UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE GUAYAQUIL

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

PROYECTO DE TITULACIÓN

Previa la obtención del Título de:

INGENIERO ELÉCTRICO

TEMA

"ANÁLISIS MATEMÁTICO Y SIMULACIÓN EN MATLAB DEL FENÓMENO DE FERRORESONANCIA EN BANCO DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS"

AUTORES:

DAVID JESÚS FREIRE MACIAS

VÍCTOR XAVIER GARCÍA ALAÑA

DIRECTOR: ING. NINO VEGA

Guayaquil, Octubre 2018

CERTIFICADOS DE RESPONSABLILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TIULACIÓN

Nosotros, **DAVID JESÚS FREIRE MACIAS** y **VÍCTOR XAVIER GARCÍA ALAÑA** autorizamos a la **Universidad Politécnica Salesiana** la publicación total o parcial de este trabajo de titulación y su reproducción sin fines de lucro. Además, declaramos que los conceptos, análisis desarrollados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad de los autores.

Guayaquil, Octubre, 2018.

Firma: _____
Autor: David Freire M.
Cédula: 0931196133.

Firma:_____
Autor: Víctor García A.
Cédula: 0703132472

CERTIFICADO DE SESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UPS

Yo, **DAVID JESÚS FREIRE MACIAS**, con documento de identificación N° 0931196133, manifiesto mi voluntad y cedo a la **UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA** la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado titulado "**ANÁLISIS MATEMÁTICO Y SIMULACIÓN EN MATLAB DEL FENÓMENO DE FERRORESONANCIA EN BANCO DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS**" mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de **INGENIERO ELÉCTRICO**, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la universidad facultada para ejercer plenamente los derechos antes cedidos.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscrito este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, Octubre, 2018.

f)_____

Autor: David Jesús Freire Macías.

Cédula: 0931196133

CERTIFICADO DE SESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UPS

Yo, **VÍCTOR XAVIER GARCÍA ALAÑA**, con documento de identificación N° 0703132472, manifiesto mi voluntad y cedo a la **UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA** la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado titulado "**ANÁLISIS MATEMÁTICO Y SIMULACIÓN EN MATLAB DEL FENÓMENO DE FERRORESONANCIA EN BANCO DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS**" mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de **INGENIERO ELÉCTRICO**, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la universidad facultada para ejercer plenamente los derechos antes cedidos.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscrito este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, Octubre, 2018.

f)_____

Autor: Víctor Xavier García Alaña

Cédula: 0703132472

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN SUSCRITO POR EL TUTOR

Yo, **NINO VEGA TELLO URETA**, director del proyecto de Titulación denominado "**ANÁLISIS MATEMÁTICO Y SIMULACIÓN EN MATLAB DEL FENÓMENO DE FERRORESONANCIA EN BANCO DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS**" realizado por los estudiantes **DAVID JESÚS FREIRE MACIAS** y **VÍCTOR XAVIER GARCÍA ALAÑA**, certifico que ha sido orientado y revisado durante su desarrollo, por cuanto se aprueba la presentación del mismo ante las autoridades pertinentes.

Guayaquil, Octubre, 2018.

f) _____

Ing Nino Vega Msc.

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a mis padres, hermanos y a toda mi familia, en especial a mi querida madre Ing. Victoria Alaña que ha sido un pilar fundamental para el desarrollo de mis estudios, que con su amor y apoyo me ha dado la fortaleza para no decaer y poder cumplir esta gran meta.

Xavier García Alaña

Este trabajo es dedicado a mis padres, quienes siempre creyeron en mí y me exhortaron a seguir adelante a pesar de cualquier adversidad, brindándome su amor incondicional durante todos los días de mi vida. A mis amigos y familiares que estuvieron pendientes de mí.

David Freire Macías

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a Dios por llenarnos de bendiciones y permitirnos llegar al momento en que terminamos una etapa importante en nuestras vidas, ya que sin su apoyo no habríamos conseguido este logro.

También a nuestros padres y familiares más cercanos, que han hecho posible esto, gracias a su apoyo nos hemos mantenido firmes en nuestro propósito de estudiar a pesar de todos los inconvenientes que se han presentado, dándonos siempre ejemplo de esfuerzo, amor, dedicación y sacrificio.

También queremos agradecer a las personas que contribuyeron para la realización de este proyecto, ya que su aporte fue nuestra mejor guía para culminar con éxito este trabajo. Al Ing. Nino Vega por su valioso aporte y por la entrega desinteresada de su tiempo y conocimientos, quien además de ser nuestro guía y amigo incondicional para afrontar este duro trayecto estudiantil.

RESUMEN

El presente estudio permite demostrar la ocurrencia de la Ferroresonancia como un fenómeno de vital importancia de análisis y debate. Pues produce un recalentamiento en el transformador, provocando una elevación de la tensión y la introducción de una capacitancia al sistema, y si no es mitigado a tiempo, ingresa a los componentes internos como sus inductancias, causando daños serios a los transformadores y por lo tanto pérdidas económicas para una empresa. Normalmente en todo sistema eléctrico se debe conservar en valores constantes la alimentación eléctrica, pero ante este fenómeno, la durabilidad de los componentes que forman dicho sistema se ven comprometidos, lo que causa, un reto a los ingenieros eléctricos para eliminar este fenómeno transitorio, por lo tanto, los estudiantes a fin a esta carreras deben estudiar el inadecuado funcionamiento de los transformadores eléctricos, analizar las causa que lo provocan, y encontrar soluciones para prevenir su ocurrencia en el sistema eléctrico. En este proyecto se realiza un análisis del fenómeno de la ferroresonancia, pasando por la parte matemática circuital, luego por pruebas de laboratorio que se realizó en los bancos de transformadores de la universidad, para dar paso a una simulación de computadora con el uso del software Matlab, finalizando con una comparación de datos. Con esta investigación se pretende contribuir para que los estudiantes de la carrera de Ingeniería Eléctrica puedan conocer los detalles en la ocurrencia y simulación de la ferroresonancia.

Palabras claves: Ferroresonancia, transitorio, transformadores, capacitores, inductancia.

ABSTRACT

The present study allows to demonstrate the occurrence of ferroresonance as a phenomenon of analysis and debate of vital importance. As it produces an overheating in the transformer, which causes a voltage rise and the introduction of a capacitance in the system, and if it is not mitigated in time, it enters the internal components as its inductances, which causes serious damage to transformers and therefore economic losses for a company. Normally, in any electrical system, the electrical energy must be conserved in constant values, but before this phenomenon, the durability of the components that form said system is compromised, which causes a challenge for electrical engineers to eliminate this transitory phenomenon, Therefore, students to follow these careers should study the inadequate functioning of electrical transformers, analyze the causes that cause them and find solutions to prevent their appearance in the electrical system. In this project, an analysis of the phenomenon of ferroresonance is made, going through the circuit mathematical part, then through laboratory tests that were carried out in the transformer banks of the university, to make way for a computer simulation with the use of the software Matlab, ending with a comparison of data. This research is intended to help students of the Electrical Engineering career to know the details of the occurrence and simulation of ferroresonance.

Keywords: Ferroresonance, transitory, transformers, capacitor, inductance.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

PROYECTO DE TITULACIÓN 1
CERTIFICADOS DE RESPONSABLILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TIULACIÓN 2
CERTIFICADO DE SESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UPS3
CERTIFICADO DE SESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UPS 4
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE 5
TITULACIÓN SUSCRITO POR EL TUTOR 5
DEDICATORIA 6
AGRADECIMIENTO 7
RESUMEN 8
ABSTRACT 9
ABREVIATURAS 16
1. EL PROBLEMA 2
1.1. Descripción del problema 2
1.2. Justificación 2
1.3. Importancia y alcance 3
1.4. Delimitación 3
1.5. Objetivos 3
1.4.1. Objetivo General 3
1.4.2. Objetivos Específicos 3
1.6. Marco Metodológico 4
2. MARCO TEORICO 5
2.1. Análisis Matemático 5
2.2. Simulación 6
2.2.1. Característica y clasificación de los sistemas de simulación 6
2.3. Transformadores 8
2.4. Resonancia 9
2.4.1. Circuito resonante lineal 9
2.4.2. Circuito resonante no lineal 10
2.5. Ferroresonancia 11
2.6. Clasificación de los regímenes en ferroresonancia 15
2.6.1. Régimen Periódico Fundamental 15
2.6.2. Régimen Subarmónico 16
2.6.3. Régimen pesudoperiódico 16

2.6.4. Régimen caótico 17
2.7. Análisis del efecto ferroresonante mediante un método gráfico. 17
2.7.1. Ferroresonancia por variación de la capacitancia 19
2.7.2. Ferroresonancia generada por la variación de fuente de alimentación. 20
2.7.3. Ferroresonancia por variación de frecuencias. 20
2.8. Probabilidades de tener el efecto ferroresonante en una red real. 21
2.9. Ferroresonancia presente en la red eléctrica. 22
2.10. Reducción del efecto ferroresonante. 23
2.11. Introducción a la herramienta MATLAB. 23
2.12. MATLAB/SIMULINK 24
2.13. Interface SIMULINK 24
2.14. Librería Simscape/SimPowerSystems 25
3. DESARROLLO DEL PROYECTO 26
3.1. Recolección de datos. 26
3.1.1. Prueba de circuito abierto. 26
3.1.2. Prueba de Corto circuito 28
3.1.3 Prueba para la obtención de la curva de Magnetización. 29
3.2. Análisis de la ferroresonancia 33
3.2.1. Modelo matemático del transformador monofásico 33
3.2.2. Conexión delta con una fase desconectada. 34
3.2.3. Conexión delta con dos fases desconectadas. 39
3.2.4. Conexión estrella con una fase desconectada. 42
3.2.5. Conexión estrella con dos fases desconectadas 45
3.2.6 Magnitudes de reactancias capacitivas e inductivas 47
3.3. Desarrollo en el banco de transformadores. 48
3.3.1. Selección del banco de pruebas. 48
3.3.2. Montaje de las conexiones. 49
4. SIMULACION DE LA FERRORESONANCIA EN BANCOS TRIFASICOS DE TRANSFORMADORES 54
4.1. Elementos utilizados en la simulación del proyecto. 54
4.2. Métodos de Integración en Simulink 59
4.3. Desarrollo del Esquema en el Simulador del efecto de Ferroresonancia. 60
4.4. Pruebas con el Simulador del Efecto de la Ferroresonancia. 62
4.4.1. Configuración Delta con 1.5 µF. 63
4.4.2. Configuración Delta con 10 µF. 63

4.4.3. Configuración Delta con 20 µF. 64
4.4.4. Matlab Guide ferroresonancia 65
4.4.5 Comparación de datos real vs simulado. 67
5. CONCLUSION Y RECOMENDACIONES 69
5.1. Conclusiones 69
5.2. Recomendaciones 70
REFERENCIA BIBLIOGRAFICA 71
APENDICE A 74
APENDICE B 77
APENDICE C 80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Sistema de simulación. 6
Figura 2 : Representación esquemática de un transformador. 8
Figura 3: Resonancia (Serie y paralelo). 9
Figura 4: Circuito Resonante Serie. 9
Figura 5: Circuito resonante no lineal. 10
Figura 6: Corriente de magnetización de un transformador. 12
Figura 7: Circuito Ferroresonante. 12
Figura 8: Corriente de magnetización aproximada por 2 rectas. 13
Figura 9: Oscilaciones libres de un circuito Ferroresonante. 13
Figura 10: Régimen Fundamental. 15
Figura 11: Régimen subarmónico. 16
Figura 12: Régimen casi periódico. 16
Figura 13: Régimen caótico. 17
Figura 14: Circuito Ferroresonante LC. 17
Figura 15: Circuito Ferroresonante con un solo punto de operación. 19
Figura 16: Circuito Ferroresonante con dos punto de operación. 19
Figura 17: Circuito Ferroresonante con variación en el voltaje aplicado. 20
Figura 18: Ferroresonancia por variación de la frecuencia. 21
Figura 19: Ventana de librerías de MATLAB/Simulink. 24
Figura 20: MATLAB/Simulink Librería para sistemas eléctricos SimPowerSystems. 25
Figura 21: Prueba de Circuito abierto – Banco de pruebas de transformadores. 27
Figura 22: Prueba de circuito abierto. 27
Figura 23: Prueba de Corto circuito – Banco de pruebas de transformadores. 28
Figura 24: Prueba de circuito abierto. **¡Error! Marcador no definido.**
Figura 25 : Aproximación de los polinomios a las curvas de magnetización reales de los 3 transformadores. 32
Figura 26. Circuito de transformadores. 33
Figura 27: Conexión delta dos fases energizadas. 34
Figura 28: Transformador en delta 1 fase abierta. 35
Figura 29: Transformador delta simplificando el circuito y considerando a y b como barras infinitas. 35
Figura 30: Transformador en delta 1 fase abierta circuito reducido aplicando Thevenin en el punto c. 35
Figura 31: Transformador en delta con efecto de ferroresonancia, tomando en cuenta sus partes reales. 36
Figura 32: Circuito equivalente para la parte real mediante superposición para VCN. 36
Figura 33: Conexión delta una fase energizada. 39
Figura 34: Circuito simplificado delta 2 fase abierta. 40
Figura 35: Circuito equivalente para la trayectoria 1 o 2. 40
Figura 36: Conexión estrella dos fases energizadas. 42
Figura 37: Circuito simplificado estrella 1 fase abierta. 43
Figura 38: Circuito equivalente utilizando Thevenin en el punto b. 43
Figura 39: Conexión estrella una fase energizada. 45

Figura 40: Circuito simplificado de la conexión estrella 1 fase energizada. 45
Figura 41: Circuito equivalente para conexión estrella 1 fase energizada. 46
Figura 42: Circuito equivalente para conexión estrella 1 fase energizada. 48
Figura 43: Conexiones Delta y estrella del banco de transformadores. 49
Figura 44: Banco de capacitores. 49
Figura 45: Conexiones del banco de transformadores. 50
Figura 46: Corte de interruptores de las líneas. 50
Figura 47: Ocurrencia del fenómeno ferroresonante 1 línea a tierra para 10 y 20 uf. 51
Figura 48: Prueba del efecto ferroresonante 2 líneas a tierra. 52
Figura 49: Prueba del efecto ferroresonante 2 líneas a tierra en conexión estrella. 53
Figura 50: Prueba del efecto ferroresonante ante conexiones estrella. 53
Figura 51: Librería de Alimentadores eléctricos de MATLAB/Simulink. 54
Figura 52: Librería de Elementos fundamentales MATLAB/Simulink. 55
Figura 53: Elemento Interruptor de MATLAB/Simulink. 55
Figura 54: Elemento Constante de MATLAB/Simulink. 55
Figura 55: Elemento Comparador de MATLAB/Simulink. 56
Figura 56: Elemento Resistencia de MATLAB/Simulink. 56
Figura 57: Elemento Capacitancia de MATLAB/Simulink. 56
Figura 58: Elemento Aterramiento de MATLAB/Simulink. 57
Figura 59: Elemento Medidor de voltaje de MATLAB/Simulink. 57
Figura 60: Librería de Medidores de MATLAB/Simulink. 57
Figura 61: Elemento Transformador de MATLAB/Simulink. 58
Figura 62: Elemento Medidor de corriente de MATLAB/Simulink. 58
Figura 63: Ventana de configuraciones de parámetros de MATLAB/Simulink. 59
Figura 64: Sección del circuito diseñado en MATLAB/Simulink 60
Figura 65: Circuito de ferroresonancia diseñado en MATLAB/Simulink. 61
Figura 66: Interfaz de simulación Matlab guide. 61
Figura 67: Resultado del simulador en configuración Delta, con 1.5 µF. 63
Figura 68: Resultado del simulador en configuración Delta, con 10 µF. 64
Figura 69: Resultado del simulador en configuración Delta, con 20 µF. 64
Figura 70: Resultado del simulador en configuración Delta, con 20 µF y falla una línea. 65
Figura 71: Resultado del simulador en configuración Delta, con 20 µF y fallan dos líneas. . 66
Figura 72: Resultado del analizador de redes ante una falla de 2 fase a tierra con 10 uf. ... 67
Figura 73: Resultado del simulador ante una falla de dos fases a tierra con 10 uf. 67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Lecturas obtenidas de la prueba con circuito abierto. 28
Tabla 2: Lecturas obtenidas de la prueba con corto circuito 29
Tabla 3: Datos de la curva de magnetización de los transformadores. 30
Tabla 4: Resultados de pruebas con 10 y 20 µf. 51
Tabla 5: Resultados de pruebas con falla en dos líneas con 10 µf. 52
Tabla 6: Valores a utilizar en el simulador..... 62
Tabla 7: Resultados de simulación con falla en una línea con 20 µf. 65
Tabla 8: Resultados de simulación con falla en dos líneas con 20 µf. 66
Tabla 9: Comparación de los resultados obtenidos en el banco de transformadores y simulados..... 68

ABREVIATURAS

$\emptyset$	Flujo
$\emptyset_{sat}$	Flujo de saturación
$\emptyset_{max}$	Flujo de máxima
di/dt	Derivada de la corriente respecto al tiempo
SEP	Sistema eléctrico de Potencia
V	Voltaje
I	Corriente
E	Alimentación suministrada
E_L	Voltaje del inductor
E_C	Voltaje del capacitor
f_0	Frecuencia fundamental
$3f_0$	Tercera frecuencia armónica
nf_0	N-ésima frecuencia armónica
f_1	Frecuencia uno
f_2	Frecuencia dos
nf_1	N-ésima frecuencia armónica de la frecuencia uno
mf_2	M-ésima frecuencia armónica de la frecuencia dos
fem	fuerza electromotriz
C	Capacitor
SAT	Saturación
L	Inductor
L_{sat}	Inductancia de saturación
q	Carga eléctrica
t_0	Tiempo inicial
t_1	Tiempo en el punto 1.
t_2	Tiempo en el punto 2.
t_3	Tiempo en el punto 3.
V	Voltaje
V_0	Voltaje inicial
V_1	Voltaje en el punto 1.
V_2	Voltaje en el punto 2.
w	Frecuencia Angular

w_1	Frecuencia Angular en el punto 1.
Y	Conexión Estrella
D	Conexión Delta
XM	Reactancia del Transformador en condiciones normales
XMS	Reactancia del Transformador en saturación
Xc1	Reactancia capacitiva
XAB, XBC, XCA	Reactancia efectiva de los devanados AB, BC y CA
VAN, VBN, VCN	Voltajes línea a tierra

INTRODUCCION

La ferroresonancia magnética es el fenómeno eléctrico que se presenta durante el intercambio entre dos estados estables, es decir, es un fenómeno transitorio que puede generar fallos en transformadores debido a la sobre carga de tensiones. Todo sistema eléctrico está propenso a presentar variaciones en sus fuentes por lo tanto se plantea la importancia del estudio de un proceso transitorio que es reconocido a nivel mundial. Como indica Maklad refiriéndose a la ferroresonancia "es un fenómeno de salto asociado con circuitos que contienen básicamente un inductor no lineal y un condensador lineal. Para ciertos valores de los parámetros de circuito RLC, voltaje aplicado y frecuencia de forzamiento, existen dos modos de operación estables: un modo de señal mejorada y un modo de señal deprimida" [1].

En el marco teórico del presente documento se presentan un conjunto de definiciones y explicaciones que permiten profundizar más en el tema de la ferroresonancia, esto permite facilitar su comprensión y ocurrencia, principalmente para aquellas empresas que procesan la electricidad controlada en base a transformadores.

El proceso de demostrar la ocurrencia de la ferroresonanacia origina al presente documento, para lo cual se realizará el análisis, estudio, simulación de desarrollo práctico de la misma. Para el desarrollo de la presente investigación se utiliza el programa MATLAB por sus confiables condiciones y funciones de simulaciones eléctricas y se gestiona el desarrollo de un circuito para el análisis de la ferroresonancia utilizando los componentes y herramientas del laboratorio de la Universidad Politécnica Salesiana.
En este proyecto de grado se presenta en 5 cinco capítulos en los que se redacta lo siguiente: Capítulo 1: Presenta el problema y los objetivos de estudio, Capítulo 2: se desarrolla el marco teórico donde se recopila la información necesaria para conocer al fenómeno y sus características, Capítulo 3: Se presentan los diagramas y conexiones además de las fórmulas implicadas, Capítulo 4: Se realiza la simulación para la comparación con la práctica física, y Capítulo 5: relacionado con los análisis y conclusiones.

CAPÍTULO I

1. EL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

En los sistemas de distribución eléctrica cuando se producen fallas por efecto de pérdidas de una o dos líneas de alimentación, se presenta un fenómeno transitorio que puede ocasionar elevaciones de voltaje y seguidamente saltos en las protecciones, inadecuado funcionamiento de los transformadores, daños de los transformadores, disminución del tiempo de vida, y avería de los equipos conectados en las líneas alimentadas, etc.

