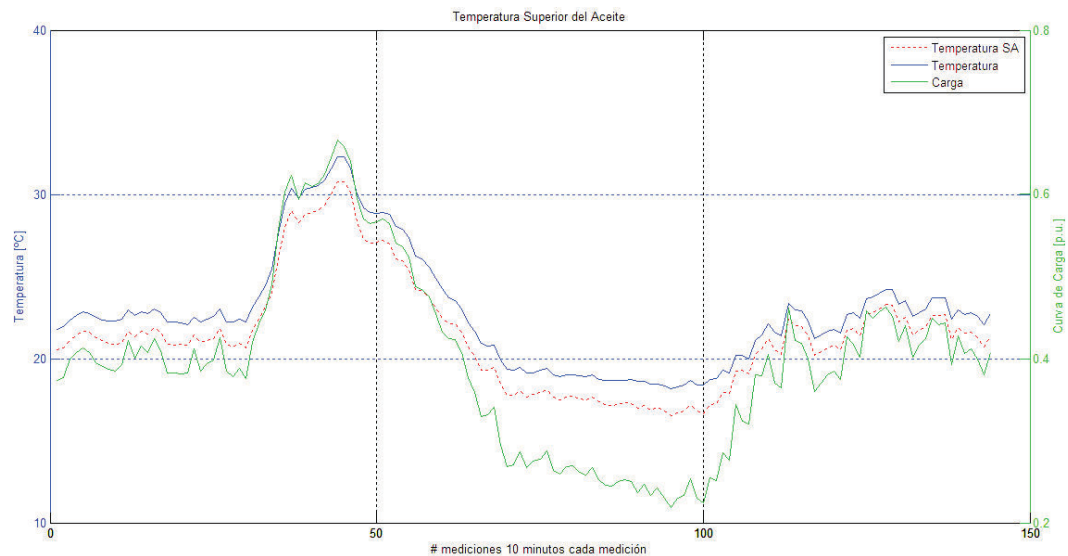


Figura 6.8: Temperatura superior del aceite

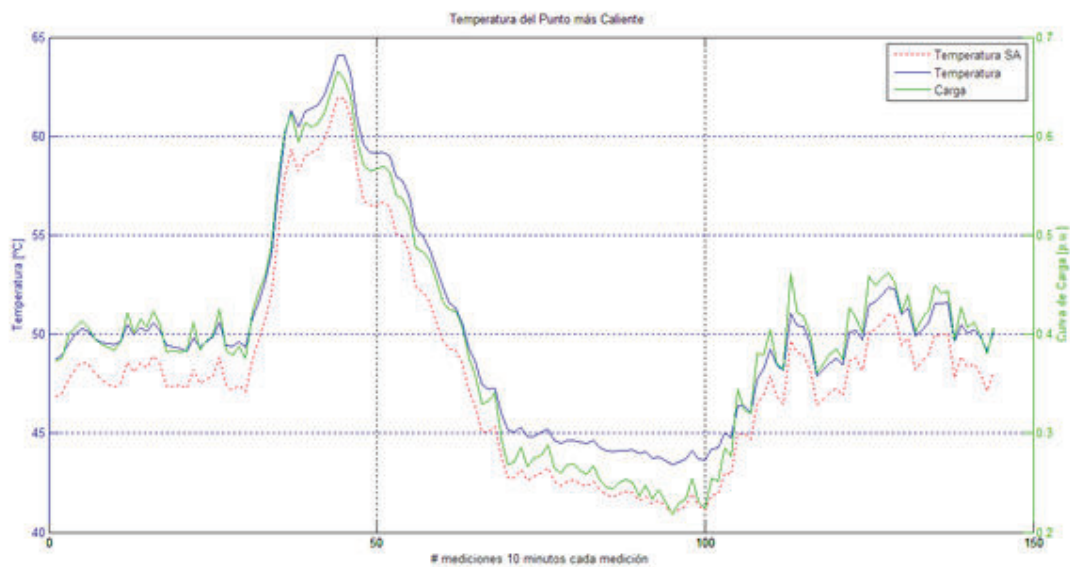


Figura 6.9: Temperatura del punto más caliente

También se muestran las pérdidas del transformador con y sin carga armónica, se puede observar que con la carga armónica las pérdidas son mayores.

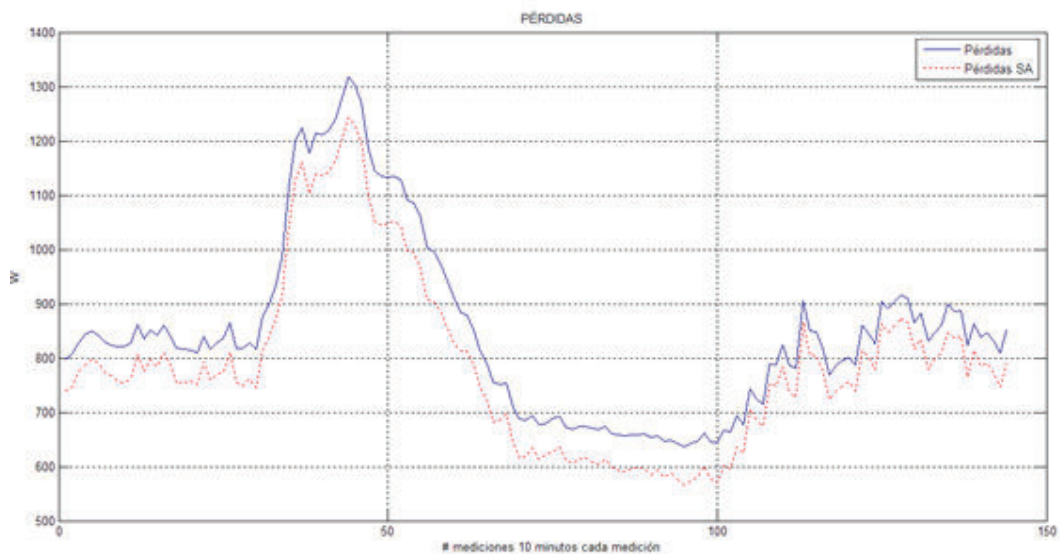


Figura 6.10: Comparación de pérdidas en el transformador

El análisis se realiza para un período de 24 horas, como se puede apreciar la variación de la temperatura depende directamente del comportamiento de la carga, es decir a mayor carga mayor temperatura y viceversa. Las pérdidas

también aumentan, en el caso de cargas armónicas las pérdidas son mayores en el transformador, también es destacable la disminución del tiempo de vida del transformador con relación a una carga sin armónicos.

Por último se muestran datos con relación a la afectación que producen los armónicos en el transformador como la reducción del tiempo de vida y el factor K, se reduce también la cargabilidad haciéndolo capaz de trabajar al 97.22% en promedio con carga armónica, y no a plena capacidad, y por último el aumento de porcentaje de pérdidas, en el caso de carga armónica éstas pérdidas aumentan un 7.81 % en promedio con relación a una carga sin armónicos.

A continuación se presenta un cuadro detallado de estos resultados.

Parámetro		
Disminución del tiempo de vida con armónicos [%]	9.6923x10 ⁻⁴	
Disminución del tiempo de vida sin armónicos [%]	7.1151x10 ⁻⁴	
Incremento con armónicos [%]	25.49	
Factor K	Max	2.74
	Med	1.482
	Min	1.11
Porcentaje de cargabilidad [%]	Max	99.34
	Med	97.22
	Min	91
Aumento de las pérdidas [%]	Max	12.55
	Med	7.81
	Min	6.03

Tabla 6.3: Tabla comparativa de resultados

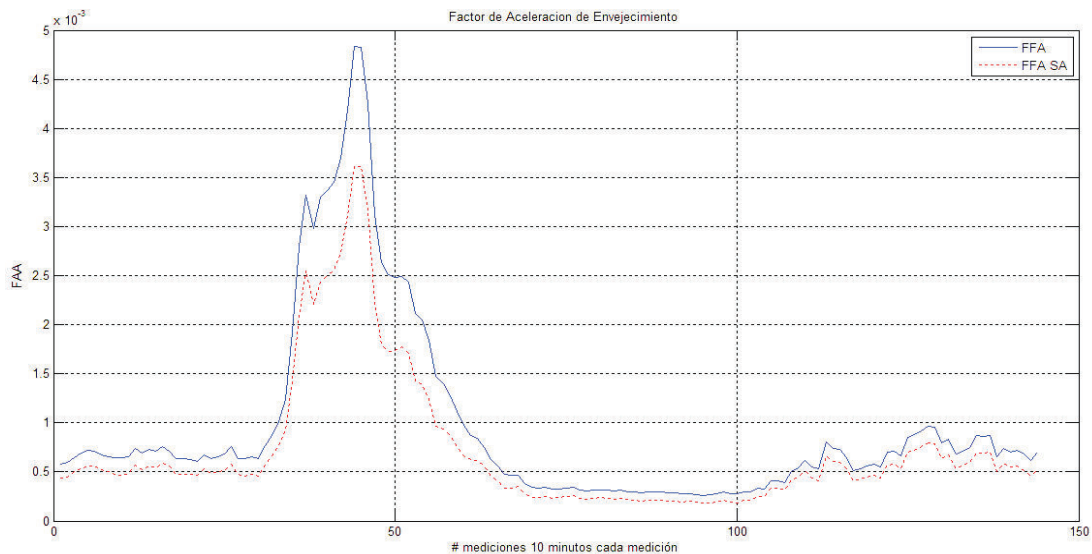


Figura 6.11: Comparación del FAA

6.3.2 TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

A continuación se presenta el caso de estudio de un transformador monofásico con los siguientes datos:

Nº de transformador:	5577
Potencia:	50 kVA
Alto voltaje:	7968 V
Bajo voltaje:	120/240 V
Resistencia de AV	H1-H0: 4.57 Ω
Resistencia de BV	X1-X3: 0.0047 Ω
Prueba de CA	176 W
Prueba de CC	425 W
Temperatura de prueba	19 °C

El transformador se ubica en el sector de Ficoa una parte comercial que presenta cargas armónicas. Se toman los datos armónicos de desde el 06/08/2014 al 13/08/2014, éstas mediciones se hacen en periodos de 10 minutos, de estos datos se toma una muestra de un día que es lo que sugiere la norma IEEE Std. C57.91-1995 para el estudio. Una vez ejecutado el programa se pudo apreciar los siguientes resultados:

A continuación se muestra los datos de listado de armónico máximo junto con su gráfico de barras por fase:

ARMÓNICOS DE CORRIENTE A		
h	Fase a	Fase b
1	73.6988	93.0985
2	0	0
3	5.0845	5.21278
4	0	0
5	1.6206	2.7917
6	0	0
7	1.6936	2.41851
8	0	0
9	0.8829	1.02244
10	0	0
11	0.3675	0.37136
12	0	0
13	0.5142	0.37108
14	0	0
15	0.5137	0.09238
16	0	0
17	0.2194	0.09199
18	0	0
19	0.1458	0.09180
20-49	0	0

Tabla 6.4: Armónicos de corriente por fase

Gráfico de barras de las mayores corrientes armónicas que soportó en transformador.

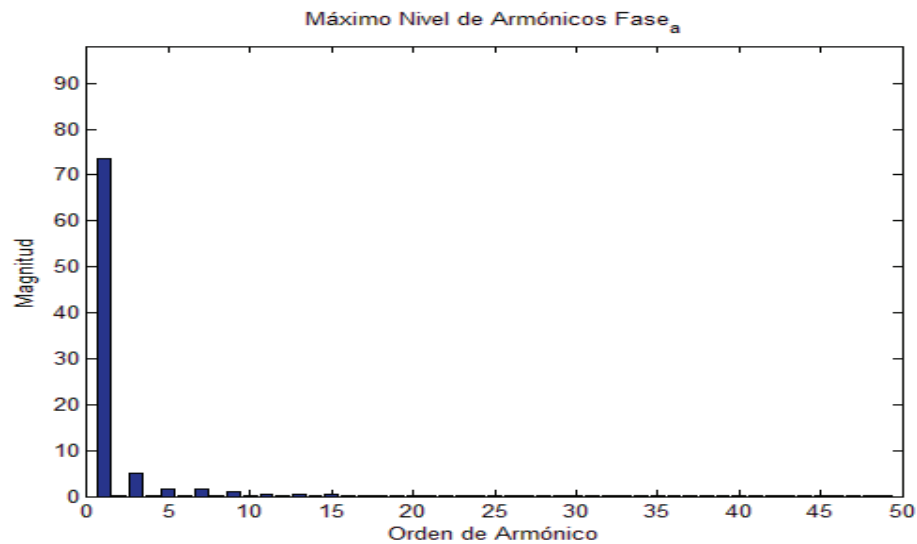


Figura 6.12: Armónicos máximos en la fase a

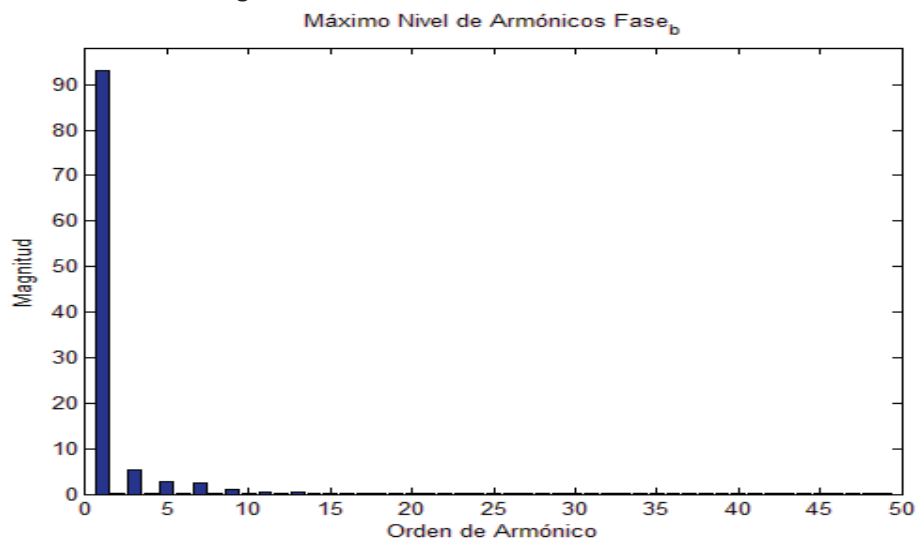


Figura 6.13: Armónicos máximos en la fase b

A continuación se muestran los datos térmicos y de pérdidas comparados con cargas armónicas y sin ellas, los resultados obtenidos para un caso en particular son los siguientes:

Tabla de datos para la medición 21 con 21% de cargabilidad		
Parámetro	Con Armónicos	Sin Armónicos
Temperatura superior del aceite °C	32.85	29.19
Temperatura del punto más caliente °C	61.09	55.72
Pérdidas en el transformador W	340.1	294.1

Tabla 6.5: Comparación de parámetros con y sin armónicos

Sin embargo también se puede visualizar la variación de estos datos conforme varía la curva de demanda, a continuación se apreciar el aumento de pérdidas, la elevación de la temperatura, y como este tipo de carga afecta a los componentes viéndose reflejado en la disminución del tiempo de vida del transformador.

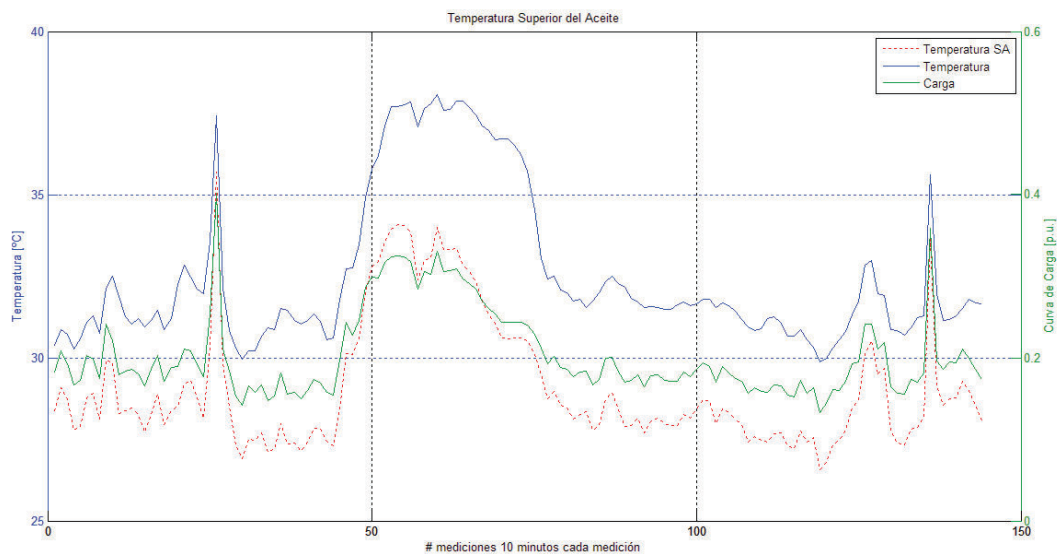


Figura 6.14: Temperatura superior del aceite

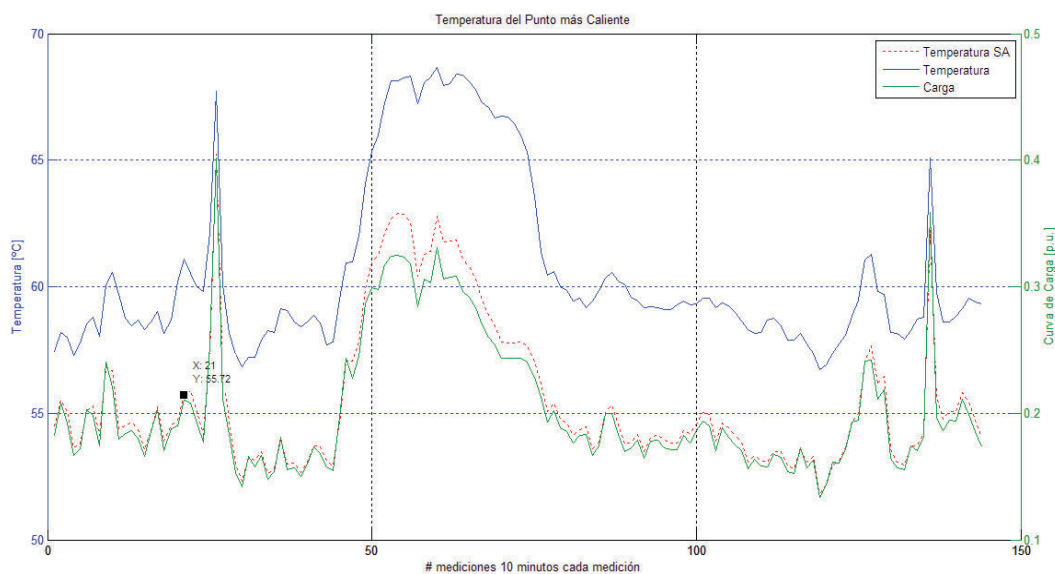


Figura 6.15: Temperatura del punto más caliente

A continuación se muestra el aumento de las pérdidas en el transformador por efectos de la carga armónica.

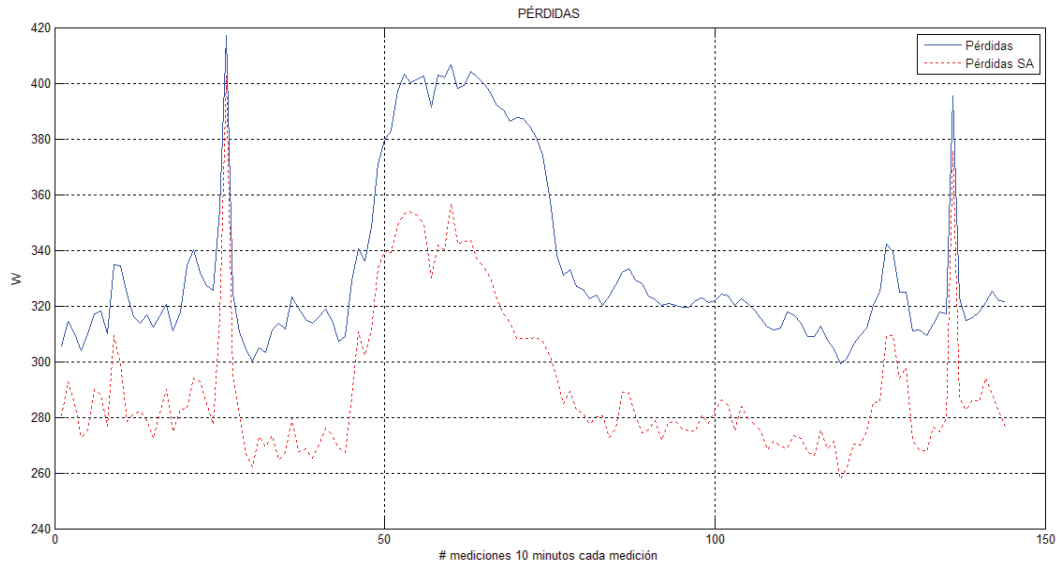


Figura 6.16: Pérdidas técnicas en el transformador

Por último se observa los datos que se obtienen del estudio de la curva de demanda, entre ellos el que se ve afectado por el tipo de carga es la disminución del tiempo de vida, se puede observar un aumento significativo en las pérdidas en el transformador, ya que con carga armónica este valor aumenta un 14.73% medio de su valor con carga sin armónicos.

Parámetro		
Disminución del tiempo de vida con armónicos[%]		3.4242×10^{-3}
Disminución del tiempo de vida sin armónicos[%]		1.6737×10^{-3}
Incremento con armónicos [%]		51.12
Factor K	Max	3.514
	Med	1.733
	Min	1.1
Porcentaje de cargabilidad [%]	Max	99.39
	Med	95.88
	Min	88.13
Aumento de las pérdidas [%]	Max	15.96
	Med	14.73
	Min	3.58

Tabla 6.6: Tabla comparativa de parámetros

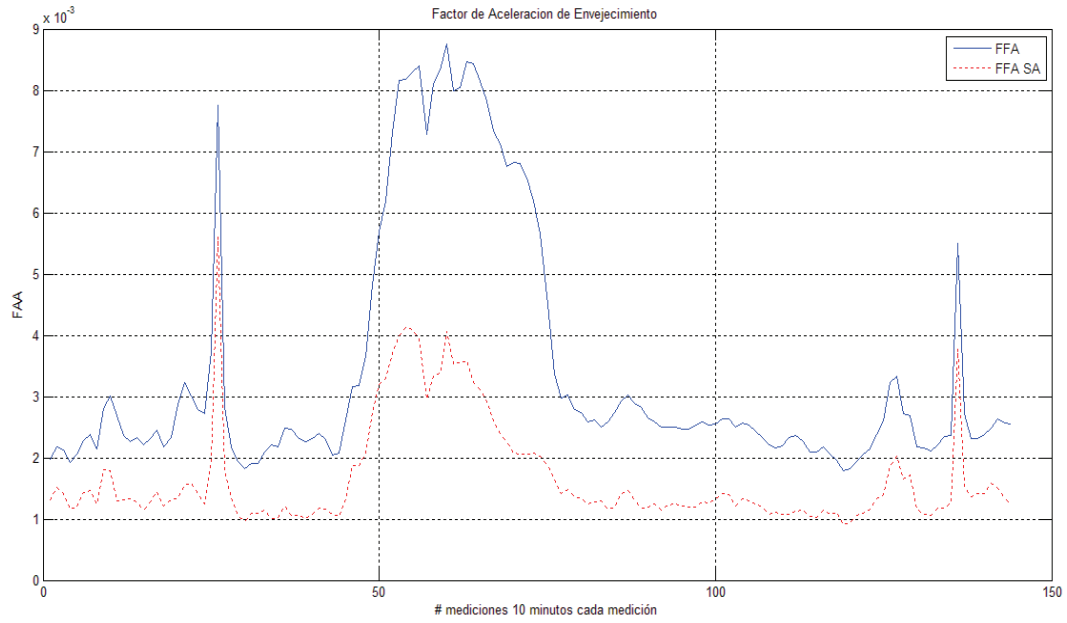


Figura 6.17: Factor de aceleración del envejecimiento

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

- Las empresas distribuidoras, en este caso particular la Empresa Eléctrica Ambato S.A., deben desarrollar estudios que permitan realizar una mejor administración de los transformadores de distribución, por cuanto los regímenes de operación se están alterando debido al incremento cada vez mayor de cargas armónicas que inciden en el régimen térmico del transformador. Por ello estos estudios deben enmarcarse en analizar el régimen de operación para proteger su vida útil y posibles fallas en los mismos, procurando mantener la continuidad del servicio para el usuario.

- De acuerdo al estudio realizado es conveniente diferenciar entre los diferentes tipos de transformadores (convencionales y autoprotegidos), ya que tienen características de protecciones diferentes sobresaliendo principalmente en la característica termomagnética de apertura frente a fallas, pudiendo ser causa de resultados erróneos al finalizar la ejecución del programa, y una posible mala interpretación de resultados y por ende de soluciones.

- Se comprobó que es importante realizar el estudio con datos de curva de demanda para 24 horas, ya que a más de cumplir con la norma IEEE Std C57.91-1995, se tiene una apreciación del comportamiento del transformador en el transcurso del día, y sería importante tomar como base un día cuyo registro de carga pueda ser comparable con los demás, es decir un día típico de carga y no uno en el cual el transformador podría estar sobrecargado, ya que los datos serían errados para su interpretación.

- Se concluye claramente que la carga armónica produce un incremento en la elevación de la temperatura del transformador y un incremento de pérdidas técnicas, por ende genera un mayor factor de disminución de vida, haciendo que la vida del transformador disminuya con respecto al mismo transformador alimentando una carga no armónica.
- Si se desea que el transformador trabaje dentro de su operación óptima con carga armónica, sin sobrecargar ningún elemento del mismo, se debe trabajar a una potencia menor a la nominal ya que los armónicos generan problemas ya antes mencionados que impiden que se pueda aprovechar en su totalidad la capacidad del transformador.
- Las temperaturas del transformador hacen que los elementos de protección también se vean afectados por la misma, ya que se genera un derating haciendo que estos elementos trabajen a una capacidad menor a la nominal, pudiendo operar a una corriente menor de la que debieran operar sin el exceso de temperatura causada por los armónicos.
- Los gráficos térmicos y de pérdidas obtenidos en este estudio nos dan una mejor idea del efecto que ocasionan los armónicos en el transformador, sin embargo estos no son los únicos efectos que causan sino también una mala calidad de energía.
- Aunque se haya realizado el modelamiento de la manera más cercana a la realidad, siempre será una aproximación debido a las múltiples variables que existen tanto térmicas, climáticas y eléctricas, éstas pueden ser caída de voltaje desde la subestación o caídas de voltaje momentáneas en los alimentadores, sin embargo es una muy buena aproximación para un análisis en estado estable que aporta con una idea del régimen de operación del transformador.
- Las temperaturas de carga normal de los transformadores no provocan una disminución considerable en el porcentaje de pérdida de vida de los

mismos, aún con la consideración del aumento de la temperatura debido a que dicho aumento no genera una temperatura comparable con la base de 110°C referidos a la norma, y aunque el porcentaje de pérdida no sobrepase el 0.0133 % de la norma, se puede observar que existe una reducción significativa en comparación al tipo de carga al que esté conectado el transformador.

7.2 RECOMENDACIONES

- Es recomendable que las pruebas de circuito abierto y corto circuito en el laboratorio de la EEASA, estén correctamente realizadas para cada uno de los transformadores y con todos los datos correctamente ingresados, ya que estos resultados, junto con los datos de carga del transformador son la base para el desarrollo del estudio aquí presentado y sus posteriores resultados.
- Se recomienda que el analizador de red instalado en el transformador tome la carga de por lo menos un día completo, para el desarrollo del estudio, y mucho mejor si es semanal pues se podrá hacer una comparación de curva de demanda, y escoger la que mejor convenga para el estudio.
- Es recomendable que cada cierto tiempo se realice un mantenimiento preventivo del transformador, sobre todo del líquido aislante y de la sujeción de herrajes internos, ya que estos también pueden presentar pérdidas debido a la sujeción, además con el ingreso de cargas armónicas el mantenimiento preventivo debe realizarse con mayor regularidad.
- Se debe tener cuidado en las horas pico de carga, ya que en estos ciclos se genera una mayor contaminación armónica y por ende sus efectos son más drásticos en esos momentos, pudiendo causar alguna falla en el transformador, de darse el caso es importante cambiar el transformador por

uno de mayor capacidad, o por uno que tenga un factor armónico K para soportar estos efectos.

- No solo las empresas de distribución deberían tener un estudio de comportamiento de transformadores frente a armónicos, también deberían realizar estos estudios los fabricantes, para realizar mejoras en la fabricación y en el tipo de material que se usa para su construcción, generando una mayor confiabilidad para el uso de los mismos con cargas armónicas.
- Para la selección de un transformador con factor K se debe tomar en cuenta el tipo de carga que se va a alimentar, si bien según la norma UL 1561-1994 ya se establecen estos factores para determinadas cargas, se puede usar el programa para simular la carga armónica conectada al transformador y junto con los demás datos necesarios para la ejecución, se obtendría el factor K como resultado final. Para esto no es necesario modelar en 24 horas, basta con ingresar el dato armónico de las cargas y ejecutar el programa.
- La distribución de energía es una inversión cuyo principal componente y de mayor costo es el transformador, por ende no se deben escatimar recursos para mejorar y protegerlo de problemas que pueden afectar su vida útil y problemas con la calidad de servicio final para el usuario.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. Toapanta, J J., «Aplicación del equipo MIT 520/2 en la prueba de aislamiento sólido para transformadores de distribución monofásicos y trifásicos en el laboratorio de pruebas de transformadores, con la elaboración de un programa de simulación», Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, 2012.
- [2] IEC 60085, «Electrical Insulation Termal Clasification.» 1994.
- [3] Reinoso, O, «Protección contra sobrecarga y determinación de pérdida de tiempo de vida en transformadores de distribución debido a sobrecargas», Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, 2011.
- [4] Pedro Avelino Pérez, *Transformadores de distribución: Teoría, cálculo, construcción y prueba*, Segunda. México DF: Reverte SA, 2011.
- [5] Alkargo, «Alkargo», 2015. [En línea]. Disponible en: <http://www2.alkargo.com/transformadores-estandar/>.
- [6] Magnetron, «Guía para transformadores auto protegido», 20015. [En línea]. Disponible en: <http://www.magnetron.com.co/magnetron/images/pdf/productos/autoprotegidos.pdf>.
- [7] I. E. T. R. AP&C, «Programa de ahorro de energía, “Distorsión Armónica”.» [En línea]. Disponible en: <http://watergymex.org/contenidos/rtecnicos/Optimizando%20la%20Operacion%20y%20el%20Mantenimiento/Distorsion%20Armonica.pdf>.
- [8] D. C. Copper Developmen Asociation, «Armónicos causas y efectos», 2011. [En línea]. Disponible en: <http://www.cmdearcos.es/wp-content/uploads/2013/04/Guia-Calidad-3-1-Armonicos.pdf>.
- [9] Dr. Gabriel Salazar, «Perturbaciones en redes eléctricas.» 2013.
- [10] SOLA HEVI-DUTY, «K-Factor harmonic transformer.» [En línea]. Disponible en: http://www.trups.com/images/Sola_K_Factor.pdf.
- [11] R. J. Ortiz F, «Metodologías para identificar fuentes armónicas en sistemas eléctricos», Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, 2007.
- [12] IEEE C57-110, «IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Current.» 1998.

- [13] ElectroMAgazine, «ElectroMagazine», 2015. [En línea]. Disponible en: <http://www.electromagazine.com.uy/cursos/>.
- [14] IEEE Std C57-91, «IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers.» 1995.
- [15] IEC 60076-7, «Power transformers-Part 7: Loading Guide for oil-immersed power transformer.» 2005.
- [16] IEC 60354, «Loading guide for oil immersed power transformers.» 1991.
- [17] ermco-eci, «ERMCO», *Ermco*, 2015. [En línea]. Disponible en: <http://www.ermco-eci.com/products#components>.
- [18] Dr Dib, «Quality Energy and Harmonics».

ANEXO 1

ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA OTROS CASOS

1.1 TRANSFORMADOR TRIFÁSICO CON CARGA EXTRA

Como se mencionó anteriormente el usuario puede agregar cargas extras si así lo desea, en este caso se agregará una carga armónica extra al modelo ya planteado, la carga es un rectificador de diodos trifásico.

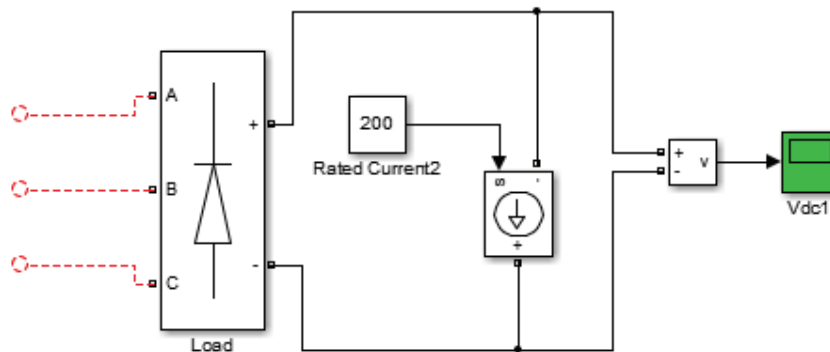


Figura A1.1: Carga armónica ¹

Para ésta simulación se usa los datos de medición de corriente del 3/09/2014 a las 12:40 (revisar en el Anexo digital la medición 144), y la carga armónica del convertidor trifásico de diodos presentada anteriormente.

Al ejecutar se obtienen nuevos datos armónicos de corrientes, a continuación se presentan dichos resultados.

¹ Carga del modelo de MATLAB "power_active_filter"

ARMÓNICOS DE CORRIENTE A			
h	Fase a	Fase b	Fase c
1	155.1784	239.7185	322.0241
2	0.0712	0.0744	0.0682
3	13.3596	26.6258	13.6058
4	0.0624	0.0300	0.0556
5	34.6073	38.7182	38.3223
6	0.0425	0.0667	0.0619
7	24.2959	25.2883	22.2398
8	0.0397	0.0568	0.0457
9	2.9187	10.1937	3.5492
10	0.0226	0.0230	0.0279
11	11.7084	5.4016	12.8589
12	0.0088	0.0054	0.0174
13	5.1126	7.9673	4.9834
14	0.0049	0.0112	0.0140
15	2.4274	3.2790	2.2850
16	0.0107	0.0146	0.0100
17	3.5824	0.9613	3.9695
18	0.0150	0.0056	0.0163
19	1.2486	2.6568	2.3696
20	0.0209	0.0293	0.0083
21	1.3385	2.3760	1.0322
22	0.0133	0.0280	0.0140
23	2.1830	0.2073	2.0253
24	0.0116	0.0135	0.0134
25	0.7376	1.5236	0.9338
26	0.0044	0.0069	0.0185
27	1.1510	1.7332	1.0515
28	0.0053	0.0116	0.0082
29	1.3228	0.5818	1.4870
30	0.0109	0.0065	0.0107

31	0.2327	0.6705	0.4597
32	0.0187	0.0090	0.0087
33	0.7473	1.0162	0.6570
34	0.0144	0.0239	0.0085
35	0.8079	0.5133	0.8904
36	0.0191	0.0236	0.0106
37	0.0438	0.2516	0.2278
38	0.0145	0.0130	0.0102
39	0.6863	0.7299	0.5832
40	0.0104	0.0090	0.0092
41	0.5832	0.5991	0.6810
42	0.0043	0.0032	0.0195
43	0.0897	0.0519	0.0520
44	0.0113	0.0072	0.0144
45	0.5118	0.4677	0.4933
46	0.0084	0.0125	0.0064
47	0.3408	0.4758	0.4385
48	0.0162	0.0283	0.0088
49	0.1160	0.1311	0.0320

Tabla A1.1: Armónicos generados con la carga extra

La conexión de una carga extra genera nuevas corrientes armónicas, así como una corriente total diferente a la ingresada por las mediciones, en los oscilogramas se puede visualizar las corrientes provocadas por las mediciones y la corriente total generada, a la misma vez que se observa el factor THD en ambos casos. A continuación se muestran claramente estos resultados.