Éste fenómeno en el transitorio es la ferroresonancia y se caracteriza por la aparición de una capacitancia al aterrarse una línea de alimentación de un transformador. Éste tipo de fenómenos causa diversos problemas derivados de los picos de voltajes que se presentan en fragmentos de segundos pero su daño es muy grande. Éste estudio se ha desarrollado para demostrar la ocurrencia de la ferroresonancia en un banco de transformadores de la Universidad Politécnica Salesiana, y los resultados serán comparados con los obtenidos al diseñar un simulador en MATLAB, por lo tanto se gestiona la siguiente duda:

¿Es posible realizar un análisis matemático, simulación y experimentación del fenómeno de la ferroresonancia con los bancos de transformadores de la Universidad Politécnica Salesiana?

1.2. Justificación

Algunos estudiantes y profesionales del área eléctrica no han experimentado el evento de la ferroresonancia, lo que genera una curiosidad de conocer en detalle este fenómeno, sus consecuencias hacia las líneas y circuitos conectados a la falla eléctrica. La presente investigación se ha desarrollado con el objetivo fundamental de presentar un estudio de la ferroresonancia magnética en transformadores trifásicos pertenecientes a los bancos de transformadores de la Universidad Politécnica Salesiana, donde durante el estudio de la carrera de ingeniería eléctrica se realiza un conjunto de prácticas de laboratorio pero no contempla el análisis de la ferroresonancia. A partir de aquí se puede demostrar que la

importancia del presente documento es de carácter académico y permitirá beneficiar a los estudiantes y a mejorar la comprensión de las clases impartidas.

1.3. Importancia y alcance

El proyecto planteado es muy valorado en los estudios de transformadores utilizados por las compañías de distribución del suministro eléctrico, por lo tanto también para todo estudiante de Ingeniería Eléctrica, principalmente porque éste fenómeno puede afectar la vida útil de los transformadores y equipos a su vez de provocar grandes pérdidas a futuro. El estudio realizado permite conocer las características y condiciones que causan el efecto de ferroresonancia y de este modo determinar un control sobre las variables que permitan evitar éste efecto.

1.4. Delimitación

El proyecto de tesis está previsto a efectuarse en la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil, específicamente en el Laboratorio de Transformadores, el estudio del fenómeno de la ferroresonancia se centrara en el régimen fundamental por lo extenso del proyecto, con el propósito de beneficiar e incentivar a los estudiantes cursantes de Ingeniería Eléctricas al análisis del fenómeno de la ferroresonancia a través de prácticas seguras y controladas. Se debe recordar que dichos bancos son utilizados constantemente para otros experimentos y se pueden desarrollar otros estudios más de gran interés profesional del país.

1.5. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Analizar y comprobar experimentalmente el comportamiento del Fenómeno de Ferroresonancia en un Banco de Transformadores Trifásicos.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Analizar matemáticamente el Fenómeno de Ferroresonancia.
- Comprobar experimentalmente el fenómeno de la ferroresonancia en el banco de transformadores del laboratorio de la UPS y compararlo con una simulación en Matlab.

- Simular fallas de caída de líneas de alimentación en sistema trifásico y comprobar experimentalmente el comportamiento Ferroresonante.
- Determinar magnitudes críticas de reactancias capacitivas e inductivas que afectan a este fenómeno.

1.6. Marco Metodológico

En el presente proyecto se emplean varios métodos de la investigación entre ellas el método analítico, que permite recopilar toda la información relacionada con el fenómeno de diferentes fuentes; la experimentación controlada para sustentar adecuadamente el desarrollo del ensayo en el laboratorio de la universidad; y el método gráfico para representar a través de un lenguaje computarizado el proceso de la ferroresonancia.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEORICO

2.1. Análisis Matemático

El análisis matemático se considera como una de las ramas de la matemática pura que permite estudiar los números, funciones y vectores tomando como base la formulación matemática. Desde la formación básica del Ministerio de Educación se presenta el análisis matemático como una herramienta útil para el estudiante y tomando en cuenta lo indicado en Ecured [2], el análisis matemático cubre los siguientes campos:

- Análisis real. Que comprende el estudio de las derivadas e integrales de las funciones reales.
- Análisis funcional. Abarca principalmente el Espacio de Banach y de Hilbert y las funciones relacionadas.
- Análisis armónico. Demuestran el estudio de la serie de Fourier y las abstracciones derivadas.
- Análisis complejo. Se comprende del estudio del plano complejo con relaciones diferenciales y funciones holomorfas.
- Análisis p-ádico. Abarca el estudio y aplicación de los números p-ádicos.
- Análisis no estándar. Está comprendido por el análisis de los números infinitesimales, hiperreales y las funciones relacionadas.

A lo largo del estudio de toda ingeniería se requiere la aplicación del análisis y cálculo matemático, así como lo expresan Courant y Jhon: “Las nociones básicas del Cálculo son la derivada y la integral: la derivada es una medida de la ‘rapidez’ de una variación; la integral, una medida del efecto total de un proceso de cambio continuo”. [3, p. 25]

En este proyecto de grado el análisis matemático permitirá establecer los lineamientos necesarios para desarrollar la investigación sobre la ferroresonancia aplicando los conceptos matemáticos que permite el estudio y análisis de éste fenómeno.

2.2. Simulación

Una simulación, para nuestro entendimiento actual, es una herramienta de estudio que permite desarrollar un entorno de variables controladas tanto en un medio físico como electrónico facilitando una investigación.

Himmelblau & Bischoff afirman que una simulación es el estudio de un sistema o sus partes mediante manipulación de su representación matemática o de su modelo físico. [4]

Por su parte Ruiz asevera que: "La simulación es una forma de abordar el estudio de cualquier sistema dinámico real en el que sea factible poder contar con un modelo de comportamiento y en el que se puedan distinguir las variables y parámetros que lo caracterizan". [5, p. 0]

2.2.1. Característica y clasificación de los sistemas de simulación

Todo sistema de simulación debe basarse en una clasificación según el tratamiento de las variables durante su operación: Continuos y discretos. En la figura 1 se puede apreciar lo que se nombra como escenario, que está formado por un estímulo recibido, los parámetros, las condiciones que controlan a los parámetros, el modelo a seguir y la respuesta generada. [5, p. 4]

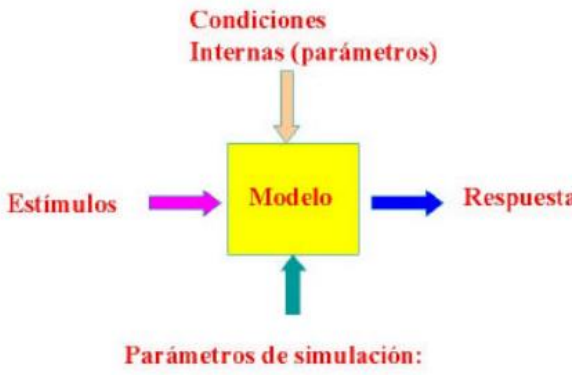


Figura *1*: Sistema de simulación.

Fuente: [5, p. 4]

De la figura 1 se puede deducir que:

- Los **estímulos** son reconocidos como las acciones que inician la simulación, pudiendo ser física o virtual.
- Las **respuestas** son los términos y operaciones de salida del proceso.
- Las **condiciones internas** son las reglas que son cumplidas por las variables a durante una operación.
- Los **parámetros** son limitaciones del modelo, generalmente de tiempo, cantidades de cálculos y gráficos generados.

Ruiz indica que la diversidad de campos de estudios ha permitido el desarrollo de múltiples entornos de simulación que dificulta la realización de clasificaciones específicas, pero todas en general poseen un conjunto de características en común: [5, p. 5]

- Entorno Gráfico.
- Posibilidad de Conexión con el exterior.
- Incorporación de módulos de planificación del aprendizaje.
- Posibilidad de conexión con otros programas.
- Lenguaje de programación gráfica.
- Posibilidad de ampliación de biblioteca de objetos.
- Interfaces Hombre Máquina.
- Instrumentación Virtual.
-

Los aspectos que permiten apreciar una simulación son el entorno gráfico y la interfaz, estos dos son totalmente tangibles para el usuario y son la representación de la simulación siendo los elementos finales del mismo.

La simulación en este proyecto nos permitirá observar los cambios en la forma de onda cuando se presente los distintos fallos de desconexión de las líneas de alimentación de los bancos de transformadores, se cuenta con la posibilidad de modificar los parámetros relacionados que permiten determinar los valores de tensión de las pruebas.

2.3. Transformadores

Entre la variedad de equipos eléctricos que son utilizados en una red, los transformadores son unos de los más utilizados debido a que regulan los parámetros necesarios de la alimentación eléctrica como indica a continuación:

> "Se denomina transformador a un dispositivo electromagnético (eléctrico y magnético) que permite aumentar o disminuir el voltaje y la intensidad de una corriente alterna de forma tal que su producto permanezca constante (ya que la potencia que se entrega a la entrada de un transformador ideal, esto es, sin pérdidas, tiene que ser igual a la que se obtiene a la salida)" [6].

Todo transformador está constituido como mínimo de una bobina principal que posee la alimentación eléctrica, una bobina secundaria que recibe la inducción magnética y genera otra carga, ésta puede incrementarse y disminuirse en función de la relación corriente/voltaje generada. También se cuenta con un núcleo que sirve como estructura y permite la conducción magnética. Ver figura 2.

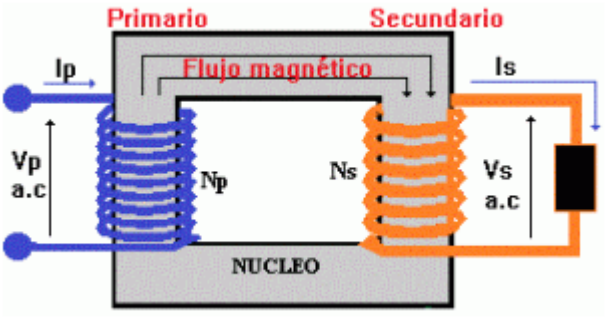


Figura *2* : Representación esquemática de un transformador.

Fuente: [7]

2.4. Resonancia

La resonancia de un circuito eléctrico compuesto por una inductancia no linear y de núcleo de hierro, que es excitado por una alimentación de corriente que es alternada, durante la variación se genera el efecto. En la figura 3 se muestran dos circuitos con arreglos en serie y en paralelo. “La resonancia paralelo, que es más usual en la práctica electrónica” [8].

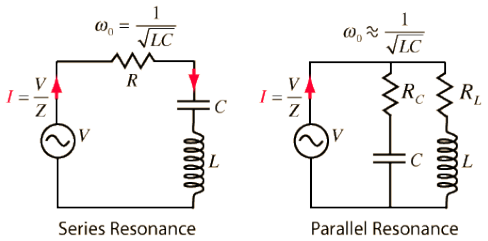


Figura 3: Resonancia (Serie y paralelo).

Fuente: [8]

2.4.1. Circuito resonante lineal

La inductancia en los circuitos simples resonantes es normalmente de núcleo de aire por lo que no posee variación. La corriente que pasa por los elementos es la misma, La suma de los voltajes será en la parte vectorial. En los circuitos resonantes lineales similares a la figura 4, sus valores ya están prácticamente predefinidos, se tendrá una reactancia capacitiva cuya ecuación está representada en la Ecuación 1 y una reactancia inductiva que está definida por la Ecuación 2, la cual estará dada en ohm.

$$Xc = \frac{1}{wC} (1)$$

$$Xl = wL (2)$$

Dónde: w = 2πf de la cual su frecuencia f está dada en Hz.

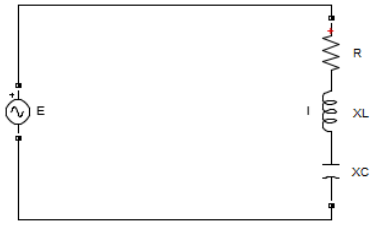


Figura 4: Circuito Resonante Serie.

Fuente: Los Autores.

La solución para este circuito mostrado en la figura 4, se obtiene mediante la ley de voltaje de Kirchhoff donde por sumatoria de voltajes se obtiene la Ecuación 3, y replanteando se obtiene Ecuación 4, y la corriente en la Ecuación 5.

$$E = VR + VC + VL (3)$$

$$E = IR + IXL + IXC (4)$$

$$I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + (XL + XC)^2}} (5)$$

2.4.2. Circuito resonante no lineal

Estos circuitos se caracterizan por poseer impedancias con valores constantes en función del tiempo y con la variación que depende de muchos factores los cuales pueden ser frecuencia, voltaje, corriente.

La inductancia con no linealidad también puede deberse a su fabricación por tener un núcleo de hierro u otro material que cambie sus propiedades físicas químicas y eléctricas, su forma de representarla puede ser con una línea recta que cruza la inductancia tal como se muestra en la figura 5, donde esta representa una no linealidad y saturación tanto en sus puntos máximos y mínimos.

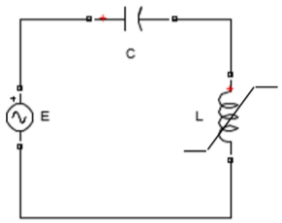


Figura 5: Circuito resonante no lineal.

Fuente: Los autores.

2.5. Ferroresonancia

La Ferroresonancia es un efecto caracterizado por un fenómeno en el transitorio, el cual puede causar sobre-tensiones o sobre-corrientes con formas de onda no regulares que están relacionados en su gran mayoría por la excitación de una o más inductancias no lineales saturables por medio de un elemento capacitivo aplicado en serie. En un circuito lineal resonante, las reactancias capacitivas e inductivas poseen la misma magnitud en el tiempo eliminándose el efecto entre ellas, por lo que la resistencia es el único elemento que se opone a la corriente generando así sobretensiones y sobre corriente que no son adecuadas para la frecuencia de resonancia. Para mantener la frecuencia en una operación estable, el efecto debe ser mitigado por la aplicación de un control de frecuencia o con la instalación de una resistencia pura.

La ferroresonancia tiene semejanza con la resonancia, que ocurre en los circuitos RLC en serie, presentándose como un circuito lineal al poseer valores constantes. Pero en los circuitos Ferroresonantes con inductancia no lineal la corriente de magnetización posee una característica que no es sinusoidal, aunque la tensión aplicada si lo sea. [9] afirma que:

> La ferroresonancia es un fenómeno no lineal complejo que involucra interacción entre las características de saturación de un transformador y una capacitancia. La ferroresonancia es capaz de producir sobretensiones sostenidas con magnitudes máximas que se aproximan y en ocasiones exceden dos veces la tensión máxima nominal.

El módulo de la tensión a los extremos de L no es proporcional a la corriente que circula por el sistema, ya que L no es un parámetro constante debido a que varía dependiendo de la ubicación del transformador respecto al codo de saturación. La característica de voltaje del inductor será en función de la corriente $E_L = F(I)$ es lo que se denomina curva de magnetización del circuito magnético de la inductancia presentada en la Figura 6, se debe tomar en cuenta que E_L es el voltaje del inductor, e I es la corriente, además observamos que antes de llegar al codo de saturación el voltaje aumenta y la corriente varia en menor escala pero cuando el transformador entra en saturación el voltaje deja de aumentar respecto a la corriente la cual se incrementa.

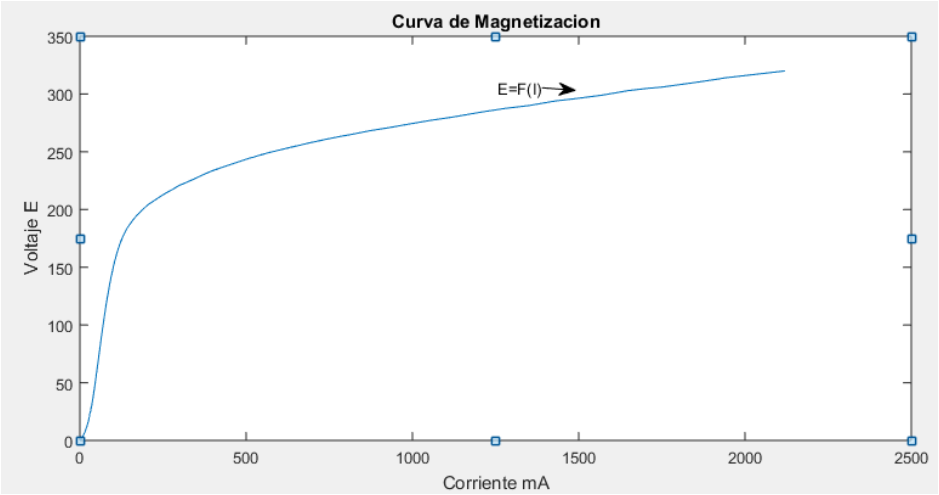


Figura 6: Corriente de magnetización de un transformador.

Fuente: Los Autores.

Principales diferencias entre un circuito ferroresonante y un circuito resonante:

- ✓ La ferroresonancia ocurre para distintas magnitudes de capacitancias.
- ✓ La forma de onda de voltaje y corriente puede presentar diferencias a su fuente de generación.
- ✓ La existencia de varios regímenes en estado transitorio y otros en menor medida en estado estable para los parámetros del circuito.

Cuando un transformador se encuentra en vacío se produce la ferroresonancia, también al poseer poca carga o incluso al opera en las proximidades del codo de la curva de magnetización.

Si te toma un circuito simple como se muestra en la figura 7, el cual está formado por un transformador, un interruptor K, la resistencia R, capacitor C que es cargado con una corriente i.

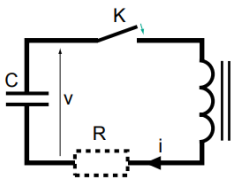


Figura 7: Circuito Ferroresonante.

Fuente: [10, p. 6]

La figura 8 representa la curva de magnetización del núcleo de hierro del transformador. De ésta gráfica se puede visualizar el flujo de saturación $\emptyset_{sat}$, y un flujo máximo $\emptyset_{max}$, inductancia de saturación L_{sat}. La curva de magnetización puede ser modelada mediante dos rectas en las cuales se puede identificar dos inductancias, una de no saturación y la otra en saturación.

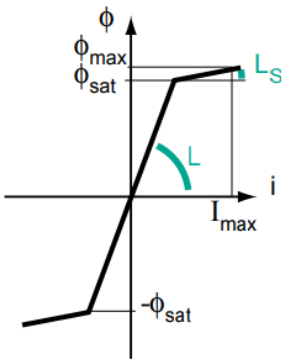


Figura 8: Corriente de magnetización aproximada por 2 rectas.

Fuente: [10, p. 6]

La figura 9 es la representación de las ondas existentes durante una resonancia periódica. De esta gráfica se puede determinar que V_0 es el voltaje inicial en los terminales del capacitor, t_0 es el tiempo inicial, t_1, t_2 y t_3 son los tiempos de interés de la gráfica, V_1 y V_2 son voltajes estabilizados.

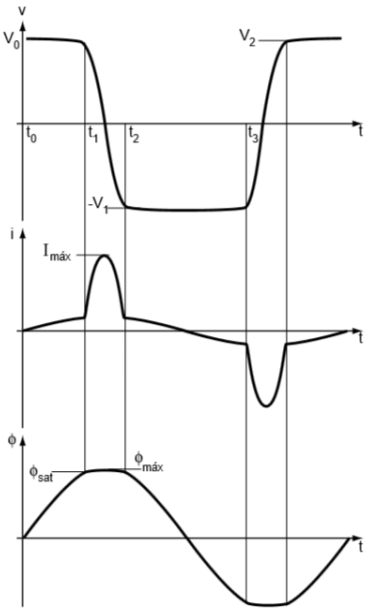


Figura 9: Oscilaciones libres de un circuito Ferroresonante.

Fuente: [10, p. 6]

Se cierra el interruptor K de la figura 7 en el momento t_0, la corriente resultante oscila con la pulsación dada por la Ecuación 6. El flujo de la bobina se expresa mediante la Ecuación 7, y el voltaje de los terminales del capacitor se relación por la Ecuación 8.

$$w_1 = 1/\sqrt{LC} \tag{6}$$

$$\emptyset = \left(\frac{Vo}{w_1}\right) sin(w_1 t) \tag{7}$$

$$V = Vocos(w_1 t) \tag{8}$$

Si al final de tiempo t_1 la relación $Vo/w_1 > \emptyset_{sat}$, entonces el flujo alcanza el valor de flujo de saturación $\emptyset_{sat}$, el voltaje presente en el circuito es V_1 obteniéndose una inductancia de la bobina saturada como L_{SAT}.

Debido a que la inductancia del núcleo del transformador (L) es mayor que la inductancia de saturación del transforma (LSAT), el capacitor se descarga repentinamente en una oscilación de pulsación según la Ecuación 9.

$$w_2 = 1/\sqrt{L_{SAT}C} \tag{9}$$

En el tiempo t_2 el flujo posee un valor $\emptyset_{sat}$, la inductancia es L, el voltaje es $-V_1$ si se ignoran las pérdidas.