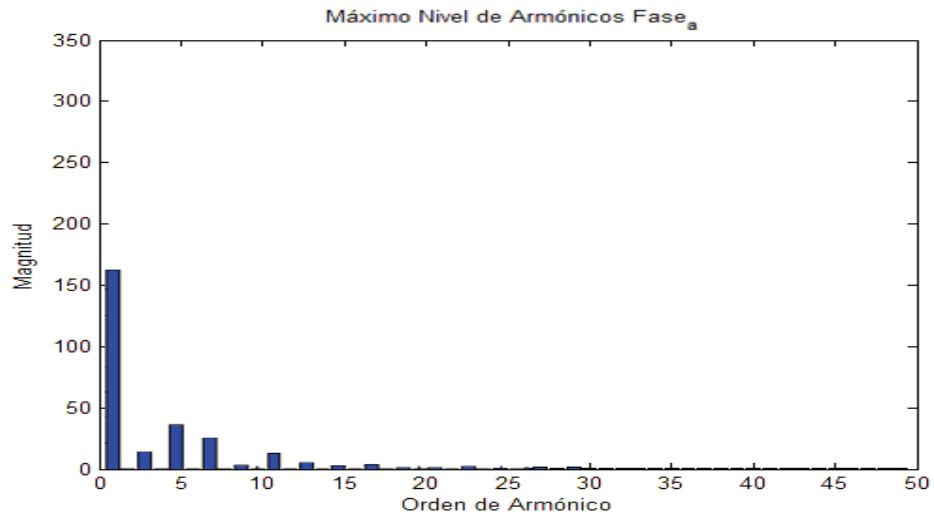


Figura A1.2: Armónicos de la fase a

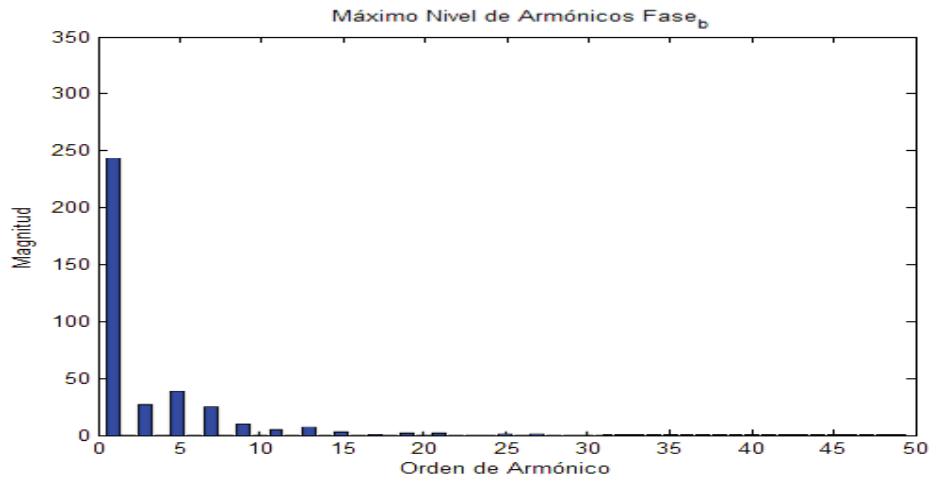


Figura A1.3: Armónicos de la fase b

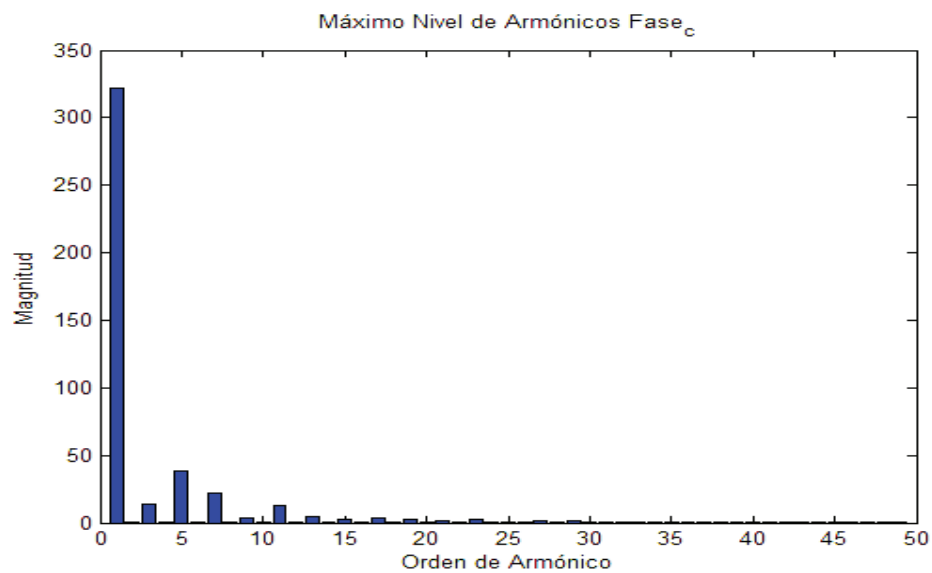


Figura A1.4: Armónicos de la fase c

A continuación se presenta los oscilogramas de cada una de las cargas, el oscilograma superior representa la carga total, mientras que la inferior representa a la carga armónica medida con el analizador de red.

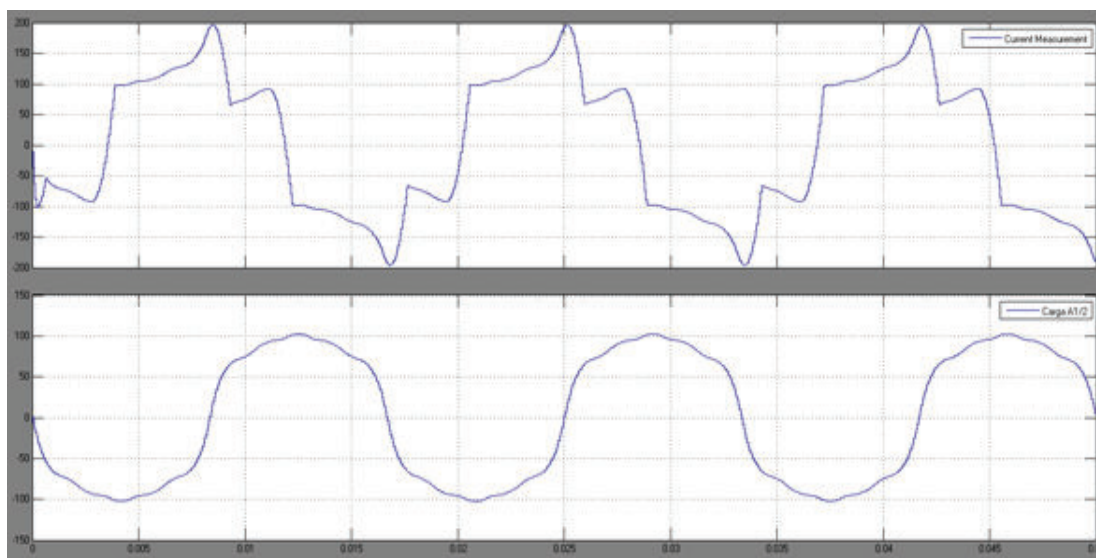


Figura A1.5: Oscilograma de la carga de la fase a

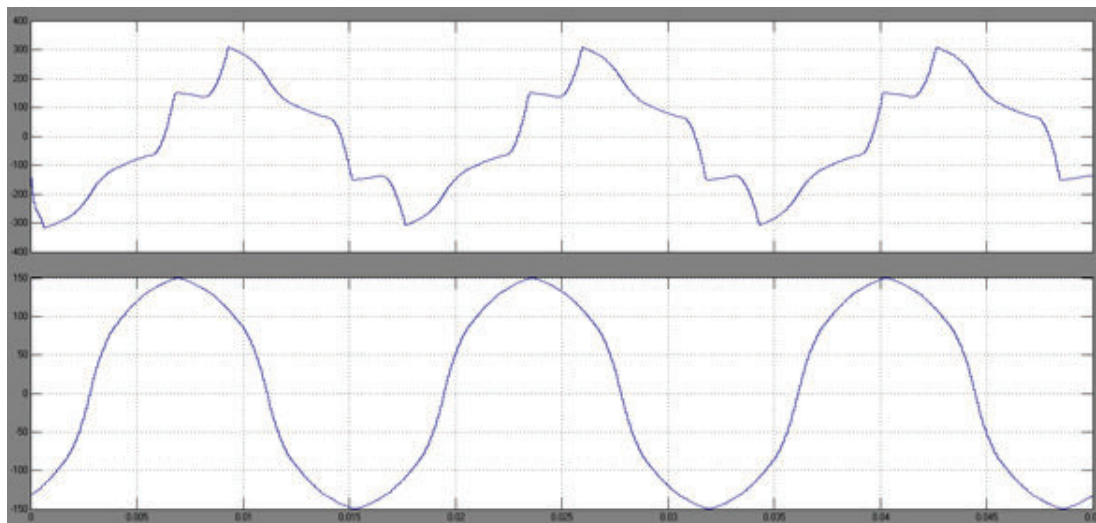


Figura A1.6: Oscilograma de la carga de la fase b

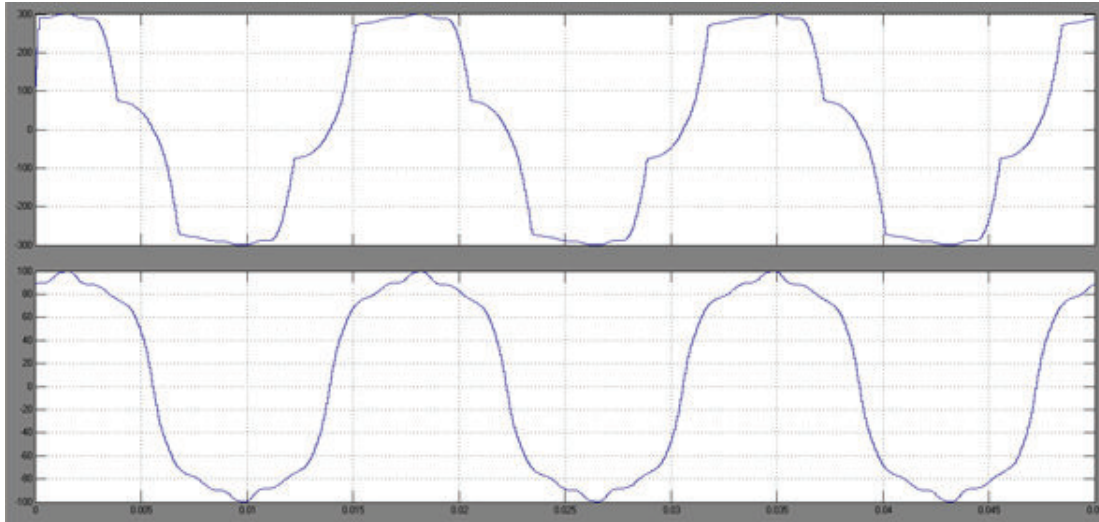


Figura A1.7: Oscilograma de la carga de la fase c

A continuación se muestra una tabla con los resultados de corriente nominal de cada carga y su factor THD.

	Carga a	Carga b	Carga c
Corriente RMS [A]	162	246.1	325.7
THD [%]	30.07	23.15	15.21

Tabla A1.2: Tabla de datos de carga por fase

1.2 TRANSFORMADOR TRIFÁSICO CON APERTURA DEL INTERRUPTOR TERMOMAGNÉTICO

Al aumentar la carga extra se pueden generar aperturas en el circuito termomagnético ocasionando que se corte la transferencia de potencia del transformador, a continuación se muestra este efecto.

Se muestra las corrientes trifásicas de apertura, la corriente previa a la apertura es una extensión para una mejor visualización ya que se abre inmediatamente después que se recibe la señal de apertura por cualquier caso que se provoque (cortocircuito, sobrecorriente, o temperatura), en el gráfico de voltaje se puede

observar este caso, el circuito termomagnético apenas recibir la señal por el control del interruptor termomagnético.

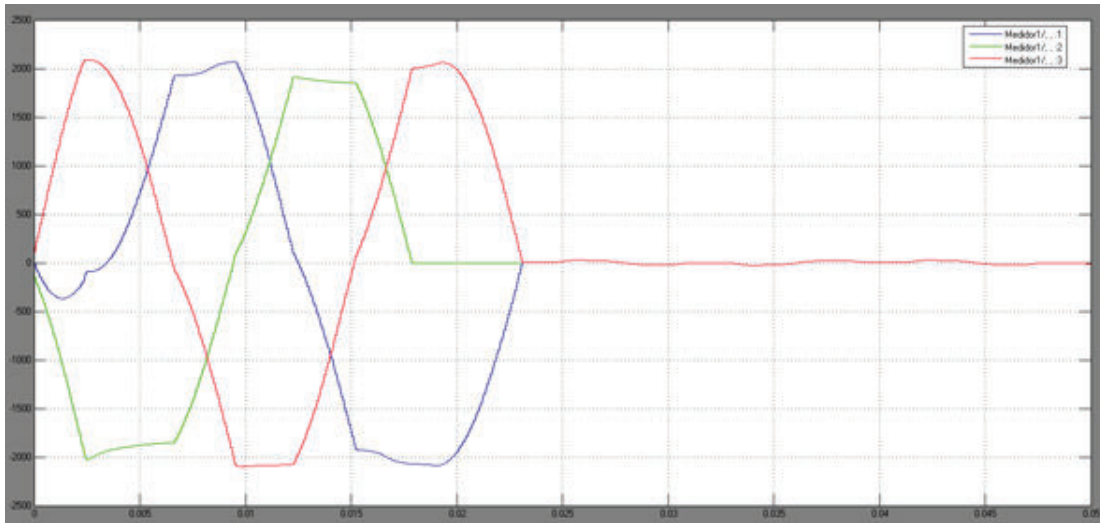


Figura A1.8: Corriente trifásica de apertura del circuito termomagnético

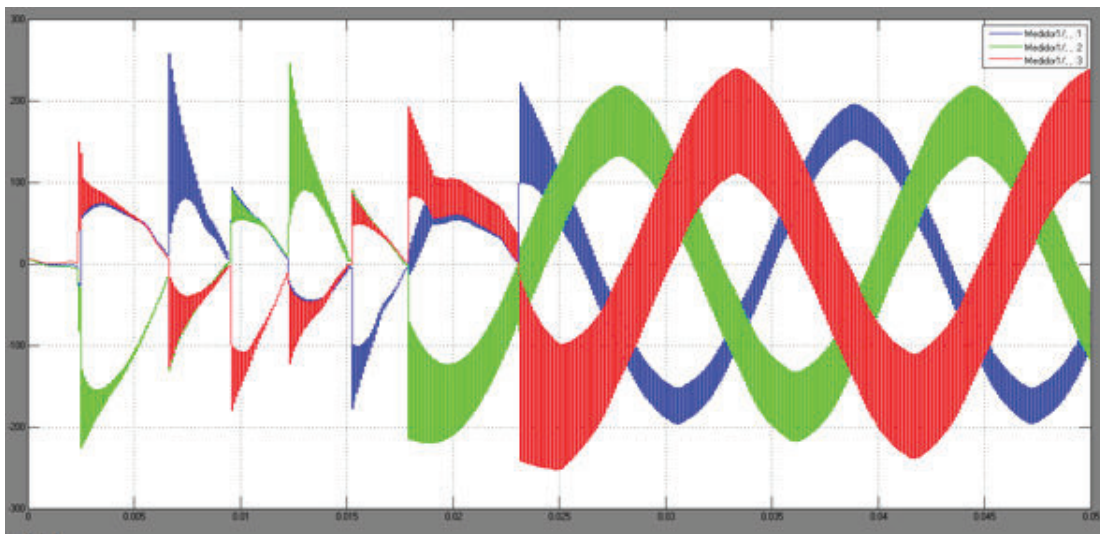


Figura A1.9: Voltajes en la apertura del circuito termomagnético ²

² La apertura se realiza inmediatamente, aproximadamente a los 250 ms

En el caso de que se tenga un estudio de varias cargas y entre ellas exista una apertura, el programa mostrará el número de medición con la que se abrió el circuito termomagnético y la causa por la que este se abrió.

En los resultados finales en cada apertura se mostrarán los resultados como si solo se tuviese la carga medida, es decir sin la carga armónica extra, esto dado que el programa usa la lectura armónica del modelo de Simulink y para ciertos cálculos se obtienen indeterminaciones.

El siguiente estudio se realizó con las mediciones 3 a la 6 de la carga armónica y con carga armónica extra, a continuación se muestra los resultados obtenidos en la ejecución del programa. La apertura se realiza en la medición 3 (carga medida el 02/09/14 a las 13:10) por apertura de temperatura.