Ya en el momento t_3, el voltaje posee un valor $-V_2$ con un flujo que alcanza la saturación $-\emptyset_{sat}$. Para éste proceso se considera que V_1 es muy pequeño entonces $V_0 = V_1 = V_2$. El período de la oscilación se encuentra dentro de dos casos: sin saturación según la Ecuación 10 y con saturación según la ecuación 11.

$$T = 2\pi\sqrt{L \cdot C} \tag{10}$$

$$T = 2\pi\sqrt{L_S \cdot C} + 2(t_3 - t_2) \tag{11}$$

Se considera la siguiente relación $t_3 - t_2 = \frac{2\emptyset_{sat}}{V_0}$. Ya teniendo el periodo, la frecuencia resultante es: $\frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}} < f < \frac{1}{2\pi\sqrt{L_S \cdot C}}$, la cual depende de $\emptyset_{sat}$ y del voltaje inicial.

2.6. Clasificación de los regímenes en ferroresonancia

Ferraci [10] en su documento indica que la ferroresonancia posee diversos regímenes derivados de las simulaciones del fenómeno, reduciendo la presencia de riesgo y evitando daños a los equipos de un laboratorio. Los regímenes en el periodo de ferroresonancia son:

- Régimen periódico fundamental.
- Régimen subarmónico.
- Régimen pseudoperiódico.
- Régimen caótico.

2.6.1. Régimen Periódico Fundamental

En éste régimen los voltajes y corrientes son armónicos con un período igual al del sistema y puede poseer varios armónicos. El espectro de señales está constituido de una forma discontinua de la fundamental f_0 y sus armónicas ($2f_0$, $3f_0$….). La figura 10 muestra las gráficas del voltaje respecto al tiempo, frecuencia y corriente.

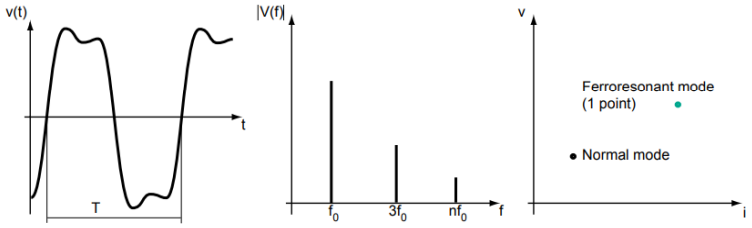


Figura *10*: Régimen Fundamental.

Fuente: [10, p. 8]

2.6.2. Régimen Subarmónico

En éste régimen, los voltajes poseen un período dado por un múltiplo de su período, respecto a la segunda gráfica, se usan las subarmónicas o armónicas 1/n de la fundamental, donde se visualiza el crecimiento de cada armónico en función de f_0. En el trazado estroboscópico de la última gráfica se representa **n** cantidades de puntos como armónicos se tengan.

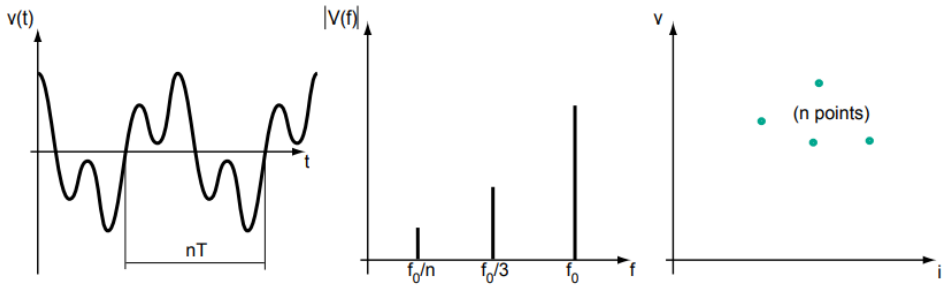


Figura *11*: Régimen subarmónico.

Fuente: [10, p. 8]

2.6.3. Régimen pesudoperiódico

Éste régimen tiene una característica no periódica y se le conoce como pseudoperiódico. Su espectro no es continuo y posee una relación nf_1+mf_2, siendo n y m números enteros, f_1 y f_2 son números reales irracionales. La gráfica estroboscópica se asemeja a una curva cerrada.

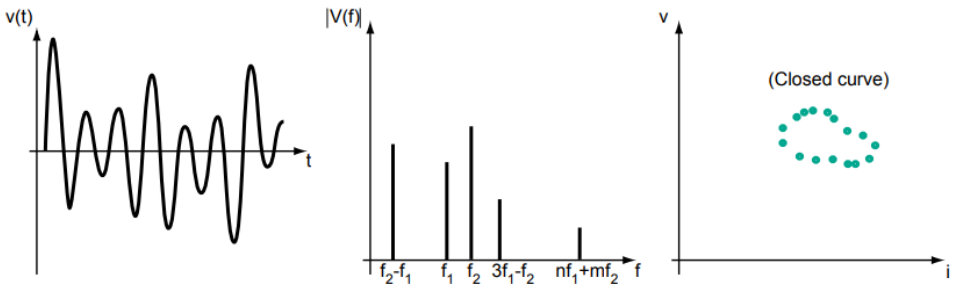


Figura *12*: Régimen casi periódico.

Fuente: [10, p. 8]

2.6.4. Régimen caótico

En éste régimen se presenta un espectro continuo, además de que la gráfica estroboscópica muestra un conjunto de puntos que pueden formar un área denotado como atractor extraño.

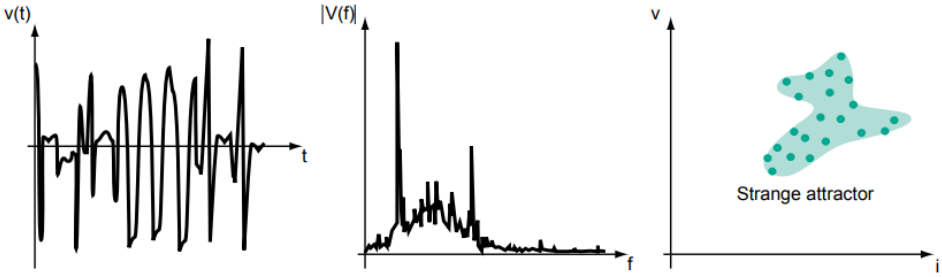


Figura *13*: Régimen caótico.

Fuente: [10, p. 8]

2.7. Análisis del efecto ferroresonante mediante un método gráfico.

En la figura 14 se muestra un circuito simple para el estudio de la resonancia donde E corresponde con el voltaje del sistema (tensión en los bornes de la inductancia), el inductor L representa el primario del transformador, R representa a la resistencia del transformador el cual se considera nulo, y la capacitancia C que debe ser conectada a tierra causado por la falla presentada en las redes eléctricas.

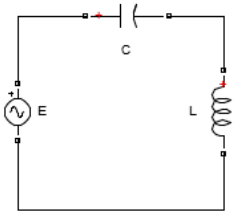


Figura *14*: Circuito Ferroresonante LC.

Fuente: Los autores.

Aplicando la Ley de Kirchoff, al realizar la sumatoria del voltaje capacitivo y del voltaje inductivo, se obtiene el voltaje total de la fuente en un circuito resonante como expresa la Ecuación 12.

$$E = V_C + V_L \tag{12}$$

El voltaje que circula por la bobina inductiva es proporcional a la corriente, y ése elemento presenta unas características ferroinductivas ya que su núcleo es de hierro. La Ecuación 13 demuestra dicha relación:

$$E_L = V_L = wf(I) \tag{13}$$

La tensión en los extremos del condensador corresponde con la Ecuación 14:

$$E_C = V_C = \frac{-I}{wC} \tag{14}$$

Reemplazando los valores de las ecuaciones 13 y 14 en la ecuación 12 se reformula del valor del voltaje resultando la Ecuación 15:

$$E = wf(I) - \frac{I}{wC} \tag{15}$$

Para hallar el punto de funcionamiento del sistema (voltaje a los extremos de la inductancia y corriente que circula), hay que resolver la ecuación anterior obteniendo como resultado la Ecuación 16, teniendo como objetivo la ferroresonancia en un solo punto de operación como se muestra en la figura 15.

$$f(I) = \frac{E}{w} - \frac{I}{w^2C} \tag{16}$$

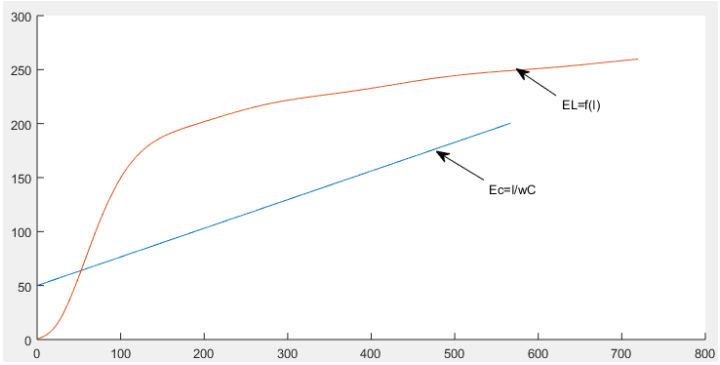


Figura *15*: Circuito Ferroresonante con un solo punto de operación.

Fuente: Los autores.

2.7.1. Ferroresonancia por variación de la capacitancia

Para obtener un efecto ferroresonante causado por variación de la capacitancia se debe tener en consideración que todos los parámetros del circuito deben ser constantes. Esto se debe a que la variación de la capacitancia causa la variación en la pendiente de la recta de la figura 16.

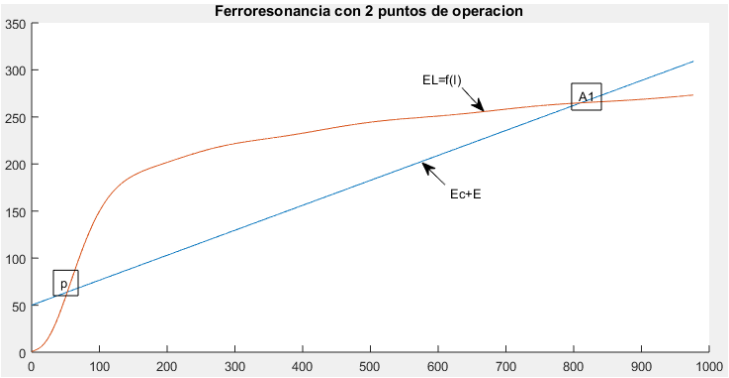


Figura *16*: Circuito Ferroresonante con dos punto de operación.

Fuente: Los autores.

Se puede visualizar que el punto **p** se encuentra ubicado en el segmento lineal del transformador, en cambio el punto **A1** se halla en el segmento no lineal, lo que corresponde con la saturación. Al incrementarse rápidamente la intensidad, se produce un aumento del voltaje en los conectores del capacitor, como éste actúa en el mismo sentido del voltaje de la fuente, éste efecto incrementa el voltaje en el punto **A1** causando el incremento violento de la tensión del inductor resultando una fuerza electromotriz, $fem = -L \cdot di/dt$, que es opuesta al sentido de la corriente y a su vez mayor que la generada por el capacitor, $E = q/C$.

2.7.2. Ferroresonancia generada por la variación de fuente de alimentación.

La ferroresonancia puede ser obtenida mediante la variación de la fuente de alimentación, la cual ante un rango capacitivo dado en los parámetros de su configuración, puede dar distintos puntos de corte tal como se encuentra ilustrada en la figura 17, donde se observa diversos cortes de la pendiente capacitiva para distintos valores de una fuente de alimentación.

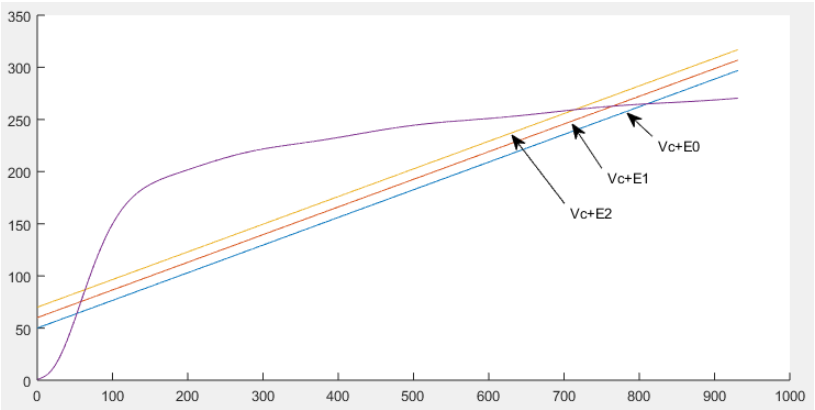


Figura 17: Circuito Ferroresonante con variación en el voltaje aplicado.

Fuente: Los autores.

El incremento de voltaje modifica el comportamiento del circuito produciendo un cambio de un estado inductivo a uno capacitivo, hecho que no puede ser revertido cuando el voltaje disminuye.

2.7.3. Ferroresonancia por variación de frecuencias.

Al variar la frecuencia se modifica el circuito debido a que la inductancia y capacitancia están dominados por la misma, las inductancias poseen una relación $X_L = w_L$ y $X_C = 1/w_C$, donde $w = 2\pi \cdot f$, se puede observar que la función del inductor permanece casi igual en la mayoría de las frecuencias dadas, y por la variación de frecuencias la capacitancia en los puntos de operación se obtiene una variación de pendientes como se observa en la figura 18.

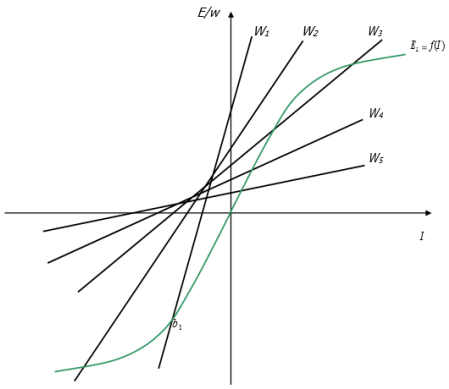


Figura *18*: Ferroresonancia por variación de la frecuencia.

Fuente: [11, p. 45]

Esto permite determinar que con frecuencias inestables o fluctuantes en función del tiempo se puede incrementar la posibilidad del efecto ferroresonante y la duración de su transitorio así como disparos en el voltaje no controlados.

En base a la frecuencia obtenida, las líneas que son representadas poseen una pendiente establecida, con esto se genera un punto de corte con la gráfica de magnetización. Para w_1 la intercepción es negativa, también con w_2. Para w_3 se generan dos puntos de corte, y con w_4 y w_5 se obtienen un punto de corte y es positivo. El incremento de la frecuencia genera una disminución de la pendiente de la recta permitiendo controlar el punto de corte y alejarse de la condición crítica de la ferroresonancia.

2.8. Probabilidades de tener el efecto ferroresonante en una red real.

Existe un conjunto de parámetros que permiten la ocurrencia de la ferroresonancia durante el suministro eléctrico, entre los causantes más básicos se presentan los siguientes factores:

- Transformadores que posean un núcleo ferromagnético saturable, esto nos indica que su inductancia interna de magnetización posera una no linealidad.

- La mayoría de las redes subterráneas usan conductores mono polares apantallados tipo XLPE, por lo tanto al ocurrir una falla a tierra provoca una conexión de las capacitancias simultáneamente. Convirtiendo al conductor largo en una gran capacitancia que permite la ocurrencia del fenómeno de la ferroresonancia de un modo muy rápido con una probabilidad muy alta de dañar los equipos conectados.

- Que en la red eléctrica exista como mínimo un punto donde el potencial eléctrico pueda ser variable, interruptores que hayan tenido fallas que produzca una fisión de su fusible, que el neutro de este sea tipo aislado etc…

- Elementos que se encuentren en corto circuito o comúnmente en transformadores donde cuya carga es mínima o en vacío.

2.9. Ferroresonancia presente en la red eléctrica.

Como la ferroresonancia es un transitorio en la escala del dominio del tiempo, se puede observar sus efectos con el paso del tiempo y más aún en transformadores con pocas protecciones debido al esfuerzo electromecánico que este genera. Además muchos efectos pueden ser visibles o audibles como es el caso del ruido que se genera dentro del transformador cuando este entra en saturación, además de un calentamiento excesivo sin causa aparente cuando está en vacío y la presencia de picos de voltaje el cual puede superar el de su nominal por instantes de segundos.

En los transformadores de potencia se puede generar un desgaste y deterioro en el aislamiento de estos transformadores, formas de onda de tensión e intensidad las cuales no son regulares, en picos muy altos de voltaje cuando el transformador está a su máximo voltaje permitido entrando en saturación se pueden dar fallas en los pararrayos y destrucción de aislamientos

2.10. Reducción del efecto ferroresonante.

Para todo circuito y red eléctrica es fundamental conservar diversas maneras de protección frente al fenómeno de la ferroresonancia, con el objetivo de reducir y evitar completamente el daño de partes y componentes, para ello se debe tomar en cuenta que la longitud de los cables es una de las variables que pueden ser controlados, esto se debe a que ellos se convierten en capacitores cuando se aterran con un valor proporcional a su longitud. Una de las medidas de prevención es la reducción de la longitud de los cables mediante el uso de disyuntores.

Otra acción a realizarse es el aterramiento del neutro del transformador para reducir la aparición de trayectorias LC no lineales. El uso de resistencias en diversos puntos de las redes, incluso en la puesta a tierra, puede ayudar a ajustar la ocurrencia de la ferroresonancia. La configuración de los transformadores en muy importante para la reducción del fenómeno, la agrupación delta tiene mayor propensidad que la estrella, por lo tanto, los transformadores de los sistemas eléctricos utilizan dicho arreglo estrella como principal medida de control.

2.11. Introducción a la herramienta MATLAB.

MATLAB es una de las muchas herramientas de computación disponibles en el mercado, es una de las más populares para resolver problemas matemáticos, MATLAB es superior en los cálculos que involucran matrices el nombre mismo es una abreviación de Matrix Laboratory o también llamado laboratorio matricial. La realización de los cálculos con un programa de computación como MATLAB llega en ciertos casos a sustituir la programación de computadora más tradicional, motivada también por poseer un uso muy simple.

MATLAB sobresalta en cálculos numéricos, principalmente en la generación de diversos gráficos, entre otro aspecto es el gran conjunto de funciones de aplicaciones de ingeniería que desarrollan cálculos avanzados. Además MATLAB puede ser usado para cientos de aplicaciones como analítica de datos, análisis de producción, visión artificial, comunicaciones inalámbricas, procesamiento de señales, robótica, sistemas de control, etc…

2.12. MATLAB/SIMULINK

Simulink anteriormente formaba una parte extra en MATLAB pero ahora se cuenta como parte integral que permite el desarrollo más palpable de diversos elementos y procedimientos visuales, todo esto emparentado con una codificación y configuración de los bloques, inclusive aquellos que hacen uso de tiempos continuos y discretos así como elementos lineales y no lineales, Simulink es parte de MATLAB y no puede ser ejecutado sin el mismo. Simulink tiene dos fases de uso: el análisis y la definición del modelo, el cual es la construcción del mismo en base a elementos propios de este.

Usa diferentes ventanas llamados diagramas de bloques mediante una programación orientada a objetos, Simulink puede simular cualquier sistema que sea definida por ecuaciones diferenciales continuas como discretas.

2.13. Interface SIMULINK

Simulink usa diagramas de bloques para representar sistemas mediante programación orientada a objetos donde los usuarios pueden arrastrar los bloques existentes desde sus librerías y luego interconectarlas entre sí. Simulink trae consigo una gran cantidad de librerías destinadas para distintos fines como se observa en la figura 19.

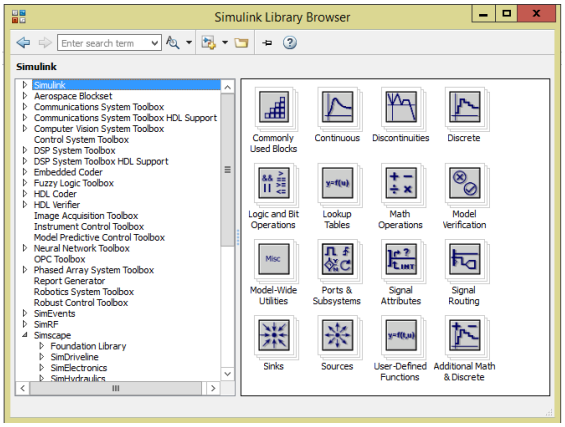


Figura 19: Ventana de librerías de MATLAB/Simulink.

Fuente: Los autores.

2.14. Librería Simscape/SimPowerSystems

SIMULINK posee un amplio repertorio de librerías que abarca consigo muchos campos de la investigación. En la presente investigación será aplicada la librería *PowerLib* principalmente por contar con diversos elementos eléctricos con funciones muy específicas. Ver figura 20.

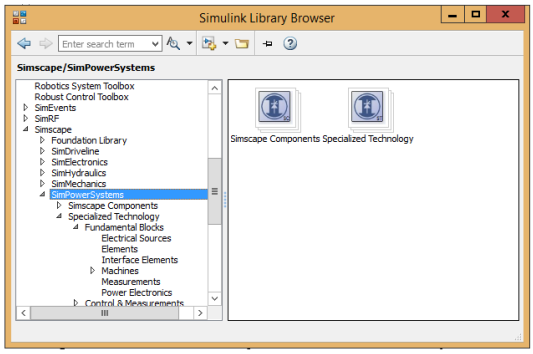


Figura 20: MATLAB/Simulink Librería para sistemas eléctricos SimPowerSystems.

Fuente: Los autores.

CAPÍTULO III

3. DESARROLLO DEL PROYECTO

El proyecto ha sido desarrollado por etapas para demostrar de manera organizada su ejecución. Las etapas son las siguientes:

1. **Recolección de datos.** Ésta consiste en dos pruebas y aplicación de conceptos básicos de transformadores, entre ellas las comunes son la prueba de circuito abierto y de cortocircuito, curvas de magnetización de los transformadores.
2. **Análisis numéricos**. En ésta sección se expresan los cálculos y determinaciones de los valores que deben ser utilizados durante los experimentos del banco de transformadores.
3. **Desarrollo en el banco de transformadores**. Se demuestra de manera experimental en el banco de transformadores de la Universidad Politécnica Salesiana en las configuraciones delta y estrella el efecto de la ferroresonacia.
4. **Simulación en MATLAB.** Estos procedimientos y resultados están indicados en el Capítulo IV y comprende la aplicación del programa MATLAB para analizar y comparar el fenómeno de ferroresonancia.

3.1. Recolección de datos.

3.1.1. Prueba de circuito abierto.

Esta prueba nos permite determinar los parámetros internos del transformador como la reactancia de magnetización y las pérdidas del núcleo, se lleva a cabo alimentando el primario del transformador llegando hasta su voltaje nominal, teniendo en cuenta que el transformador debe estar en vacío (sin carga), se procede a tomar lecturas de los datos obtenidos como V_{ca}, I_{ca}, P_{ca}. Este proceso se repitió para los 3 transformadores de manera individual, en la figura 21 se observa el proceso para realizar las pruebas.

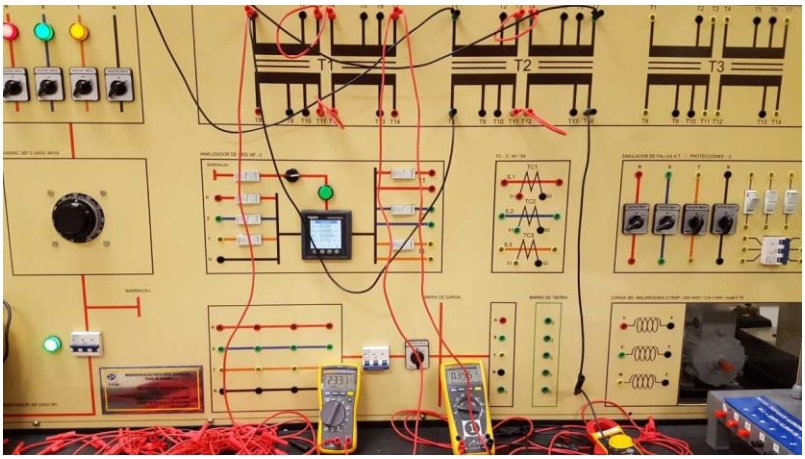


Figura 21: Prueba de Circuito abierto – Banco de pruebas de transformadores.

Fuente: Los autores.

Para realizar esta prueba, se siguen los procedimientos indicados por [12], creadores del banco de transformadores. Se realizan las conexiones que se indican en la figura 22.

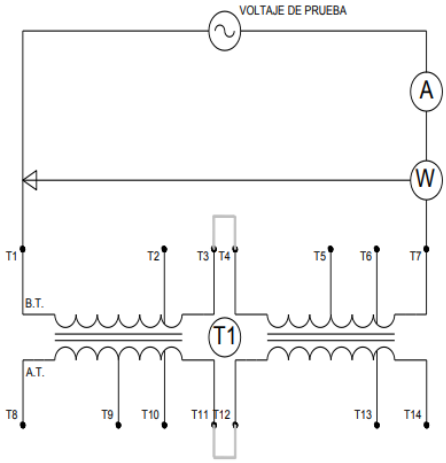


Figura 22: Prueba de circuito abierto.

Fuente: [12, p. 65]

Se aplica el voltaje de prueba y se toma la medición de la corriente y potencia indicado en la pantalla del analizador del banco de transformadores. Los resultados obtenidos de esta prueba son los siguientes:

Tabla 1: Lecturas obtenidas de la prueba con circuito abierto.

Fuente: Los autores.

	Transformador 1	Transformador 2	Transformador 3
V_{ca} (V)	220,4	220,2	220,01
I_{ca} (A)	0,26947	0,35363	0,3816
P_{ca} (W)	20,98	20,58	21,97
Xm (Ω)	743,93	622,68	576,55

3.1.2. Prueba de Corto circuito

Mediante la siguiente prueba obtendremos las resistencias e inductancias de dispersión que están presentes en los bobinados, donde acercaremos la simulación a mayor medida para la cual las reactancias de los devanados tendrá un papel fundamental, los valores necesarios a recolectar en esta prueba está la V_{cc}, I_{cc} y P_{cc}, que aplicando el desarrollo obtendremos nuestras reactancias de dispersión. La figura 23 muestra las conexiones realizadas en el banco de transformadores.

Figura 23: Prueba de Corto circuito – Banco de pruebas de transformadores.

Fuente: Los autores

el primer paso es realizar las conexiones como se muestra en la figura 24. Esta prueba se la realiza después de la prueba anterior ya que su conexión es la misma exceptuando que en esta se cortocircuita el secundario.

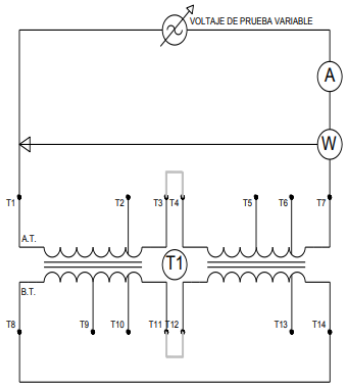


Figura 24: Prueba de corto circuito.

Fuente: [12, p. 65]

Tabla 2: Lecturas obtenidas de la prueba con corto circuito

Fuente: Los autores.

	Transformador 1	Transformador 2	Transformador 3
V_{cc} (V)	10,22	9,36	10,49
I_{cc} (A)	4,03	4,0	3,98
P_{cc} (W)	20,01	19,98	21,08
Lm (Ω)	0.81	1,02	0,9

3.1.3 Prueba para la obtención de la curva de Magnetización.

La obtención de la curva de magnetización se efectuó alimentando el transformador con una fuente de voltaje que supere su valor nominal e ir incrementando desde 0 hasta un rango máximo de un 10% del nominal del transformador, esto permite crear la curva de magnetización que abarque zona lineal de no saturación y la zona saturada. Para elaborar esta práctica se debe tener todas las protecciones adecuadas.

Esta prueba es desarrollada en base a la información indicada por [12], que habla sobre la obtención de datos de los transformadores.

Los valores obtenidos de las curvas de magnetización se muestran a continuación en la tabla 2 que fue construida con valores de voltaje vs corriente. Los valores completos de éstas mediciones se encuentran indicadas en el Apéndice A.

Tabla 3: Datos de la curva de magnetización de los transformadores.

Fuente: Los autores.

Transformador 1		**Transformador 2**		**Transformador 3**	
V	**mA**	**V**	**mA**	**V**	**mA**
0,024	0,0001	0,024	0,0001	0,024	0,0001
0,076	0,00038	0,076	0,00038	0,076	0,00038
0,175	0,00078	0,175	0,00078	0,175	0,00078
0,21	0,00093	2,36	0,0066322	2,12	0,00636
0,65	0,00229	5,78	0,013265	4,7	0,01174
2,38	0,00654	7,77	0,016317	6,9	0,01549
3,38	0,00857	10,2	0,019506	7,8	0,0168
6,16	0,01336	13,06	0,022814	9,28	0,0188
7,7	0,01572	15,32	0,02514	11,23	0,02124
8,2	0,01637	17,12	0,02688	13,09	0,02328
10,35	0,01899	19,37	0,02879	15,7	0,02593
13	0,02203	22,01	0,03089	17,09	0,02722
15,62	0,02454	25,6	0,03331	19,65	0,02937
16,95	0,02581	28,92	0,03558	22,81	0,03184
17,8	0,02669	30,49	0,03667	25,57	0,0337

Para desarrollar éste gráfico se utiliza el MATLAB como soporte, los pasos necesarios son los siguientes:

1. Se ingresan los valores de voltaje y corriente de cada transformador. Éste ingreso se realiza en forma de vector.
2. Por cada transformador se aplica la función polyfit(x,y,n), en MATLAB ésta función retorna los coeficientes de una función polinómica de grado n.
3. La función Poly2sim crea un símbolo polinomial de un vector indicado.
4. La función Inline crea una función a partir de una información estructurada como vector.
5. Seguidamente de realizar el ordenamiento de los datos se procede a utilizar la función Plot que permite el desarrollo de gráficas.

El código utilizado en MATLAB para desarrollar el modelo matemático se presenta a continuación:

```
yt1=[0.024 0.076 0.175 0.21 0.65 2.38 ... 320];
xt1=[0.1 0.38 0.78 0.93 2.29 6.54 8.57 ... 2120];
yt2=[2.36 5.78 7.77 10.2 13.06 15.32 17.12 ... 300];
xt2=[6.6322 13.265 16.317 19.506 22.814  ... 2470];
yt3=[2.12 4.7 6.9 7.8 9.28 11.23 13.09 15.7 ... 280.6];
xt3=[6.36 11.74 15.49 16.8 18.8 21.24 ... 1800];
%% Polinomio del Transformador 1/
pot1=polyfit(xt1,yt1,22);
pt1=poly2sym(pot1);
polt1=inline(pt1);
xpt1=0.1:0.1:1800
ypt1=polt1(xpt1)
%% Polinomio del Transformador 2
pot2=polyfit(xt2,yt2,10);
pt2=poly2sym(pot2);
polt2=inline(pt2);
xpt2=0.1:0.1:1800
ypt2=polt2(xpt2)
%% Polinomio del Transformador 3
pot3=polyfit(xt3,yt3,8);
pt3=poly2sym(pot3);
polt3=inline(pt3);
xpt3=0.1:0.1:1800
ypt3=polt3(xpt3)
%% Voltaje del capacitor de 10uf
%%Ec=fu+0.26525*xpt1
%% Graficas de los polinomios
hold on
plot(xpt1,ypt1)
plot(xpt2,ypt2)
plot(xpt3,ypt3)
hold off
ylabel('Voltaje (V)')
xlabel('Corriente (mA)')
```

En la gráfica 25 se ha consolidado la respuesta del trasformador real de su curva de magnetización, con el modelo del mismo obtenido con MATLAB . La grafica de color azul corresponde al funcionamiento real de los tres transformadores monofásicos y las gráficas amarilla, naranja y roja corresponden al modelo obtenido, las ecuaciones matemáticas del modelo se presenta en el apéndice A .

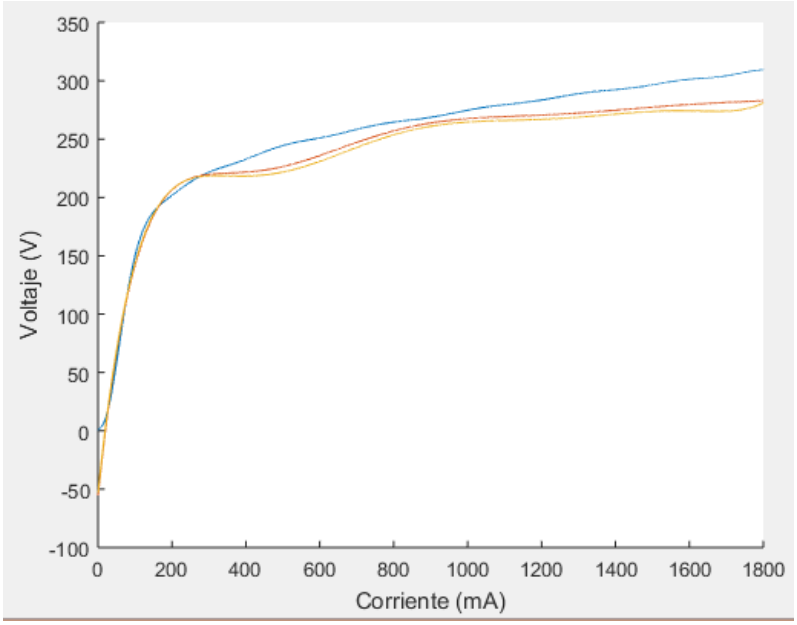


Figura 25 : Aproximación de los polinomios a las curvas de magnetización reales de los 3 transformadores.

Fuente: Los autores.

3.2. Análisis de la ferroresonancia.

El presente análisis está enfocado en demostrar un cálculo aproximado de los voltajes de línea a tierra de redes trifásicas con la presencia de tres transformadores conectados en un arreglo delta y estrella, además cuando se abre una y dos líneas.

3.2.1. Modelo matemático del transformador monofásico

Para el obtener un modelo matemático de un transformador se debe comprender el modelo real del mismo, véase la figura 26.

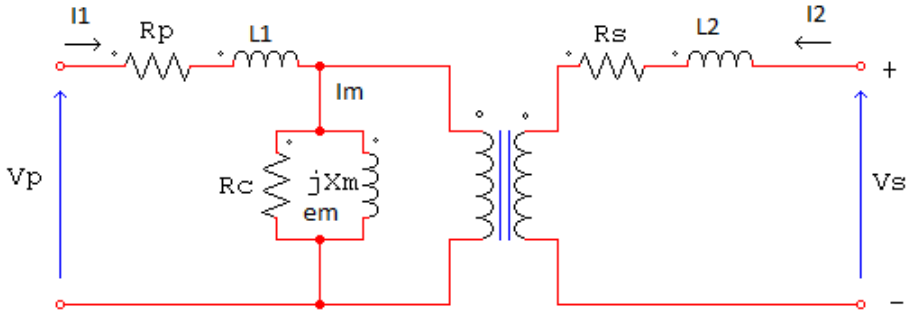


Figura 26. Circuito de transformadores.

Fuente: Los autores.

Aplicando ley de corrientes de Kirchhoff las corrientes de entrada deben ser iguales a las de salida.

$$Im = Ic + Ixm \tag{17}$$

$$I1 + I2 = Im \tag{18}$$

Donde por ley de voltaje de Kirchhoff podemos obtener las ecuaciones diferenciales del mismo.

$$VP = I1 * Rp + I1 * L1 + Rc(I1 + I2 - Im) \tag{19}$$

$$VP = I1 * Rp + \frac{d\,I1}{dt} * L1 + Rc(I1 + I2 - Im) \tag{20}$$

Lo mismo se aplica para la parte secundaria del transformador.

$$VS = I2 * Rs + I2 * L2 + LXm(I1 + I2 - Im) \quad (21)$$

$$VS = I2 * Rs + \frac{d\,I2}{dt} * L2 + LXm(I1 + I2 - Im) \quad (22)$$

Obteniéndose la ecuación para el secundario del transformador.

3.2.2. Conexión delta con una fase desconectada.

Para el análisis de la ferroresonancia en este caso con alta probabilidad de que se presente dicho fenómeno, podemos utilizar la reducción del circuito para facilitar su estudio de una manera rápida y eficaz, para el caso de una fase abierta y el transformador en Delta se tiene un camino no deseado donde la capacitancia de la línea entra a tierra lo cual provoca que el potencial en la línea abierta es diferente de cero, como se observa en la figura 27.

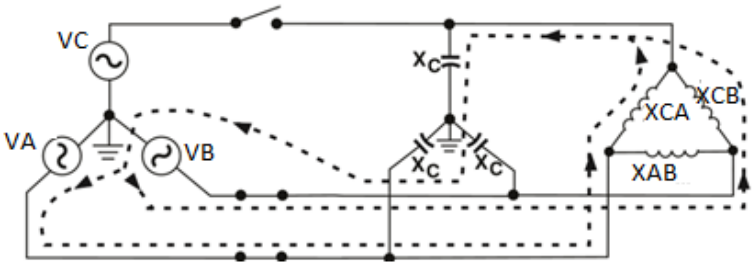


Figura 27: Conexión delta dos fases energizadas.

Fuente: [13, p. 2]

Como se puede visualizar en la figura 26 se obtiene un voltaje de línea abierta a neutro, que será semejante al voltaje de la capacitancia con una nueva corriente la cual será diferente de cero. Entonces el voltaje VC ya no está al potencial de la fuente donde se desarrolla un circuito equivalente para reducir los tiempos de estudio de este fenómeno, en la figura 28 se observa como se ha obviado la línea C en donde ocurrió la falla y se ha incluido el camino a tierra a través de la capacitancia.

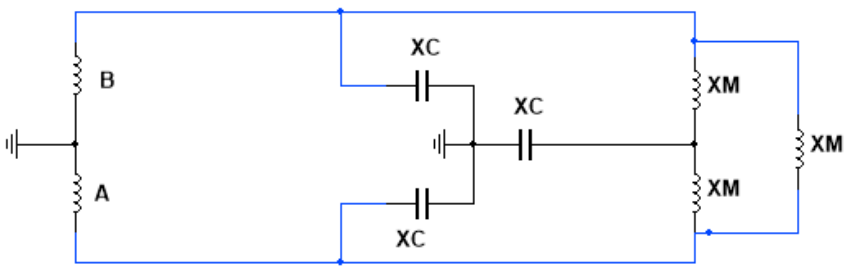


Figura 28: Transformador en delta 1 fase abierta.

Fuente: Los autores.

El circuito de la figura 28 puede ser reordenado como se muestra en la figura 29, donde se marcan los puntos a, b y c.

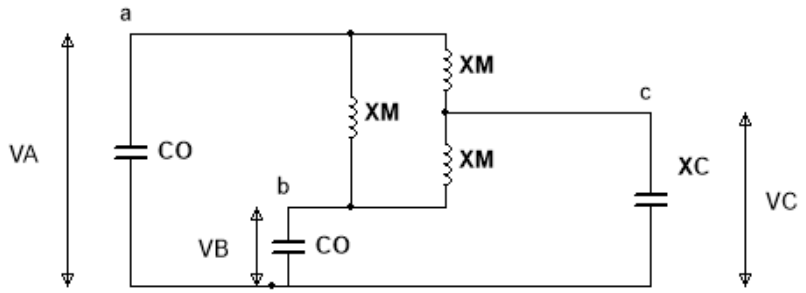


Figura 29: Transformador delta simplificando el circuito y considerando a y b como barras infinitas.

Fuente: Los autores.

Aplicando el teorema Thevenin en el punto c, se obtiene un circuito equivalente como el mostrado en la figura 30, donde el voltaje equivalente se lo puede encontrar aplicando el método de superposición.

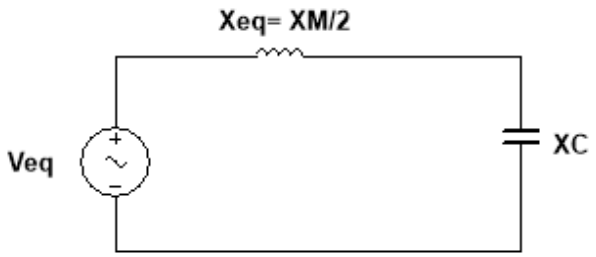


Figura 30: Transformador en delta 1 fase abierta circuito reducido aplicando Thevenin en el punto c.

Fuente: Los autores.

Otro circuito simplificado es el mostrado en la figura 31 donde se puede observar las reactancias inductivas del transformador.

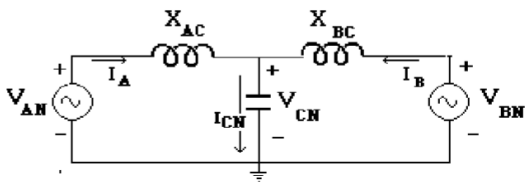


Figura 31: Transformador en delta con efecto de ferroresonancia, tomando en cuenta sus partes reales.

Fuente: *[14, p. 37]*

Cuando se genera una falla en la línea C por una falla del sistema sólo permanecen las alimentaciones generadas por las otras dos fuentes, también han sido eliminados los efectos capacitivos a tierra de la línea a y b junto con el transformador XAB, ya que no afectan al voltaje del punto C. La tensión en la línea A y B son voltajes de línea a tierra con igual magnitud y el desfase de 120 grados entre sí. Esto queda expresado en las Ecuaciones 23 y 24.

$$V_A = V_A(-120°) = V_A\big(cos(-120°) + Sen(-120°)\big) = V_A\left(\frac{-1}{2} - j\sqrt{\frac{3}{2}}\right) \qquad (23)$$

$$V_B = V_B(120°) = V_B\big(cos(120°) + Sen(120°)\big) = V_B\left(\frac{-1}{2} + j\sqrt{\frac{3}{2}}\right) \qquad (24)$$

Donde, $V_A = V_B$ son voltajes prácticamente iguales en magnitud de la parte real. El voltaje restante es el V_C que es diferente de cero y está limitado por la corriente I_C. Como la parte real del voltaje en A y B son semejantes, y que las reactancias de los transformadores entre AC y BC son muy aproximadas entre sí, obtenemos un circuito equivalente simplificado de la figura 32.