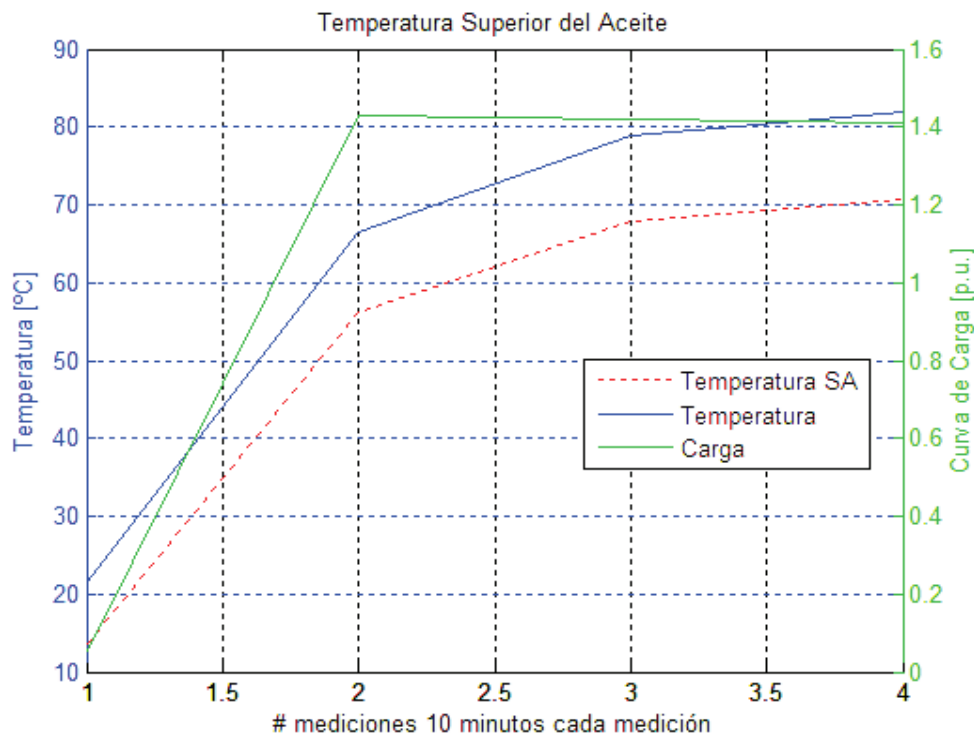


Figura A1.10: Temperatura superior del aceite con apertura de circuito termomagnético

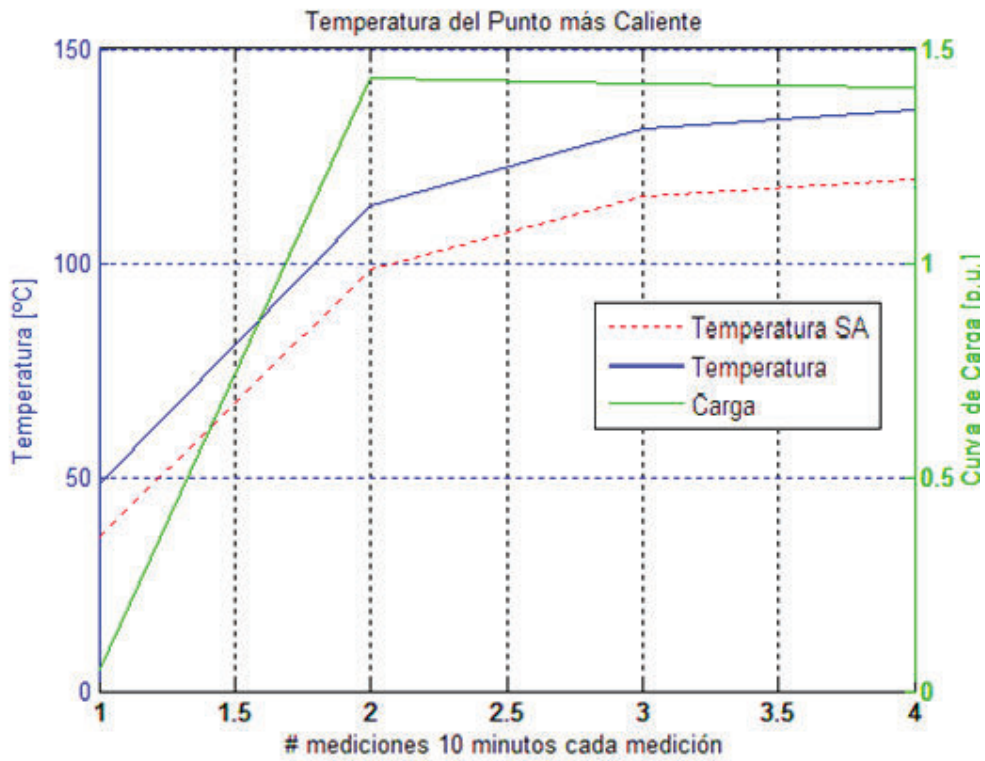


Figura A1.11: Temperatura del punto más caliente con apertura de circuito termomagnético

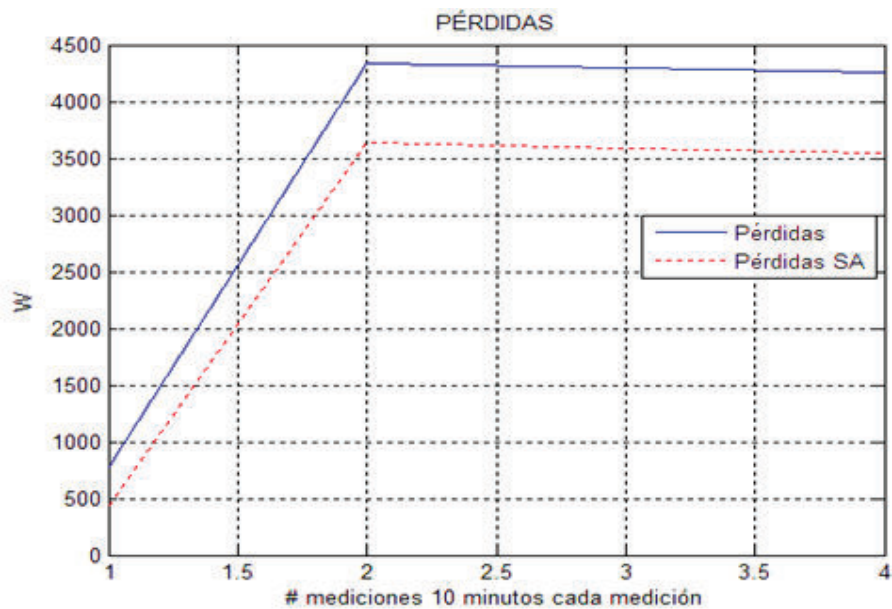


Figura A1.12: Pérdidas en el transformador con apertura de circuito termomagnético

Como se puede observar en las figuras la medición de apertura (medición 1 en cada figura) presenta los valores más bajos, esto porque solo se calcula con los

datos de las mediciones armónicas dejando fuera la carga extra, las demás mediciones son altas pero no provocan ninguna apertura, se debe tomar una decisión para saber si es conveniente o no conectar ésta carga al transformador.

1.3 TRANSFORMADOR MONOFÁSICO CON CARGA EXTRA

A continuación se muestra el análisis para el transformador monofásico con una carga armónica extra, la carga es un puente rectificador bifásico de diodos, como se muestra a continuación.

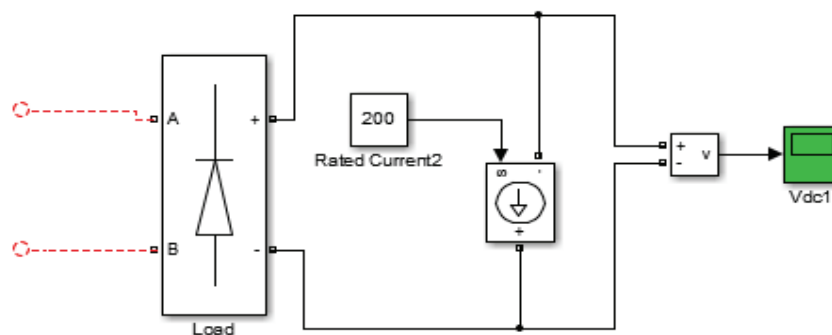


Figura A1.13: Carga armónica

Como ya se dijo anteriormente la carga armónica genera nuevos datos que serán presentados a continuación.

ARMÓNICOS DE CORRIENTE A		
Medición	Fase a	Fase b
1	154.074901	216.090097
2	0.02607297	0.00553373
3	52.2594861	50.5711656
4	0.01463696	0.0061703
5	21.767663	18.0083944
6	0.00636795	0.00856803
7	8.22245349	8.00433411
8	0.00424549	0.00680897
9	3.36436684	5.00511033
10	0.00757789	0.00415798
11	3.91417826	3.19599192
12	0.00763811	0.00726309

13	2.7055986	2.05220552
14	0.00428015	0.00737433
15	1.31790729	1.76365248
16	0.00517517	0.00336221
17	1.29023645	1.37985031
18	0.0085688	0.00667539
19	1.29658576	0.93563997
20	0.00686201	0.0087393
21	0.85744377	0.86087754
22	0.00272482	0.00439725
23	0.58483339	0.70019626
24	0.00733832	0.00475822
25	0.6487856	0.60634685
26	0.00918616	0.00953679
27	0.5392024	0.53636205
28	0.00469095	0.00758038
29	0.42433775	0.50779399
30	0.00509371	0.00265127
31	0.36964238	0.41403008
32	0.00957646	0.0088217
33	0.39314754	0.35363902
34	0.00729842	0.00913044
35	0.30500036	0.30650158
36	0.00274862	0.00488586
37	0.26875683	0.27181521
38	0.00927227	0.0078352
39	0.24773988	0.25044081
40	0.00776234	0.00830676
41	0.22493355	0.22297958
42	0.00465637	0.00732727
43	0.20332217	0.20297031
44	0.00436565	0.00239539
45	0.18682167	0.18929696
46	0.01347709	0.01511523
47	0.16626967	0.16266512

48	0.00838316	0.01017666
49	0.15688396	0.15326116

Tabla A1.3: Armónicos de corriente generados con la carga extra

La conexión de la carga extra genera nuevas corrientes armónicas, así como una corriente total diferente a la ingresada por las mediciones, en los oscilogramas se puede visualizar las corrientes provocadas por las mediciones y la corriente total generada, a la misma vez que se observa el factor THD total. A continuación se muestran estos resultados.

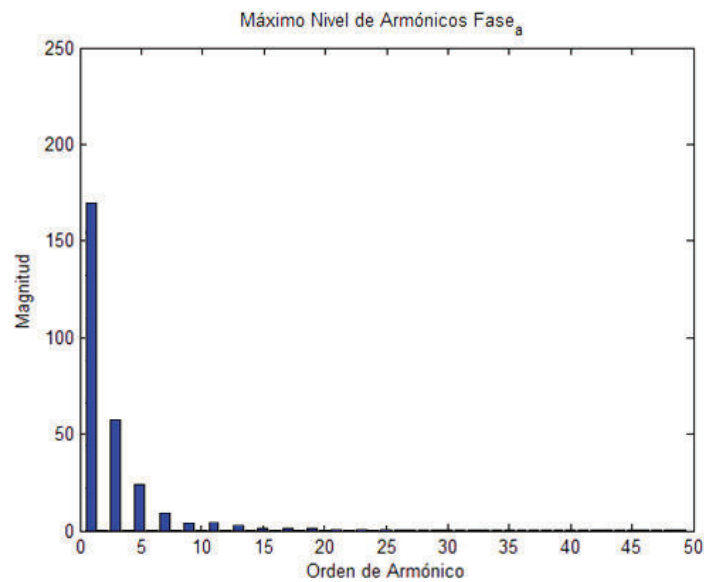


Figura A1.14: Armónicos de la fase a generados con la carga extra

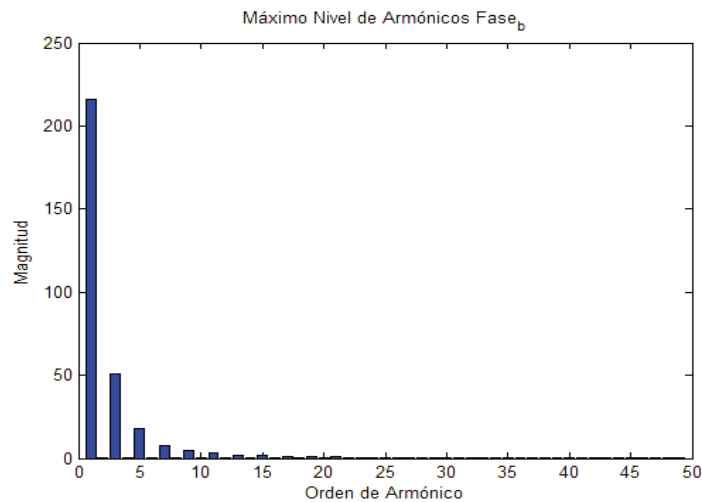


Figura A1.15: Armónicos de la fase b generados con la carga extra

A continuación se presenta los oscilogramas de cada una de las cargas, el oscilograma superior representa la carga total, mientras que la inferior representa a la carga armónica medida por el analizador de red.

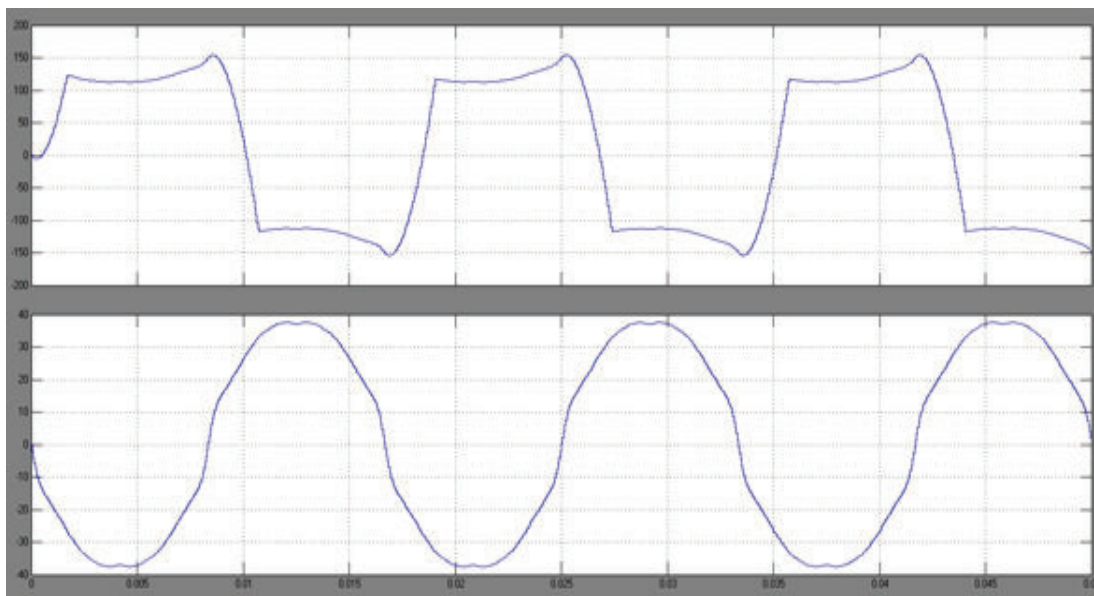


Figura A1.16: Oscilograma de la carga de la fase a

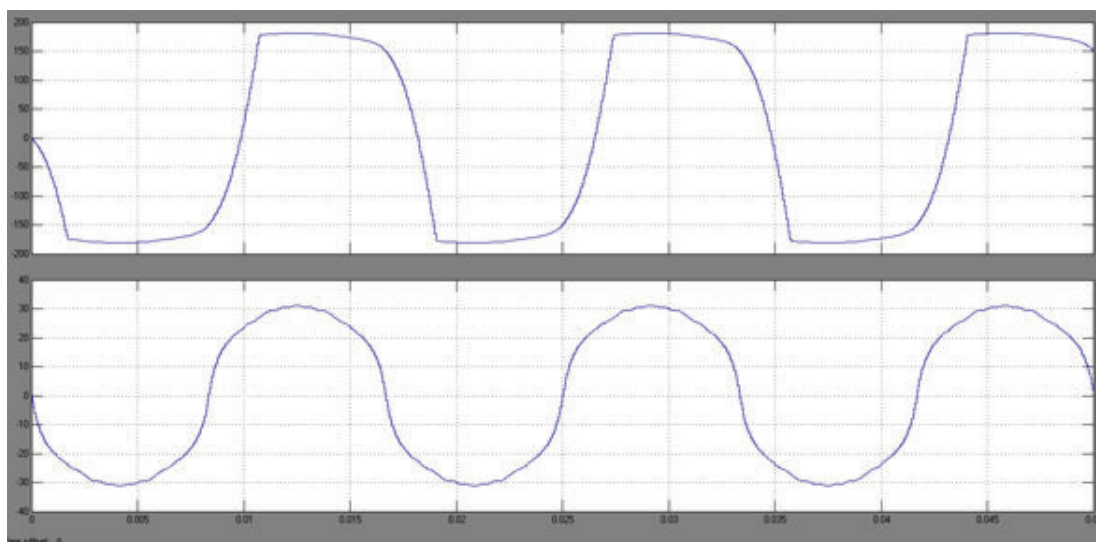


Figura A1.17: Oscilograma de la carga de la fase b

A continuación se muestra una tabla con datos de THD y corrientes RMS con la nueva carga.

	Carga a	Carga b
Corriente RMS [A]	164.5	222.9
THD [%]	37.38	25.33

Tabla A1.4: Tabla de datos de carga por fase

1.4 TRANSFORMADOR MONOFÁSICO CON APERTURA DEL INTERRUPTOR TERMOMAGNÉTICO

Como ya se explicó en el ejemplo anterior ciertas condiciones de medición con la suma de la cargas extra pueden causar una apertura en el circuito termomagnético, mientras que otras permiten el funcionamiento normal del transformador bajo condiciones a veces críticas de uso, éstas condiciones deben ser analizadas tomando en cuenta el deterioro que puede causar al transformador. En este ejemplo al ejecutar el programa (desde la carga 53 a la carga 55) se tuvo una doble apertura por temperatura y por curva de tiempo-corriente (cargas 55 a las 06/08/2014 a las 20:00 y 56 a las 06/08/2014 a las 20:10), causando altas temperaturas en el transformador por las corrientes que no provocaron aperturas.

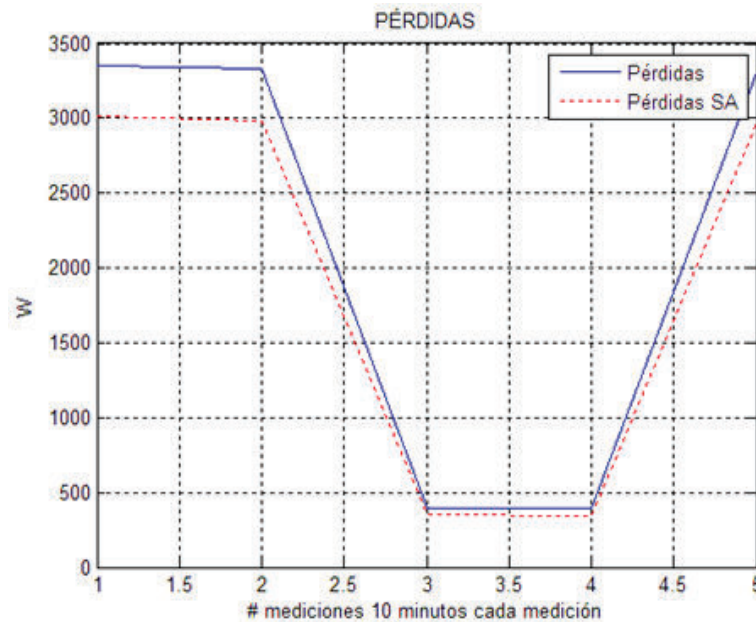


Figura A1.18: Pérdidas en el transformador con apertura de circuito termomagnético

ANEXO 2

CURVAS DE CARGA SEMANAL

A continuación se presenta la curva de carga semanal, como especifica la norma IEEE Std C57.91-1995 se debe escoger un día típico de carga para el análisis, en estos gráfico se puede visualizar los 7 días medidos por el analizador y se observa que cada uno es casi igual al anterior, es decir valores típicos.

Estos gráficos se presentan por cada fase de un transformador trifásico y uno monofásico, cada punto indica la culminación de un día de medición.

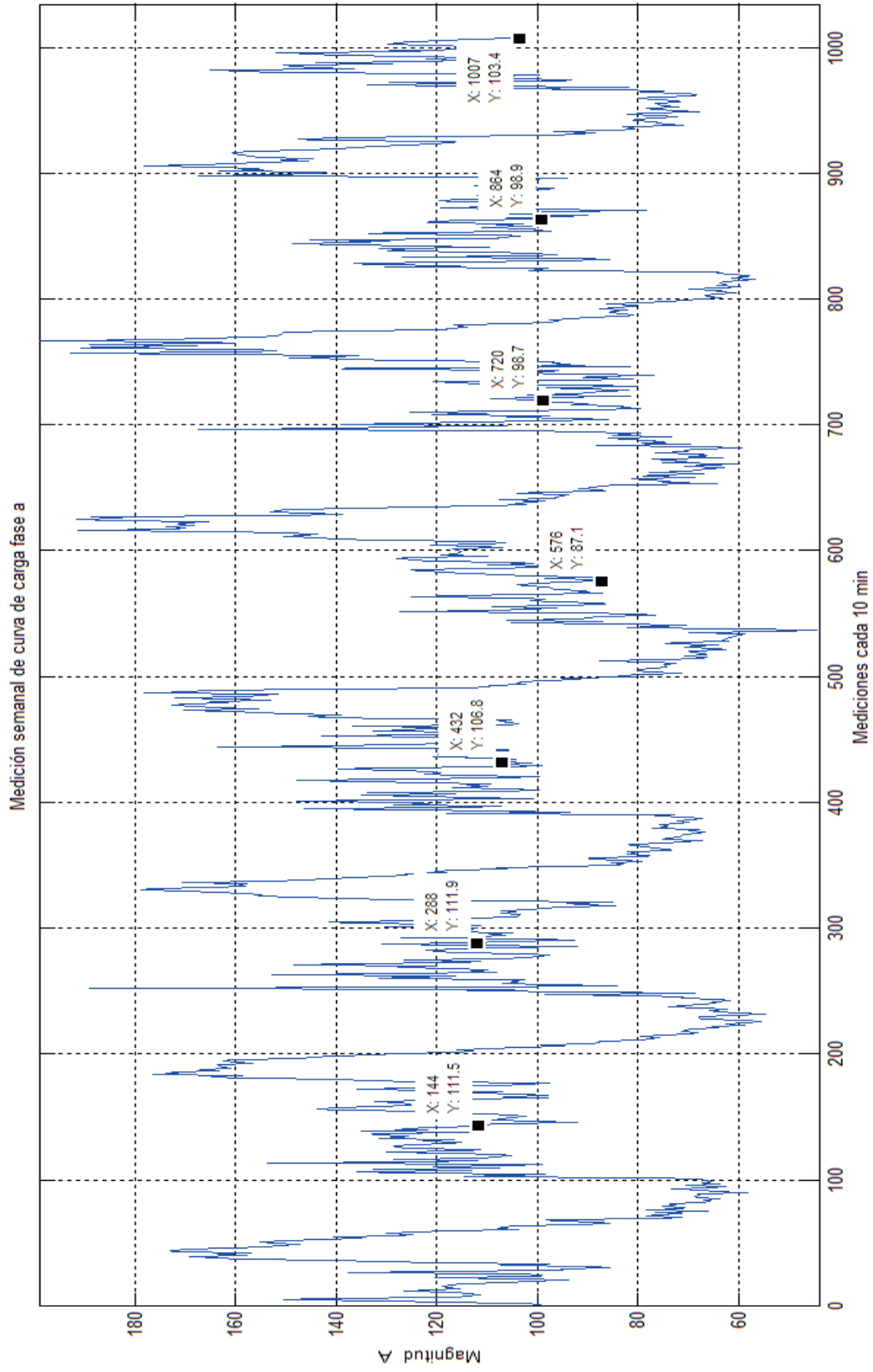


Figura A2.1: Medición semanal de carga de la fase a para un transformador trifásico.

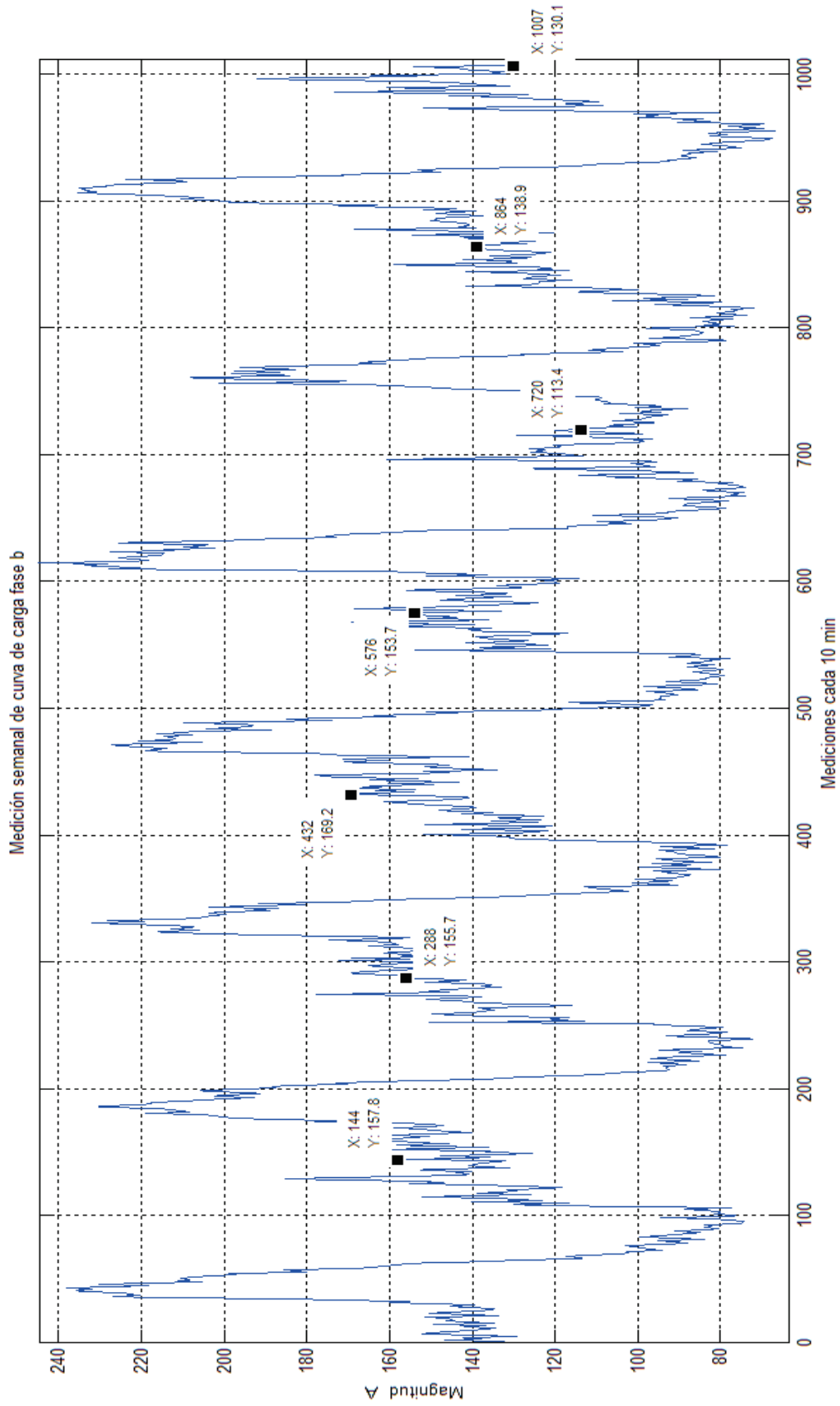


Figura A2.2: Medición semanal de carga de la fase b para un transformador trifásico.

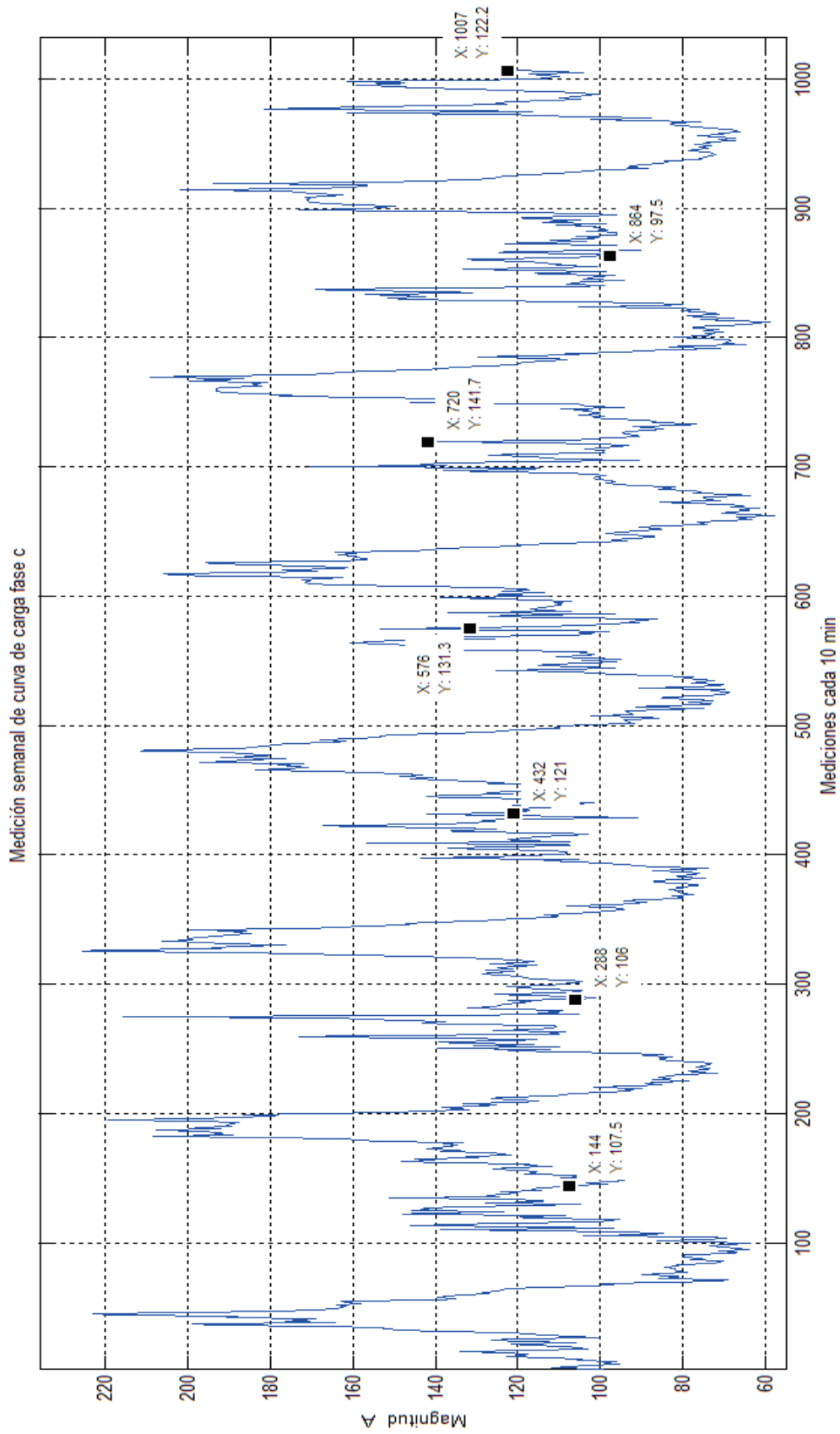


Figura A2.3: Medición semanal de carga de la fase c para un transformador trifásico.

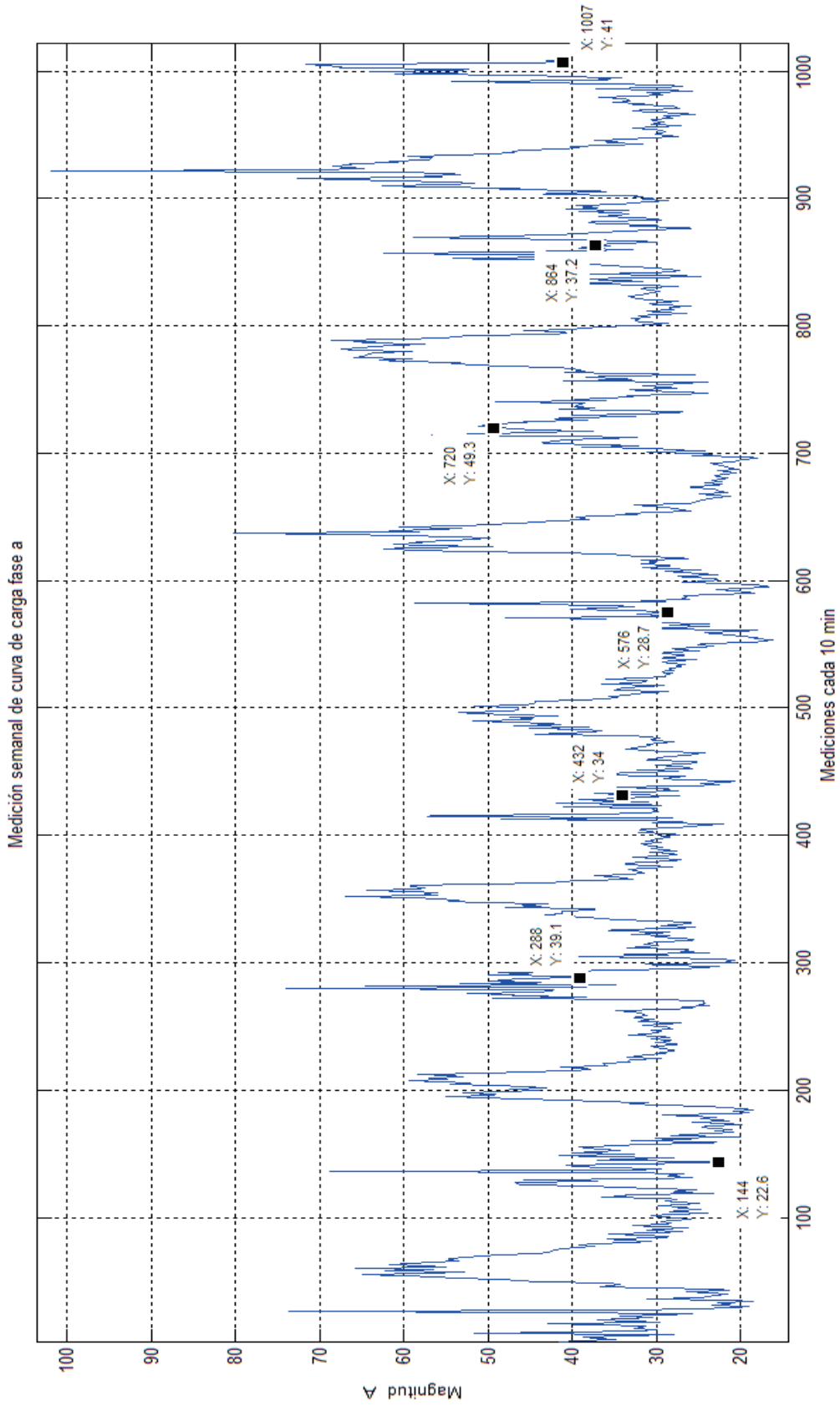


Figura A2.4: Medición semanal de carga de la fase a para un transformador monofásico.

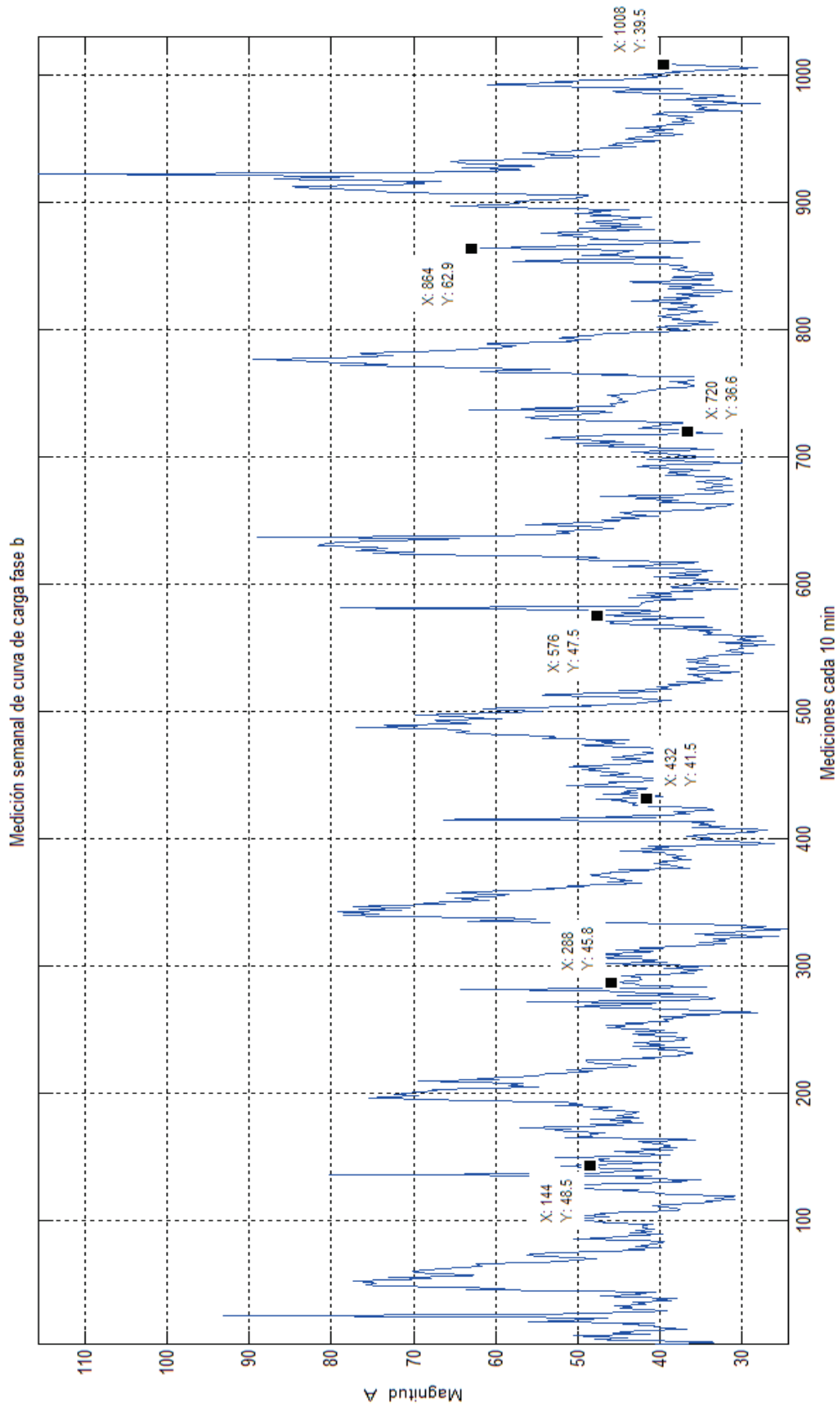


Figura A2.5: Medición semanal de carga de la fase b para un transformador monofásico.