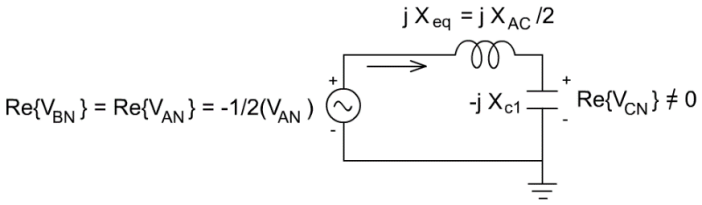


Figura 32: Circuito equivalente para la parte real mediante superposición para VCN.

Fuente: *[14, p. 39]*

A partir de la figura 32 se puede realizar una división de tensión que permita determinar el valor de VC, éste se expresa a través de la Ecuación 25.

$$V_C = \left(\frac{-1}{2}\right) V_A \left(\frac{-X_{C1}}{X_{eq} - X_{C1}}\right) \tag{25}$$

Donde V_A es un voltaje de línea a tierra pero el estudio de este caso es una conexión en delta, entonces se procede a dividir sus magnitudes entre raíz cúbica debido a que el voltaje medido pertenece a la tensión de línea a línea, la reactancia equivalente será la reactancia X_{BC} o X_{AC} entre 2 debido a que estas son iguales, ver Ecuación 26.

$$X_{eq} = \frac{X_{AC}}{2} \tag{26}$$

Reemplazando X_{eq} en la Ecuación 25 y ordenando para obtener la relación X_{C1}/X_{AC}, nos resulta la Ecuación 27.

$$V_C = \left(\frac{-1}{2}\right) V_A \left(\frac{-X_{C1}}{\frac{X_{AC}}{2} - X_{C1}}\right) = V_A \left(\frac{\frac{X_{C1}}{X_{AC}}}{1 - 2\frac{X_{C1}}{X_{AC}}}\right) \rightarrow X_{C1}/X_{BC} = V_C/(2V_C + V_A) \tag{27}$$

A partir de la Ecuación 27 podremos verificar que al variar la relación X_{C1}/X_{AC}, se obtienen los siguientes resultados:

$$\frac{X_{C1}}{X_{AC}} = \frac{1}{2} \rightarrow V_C = \infty$$

$$\frac{X_{C1}}{X_{AC}} = \frac{1}{6} \rightarrow \frac{V_C}{V_A} = 25$$

$$\frac{X_{C1}}{X_{AC}} = \frac{5}{6} \rightarrow \frac{V_C}{V_A} = -125$$

Esto nos demuestra que para la relación X_{C1}/X_{AC} con valores superiores a 1/2, la relación de tensión resultante invierte su fase con valores negativos de V_C.

Con el uso del banco de transformadores trifásicos, se puede obtener una gráfica del voltaje en la línea abierta donde ocurrió una falla V_C contra la relación X_{C1}/X_m. Con la gráfica se puede obtener el voltaje V_C, se debe usar la curva de magnetización de los transformadores mostrada en la figura 25. El procedimiento a seguir es el siguiente:

I. Asumir un valor de voltaje para V_C con respecto a V_A, como se expresa en la ecuación 28, donde n es un valor proporcionado.

$$V_C = nV_A \tag{28}$$

II. Substituir el valor asumido por la relación antes mencionada X_{C1}/ X_{BC} tomando la ecuación 27 y 28 se puede obtener la ecuación 29.

$$X_{C1}/X_{BC} = nV_A/(2nV_A + V_A)\,, alsimplificar: X_{C1}/X_{BC} = n/(2n+1) \tag{29}$$

III. Se puede calcular V_{BC}, resultando la ecuación 30.

$$V_{BC} = mag(V_B - V_C) = \left[V_A\left(\left(\frac{-1}{2}\right) - n - j\sqrt{\frac{3}{2}}\right)\right] = \frac{1}{2}V_A\big((0{,}5+n)2 + 0{,}75\big) \tag{30}$$

IV. De la curva de excitación, se debe leer la corriente I_{BC} correspondiente a V_{BC}, para obtener la ecuación 31.

$$X_{BC} = V_{BC}/I_{BC} \tag{31}$$

V. Determinar la relación entre X_{BC} y X_m (el factor 3 se debe a que X_m de línea a neutro se compara con X_{BC} entre líneas), entonces es nombrado k y determinado por la ecuación 32.

$$k = X_{BC}/3X_m \tag{32}$$

VI. Para encontrar X_{C1}/X_m se aplican los resultados de los pasos II y V, dados por la ecuación 33. Con este procedimiento se encuentra X_{c1}/X_m para el determinado valor de V_C supuesto.

$$X_{C1}/X_{BC} = n/(2n+1) = X_{C1}/3kX_m\,, despejando: X_{C1}/X_m = 3kn/(2n+1) \qquad (33)$$

3.2.3. Conexión delta con dos fases desconectadas.

Cuando se tienen dos fases a tierra en la fuente de alimentación trifásica existen dos trayectorias de flujo de corriente por lo tanto sólo permanecen dos capacitancias activas, esto permite aumentar en gran medida la posibilidad de aparición del fenómeno de la ferroresonancia. La figura 33 muestra el circuito con la configuración el delta y con dos líneas abiertas.

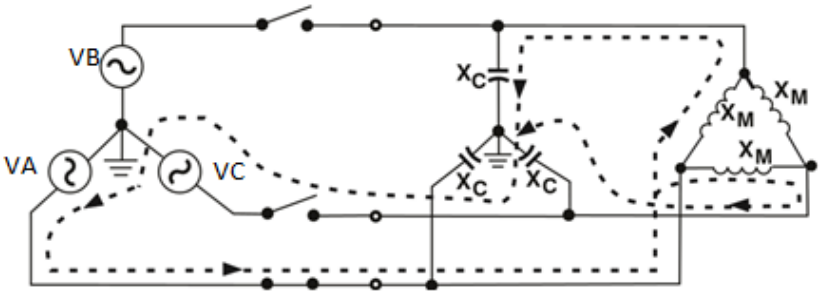


Figura 33: Conexión delta una fase energizada.

Fuente: [13, p. 2]

A partir de la figura 33 se realiza la simplificación del circuito, inicialmente se eliminan las líneas y la capacitancia inactiva resultando el circuito de la figura 34.

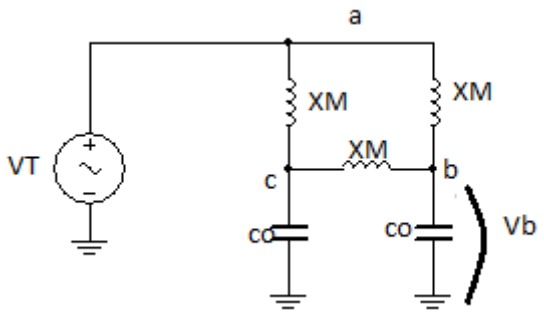


Figura 34: Circuito simplificado delta 2 fase abierta.

Fuente: Los autores.

Aplicando el equivalente Thevenin en el punto a, se desarrolla una simplificación del circuito para obtener la figura 35 que permitirá el estudio del caso.

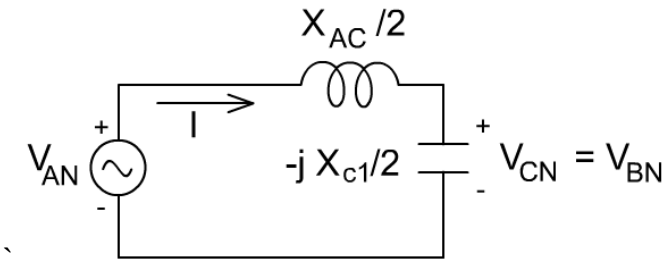


Figura 35: Circuito equivalente para la trayectoria 1 o 2.

Fuente: [14, p. 48]

Con el circuito de la figura 35 se puede realizar un estudio debido a que sus inductancias y capacitancias son iguales, entonces aplicando un divisor de voltaje en la figura 35, resulta la tensión de la Ecuación 34:

$$V_B = V_C = V_A\,(-X_{C1}/2)/\left(X_{eq}/2 - X_{C1}/2\right) \tag{34}$$

Remplazando $X_{eq} = X_A$, resulta la Ecuación 35:

$$V_B = V_C = V_A\,(-X_{C1}/2)/\left(X_{eq}/2 - X_{C1}/2\right) = V_A\left(\frac{X_{C1}/X_A}{X_{C1}/X_A - 1}\right) \tag{35}$$

A partir de la ecuación 35 se puede realizar el análisis de la relación X_{C1}/X_{AC}, asignando algunos valores numéricos:

$$\frac{X_{C1}}{X_{AC}} = 1 \rightarrow V_C = \infty$$
$$\frac{X_{C1}}{X_{AC}} = 5 \rightarrow \frac{V_C}{V_A} = 125$$
$$\frac{X_{C1}}{X_{AC}} = -9 \rightarrow \frac{V_C}{V_A} = 90$$

Como se puede observar, para éste caso cuando la relación X_{C1}/X_{AC} se igualan a la unidad, el voltaje incrementa su valor infinitamente, en cambios para valores superiores e inferiores a éste, el voltaje se conserva positivo. A partir del circuito de la figura 35 puede ser desarrollado un análisis. Si se toma al voltaje de alimentación como referencia V_A = V_A ang (0°), se tiene la ecuación 30 aplicando divisor de voltaje:

$$V_B = V_C = V_A\,(-X_{C1})/\left(X_{eq} - X_{C1}\right) \tag{36}$$

Ahora reemplazando X_{eq}= X_A, resulta la ecuación 37:

$$X_{C1}/X_{AB} = V_B/(V_B - V_A) \tag{37}$$

I. La ecuación 38 se obtiene por asignar el voltaje para la línea abierta.

$$V_C = V_B = nV_A \tag{38}$$

II. Para determinar Xc1/XAB se procede con la ecuación 39:

$$X_{C1}/X_{AB} = nV_A/(nV_A - V_A), alsimplificar: X_{C1}/X_{AB} = n/(n-1) \tag{39}$$

III. La tensión equivalente se obtiene por la ecuación 40:

$$V_{AB} = V_{AC} = mag(V_A - V_B) = magV_{AB}(V_A - nV_A) = V_A(1 + 2n) \tag{40}$$

IV. Reemplazar el voltaje obtenido y la corriente obtenida de la curva de magnetización, resulta la ecuación 41

$$X_{AB} = V_{AB}/I_{AB} \tag{41}$$

V. Al estipular cuando XAB es 3Xm se puede establecer una constante como se muestra en la ecuación 42:

$$k = X_{AB}/3X_m\,, despejandosetieneque: X_{AB}/X_m = 3k \qquad (42)$$

VI. Determinar la relación entre la reactancia capacitiva y la reactancia inductiva para obtener la ecuación 43.

$$X_{C1}/X_m = (X_{C1}/X_{AB})/(X_{AB}/X_m) =, reemplazando: X_{C1}/X_m = 3kn/(n-1) \qquad (43)$$

Con éstas fórmulas se obtiene una gráfica con n puntos que nos permite calcular los valores de voltajes supuestos y a su vez determinar las capacitancias relacionado con dicho fenómeno.

3.2.4. Conexión estrella con una fase desconectada.

Para el estudio del fenómeno de ferroresonancia en el caso de estudio de transformadores en estrella como el mostrado en la figura 36, se observa que ha ocurrido una falla en la línea de alimentación B y debido a que el transformador no se encuentra aterrizado ocurre una trayectoria a través de la capacitancia propia de la línea en la que sucedió la falla a tierra, pero en esta conexión la el efecto ferroresonante será visto como pequeños transitorios en milisegundos.

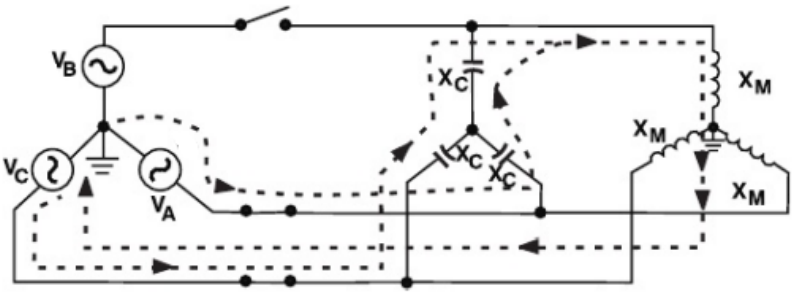


Figura 36: Conexión estrella dos fases energizadas.

Fuente: [13, p. 4]

Al ocurrir la falla en la línea nuestro esquema cambia pasando a ser un nuevo circuito completamente diferente donde el punto de la figura 37 representa el punto donde ocurrió la falla.

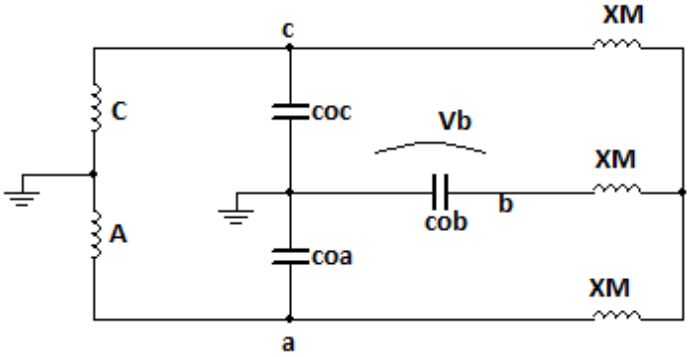


Figura 37: Circuito simplificado estrella 1 fase abierta.

Fuente: Los autores.

Al aplicar el teorema de Thevenin, obtendremos un circuito equivalente mostrado a continuación en la figura 38.

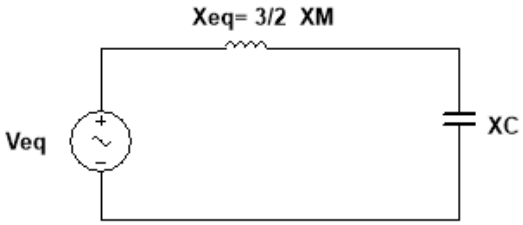


Figura 38: Circuito equivalente utilizando Thevenin en el punto b.

Fuente: Los autores.

A partir del circuito de la figura 38 se puede realizar un análisis iniciado desde el voltaje equivalente mediante el método de superposición. Esto se expresa en la ecuación 44.

$$V_{eq} = \frac{1}{2}(V_C + V_A) \tag{44}$$

Tomando en cuenta la parte real se obtiene la ecuación 45 donde:

$$V_C + V_A = -V_B \tag{45}$$

Por la aplicación de un divisor de voltaje se tiene la ecuación 46.

$$V_B = \frac{-1}{2} V_B \tag{46}$$

E implícitamente la ecuación 47.

$$V_B = \frac{-1}{2} V_B(-X_C/(3/2\, X_m - X_C)) \tag{47}$$

A partir de la relación X_C/X_m, se tiene la ecuación 48 dada por:

$$V_b/V_B = (X_C/X_m)/\big(3 - 2(X_C/X_m)\big) \tag{48}$$

La simplificación para determinar el voltaje se expresa en la ecuación 49.

$$V_b = \frac{-1}{2} V_B(-X_C/(3/2\, X_m - X_C)) = V_B\left(\frac{\frac{X_C}{X_m}}{3 - 2\frac{X_C}{X_m}}\right) \tag{49}$$

Al sustituir la relación X_C/X_m, por valores numéricos establecidos se obtienen los siguientes resultados:

$$\frac{X_C}{X_m} = 3/2 \rightarrow V_b = \infty$$

$$\frac{3}{2} < \frac{X_C}{X_m} < 0 \rightarrow \frac{V_b}{V_B} > 0$$

$$\frac{X_C}{X_m} = 4 \rightarrow \frac{V_b}{V_B} = -80$$

A partir del resultado se puede observar que existe un rango mu pequeño para obtener una fase positiva mientras que el resto de los valores generan un cambio de fase su valor negativo.

3.2.5. Conexión estrella con dos fases desconectadas.

Como último caso de estudio tenemos la posibilidad de ferroresonancia para un transformador en Y no aterrizado con falla en dos conductores de alimentación tanto de a como b, dando como resultado la trayectoria de la figura 39.

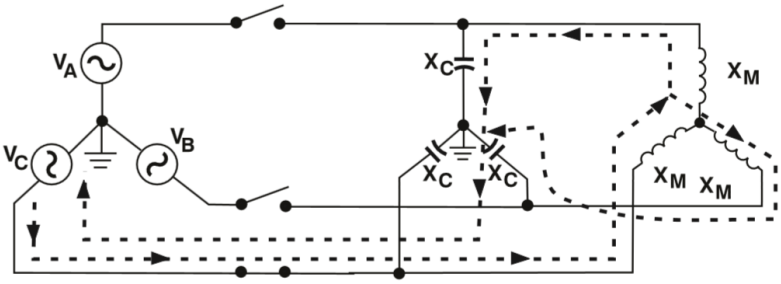


Figura 39: Conexión estrella una fase energizada.

Fuente: [13, p. 3]

Al reorganizar el circuito resultante de la falla de dos de sus líneas se obtiene la figura 40. De aquí se debe tener la consideración que las capacitancias poseen la misma reactancia.

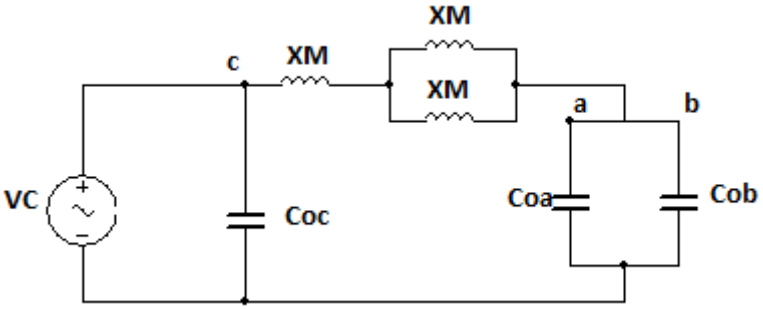


Figura 40: Circuito simplificado de la conexión estrella 1 fase energizada.

Fuente: Los autores.

Aplicando un voltaje equivalente Thevenin se obtiene una reactancia magnetizante y una reactancia capacitiva, ambas equivalentes, que permiten facilitar el estudio, el circuito se muestra en la figura 41.

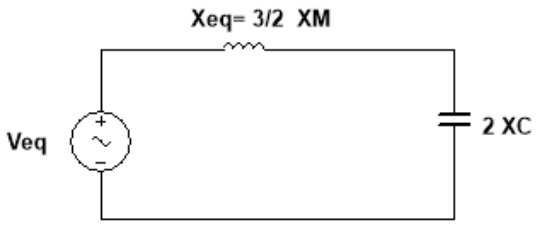


Figura 41: Circuito equivalente para conexión estrella 1 fase energizada.

Fuente: Los autores.

Para determinar el valor de la tensión se aplica una división de tensión obteniéndose la Ecuación 50.

$$V_a = V_b = V_C\left(\frac{-X_C/2}{\frac{3}{2}X_m - X_C/2}\right) = V_C\left(\frac{X_C/X_m}{X_C/X_m - 3}\right) \tag{50}$$

Al tener diversas estimaciones numérica de la relación X_C/X_m, se obtienen los siguientes resultados:

$$\frac{X_C}{X_m} = 3 \rightarrow V_a = \infty$$

$$3 < \frac{X_C}{X_m} < 0 \rightarrow \frac{V_a}{V_C} < 0$$

$$\frac{X_C}{X_m} = 4 \rightarrow \frac{V_a}{V_C} = 40$$

En éste caso, para el rango de valores de la relación XC/Xm, entre 0 y 3, la tención calculada es negativa y de fase inversa, para los otros valores resulta positiva y en el valor exacto de 3, la tensión es infinita.