ANEXO 3

DATOS GENERALES Y TÉRMICOS DE LOS TRANSFORMADORES ANALIZADOS

A continuación se muestra los datos de los transformadores analizados, los resultados de las pruebas de cortocircuito y circuito abierto en el laboratorio de las EEASA así como ejemplos de las pruebas térmicas de transformadores monofásicos y trifásicos en los laboratorios de ECUATRAN, además en los Anexos Digitales se puede visualizar los correspondientes datos del análisis armónico tomado por el analizador de red en el transcurso de una semana de medición.

Se muestran pruebas de laboratorio para el transformador trifásico de 112.5 kVA y monofásico de 50 kVA para cálculo de pérdidas nominales, y pruebas de temperatura realizada por Ecuatran para un transformador monofásico de 37.5 kVA y un trifásico de 75 kVA.



EMPRESA ELÉCTRICA AMBATO S.A
LABORATORIO DE TRANSFORMADORES

No.: 618	POTENCIA: 112.5 KVA	1 Ø:	3 Ø: x
SERIE: 78A161536	MARCA: WESTINGHOUSE	AÑO FABR: 07/1979	TIPO: CSP
IMPEDANCIA: 2.4 %	GRUPO: DY1	POLARIDAD:	
VOLTAJE M.T: 13800 V	VOLTAJE B.T: 120/208 V	Fecha Prueba: <input type="text"/>	
CORRIENTE M.T: 8.15 A	CORRIENTE B.T: 540.86 A		

TRABAJO REALIZADO: PRUEBA RUTINA

PROPIETARIO: EEASA

1.- MEDICION DE RESISTENCIAS :

ENCARGADO: BODEGA

M.T: 100 Ω	H1 - H0: 16.86 Ω	H2 - H3: 13.23 Ω	H3 - H1: 17.8 Ω
B.T: 1 Ω	X1 - X0: 0.0027 Ω	X2 - X0: 0.0031 Ω	X3 - X0: 0.0025 Ω

2.- MEDICION DE RESISTENCIAS DE AISLAMIENTO:

MEGUER: 5000 V	M.T-T: 3 G Ω	B.T-T: 745 G Ω	M.T-B.T: 50.5 G Ω
PARARAYO 1: 5.7	PARARAYO 2: 21.02	PARARAYO 3: 3.44	

3.- MEDICION DE LA RIGIDEZ DIELECTRICA DEL ACEITE :

NORMA	1	2	3	4	5	PROM.
BUENO	KV	KV	KV	KV	KV	0

4.- MEDICION DE LA RELACION DE TRANSFORMACION :

POS.	VOLTAJE	FASE U	FASE V	FASE W	POS NOMINAL	POS MINIMA	POS MAXIMA	% ERROR U	% ERROR V	% ERROR W
1	14490	119.95	119.93	120	0	-0.05	.005	100	100	100
2	14145	117.48	117.4	117.57	117.78	117.775	117.785	-.255	-.324	-.179
3	13800	114.96	114.93	115.3	114.91	114.905	114.915	.043	.017	.338
4	13455	112.46	112.44	112.57	112.04	112.035	112.045	.373	.356	.471
5	13110	109.95	109.94	110	109.17	109.165	109.175	.709	.7	.755

5.- PRUEBAS DE CORTO CIRCUITO Y CIRCUITO ABIERTO :

CIRCUITO ABIERTO.	CORTO CIRCUITO		TDK: 1.27	
	T. Ambiente : 18 °C		T 85 °C	
VOLTAJE:	208 (V)	VOLTAJE:	291 (V)	(V)
CORRIENTE:	2.33 (A)	CORRIENTE:	8.15 (A)	(A)
POTENCIA:	342 (W)	POTENCIA:	1270 (W)	2939.15 (W)
% I ₀ :	0.72 (%)	U _z :	0.57 (%)	(%)

Tabla A3.1: Datos de las pruebas del transformador trifásico de 112.5 kVA



EMPRESA ELÉCTRICA AMBATO S.A
LABORATORIO DE TRANSFORMADORES

No.:	5577	POTENCIA:	50 KVA	1 Ø: ×	3 Ø:
SERIE:	6107198	MARCA:	ECUATRAN	AÑO FABR:	TIPO: CSP
IMPEDANCIA:	1.2 %	GRUPO:	GRDY	POLARIDAD: ADITIVA	
VOLTAJE M.T:	13800 GRDY 7970 V	VOLTAJE B.T:	120/240 V	Fecha Prueba:	
CORRIENTE M.T:	6.27 A	CORRIENTE B.T:	208.33 A		

TRABAJO REALIZADO : PROPIETARIO : EEASA
ENCARGADO : BODEGA

1.- MEDICION DE RESISTENCIAS :

M.T:	100 Ω	H1 - H0:	4.57 Ω	H2 - H3:	Ω	H3 - H1:	Ω
B.T:	1 Ω	X1 - X2:	Ω	X2 - X3:	Ω	X3 - X1:	0.0047 Ω

2.- MEDICION DE RESISTENCIAS DE AISLAMIENTO:

MEGUER:	5000 V	M.T-T:	G Ω	B.T-T:	5.55 G Ω	M.T-B.T:	6.4 G Ω	PARARAYO:	105
---------	--------	--------	-----	--------	----------	----------	---------	-----------	-----

3.- MEDICION DE LA RIGIDEZ DIELECTRICA DEL ACEITE :

NORMA	1	2	3	4	5	PROM.
BUENO	KV	KV	KV	KV	KV	

4.- MEDICION DE LA RELACION DE TRANSFORMACION :

POS.	VOLTAJE	FASE U	FASE V	FASE W	POS NOMINAL	POS MINIMA	POS MÁXIMA	% ERROR U	% ERROR V	% ERROR W
1	8169.25	68.065	0	0	68.077	68.072	68.082	-0.18		
2	7970	66.375	-66.385	0	66.417	66.412	66.422	-0.63		
3	7770.75	64.683	0	0	64.756	64.751	64.761	-1.13		
4	7571.5	62.989	0	0	63.096	63.091	63.101	-1.17		
5	7372.25	61.299	0	0	61.435	61.43	61.44	-2.22		

5.- PRUEBAS DE CORTO CIRCUITO Y CIRCUITO ABIERTO :

CIRCUITO ABIERTO.	CORTO CIRCUITO		TDK:	1.26
	T. Ambiente : 19 °C		T 85 °C	
VOLTAJE:	240 (V)	VOLTAJE:	89.4 (V)	(V)
CORRIENTE:	2.01 (A)	CORRIENTE:	6.27 (A)	(A)
POTENCIA:	176 (W)	POTENCIA:	425 (W)	516.2 (W)
% I _o :	0.36 (%)	U _z :	0.76 (%)	(%)

Tabla A3.2: Datos de las pruebas del transformador monofásico de 50 kVA

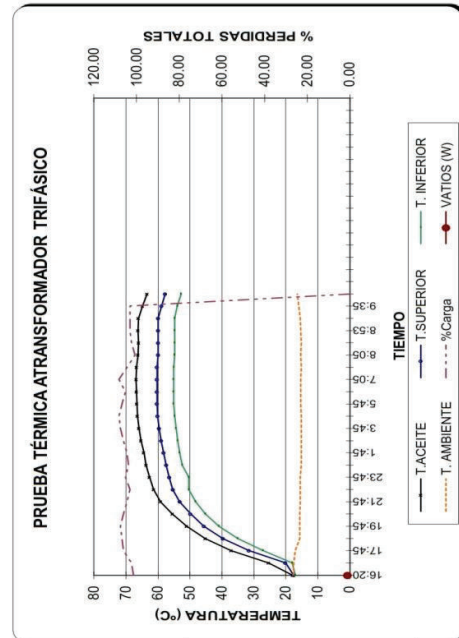
PRUEBA TÉRMICA DE TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

EC-RG-CC-LA-55-02

Código:	T-075050325
Serie:	0822509
Especificación:	T-075-M034

Año ensayo a msnm:	2008
Norma:	3000
	04

Po (W):	259.8	Io (%)	0.48	Pcu 85°(W):	1012.12	Z 85° (%)	2.91
Ti (°C):	18.8	Ro P (mOhm):	27.56	Rf P (mOhm):	34.276	Tf BP(°C)	80.52
PT(5) (85°C):	1319.9	Ro B (mOhm):	2.62	Rf B (mOhm):	3.211	Tf BS(°C)	75.97



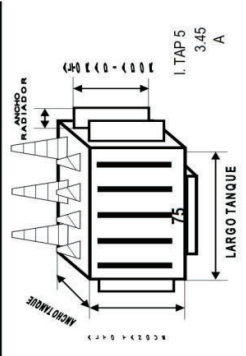
HORA	TEMPERATURA		VOLTAJE		CORRIENTE	POTENCIA	INCREMENTO		CORRIENTE	P. TOTALES
	T. SUPERIOR	T. INFERIOR	A.T.	B.T.			TEMP. LIQ.	TEMP.		
18:20	17.9	17.5	17	441	4.31	1340	-0.05	0.0	124.9	101.52
18:45	25.4	20.1	18	430	4.13	1350	6.75	6.8	119.7	102.28
17:45	37.1	31.5	27.1	432	4.11	1400	17.9	11.2	119.1	106.07
18:45	45.2	39.6	35	428	4.1	1410	27.2	9.3	118.8	106.83
19:45	51	45.6	40.9	425	4.09	1420	32.95	5.8	118.6	107.58
20:45	56.5	49.8	45.1	430	4.08	1400	37.45	4.5	118.3	106.07
21:45	58.1	53.1	48.2	432	4.05	1380	41.15	3.7	117.4	104.55
22:45	61.3	55.3	50.3	425	4	1360	43.3	2.1	115.9	103.04
23:45	62.6	56.4	50.3	424	4.08	1390	44.05	0.8	118.3	105.31
0:45	63.7	57.4	52.4	428	4.13	1370	46	2.0	119.7	103.80
1:45	64.4	58.2	53.2	421	4.18	1380	46.7	0.7	121.2	104.55
2:45	65.3	59	53.8	420	4.1	1400	47.5	0.8	118.8	106.07
3:45	65.9	59.6	54.3	430	4	1420	48.05	0.5	115.9	107.58
4:45	66.4	60.1	54.7	432	4.05	1430	48.5	0.5	117.4	108.34
5:45	66.6	60.3	55.1	428	4.05	1410	48.8	0.2	118.3	106.83
6:45	66.7	60.3	55.1	427	4.05	1390	48.8	0.1	117.4	105.31
7:05	66.8	60.3	55.1	426	4.03	1430	48.9	0.1	116.8	108.34
7:35	66.7	60.3	55	418	3.96	1380	48.85	0.0	115.4	104.55
8:05	66.2	59.9	54.8	411	3.9	1330	48.35	-0.5	113.0	100.77
8:35	66	59.9	54.7	414	3.95	1350	48.2	-0.2	114.5	102.28
8:53	66.2	59.9	54.7	416	3.89	1360	48.2	0.0	112.8	103.04
9:05	66.1	59.9	54.7	400	3.85	1360	48	-0.2	111.6	103.04
9:35	64.8	58.9	53.9	389	3.9	1360	46.3	-1.7	113.0	103.04
9:53	63.4	57.7	52.7	16.4	0	0	44.5	-1.8	0.0	0.00

CRITERIOS DE ACEPTACIÓN

La elevación de temperatura promedio del devanado sobre la temperatura ambiente no exceda los 65°C a la potencia nominal

IEEE. C.57.12.00

VALORES FINALES (°C) a 1000 msnm	ETPoli	43.52	OK
	TPoli	56.39	--
	TPDP	74.56	--
	TPBS	70.34	--
	ETDP	58.37	OK
	ETDS	55.16	OK



DIMENSIONES DE TANQUE:

LARGO	1070	mm
ANCHO	550	mm
ALTO	580	mm

RADIADORES

ANCHO (mm):	ALTO (mm)	CANTIDAD

VALORES NOMINALES

POTENCIA	75	KVA
		AMPERIOS
A.T. - Bobina	13200	3.280
B.T. - Bobina	220	196.82

ETPoli = ELEVACIÓN DE TEMPERATURA DEL ACEITE	TPoli	TEMPERATURA PROMEDIO DEL ACEITE
TPDP = TEMPERATURA PROMEDIO DEL DEVANADO SECUNDARIO	ETDP	TEMPERATURA PROMEDIO DEL DEVANADO PRIMARIO
TPBS = TEMPERATURA PROMEDIO DEL DEVANADO SECUNDARIO	ETDS	ELEVACIÓN DE TEMPERATURA DEL DEVANADO SECUNDARIO
METODO CARGA	CORTOCIRCUITO	TAP
OBSERVACIONES:	PASA LA PRUEBA	
	5	TIEMPO DE PRUEBA
	1040	TEMPERATURA PROMEDIO DEL ACEITE
	44.5	ELEVACIÓN DE TEMPERATURA DEL DEVANADO PRIMARIO
	44.5	TEMPERATURA PROMEDIO DEL ACEITE
	0.0	TEMPERATURA PROMEDIO DEL DEVANADO SECUNDARIO
	78.79	ELEVACIÓN DE TEMPERATURA DEL DEVANADO SECUNDARIO
	105.5	% CARGA PROMEDIO
	430	HORAS
	120	ACETILE (L)
		PESO T. (Kg)

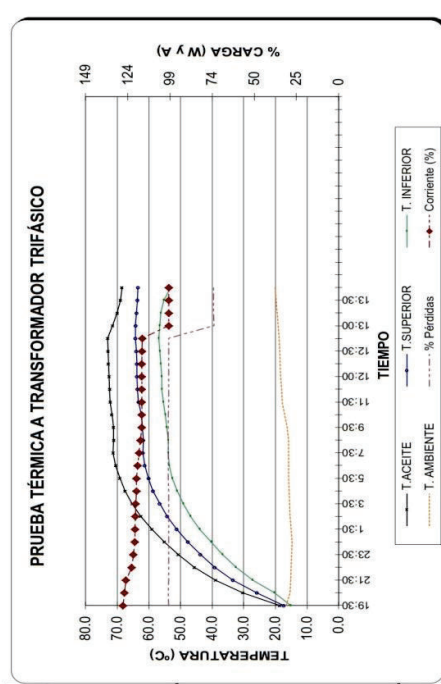
Tabla A3.3: Tabla de prueba térmica para un transformador trifásico de 75 kVA

PRUEBA TÉRMICA DEL TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

EC-RG-CC-LA-55-02

Código:	M-3707113	Año	2014
Serie:	0000008714	ensayo a msnm	3000
Especificación:	37.P1	Norma:	04

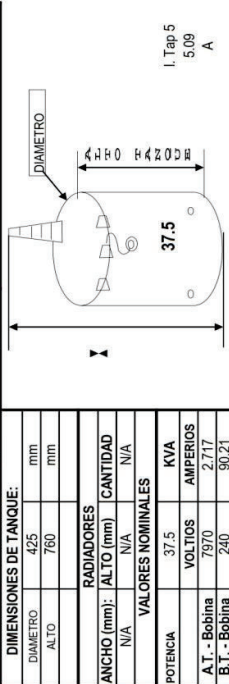
Po (W):	124	Io (%)	0.45	Pcu 85°(W):	374.5	Z 85° (%)	2.56
T1(°C)	18.6	Ro P(mOhm)	5.331	RT P(mOhm)	6.549	TT B(°C)	76.44
PT (85°C)	510.8	Ro B(mOhm)	6.231	RT B(mOhm)	7.684	TT BS(°C)	77.64



HORA	ACEITE	T SUPERIOR	T INFERIOR	AMBIENTE	VOLTAJE	A.T.	B.T.	CORRIENTE	POTENCIA	INCREMENTO	TEMP. LIQ.	TEMP.	P. TOTALES
						A.T. (A)		A.T. (A)	W	TEMP. LIQ.	TEMP.		%
19:30	18.7	17.4	15.2	16.6	230.00	6.46	CC	6.46	511.0	1.00	0.0	126.9	100.04
20:30	30.3	25.9	20.3	15.4	229.30	6.42	CC	6.42	512.0	12.10	11.1	126.1	100.23
21:30	38.9	33.4	27.2	15.2	228.60	6.38	CC	6.38	511.0	20.60	8.5	125.3	100.04
22:30	45.7	39.2	32.5	15.1	227.90	6.20	CC	6.20	511.3	27.25	6.7	121.8	100.10
23:30	50.8	43.7	36.7	14.9	227.20	6.15	CC	6.15	511.3	32.40	5.2	120.8	100.10
0:30	55.1	47.7	40.3	14.8	226.50	6.11	CC	6.11	511.3	36.60	4.2	120.0	100.10
1:30	59.1	51.2	43.9	15.1	225.80	6.10	CC	6.10	511.3	40.35	3.8	119.8	100.10
2:30	62.5	54.2	46.8	15.3	225.10	6.09	CC	6.09	511.3	43.50	3.2	119.6	100.10
3:30	65.3	56.6	49.1	15.6	224.40	6.08	C.C	6.08	511.3	45.95	2.5	119.4	100.10
4:30	67.5	58.7	51.1	15.7	223.70	6.06	CC	6.06	512.0	48.00	2.1	119.1	100.10
5:30	69.2	60.1	52.6	15.8	223.00	6.02	CC	6.02	512.0	49.65	1.7	118.3	100.23
6:30	70.5	61.3	53.6	15.9	222.30	5.98	CC	5.98	512.0	51.40	0.6	117.5	100.23
7:30	71.3	61.9	53.9	15.9	221.60	5.94	CC	5.94	512.0	51.25	-0.2	116.7	100.23
8:30	71.1	61.8	53.9	15.9	220.90	5.90	CC	5.90	512.0	51.10	-0.1	115.9	100.23
9:30	71.2	62.0	54.4	16.3	220.20	5.90	CC	5.90	511.0	50.80	-0.3	115.9	100.23
10:30	71.7	62.4	54.8	17.1	219.50	5.90	CC	5.90	511.0	50.35	-0.5	115.9	100.04
11:30	72.2	63.3	55.4	17.9	218.80	5.90	CC	5.90	511.0	50.45	0.1	115.9	100.04
11:45	72.4	63.6	55.9	18.1	218.10	5.90	CC	5.90	511.0	50.40	-0.1	115.9	100.04
12:00	72.6	63.8	56.0	18.3	217.40	5.90	CC	5.90	511.0	50.50	0.1	115.9	100.04
12:15	72.8	63.8	56.2	18.5	217.00	5.90	CC	5.90	511.0	50.50	0.0	115.9	100.04
12:30	72.9	64.0	56.5	18.7	216.50	5.90	CC	5.90	511.0	50.45	0.0	115.9	100.04
12:45	73.0	64.3	56.9	18.8	216.00	5.88	CC	5.88	511.0	50.50	0.0	115.5	100.04
13:00	71.5	64.2	56.6	19.2	186.00	5.09	CC	5.09	375.0	46.75	-1.7	100.0	73.41
13:15	70.0	63.9	56.2	19.4	186.00	5.09	CC	5.09	376.0	45.15	-1.6	100.0	73.81
13:30	69.0	63.6	56.3	19.7	186.00	5.09	CC	5.09	377.0	45.15	-1.6	100.0	73.61
13:45	68.5	63.4	56.1	20.1	186.00	5.09	CC	5.09	376.0	43.25	-1.9	100.0	73.61