3.2.6 Magnitudes de reactancias capacitivas e inductivas

De las ecuaciones anteriores se puede obtener los distintos valores que necesitamos para encontrar nuestra capacitancia

$$V_A = V_B = 220/\sqrt{3} = 127.16v$$

La reactancia normal de magnetización de cualquier transformador se obtiene a partir del voltaje nominal de la curva esto es:

$$X_m = 220/0.296 = 743.92\Omega$$

Aplicando los pasos i a vi se tiene:

i) Suponer $V_C = 2V_A = 2 \cdot 70V = 254.32V; n = 2$

ii) $X_{CL}/X_{BC} = 2/(2 \cdot 2 + 1) = 0.4$

iii) $V_{BC} = \big((0.5 + 2)2 + 0.75\big)\, 1/2(127.16V) = 365.58V$

iv) De la curva de excitación, para V_{BC} = se toma un aproximado de la curva de excitación ya que estos valores no se encuentran dentro del rango nominal y la fuente generadora de voltaje tiene un tope límite de 226volts

XBC= 365.58 V / 0.8342 amp = 305 Ω

v) La relación $X_{BC}/3X_m$ será entonces: $k = X_{BC}/3X_m = 305/743.92 = 0.41$

vi) Siendo V_C = 254.42 V, entonces: $X_{CL}/X_m = (3 \cdot 0.41)(0.4) = 0.4999$

Los puntos donde se intercepta más de 2 puntos es para un Vcn vs XC/XM= 0.059 obtenido mediante un método grafico profundizado a más detalle en el Apéndice B.

Con el valor obtenido podemos estimar una capacitancia máxima crítica

$X_{C(crítica)}$ = 0.059 X_m = (0.059)(749.32) = 44.2096 ohm, cuya capacitancia correspondiente es:

$$C_{1(crítica)} = C_1 = 1/(w\ X_{c1(crítica)})$$

Donde f = 60 Hz,

$$C_{1(crítica)} = 1/(2*pi*f*44.20) = 60x10^{-6}$$

$$C_{(crítica)=}\ 60\ uf$$

3.3. Desarrollo en el banco de transformadores.

Para la ejecución del ensayo experimental de la ferroresonancia en el banco de transformadores de la Universidad Politécnica Salesiana, se han tomado un conjunto de precauciones y procedimiento de manera de sistematizar cada práctica en función a cada uno de los circuitos analizados.

3.3.1. Selección del banco de pruebas.

Para asegurar un efectivo desarrollo práctico de la ferroresonancia se realizó una verificación de los bancos de transformadores para seleccionar uno que se encuentre en un estado de funcionamiento idóneo a su estado inicial.

Para esto se realizaron las siguientes verificaciones:

- De los fusibles para reemplazar los que estaban dañados.
- Las conexiones internas para determinar cortos en las barras.
- De interruptores para confirmar el correcto corte de energía.
- De los valores nominales de las fuentes. Para esto se utilizó un multímetro de marca Fluke disponible en el laboratorio.

En la figura 42 se muestra una representación del frontal de un banco de transformadores de la Universidad Politécnica Salesiana.

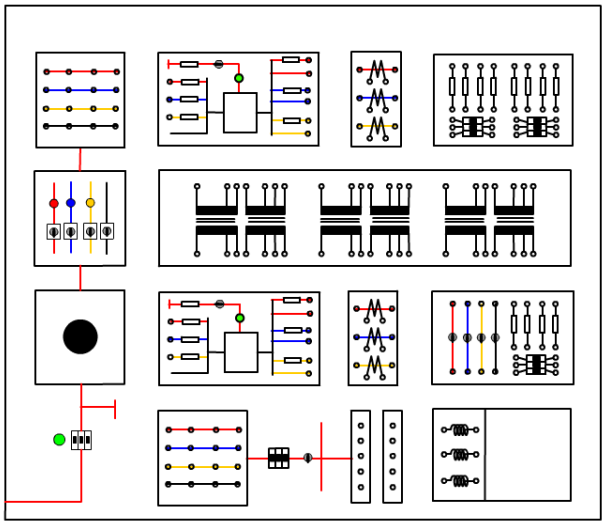


Figura 42: Circuito equivalente para conexión estrella 1 fase energizada.

Fuente: Los autores.

3.3.2. Montaje de las conexiones.

Una vez que se ha seleccionado un banco de transformadores, se realizan las conexiones en base a las figuras 26 y 35, hay que tomar en cuenta que los circuitos armados en los bancos son dos: con configuración Delta y con Estrella, las variantes de cada una de ella se obtienen cuando se usa el interruptor de las fuentes del banco de transformadores para obtener la falla de una o dos líneas de alimentación.

En la figura 43 de muestran las conexiones del banco de transformadores para las dos configuraciones de estudio: Delta y Estrella.

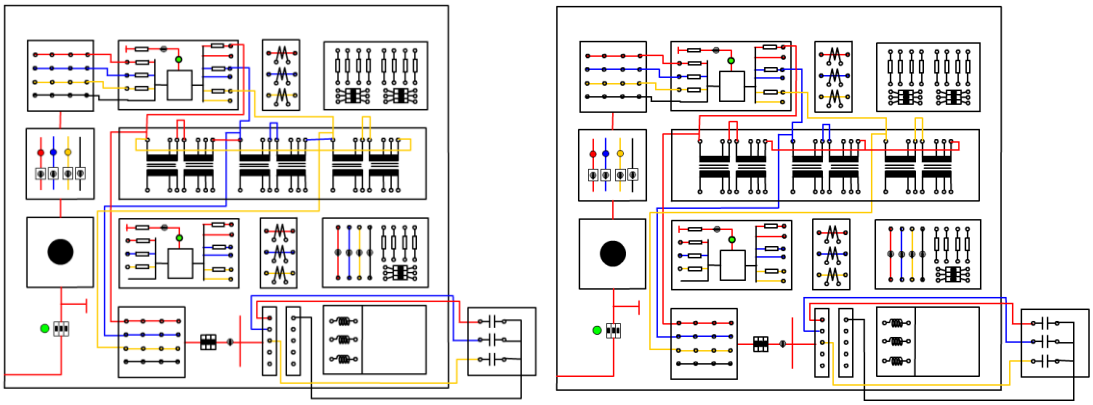


Figura 43: Conexiones Delta y estrella del banco de transformadores.

Fuente: Los autores.

En la sección derecha de la figura derecha se representa un pequeño banco de capacitores que ha sido creado para establecer el cambio de tres valores de capacitancia: 1.5, 10 y 20 μF. Estos dispositivos permiten completar los diagramas, el banco de capacitores se muestra en la figura 44.

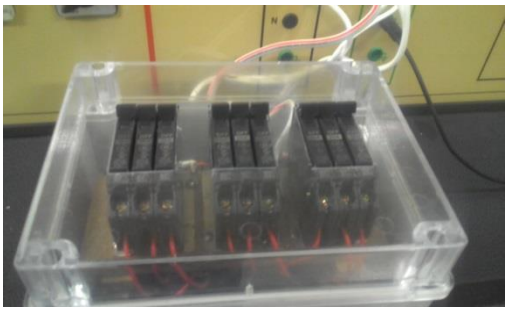


Figura 44: Banco de capacitores.

Fuente: Los autores.

Para realizar los ensayos en el banco de transformadores y basados en la configuración de sus dispositivos, se procedió de la siguiente manera:

1. Se verificaron y reemplazaron los fusibles inoperativos.
2. Se realizaron las conexiones como se muestran en la figura 39.
3. Se verificaron que la perilla de la fuente estaba en posición mínima, los interruptores del banco en encendido (ON).
4. Se activa la alimentación eléctrica y se eleva el voltaje hasta 120 V.

Para éstos pasos todas las líneas están activas y no se aplican fallas por lo tanto la diferencia de cada configuración corresponde a la conexión con los transformadores. En la figura 45 se expone la realización de las conexiones del banco de transformadores.

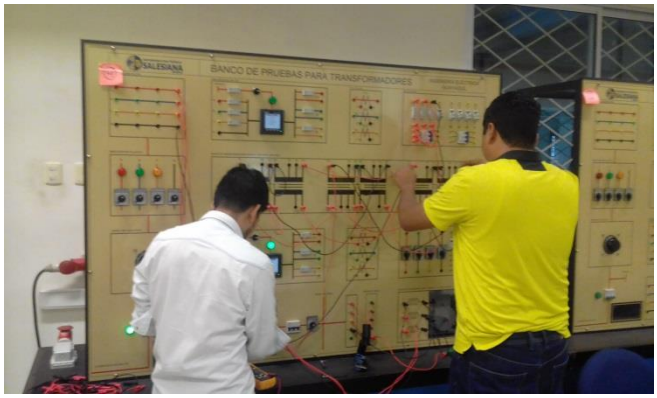


Figura 45: Conexiones del banco de transformadores.

Fuente: Los autores.

Las fallas en los circuitos se logran a través del corte de la alimentación eléctrica con la perilla correspondiente, algunos casos de cortes se muestran en la figura 46.

Figura 46: Corte de interruptores de las líneas.

Fuente: Los autores.

La realización de los ensayos se establecieron en función de conservar la tensión de la fuente como una constante de 120V, las capacitancias de cada línea se conservaron con igual valor pero se realizaron pruebas con 1.5, 10 y 20 µF, a partir de cada configuración se realizó el corte de una y dos líneas para determinar la ocurrencia de la ferroresonancia y se tomaron los valores de voltajes en los transformadores.

En la figura 47 se presenta las curvas de voltaje cuando el transformador con la configuración en delta se le aplica una falla en la línea de alimentación para que ocurra el efecto ferroresonante, esto originó elevaciones de voltaje e inestabilidad en las condiciones normales del trasformador.

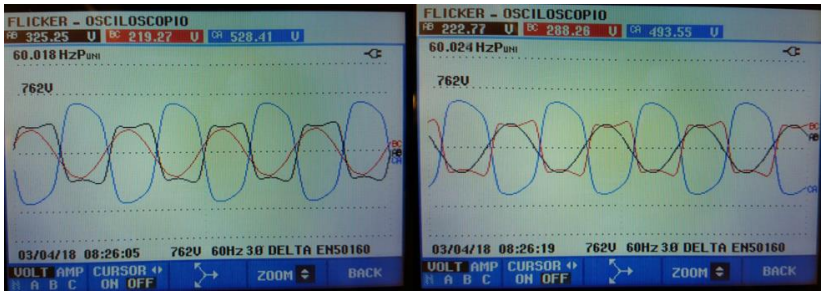


Figura 47: Ocurrencia del fenómeno ferroresonante 1 línea a tierra para 10 y 20 uf.

Fuente: Los autores.

Tabla 4: Resultados de pruebas con 10 y 20 µf.

Fuente: Los autores.

Capacitor	**VAB**	**VBC**	VCA
10 µf	222,77	208,28	493,55
20 µf	325,25	219,27	529,47

Para la siguiente prueba se aplicó la falla de dos líneas de alimentación la cual también provoca elevaciones de tensión como se muestra en la figura 48.

Figura 48: Prueba del efecto ferroresonante 2 líneas a tierra.

Fuente: Los autores.

Tabla 5: Resultados de pruebas con falla en dos líneas con 10 µf.

Fuente: Los autores.

Capacitor	**VAB**	**VBC**	VCA
10 µf	304,78	276,49	41,10

En la configuración en estrella es muy difícil detectar el fenómeno ya que ocurre durante un instante mínimo de tiempo y únicamente para capacitancias muy elevadas en la figura 49 se observa un mínimo cambio en los voltajes, pero luego se estabiliza en ondas sinusoidales limpias sin ningún efecto ferromagnético.

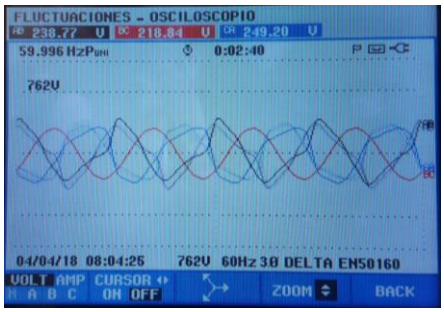


Figura 49: Prueba del efecto ferroresonante 2 líneas a tierra en conexión estrella.

Fuente: Los autores.

En la figura 50 se observan cambios ante la variación capacitiva en una configuración estrella de transformadores donde la ferroresonancia es más difícil de en la configuración delta.

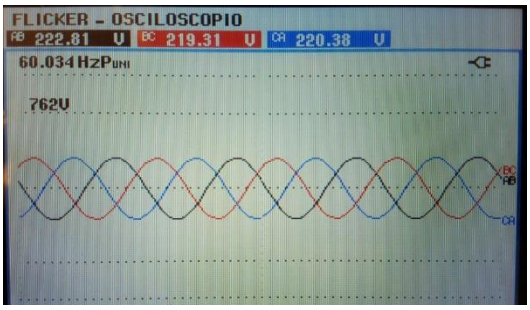


Figura 50: Prueba del efecto ferroresonante ante conexiones estrella.

Fuente: Los autores.

CAPÍTULO IV

4. SIMULACION DE LA FERRORESONANCIA EN BANCOS TRIFASICOS DE TRANSFORMADORES

4.1. Elementos utilizados en la simulación del proyecto.

Fuente de voltaje AC. Debido a que se pueden variar los parámetros del voltaje, fase y frecuencia. Se utilizaron tres (03) y se identificaron como VA, VB y VC el cual se encuentra en *electrical source* como se muestra en la figura 51.

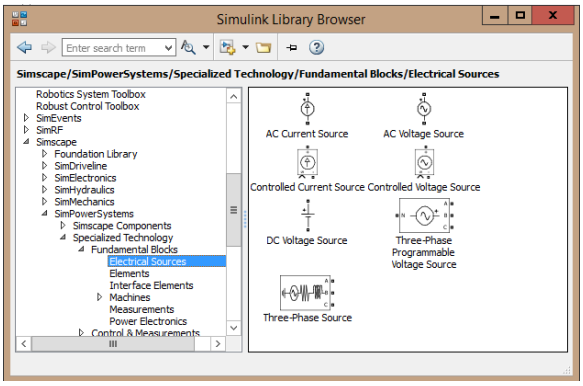


Figura 51: Librería de Alimentadores eléctricos de MATLAB/Simulink.

Fuente: Los autores.

Interruptor ideal. Con el objeto de poder abrir y cerrar conexiones se utiliza un interruptor ideal, éste componente es controlado remotamente con la conexión con una variable que a su vez está enlazado con un interruptor de interfaz de usuario. Ésta combinación permite obtener un control de las conexiones durante la simulación. (véase la figura 52 donde se muestra la librería donde se encuentra ubicado). Éste interruptor permite capturar los valores de corriente y voltaje entre los puntos 1 y 2. El pin **g** se conecta con una constante para cerrar el interruptor al recibir un valor **1**, o abrirlo con valor **0**.

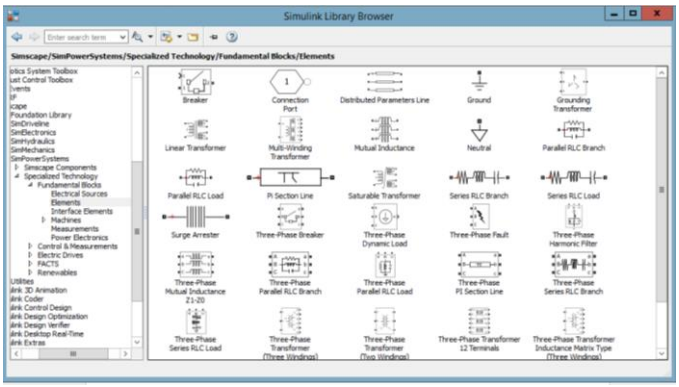


Figura 52: Librería de Elementos fundamentales MATLAB/Simulink.

Fuente: Los autores.

Interruptor. Estos componentes permiten que durante la simulación, el usuario pueda interactuar con el circuito. Se han incluido tres interruptores que están enlazados con las constantes para el control de la simulación de las fallas conductor a tierra. Ver figura 53.

Figura 53: Elemento Interruptor de MATLAB/Simulink.

Fuente: Los autores.

Constante. Es un bloque que puede manejar un valor numérico que ha sido seleccionado para controlar dos interruptores ideales a la vez mediante la combinación con un comparador de cero. La conexión con el interruptor de interfaz usuario cambia el valor de la constante entre 1 y 0. El bloque constante se muestra en la figura 54.

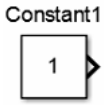


Figura 54: Elemento Constante de MATLAB/Simulink.

Fuente: Los autores.

Comparador. Se utiliza para evaluar una señal de entrada, si es menor o igual que cero emite una respuesta binaria **1**, pero si la señal es mayor que cero la salida del componente es **0**. Con éste componente se obtiene el control de una variable para dos interruptores de modo alterno, es decir, el primer interruptor está cerrado y el segundo está abierto. La imagen correspondiente al comparador se muestra en la figura 55.

Figura 55: Elemento Comparador de MATLAB/Simulink.

Fuente: Los autores.

Resistencia. Las resistencias son componentes que permiten regular el voltaje de un circuito, se utilizaron tres de éstos bloques de la rama RLC ajustado individualmente como resistencia. Estas resistencias han sido colocadas debido a una alerta de error mostrado por el MATLAB, debido a que al abrir el interruptor cercano a la fuente de voltaje circula una gran cantidad de corriente por éste componente. La resistencia se muestra en la figura 56.

Figura 56: Elemento Resistencia de MATLAB/Simulink.

Fuente: Los autores.

Capacitancia. Como parte básica del circuito de estudio de la ferroresonancia se inserta en el Simulink y completar los elementos a recibir voltaje al abrirse el interruptor de la alimentación. Estos bloques pertenecen a la rama RLC y se ha colocado de manera individual para poder medir su voltaje de forma directa. Ver figura 57.

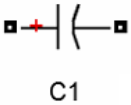


Figura 57: Elemento Capacitancia de MATLAB/Simulink.

Fuente: Los autores.

Conexión a tierra. Estos elementos permiten realizar el retorno de los voltajes suministrados por las tres fuentes. Se utilizaron siete bloques en el circuito. La imagen correspondiente a este elemento se visualiza en la figura 58.

Figura 58: Elemento Aterramiento de MATLAB/Simulink.

Fuente: Los autores.

Medidor de voltaje. Como se indica en su nombre, estos elementos permiten obtener el voltaje de forma controlada entre dos puntos del circuito. En el circuito de estudio se incorporaron seis elementos, se puede visualizar su imagen en la figura 59, y su ubicación en la librería en la figura 60.

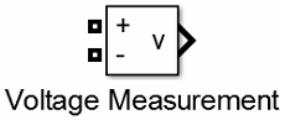


Figura 59: Elemento Medidor de voltaje de MATLAB/Simulink.

Fuente: Los autores.

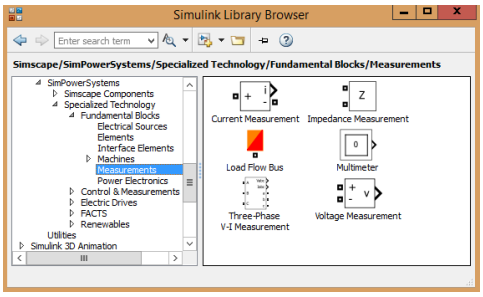


Figura 60: Librería de Medidores de MATLAB/Simulink.

Fuente: Los autores.

Transformador. Este elemento es el componente fundamental del circuito, permite emular a un transformador y realizar las conexiones necesarias, de igual modo se puede seleccionar la configuración de las bobinas, permitiendo variar entre una construcción delta y estrella. Esta configuración debe realizarse antes de correr la simulación, en la figura 61 se presenta los tipos de transformadores que se muestran en la librería. Este elemento permite controla la saturación para adaptar los resultados a valores reales.

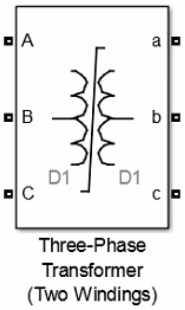


Figura 61: Elemento Transformador de MATLAB/Simulink.

Fuente: Los autores.

Medidor de corriente. Se han colocado tres componentes para capturar los valores de la corriente que circulan entre sus contactos (véase la figura 62). Los valores obtenidos por los tres componentes son enviados a un mismo osciloscopio.

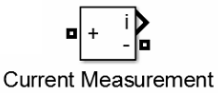


Figura 62: Elemento Medidor de corriente de MATLAB/Simulink.

Fuente: Los autores.

4.2. Métodos de Integración en Simulink.

ode45: Método basado en Dormand - Prince, un paso Runge – Kutta es el método que viene por default cuando uno inicia la instalación de MATLAB.

ode23: Método basado en Bogacki – Shampine, un paso un paso Runge – Kutta el cual es utilizado para tolerancias mayores a x10 ^3

ode113: Es un multipaso, de orden variable Admas – Bashforth – Moulton PECE. Generalmente utilizado cuando una simulación posee poca tolerancia y requiere mayor tiempo para su proceso.

ode15s: Éste multipaso está basado en operaciones de diferenciación *backward*.

ode23: Con éste multipaso se puede aplicar operaciones basados en la fórmula de Rosembrock de segundo orden.

Todos tipos de integración indicados anteriormente pueden ser seleccionados en la sección de configuración, ver la figura 63.

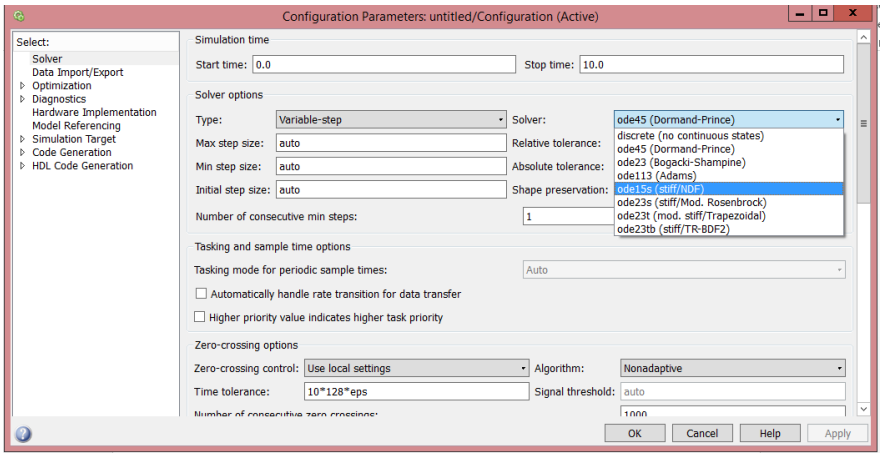


Figura 63: Ventana de configuraciones de parámetros de MATLAB/Simulink.

Fuente: Los autores.

4.3. Desarrollo del Esquema en el Simulador del efecto de Ferroresonancia.

Se empezó creando un nuevo archivo de Simulink.slk en el cual procedemos a buscar nuestras librerías y empezar a colocar los elementos que infieren en el sistema. Entre estos tenemos las fuentes de Voltaje AC que están conectadas en Y consiguientes a un transformador trifásico conectado en Delta en el primario.

En las líneas que conectan la fuente con el transformador se introdujo un interruptor (*breaker*) con acción externa la cual corresponde a una constante que tiene dos estados 0 y 1 los cuales están ruteados a un interruptor on/off el cual permitirá simular la falla de desconexión de las líneas mediante un click. La sección de alimentación está conectada a un retorno común.

Cada fuente es conectada al transformador bajo el control del interruptor, de modo alterno el segundo interruptor permite controlar el retorno del voltaje a través de la capacitancia. La figura 64 muestra el segmento del circuito desde una fuente hasta el medidor de voltaje.

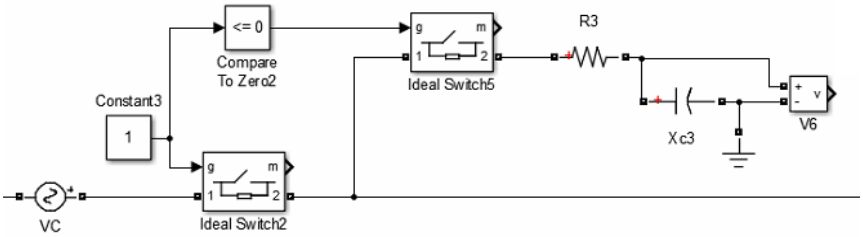


Figura 64: Sección del circuito diseñado en MATLAB/Simulink

Fuente: Los autores

Los interruptores envían los valores de corriente y voltaje a los osciloscopios. El medidor de voltaje se conecta con un osciloscopio. La simulación está desarrollada para ofrecer al usuario cambiar parámetros tanto del transformador, fuente generadora y capacitancia de la línea. El circuito se diseñó en base a los elementos indicados en éste capítulo resultando en la forma mostrada de la figura 65.

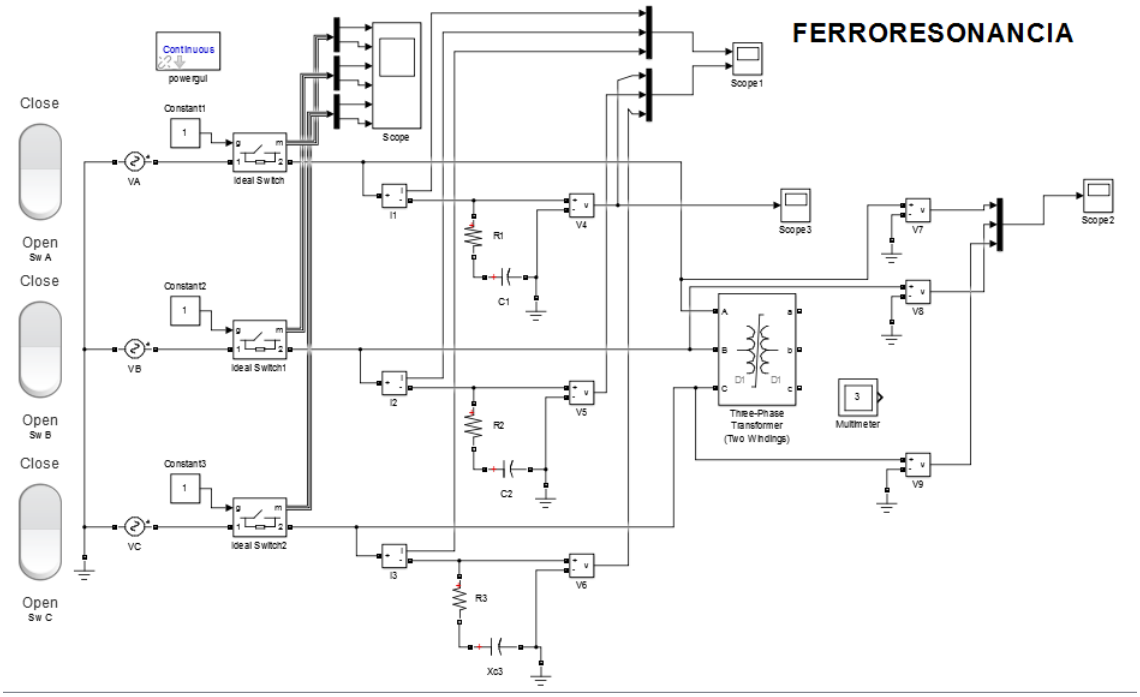


Figura 65: Circuito de ferroresonancia diseñado en MATLAB/Simulink.

Fuente: Los autores.

Para facilitar la comprensión del fenómeno de la ferroresonancia, se desarrolló un entorno gráfico por guide en Matlab que permite visualizar el comportamiento y fluctuación de las curvas de voltaje como se muestra en la figura 66.

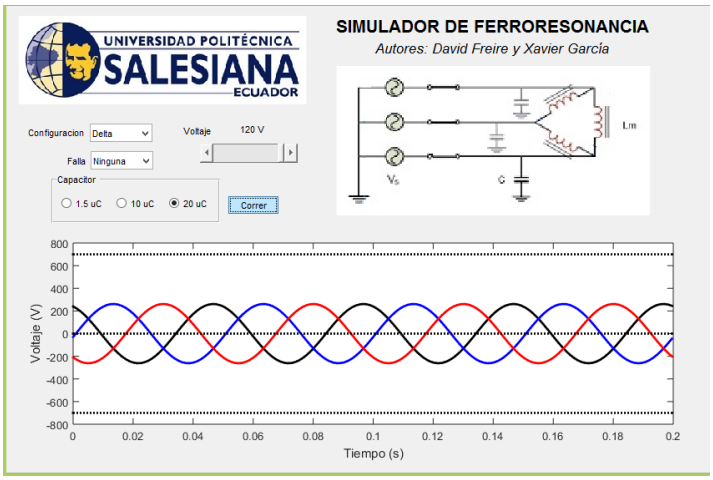


Figura 66: Interfaz de simulación Matlab guide.

Fuente: Los autores.

4.4. Pruebas con el Simulador del Efecto de la Ferroresonancia.

Para desarrollar el estudio de la ferroresonancia aplicando el simulador se establecen los valores indicados en la tabla 6:

Tabla 6: Valores a utilizar en el simulador.

Fuente: Los autores.

Voltaje de las fuentes

Fuente	Valor (V)		Fase
VA	120		0
VB	120		120º
VC	120		-120º
Capacitores			
Nº	**Valor Prueba 1**	**Valor Prueba 2**	**Valor Prueba 3**
C1	1,5 µF	10 µF	20 µF
C2	1,5 µF	10 µF	20 µF
C3	1,5 µF	10 µF	20 µF

Una vez que se insertan los valores de cada fuente y capacitor en su bloque correspondiente del simulador, se establece al transformador con la configuración Delta, se procede de la siguiente forma:

1. Se inicia la simulación con los tres interruptores están cerrados, es decir, las tres líneas se encuentran cargadas y el circuito no presenta fallas de líneas.
2. Se activa la visualización del osciloscopio Nº 2 (Scope2) del simulador para visualizar el voltaje en la entrada del transformador.
3. Una vez que se visualice las ondas sinusoidales completas y normales del circuito se abre el interruptor A para generar la falla en la línea A. Se observa la gráfica del Scope2.
4. Una vez normalizada, se abre el interruptor B, con esto se obtiene la ocurrencia de la falla en la línea B.
5. Se espera que las gráficas se estabilicen.
6. Se detiene la simulación, se procede a cambiar el valor de las capacitancias y se realiza nuevamente las pruebas.

7. Una vez que se realizan las pruebas con los tres valores de capacitancias, se procede a cambiar la configuración del transformador que actualmente es Delta a Estrella y se inician las pruebas con los mismos valores de capacitancias.

4.4.1. Configuración Delta con 1.5 µF.

Al utilizar capacitores de 1.5 µF y al presentarse la falla de una línea se detecta un pico en una de las líneas con un valor aproximado de 1200 V en la entrada del transformador para luego estabilizarse. Al fallar la segunda línea se vuelve a presentar un pico de 530 V aproximadamente. El MATLAB presenta los valores internos en el transformador con los voltajes Vab, Vbc y Vca, donde se presentan unos incrementos. Éstos resultados gráficos están en la figura 67.

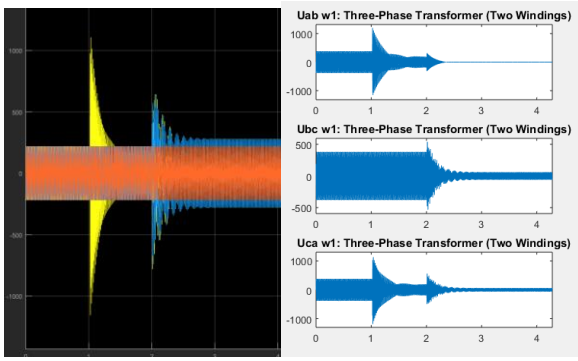


Figura 67: Resultado del simulador en configuración Delta, con 1.5 µF.

Fuente: Los autores.

4.4.2. Configuración Delta con 10 µF.

Cuando se utilizan los capacitores de 10 µF se realizan las fallas de las líneas de forma progresiva, el resultado obtenido se muestra en la figura 68, donde se puede apreciar que con la falla de una línea se obtiene un pico de 1000 V aproximadamente pero al fallar otra línea más, ocurre un pico que sobrepasa éste valor. Las lecturas obtenidas de los voltajes en el primario del transformador por el MATLAB demuestran la caída de un voltaje y el incremento de los otros dos al estabilizarse.

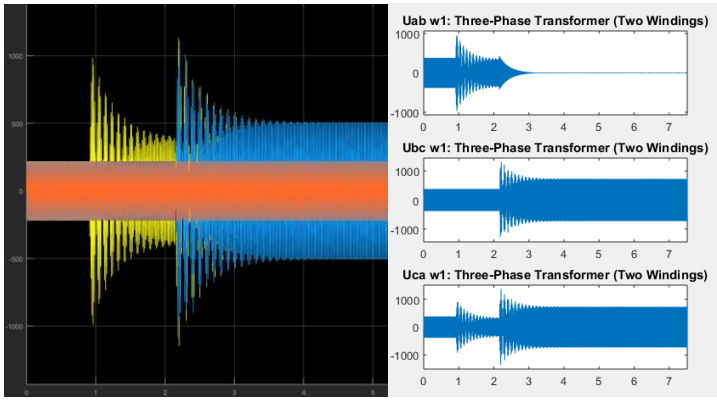


Figura 68: Resultado del simulador en configuración Delta, con 10 µF.

Fuente: Los autores.

4.4.3. Configuración Delta con 20 µF.

Al utilizar los capacitores de 20 µF el simulador demuestra un poco de estabilidad y pocos incrementos de voltajes. Inicialmente al cortar la primera línea el pico se aproxima a los 300 V, en cambio al fallar la segunda se muestran caídas de tensiones en las líneas y casi totalmente en una de ellas esta se muestra en la figura 69.

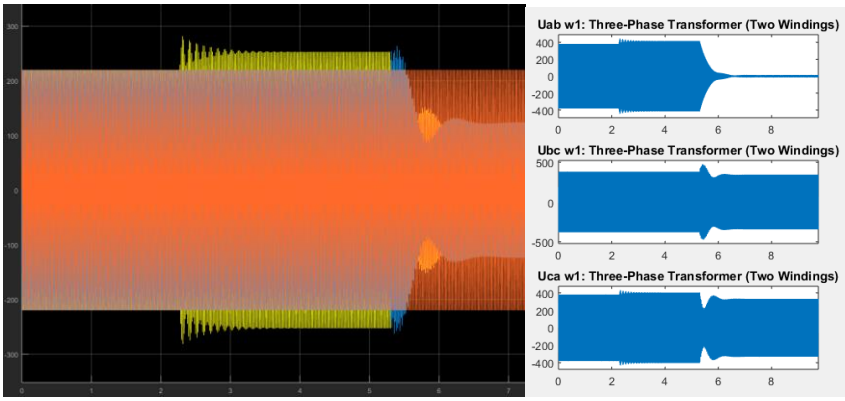


Figura 69: Resultado del simulador en configuración Delta, con 20 µF.

Fuente: Los autores.

4.4.4. Matlab Guide ferroresonancia

Aplicando el entorno grafico guide se utiliza los valores mostrados en los devanados primarios de línea a línea para que se asemeje a los utilizados en las practicas de laboratorio se desarrollan dos pruebas para determinar la ocurrencia del fenómeno ferroresonante, para ello se establece una configuración Delta en los transformadores y seguidamente con la falla de una línea y con falla de dos líneas. A partir de estas pruebas se establece que el voltaje utilizado desde la fuente es de 120V y la capacitancia de 20 µC. La gráfica resultante está representado en la figura 70.

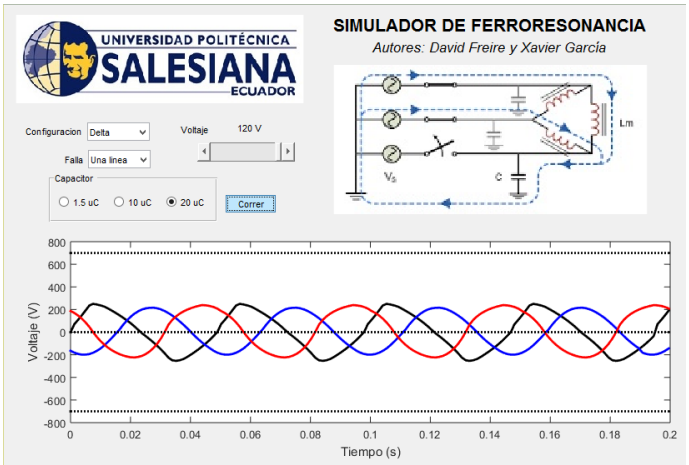


Figura 70: Resultado del simulador en configuración Delta, con 20 µF y falla una línea.

Fuente: Los autores.

Tabla 7: Resultados de simulación con falla en una línea con 20 µf.

Fuente: Los autores.

Capacitor	**VAB**	**VBC**	VCA
20 µf	250	220	260

Al aplicar la falla en dos líneas se obtienen las figura 71.

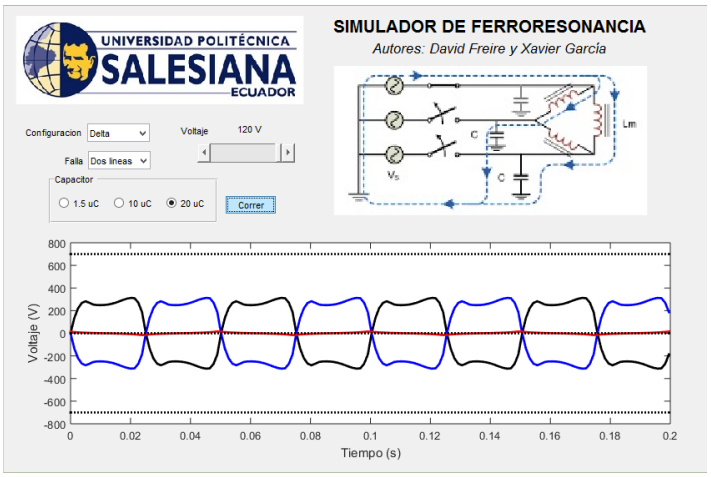


Figura 71: Resultado del simulador en configuración Delta, con 20 µF y fallan dos líneas.

Fuente: Los autores.

Tabla 8: Resultados de simulación con falla en dos líneas con 20 µf.

Fuente: Los autores.

Capacitor	**VAB**	**VBC**	VCA
20 µf	30	280	270

Cabe resaltar que para todo simulador se puede tomar en cuenta la indicación de Sanaye [15] que nos dice que en toda simulación donde se involucren fallas los resultados no siempre serán exactamente iguales debido a que ninguna falla es igual a otra.

4.4.5 Comparación de datos real vs simulado.

Para la validación del proyecto se realiza una comparación de datos que tendrá una prueba física vs una prueba realizada por simulación. Se utiliza una práctica de 2 fallas a tierra con el transformador en conexión delta normal mostrado en la figura 72.

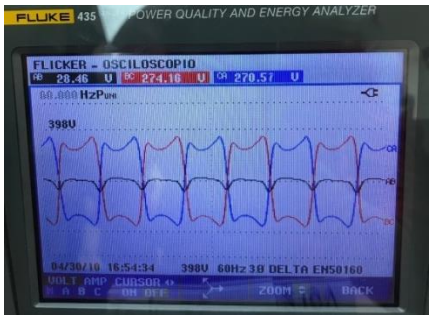


Figura 72: Resultado del analizador de redes ante una falla de 2 fase a tierra con 10 uf.

Fuente: Los autores.

En la simulación se utilizan los mismos parámetros para acercar lo más posible la simulación obteniendo los resultados de la figura 73.

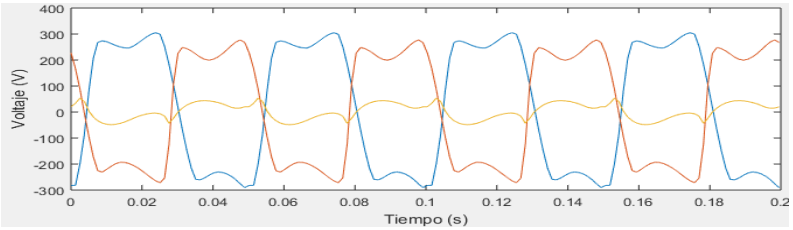


Figura 73: Resultado del simulador ante una falla de dos fases a tierra con 10 uf.

Fuente: Los autores.

Al comparar la figura 72 y 73, se puede apreciar una diferencia de los valores, lo que produce un error entre ambos valores. Dicha presencia de error se debe a los parámetros utilizados para la simulación que determinan la exactitud de los valores.

El error presentado en la tabla 9 es un promedio de varias pruebas experimentales debido a que las fallas nunca pueden ser iguales.

Tabla 9: Comparación de los resultados obtenidos en el banco de transformadores y simulados.

Fuente: Los autores.

Prueba	**VAB**	**VBC**	VCA
Experimental	28,46	274,16	270,57
Simulación	30	280	275
Error	+5,41	+2,13	+1,64

CAPÍTULO V

5. CONCLUSION Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

El análisis matemático del fenómeno de ferroresonancia se presentó de una manera laboriosa al tener de consultar múltiples libros y autores para llegar a una conclusión que en todos los casos se hace mediante la reducción circuital, dando como resultado diferentes análisis para cada caso o configuración del circuito. Dicha reducción permitió la ejecución de cada análisis y la determinación de los voltajes al ocurrir el fenómeno.

En la comprobación y obtención de los datos experimentales se pudo obtener la curva de magnetización del transformador ya que estos no contaban con dicha información de placa necesaria para el análisis de resultados.

La simulación se optó por un método sencillo el cual nos permite desarrollar circuitos eléctricos en la librería de Matlab simscape, lo que evita desarrollar distintos modelos para cada conexión ya que se puede incluir un interruptor simple. Pero en la práctica se evidenció por el sonido presentado en los transformadores y gráficamente por los valores obtenidos como se presentaron en el capítulo 3.

Para determinar las magnitudes críticas se hizo una investigación práctica para poder determinar la capacitancia máxima critica para evitar llegar a esos valores ya que provocaría daños permanentes en los equipos y a su vez las magnitudes de las reactancias inductivas van a ser distintas dependiendo del voltaje que apliquemos al circuito esta dependerá directamente de su curva de magnetización.