VALORES FINALES (°C)	
3000 msnm	1000 msnm
ETPoli	54.00
TPoli	69.30
TPDP	76.44
TPBS	71.89
ETDP	63.39
ETDS	64.59

VALORES FINALES (°C)	
Criterio	IEEE C.57.12.00 La elevación de temperatura promedio del devanado sobre la temperatura ambiente no exceda los 65°C a la potencia nominal
ETPoli	OK
TPoli	--
TPDP	--
TPBS	OK
ETDP	OK
ETDS	OK



DIMENSIONES DE TANQUE:	
DIAMETRO	425 mm
ALTO	760 mm

RADIADORES	
ANCHO (mm): ALTO (mm)	CANTIDAD
N/A	N/A

VALORES NOMINALES	
POTENCIA	37.5 KVA
A.T. - Bobina	7970 AMPERIOS
B.T. - Bobina	240 AMPERIOS

CRITERIOS DE ACEPTACION	
IEEE C.57.12.00	La elevación de temperatura promedio del devanado sobre la temperatura ambiente no exceda los 65°C a la potencia nominal
NTE INEN 2126-	Incremento devanado 65°C, incremento en aceite 60°C

ELEVACION DE TEMPERATURA DEL DEVANADO PRIMARIO	
ETPoli	TEMPERATURA PROMEDIO DEL ACEITE
TPDP	TEMPERATURA PROMEDIO DEL DEVANADO SECUNDARIO
TPBS	ELEVACION DE TEMPERATURA DEL DEVANADO PRIMARIO

MÉTODO CARGA	
CORTOCIRCUITO	5 HORAS
PASA LA PRUEBA	14:00 HORAS

% CARGA PROMEDIO	
ACETE (L)	0
PESO T. (kg)	0

Tabla A3.4: Tabla de prueba térmica para un transformador monofásico de 75 kVA

ANEXO 4

CURVAS DE DISPARO DEL INTERRUPTOR TERMOMAGNÉTICO

Se muestran las curvas de operación de los interruptores termomagnéticos de los diferentes transformadores, según datos de ERMCO, ya que los interruptores termomagnéticos que se usan en los diferentes transformadores son de ésta empresa.

Se presenta las curvas para los transformadores monofásicos seguidos de los trifásicos, como se puede observar en los monofásicos tipo T1 estos no tienen una caída severa frente a corto circuitos, por eso éstos son solo de apertura térmica mas no magnética.

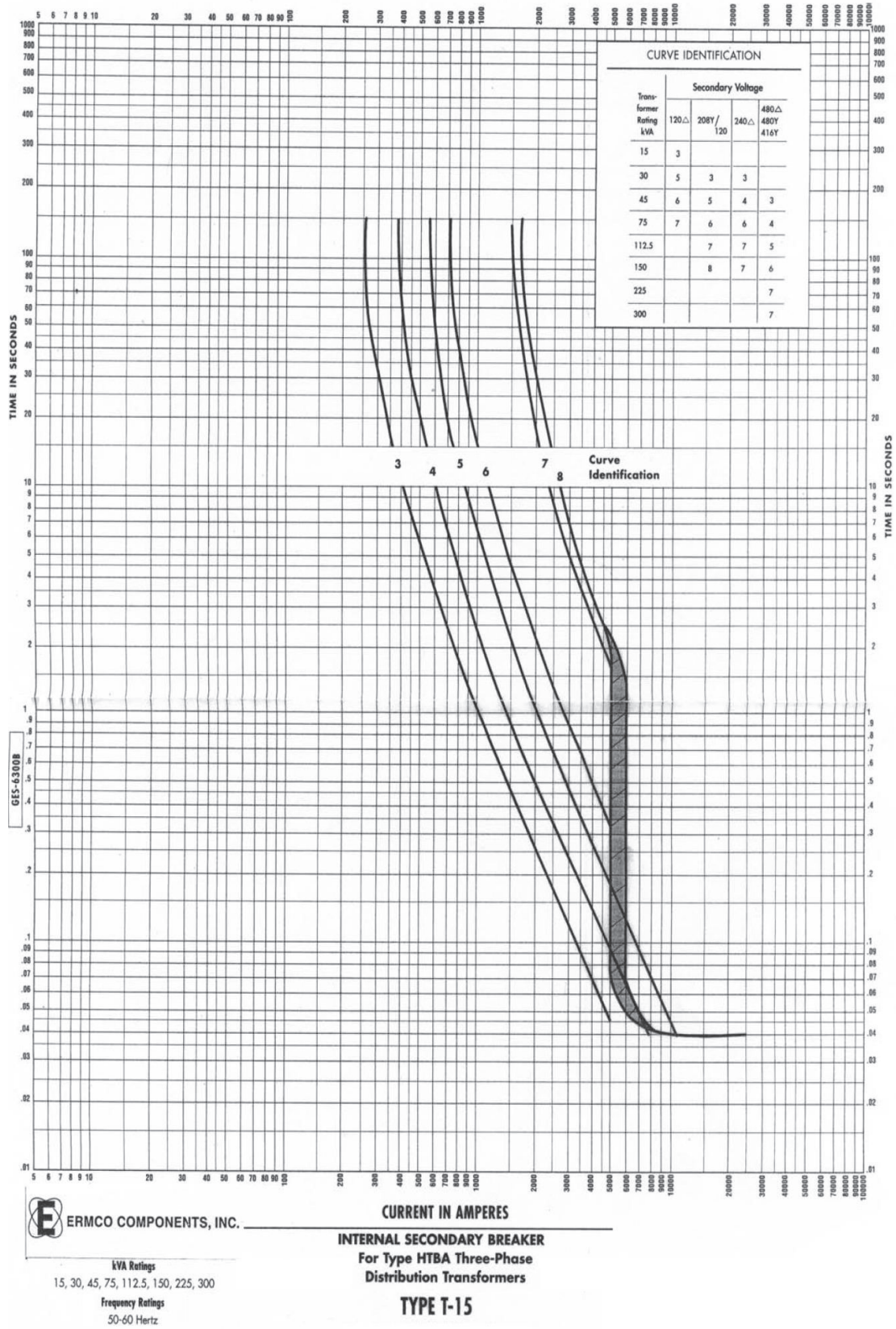
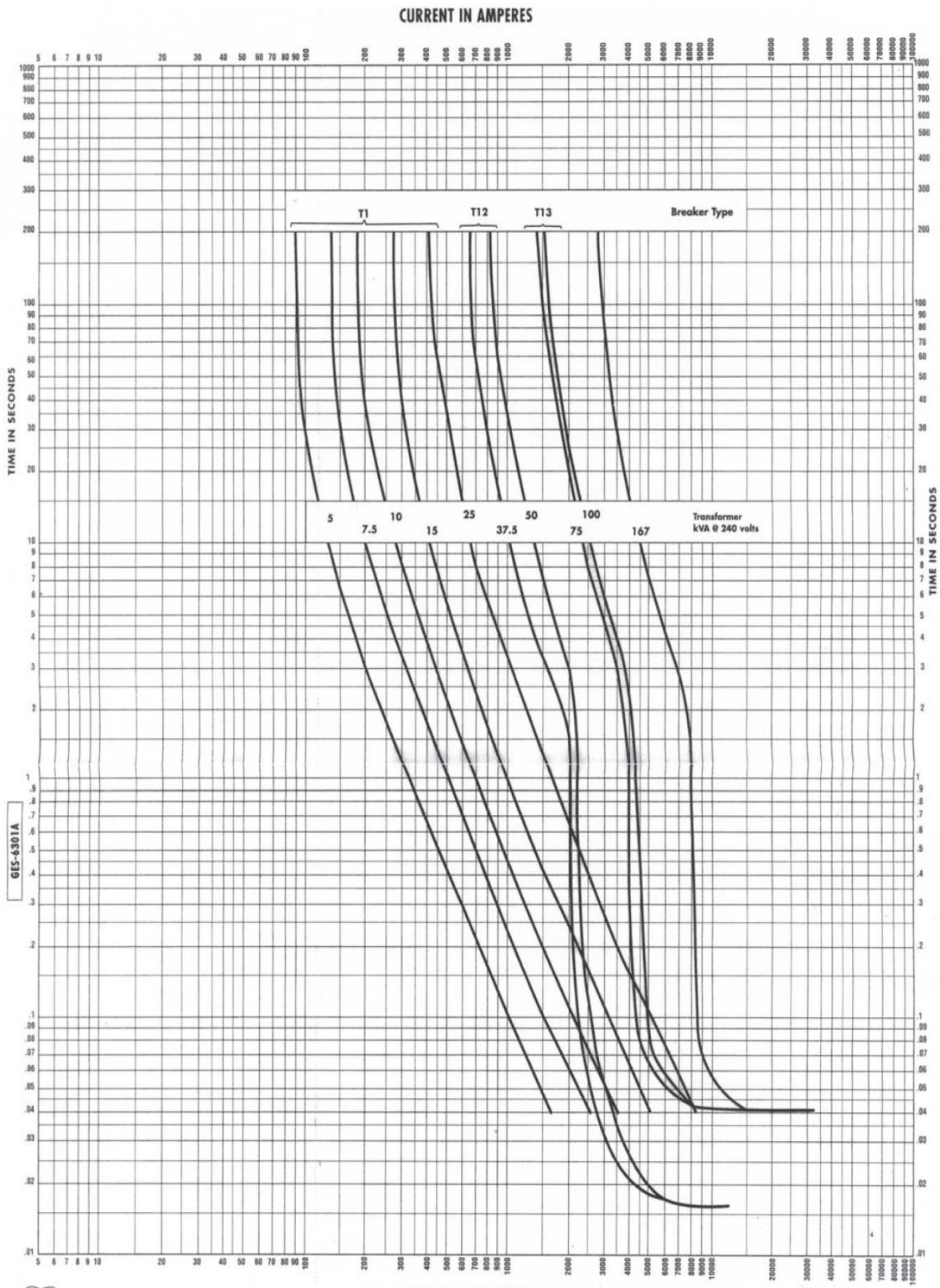


Figura A4.1: Curvas de operación del ITM para transformadores trifásicos



E ERMCO COMPONENTS, INC.

kVA Ratings
5, 10, 15, 25, 37.5, 50, 75, 100, 167
Frequency Ratings
50-60 Hertz

CURRENT IN AMPERES
INTERNAL SECONDARY BREAKER
TYPES T-1, T-12, T-13
For Type HSBA Single-Phase
Distribution Transformers

Figura A4.2: Curvas de operación del ITM para transformadores monofásicos

ANEXO 5

TEMPERATURA PARA EL ANÁLISIS ARMÓNICO

Como se mencionó en la norma IEEE Std. C57.91-1990, para un análisis de cargas de corta duración con sacrificio moderado de la esperanza de vida, se debe usar la temperatura máxima diaria para el mes en cuestión, es decir el promedio de las temperaturas máximas diarias para el mes involucrado promediado durante varios años.

En este caso se mostrará los datos de la ciudad de Ambato, los correspondientes valores deben ser tomados en cuenta para el sitio en el que se vaya a realizar el análisis armónico.

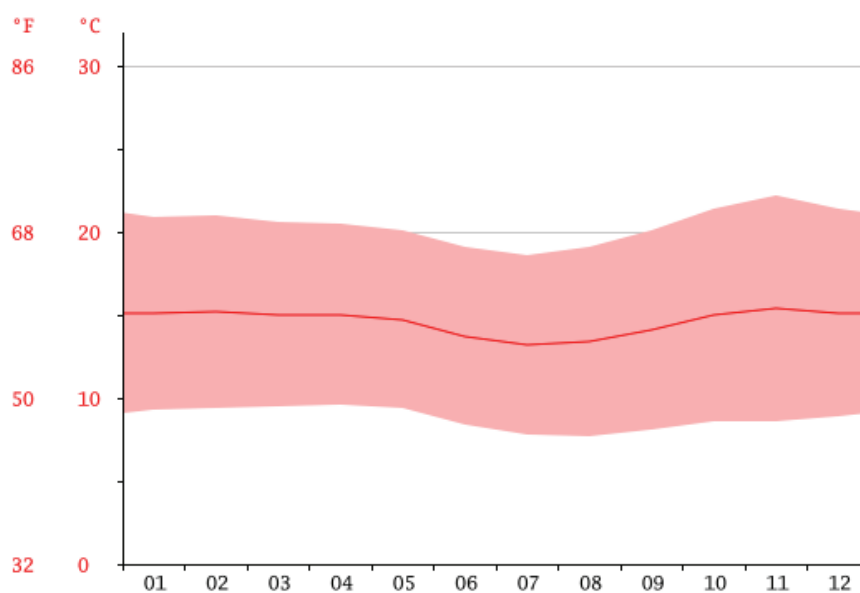


Figura A5.1: Diagrama de temperaturas de Ambato³

MES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
°C (min)	9.3	9.4	9.5	9.6	9.4	8.8	7.8	7.7	8.1	8.6	8.6	8.9
°C (max)	20.9	21.0	20.6	20.5	20.1	19.1	18.6	19.1	20.1	21.4	22.2	21.4
°C (med)	15.1	15.2	15.0	15.0	14.7	13.7	13.2	13.4	14.1	15.0	15.4	15.1

Tabla A5.1: Tabla climática de Ambato⁴

³ Datos de es.climate-data.org sección <http://es.climate-data.org/location/2957/>

⁴ Ibídem

ANEXO 6

MANUAL DE USUARIO DEL PROGRAMA “PEATD”

PEATD es la abreviatura de “Programa para el Estudio de Armónicos en Transformadores de Distribución”, este programa se desarrolló para el estudio de la influencia de cargas armónicas en el transformador de distribución, está destinado para las necesidades de la EEASA pero aplicable a cualquier otro estudio de igual similitud. A continuación se presenta al usuario la forma correcta de utilizar el programa junto con sus principales características, el programa está desarrollado en MATLAB/Simulink desde donde se puede ejecutar el mismo.

6.1 CONDICIONES DE USO DEL PROGRAMA

El programa al estar desarrollado bajo las necesidades de la EEASA, tiene ciertos criterios únicos de desarrollo basados en éstas necesidades, criterios como tipo y marca del transformador, niveles de potencia del transformador, medición de lecturas de armónicos con las características del archivo almacenadas en Excel (AMC Insntuments Model 3945-B PowerPad[®]) con los datos que ofrece el analizador.

Además de eso los transformadores que más usan son de marca ECUATRAN, y los datos de temperatura son tomados del laboratorio de ésta empresa, así como los datos correspondientes al circuito termomagnético son proporcionados por ERMCO.

Se considera también la protección del interruptor termomagnético para los transformadores que sean autoprotegidos (CSP), los transformadores de 5 a 25 kVA monofásicos solo tienen protección térmica y a partir de 37.5 kVA monofásicos y todos los transformadores trifásicos tienen protección termomagnética.

En el programa se ha considerado este tema, y además se puede escoger si el transformador es autoprotegido (CSP) o convencionales (S), es decir sin interruptor termomagnético que proteja el transformador. A continuación se listan las potencias de los transformadores que pueden ser modelados en este programa.

Transformadores trifásicos:

- Transformador de 30 kVA
- Transformador de 45 kVA
- Transformador de 50 kVA
- Transformador de 75 kVA
- Transformador de 112.5 kVA

Transformadores monofásicos

- Transformador de 5 kVA
- Transformador de 10 kVA
- Transformador de 15 kVA
- Transformador de 25 kVA
- Transformador de 37.5kVA
- Transformador de 50 kVA

6.2 INGRESO AL PROGRAMA

Para ingresar al programa se debe estar ubicado en la ruta que contengan todos los archivos del programa, una vez ubicado en la ruta se debe teclear “PEATD” en el “Comand Windows” de MATLAB.

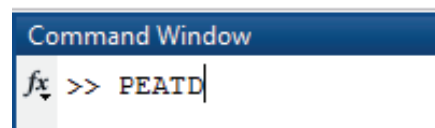


Figura A6.1: Ingreso al programa PEATD

A continuación se despliega la pantalla de inicio por un periodo corto de tiempo.



Figura A6.2: Pantalla de inicio del programa

Posteriormente se observa la ventana en la que se puede elegir el tipo de estudio que se desea realizar, estos son:

- Transformador trifásico autoprotegido
- Transformador monofásico autoprotegido
- Transformador trifásico convencional
- Transformador monofásico convencional



Figura A6.3: Pantalla de selección caso de estudio

Al escoger un tipo de transformador se comienza a abrir la pantalla de datos junto con el modelo del transformador asociado a cada estudio.

6.3 INGRESO DE DATOS DEL TRANSFORMADOR

A continuación se mostrará las principales características del ingreso de datos del transformador, junto con la forma correcta de ingreso.

Figura A6.4 : Pantalla de ingreso de datos del transformador

Descripción de bloques del programa:

1. Bloque de ingreso de datos del transformador

Datos del Transformador	
POTENCIA [kVA]	112.5
MV [L-L]	13800
BV [V L-L]	208
RHV [ohm]	[16.86 13.23 17.8]
RBV [ohm]	[0.027 0.0031 0.0025]
P CA [W]	342
P CC [W]	1270
T Prueba [°C]	18
T Medicion [°C]	21

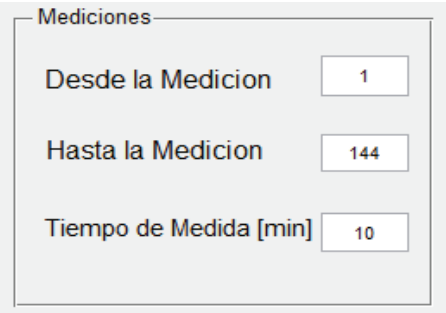
Figura A6.5: Bloque de datos del transformador

En este bloque se debe ingresar todos los datos propios del transformador, como son:

- Potencia en kVA
- Voltaje de media tensión en voltios
- Voltaje de baja tensión en voltios
- Resistencia de bobinas de media tensión en ohmios
- Resistencia de bobinas de baja tensión en ohmios
- Pérdidas de pruebas de circuito abierto en vatios
- Pérdidas de pruebas de corto circuito en vatios
- Temperatura de la prueba en el laboratorio en °C
- Temperatura a las que se realizaron las mediciones en °C

La única diferencia del ingreso de datos entre el transformadores monofásicos y el trifásicos se da en el ingreso de las resistencias de bobinados, para los transformadores trifásicos se ingresa los datos en forma de vector, es decir entre corchetes $[H1-H0 \ H2-H3]$, estos datos corresponden a las resistencias en paralelo del circuito en delta del lado primario del transformador, para las resistencias de bajo voltaje se ingresan las resistencias $[X1-X2 \ X2-X3 \ X3-X0]$, correspondientes a cada bobina del circuito en Y del lado secundario; para el caso de transformadores monofásicos el ingreso de resistencias se realiza directamente sin corchetes; para el bobinados de medio voltaje se ingresa la resistencia $H1-H0$ correspondiente al circuito en medio voltaje y la resistencia $X3-X1$ correspondiente a la bobina total del arrollamiento de bajo voltaje.

2. Bloque de mediciones



Mediciones	
Desde la Medicion	1
Hasta la Medicion	144
Tiempo de Medida [min]	10

Figura A6.6: Bloque de mediciones

Este bloque consta de tres datos de entrada, la medición inicial con la que se inicia la ejecución del programa, la medición final de la ejecución y el tiempo entre una medición y otra del analizador de red en minutos, estos datos están previamente cargados, con carga inicial 1, carga final 144 y 10 minutos entre carga, dando un análisis de 24 horas según la norma para estudios en estado estable.

3. Botones de ingreso de datos y ejecución del programa

Este bloque presenta los mandos que tiene el usuario para la ejecución del programa, los botones son los siguientes.

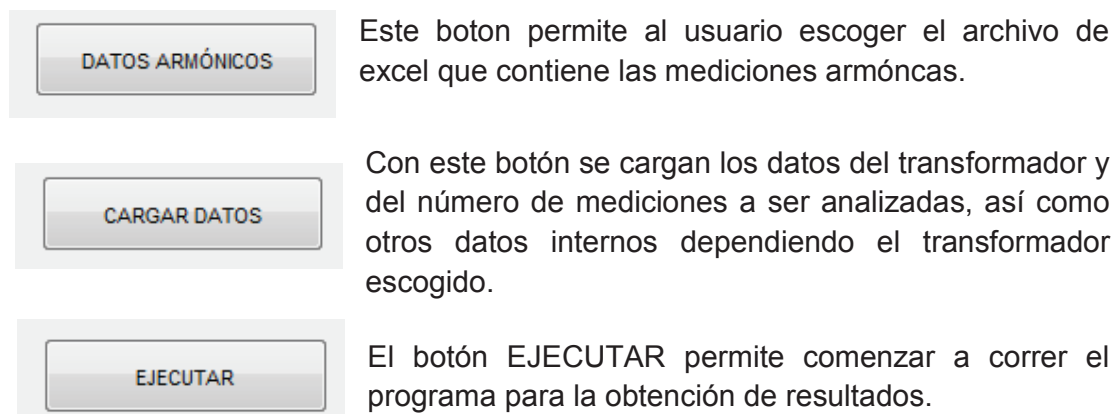


Figura A6.7: Bloque de botones

4. Datos de las mediciones

The image shows a form titled "Datos de Mediciones" with a light gray background. It contains two input fields, each with a label on the left and a text box on the right. The first field is labeled "Fecha y hora inicial" and contains the text "2/9/2014 12:50:00". The second field is labeled "Fecha y hora final" and contains the text "3/9/2014 12:40:00".

Figura A6.8: Bloque de datos de mediciones

Este bloque permite visualizar la fecha y hora en la que se ha realizado la medición seleccionada, para tener un mejor control de los datos que se van a ejecutar.

5. Aviso de datos armónicos erróneos

Los Datos No Corresponden a un Transformador Trifásico

Figura A6.9: Aviso de datos armónicos erróneos

Este mensaje aparecerá cuando se ingrese un archivo de registro de carga erróneo, ya sea un archivo monofásico para un transformador trifásico o viceversa.

6.4 RESULTADOS DEL PROGRAMA

Los resultados tienen dos partes los que se pueden visualizar en el modelamiento y los resultados finales que constan de valores generales de la ejecución del programa y gráficos de resultados.

6.4.1 RESULTADOS EN EL MODELAMIENTO

En el modelamiento se puede visualizar oscilogramas, resultados de apertura y armónicos generados por las cargas.

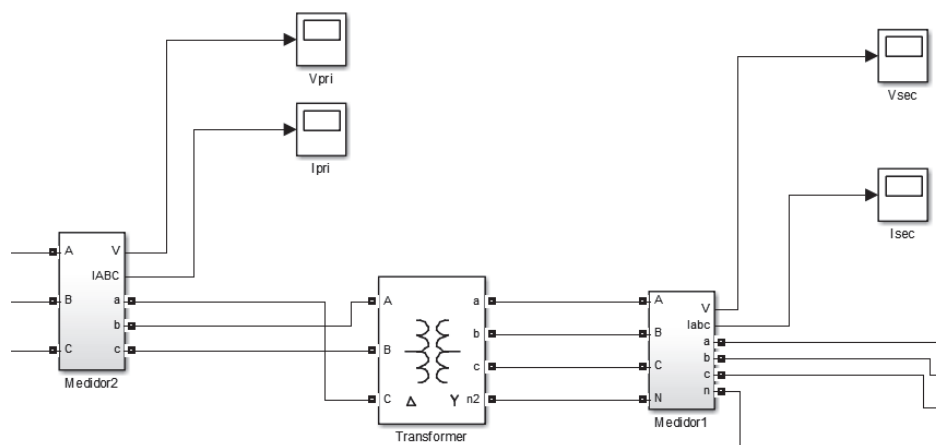


Figura A6.10: Oscilogramas de voltaje y corriente

En estos oscilogramas se visualiza las corrientes y voltajes trifásicos del primario y secundario del transformador.

A continuación se muestra el osciloscopio en el cual se puede visualizar las cargas totales y las entregadas por el analizador armónico, así como los factores THD de cada carga, y la transformada de corrientes armónicas para los cálculos generales.

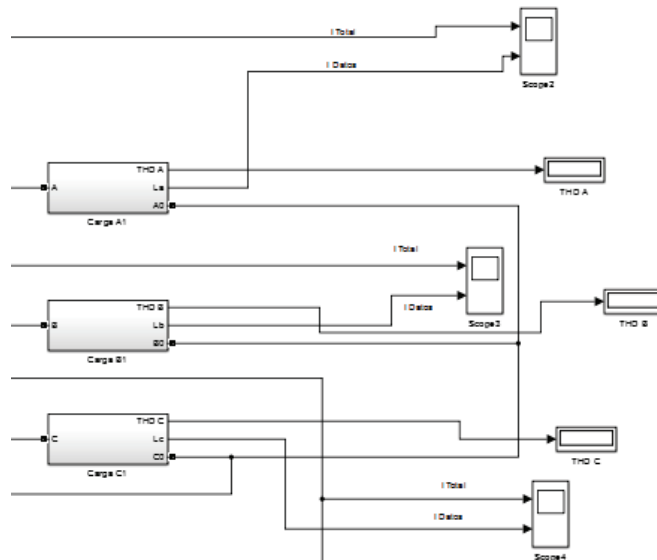


Figura A6.11: Oscilogramas de corriente y factor THD

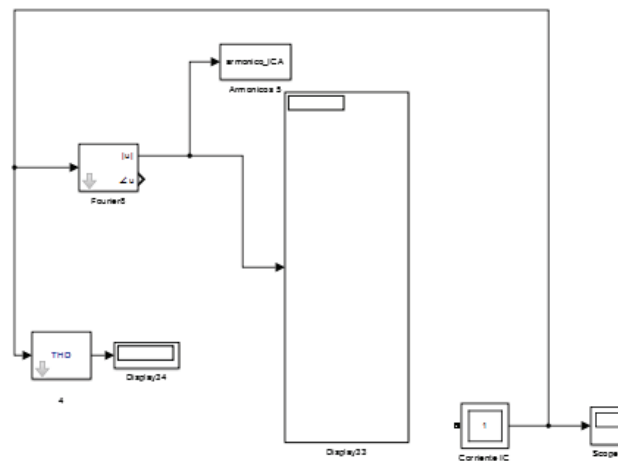


Figura A6.12: Generador de armónicos y medidor de THD

Se muestra la modelación para determinar la apertura del circuito termomagnético, este se puede abrir por cortocircuito, curva tiempo vs. corriente o por temperatura del bimetálico, también se visualiza la corriente que pasa por el interruptor termomagnético.

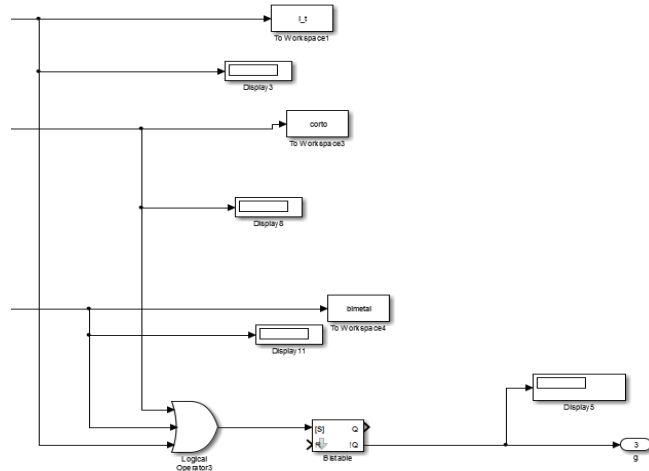


Figura A6.13: Apertura del Circuito termomagnético

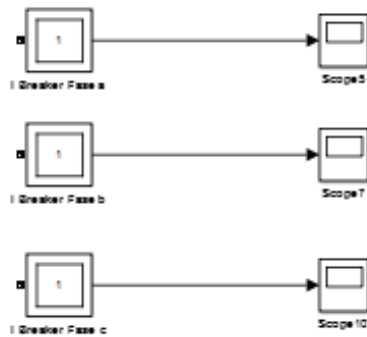


Figura A6.14: Corriente del interruptor termomagnético

6.4.2 RESULTADOS FINALES

Estos resultados corresponden a valores generales entregados al finalizar la simulación, gráficos de temperatura, pérdidas y factores de envejecimiento, así como posibilidad de guardar estos datos en un archivo de Excel para su posterior análisis. En la siguiente figura se presenta la distribución de la ventana de resultados.



Figura A6.15: Pantalla de resultados

Descripción de bloques de resultados

1. Resultados generales

En estos resultados se puede apreciar los siguientes valores

Resultados		
Factor de Envejecimiento Equivalente Sin Carga Armónica [FEQA]		0.00167371
Factor de Envejecimiento Equivalente Con Carga Armónica [FEQA]		0.00342427
Disminución del Porcentaje de Pérdida de Vida [%]		51.1222
Factor K	max	3.51367
	med	1.73255
	min	1.09967
Aumento de las Pérdidas en el Transformador [%]	max	15.961
	med	14.7347
	min	3.58861
Máxima Cargabilidad Armónica Permitida [%]	max	99.3903
	med	95.8791
	min	88.1317
No existe apertura por Temperatura		
No existe apertura por Corto Circuito		
No existe apertura por Disparo Magnético		

Figura A6.16: Bloque de resultados

- **Factor de envejecimiento equivalente (FEQA):** este valor representa la afectación de la vida del transformador con la carga simulada, está determinado para una carga con y sin presencia armónica.
- **Disminución del porcentaje de pérdida de vida (%):** este valor representa en cuanto se reduce la pérdida de vida de una carga sin corrientes armónicas con relación a una carga armónica, establece el incremento de la afectación armónica en la disminución de la pérdida de vida del transformador.

Los siguientes resultados se presentan con sus valores máximos, medios y mínimos, ya que generalmente estos valores se obtienen para cada carga pero se está tomando más de una, por lo que se ve la necesidad de presentar el rango de valores en los que estos varían.

- **Factor K:** este factor indica la estructura del transformador para poder soportar las pérdidas extras por la influencia de cargas no lineales.
- **Aumento de pérdidas en el transformador (%):** Indica el porcentaje en el que se incrementa las pérdidas al tener una carga no lineal.
- **Máxima capacidad armónica permitida (%):** Indica la carga máxima que puede soportar el transformador, bajo la condición de los armónicos máximos.

2. Bloque de informe de apertura

Este bloque nos indica si en el transcurso de la simulación ha existido la apertura del interruptor termomagnético, por cualquiera de las tres condiciones.

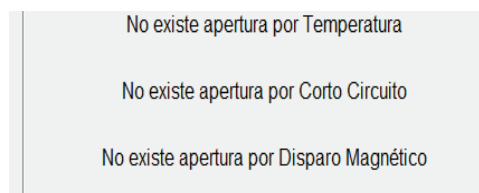
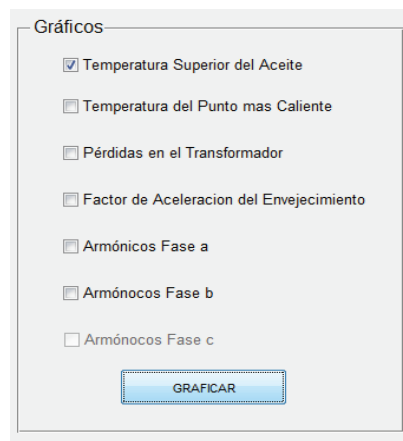


Figura A6.17: Bloque de indicación de aperturas

3. Bloque de gráficos

Este bloque presenta los resultados en gráficos que pueden ser visualizados según escoja el usuario, y guardarlos si así lo desea. Los gráficos que se presentan son los siguientes:

- Temperatura superior del aceite
- Temperatura superior del punto más caliente
- Pérdidas en el transformador
- Factor de aceleración del envejecimiento (FAA)
- Armónicos máximos de la fase a
- Armónicos máximos de la fase b
- Armónicos máximos de la fase c



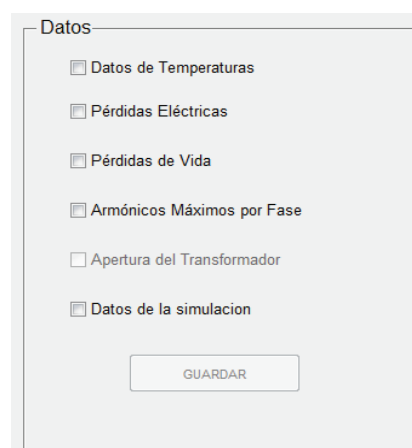
Gráficos

- Temperatura Superior del Aceite
- Temperatura del Punto mas Caliente
- Pérdidas en el Transformador
- Factor de Aceleracion del Envejecimiento
- Armónicos Fase a
- Armónocos Fase b
- Armónocos Fase c

GRAFICAR

Figura A6.18: Bloque de resultados gráficos

4. Bloque de Datos



Datos

- Datos de Temperaturas
- Pérdidas Eléctricas
- Pérdidas de Vida
- Armónicos Máximos por Fase
- Apertura del Transformador
- Datos de la simulacion

GUARDAR

Figura A6.19: Bloque de datos

Con este bloque se puede guardar los datos obtenidos en la ejecución del programa, que son los presentados en los resultados y en las gráficas, estos datos se guardan en un archivo de Excel; el usuario puede escoger que datos desea guardar.

6.5 RECOMENDACIONES PARA EL USO DEL PROGRAMA

Hay que tomar en cuenta ciertas recomendaciones para una buena ejecución del programa, la primera recomendación se da en el ingreso de datos, se debe ingresar de la siguiente forma para no tener errores de "Warning" en MATLAB:

1. Se debe ingresar los datos del transformador.
2. Cargar los datos armónicos de las mediciones realizadas, asegurándose de que sea la correspondiente al tipo de transformador.
3. De ser el caso cambiar los datos de mediciones y tiempo de carga, visualizar en los datos de mediciones.
4. Cargar los datos a las variables globales.
5. Ejecutar el programa.
6. Una vez terminada la ejecución se puede visualizar los resultados.

Si se desea ingresar cargas medidas por otros analizadores o cualquier carga armónica, los archivos de Excel deben cumplir los requerimientos de distribución de mediciones acorde a las celdas del medidor armónico que usa la EEASA, estas características son las siguientes:

- Para archivos trifásicos las mediciones comienzan en la celda C3 con la medición de la corriente fundamental de la fase a en amperios.
- Las siguientes celdas D3 y E3 corresponde a la corriente fundamental de las fases a y b correspondientemente.
- Las demás mediciones tienen la misma distribución, en cada celda la medición correspondiente a cada orden armónico para cada fase.
- El archivo corresponde a armónicos impares hasta el armónico 49.

- Para los transformadores monofásicos la distribución es la misma, solo que tendrá dos fases de medición y no tres como el los trifásicos.

A continuación se muestra el ejemplo de una medición trifásica y otra monofásica:

	A	B	C	D	E	F	G	H	...	BW	BX	BY
1	Fecha	Hora	(A)A1h1	(A)A2h1	(A)A3h1	(A)A1h3	(A)A2h3	(A)A3h3	...	(A)A1h49	(A)A2h49	(A)A3h49
2			A	A	A	A	A	A	...	A	A	A
3	2/9/2014	12:50:00	99,3	132,3	113,8	16,385	14,024	13,542	...	0	0	0
4	2/9/2014	13:00:00	102,4	146,6	99,3	16,794	14,367	13,505	...	0	0	0

Tabla A6.2: Distribución del archivo de mediciones de Excel para transformadores trifásicos

	A	B	C	D	E	F	G	H	...	AY	AZ
1	Fecha	Hora	(A)A1h1	(A)A2h1	(A)A1h3	(A)A2h3	(A)A1h5	(A)A2h5	(A)A1h7	(A)A1h49	(A)A2h49
2			A	A	A	A	A	A	A	A	A
3	6/8/2014	11:00:00	40,9	34,4	3,8037	5,0568	1,227	2,5456	1,4315	0,9407	0,8256
4	6/8/2014	11:10:00	41,6	44,4	4,3264	4,7952	1,6224	2,6196	1,5808	0,8736	0,7548

Tabla A6.1: Distribución del archivo de mediciones de Excel para transformadores monofásicos