5.2. Recomendaciones

En base a este estudio se puede tomar referencias para proyectos posteriores para hondar más en el tema, y llevar estos estudios a la parte experimental en los laboratorios de la universidad politécnica salesiana se dificulta un poco debido a que no se tiene un total conocimiento de los parámetros y características de la construcción de los transformadores, por lo que se recomienda tomar parámetros de casos ya existentes en la red eléctrica de las empresas encargadas de la transmisión de energía eléctrica. Para estudiar más a profundidad el transitorio ferroresonante se debe apoyar en programas de simulación especializados y más actuales.

REFERENCIA BIBLIOGRAFICA

[1] M. Maklad. [En línea]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/1060581/. [Último acceso: 2018].

[2] «Ecured,» [En línea]. Available: https://www.ecured.cu/An%C3%A1lisis_Matem%C3%A1tico. [Último acceso: 2017].

[3] R. Courant y F. Jhon, «Introducción al cálculo y al análisis matemático, Vol. 1,» 1999. [En línea]. Available: http://200.116.181.46/principal/bibliotecags/Introduccion%20al%20calculo%20y%20analisis%20matematico%20Vol1%20-%20Courant.pdf.

[4] D. M. Himmelblau y K. B. Bichoff, «Análisis y Simulación de procesos,» 2004. [En línea]. Available: http://aulavirtual.usal.es/aulavirtual/demos/simulacion/modulos/Libros/uni_02/Libro2/libro2.PDF.

[5] J. M. Ruíz Gutierrez, «La Simulación como Instrumento de Aprendizaje,» 2012. [En línea].

[6] Tecnología Industrial, «TRANSFORMADORES ELECTRICOS,» 2010. [En línea].

[7] «ElectronicaSi,» 2018. [En línea]. Available: http://www.electronicasi.com/ensenanzas/transformadores/.

[8] M. Olmo, «Hyperphysics,» 2017. [En línea].

[9] R. Walling, 2004. [En línea]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/1270502/.

[10] P. Ferraci, «Cahier Technique no. 190, Ferroresonance,» 1998. [En línea]. Available: https://www.ops-ecat.schneider-electric.com/cut.CatalogueRetrieverServlet/CatalogueRetrieverServlet?fct=get_element&env=publish&scp_id=Z000&el_typ=rendition&cat_id=DesignerV4&maj_v=2&min_v=14&nod_id=0000000008&doc_id=H383558&frm=pdf&usg=&dwnl=true.

[11] O. González y L. Hernández, «Aislamiento en sistemas de media tensión ante fenómenos por ferroresonancia,» 2008. [En línea]. Available: http://mriuc.bc.uc.edu.ve/bitstream/handle/123456789/35/10962.pdf?sequence=1.

[12] M. M. Heredia Borja y R. H. Intriago Bernita, «Análisis de sistemas trifásicos de transformadores conexión D - Y,» 2015. [En línea]. Available: https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/10450/1/UPS-GT001540.pdf. [Último acceso: 2017].

[13] J. Horak, «A Review of Ferroresonance,» 2004. [En línea]. Available: https://docgo.net/philosophy-of-money.html?utm_source=ferro-resonance-2.

[14] S. Acevedo, «III. Modelación Matemática,» 1987. [En línea]. Available: http://www.mty.itesm.mx/etie/deptos/ie/profesores/sacevedo/cursos/transitorios/ferro.pdf. [Último acceso: 2018].

[15] M. Sanaye-Pasand y R. Aghazadeh, 2003. [En línea]. Available: http://ipstconf.org/papers/Proc_IPST2003/03IPST09c-02.pdf.

ANEXOS

APENDICE A

Obtención de las curvas de magnetización en los transformadores de la Universidad Politécnica Salesiana. Se tomó punto por punto registros de voltaje y corriente para el trazado de la gráfica, debido a que el flujo (H) es directamente proporcional al voltaje y la densidad es directamente proporcional a la corriente. Este procedimiento se desarrolló inyectando voltaje en los terminales del trasformador e ir subiendo hasta llegar a su punto de saturación. Los datos obtenidos son los siguientes:

Transformador 1		**Transformador 2**		**Transformador 3**	
V	**A**	**V**	**A**	**V**	**A**
0,024	0,0001	0,024	0,0001	0,024	0,0001
0,076	0,00038	0,076	0,00038	0,076	0,00038
0,175	0,00078	0,175	0,00078	0,175	0,00078
0,21	0,00093	2,36	0,0066322	2,12	0,00636
0,65	0,00229	5,78	0,013265	4,7	0,01174
2,38	0,00654	7,77	0,016317	6,9	0,01549
3,38	0,00857	10,2	0,019506	7,8	0,0168
6,16	0,01336	13,06	0,022814	9,28	0,0188
7,7	0,01572	15,32	0,02514	11,23	0,02124
8,2	0,01637	17,12	0,02688	13,09	0,02328
10,35	0,01899	19,37	0,02879	15,7	0,02593
13	0,02203	22,01	0,03089	17,09	0,02722
15,62	0,02454	25,6	0,03331	19,65	0,02937
16,95	0,02581	28,92	0,03558	22,81	0,03184
17,8	0,02669	30,49	0,03667	25,57	0,0337
19,16	0,02728	32,85	0,03806	28	0,03536
20,76	0,02908	38,01	0,04093	30,55	0,03706
22,18	0,02908	41,2	0,04265	34,1	0,03912
23,48	0,0304	43,06	0,04379	36,7	0,04056
26,16	0,03281	47,2	0,04576	40,87	0,04263
27,47	0,03281	48,45	0,0465	44	0,04424
28,85	0,03466	50,19	0,04738	47,2	0,0458
30,45	0,03563	53,52	0,04897	48,8	0,04657
32,31	0,03673	55	0,04975	50,3	0,04724
34,25	0,03783	57	0,05062	54,6	0,04927
36,91	0,03931	60,5	0,0521	57,2	0,05037
38,05	0,03998	62,6	0,05311	62,5	0,05249
40,43	0,04122	65,4	0,05428	65,44	0,05376
42,93	0,04252	67,3	0,05495	66,8	0,05412
43,38	0,04291	70,4	0,05653	70,3	0,05563
47,48	0,04494	73,6	0,05782	73,5	0,05704
49,54	0,04592	76,4	0,05913	75,4	0,05786
51,72	0,04694	79,2	0,06037	79,4	0,05954
53	0,04756	80,5	0,06098	80,8	0,06016
54,63	0,04835	82,4	0,06186	82,3	0,06086
57,56	0,04965	84,7	0,0629	84,6	0,06192
60,38	0,051	87,4	0,0641	87,3	0,06304
62,84	0,05218	90,1	0,06533	90	0,06423
64,1	0,05279	92	0,06624	92,4	0,06535
66,4	0,05394	94,6	0,0674	95	0,06648
68,9	0,05517	97	0,06849	97,5	0,06764
70,5	0,05558	100,8	0,07035	100,4	0,069
72	0,05642	103,2	0,0716	103,2	0,07031
75,3	0,05796	106	0,07287	106,6	0,07193
77,1	0,05883	108,7	0,07419	110	0,07361
79	0,05985	110,5	0,0752	113,2	0,07753
81	0,0606	112,2	0,07599	116,2	0,07663
82	0,06114	115,3	0,07763	118,6	0,07786
84,2	0,06215	117,3	0,07852	120,7	0,07929
86,2	0,0631	120,7	0,08047	123	0,08077
89,4	0,0645	122	0,08127	126,5	0,08226
92	0,06571	124	0,08236	130,7	0,08465
95,1	0,0675	127,5	0,0844	133,6	0,08621
96,8	0,0682	130,2	0,08596	136	0,08782

101,3	0,0705	133,2	0,08787	140,2	0,0904
104,6	0,0721	135,1	0,08899	142,8	0,09221
106,6	0,0731	137,1	0,0903	144,1	0,09307
110	0,0749	138,5	0,09117	146	0,0943
114	0,077	140,5	0,09253	148,5	0,09594
117	0,0786	142,1	0,09361	150,1	0,09711
120	0,0802	144,3	0,09523	153,1	0,0992
122	0,0815	146,2	0,09662	155	0,10093
124	0,0826	148,9	0,09852	157,7	0,10323
126,8	0,0845	150,2	0,09958	160,2	0,1053
130	0,0864	152,2	0,1011	164	0,10898
132,9	0,0881	154,4	0,10292	166,4	0,1114
135	0,0895	156,6	0,1048	171,1	0,1171
138	0,0916	158,4	0,10649	172,5	0,11881
140,3	0,0931	160,4	0,10822	175	0,12266
143,2	0,0951	162,4	0,11046	177,4	0,12665
144,8	0,0964	165	0,11328	180,3	0,13274
149,1	0,0997	167,8	0,11663	183	0,13897
150,2	0,1005	170,2	0,11934	185,5	0,14513
153	0,1027	172,6	0,12319	190,2	0,161
156,1	0,1054	174,3	0,12584	194,7	0,1803
159,2	0,1085	176,2	0,12866	196,1	0,18642
162,5	0,1116	178,7	0,133	197,2	0,19177
166	0,1154	180,2	0,13615	200,6	0,21206
168,7	0,1185	182,1	0,14062	204,9	0,24033
170,9	0,1212	184,2	0,14561	206	0,24869
174	0,1255	186,7	0,1522	208,4	0,26842
177,4	0,1306	188,3	0,1567	210,6	0,28758
180,5	0,1357	190,8	0,16497	212,4	0,30142
184,2	0,1428	192,2	0,17029	214,3	0,31992
186,1	0,1475	194,7	0,18008	217,3	0,35
190,8	0,1591	196,2	0,18742	220,01	0,3816
192	0,1627	198,4	0,19717	224	0,42612
195	0,1714	200,7	0,20919	226,8	0,46441
197,1	0,1791	202,6	0,219	231,3	0,52454
200,2	0,1892	204,4	0,23024	233,3	0,5586
202,1	0,197	206,3	0,24231	237,2	0,62122
204,7	0,2075	208,3	0,25675	240,7	0,68424
206,1	0,2153	210,5	0,27174	242,5	0,7105
208	0,2249	212,2	0,282	243,5	0,7308
210,7	0,2391	215,3	0,30815	247,3	0,79047
212,6	0,249	216,9	0,3243	250,3	0,82897
214,5	0,2603	218,3	0,3363	253,7	0,8548
217,4	0,2789	220,2	0,35363	257,1	0,88351
220,5	0,2964	222,2	0,37789	260,6	0,91175
225,9	0,3394	224,4	0,40238	262,2	0,91983
228,2	0,3564	226,6	0,4245	265,4	0,93961
230,1	0,3705	228,1	0,4437	268,1	0,95734
233,2	0,395	230,6	0,47141	270	0,97013
236,3	0,426	232,2	0,49853	272,7	1,51
240,5	0,469	234,3	0,52679	273	1,56
243,7	0,502	236,8	0,56072	275,8	1,66
247,6	0,548	238,4	0,58429	280,6	1,8
249,5	0,571	240	0,61246		
251,6	0,602	243,4	0,6648		
254	0,636	244,7	0,6894		
258	0,695	246,6	0,72424		
261,3	0,749	248,4	0,75936		
263,2	0,781	250	0,783		
264,6	0,809	252,6	0,8098		
268,3	0,874	254	0,8263		
270,9	0,93	256,6	0,85233		
274	0,99	258,3	0,8679		
275	1,01	260,8	0,8864		
277	1,05	262,4	0,8987		
280	1,12	264,1	0,90963		
283	1,18	266,3	0,92701		
284,5	1,21	268,3	0,93938		
287,6	1,28	270,5	0,95078		
290	1,35	273,1	0,96476		
294	1,43	274,2	0,97		
295	1,46	275,3	1,491		
296	1,49	278,1	1,58		
299	1,57	280,4	1,67		
303	1,65	282,5	1,75		
305	1,71	284,6	1,85		
306	1,75	286,2	1,89		

310	1,85	288,4	1,98
313	1,92	290	2,049
314	1,94	292,4	2,15
317	2,03	294,3	2,22
320	2,12	296,3	2,3
		300	2,47

Con el uso del MATLAB se logra extraer las ecuaciones polinómicas correspondientes a los tres transformadores.

Tranformador 1.

val(x) = x.*3.398082559574617e-1-x.^2.*1.387756530663253e-2+x.^3.*1.639005923345331e-3-x.^4.*3.347991778623072e-5+x.^5.*3.490801378737671e-7-x.^6.*2.307139779214274e-9+x.^7.*1.061804218794163e-11-x.^8.*3.585853552549995e-14+x.^9.*9.184029649404578e-17-x.^10.*1.823448873880514e-19+x.^11.*2.848213691707078e-22-x.^12.*3.533214713148922e-25+x.^13.*3.498637545143833e-28-x.^14.*2.768497530555268e-31+x.^15.*1.745504504323188e-34-x.^16.*8.702032839938015e-38+x.^17.*3.384191518123708e-41-x.^18.*1.004331944991475e-44+x.^19.*2.195504944206903e-48-x.^20.*3.330515444459422e-52+x.^21.*3.130029615773648e-56-x.^22.*1.372178088679793e-60+4.965914137417176e-1

Tranformador 2.

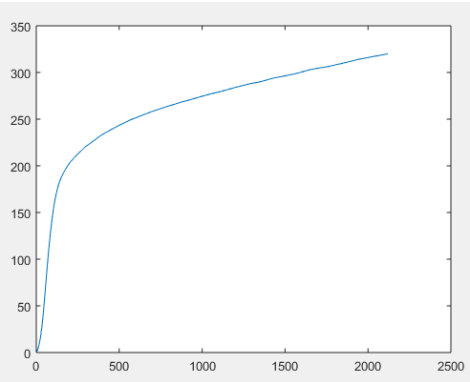
val(x) = x.*3.398082559574617e-1-x.^2.*1.387756530663253e-2+x.^3.*1.639005923345331e-3-x.^4.*3.347991778623072e-5+x.^5.*3.490801378737671e-7-x.^6.*2.307139779214274e-9+x.^7.*1.061804218794163e-11-x.^8.*3.585853552549995e-14+x.^9.*9.184029649404578e-17-x.^10.*1.823448873880514e-19+x.^11.*2.848213691707078e-22-x.^12.*3.533214713148922e-25+x.^13.*3.498637545143833e-28-x.^14.*2.768497530555268e-31+x.^15.*1.745504504323188e-34-x.^16.*8.702032839938015e-38+x.^17.*3.384191518123708e-41-x.^18.*1.004331944991475e-44+x.^19.*2.195504944206903e-48-x.^20.*3.330515444459422e-52+x.^21.*3.130029615773648e-56-x.^22.*1.372178088679793e-60+4.965914137417176e-1

Tranformador 3.

val(x) = x.*3.398082559574617e-1-x.^2.*1.387756530663253e-2+x.^3.*1.639005923345331e-3-x.^4.*3.347991778623072e-5+x.^5.*3.490801378737671e-7-x.^6.*2.307139779214274e-9+x.^7.*1.061804218794163e-11-x.^8.*3.585853552549995e-14+x.^9.*9.184029649404578e-17-x.^10.*1.823448873880514e-19+x.^11.*2.848213691707078e-22-x.^12.*3.533214713148922e-25+x.^13.*3.498637545143833e-28-x.^14.*2.768497530555268e-31+x.^15.*1.745504504323188e-34-x.^16.*8.702032839938015e-38+x.^17.*3.384191518123708e-41-x.^18.*1.004331944991475e-44+x.^19.*2.195504944206903e-48-x.^20.*3.330515444459422e-52+x.^21.*3.130029615773648e-56-x.^22.*1.372178088679793e-60+4.965914137417176e-1

APENDICE B

Obtener la gráfica de voltaje V_C vs. X_{CL}/X_m cuando se abre una fase de un banco trifásico de transformadores conectados en delta cuya curva de excitación se presenta a continuación. Asumir que el voltaje entre líneas de la fuente es el nominal y es igual a 120 volts.



Curva de magnetización correspondiente a las pruebas de laboratorio al banco de transformadores.

La fuente de voltaje se mantiene a 120 volts entre líneas, por tanto el voltaje de las líneas A y B a tierra es:

$$V_A = V_B = 120V/\sqrt{3} = 69.7V \approx 70V$$

La reactancia normal de magnetización de cualquier transformador se obtiene a partir del voltaje nominal de la curva esto es:

$$X_m = 120\Omega/0.0804 = 1501.2\Omega$$

Aplicando los pasos i a vi se tiene:

vii) Suponer $V_C = 2V_A = 2 \cdot 70V = 140V; n = 2$

viii) $X_{CL}/X_{BC} = 2/(2 \cdot 2 + 1) = 0.4$

ix) $V_{BC} = \big((0.5 + 2)2 + 0.75\big)\, 1/2(70V) = 184.2V$

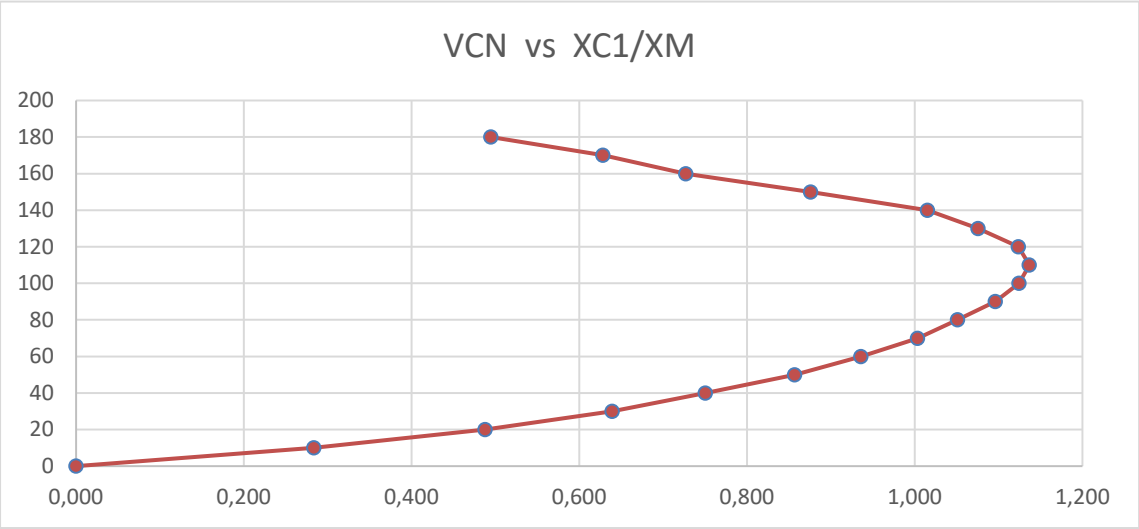
x) De la curva de excitación, para V_{BC} = 184.2 , I_{BC} = 0.1456 A, por lo tanto: $X_{BC} = 184.2/0.1456 = 1265.1\Omega$

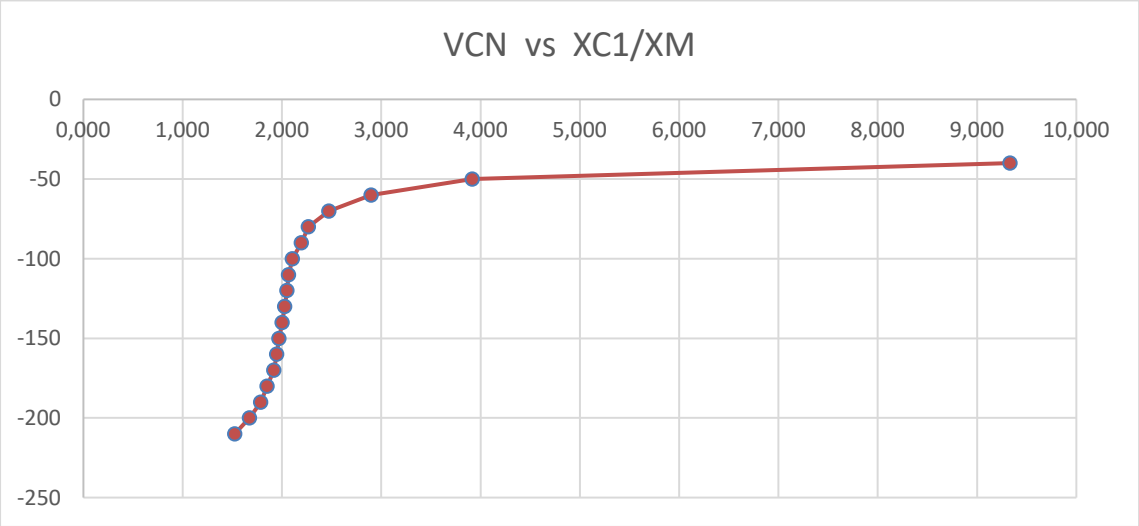
xi) La relación $X_{BC}/3X_m$ será entonces: $k = X_{BC}/3X_m = 1265.1/1501.2 = 0.84$

xii) Siendo V_C = 140 V, entonces: $X_{CL}/X_m = (3 \cdot 0.84)(0.4) = 1.01$

VCN	VAN	n	IBC	VBC	XBC	XC1/XBC	XBC/XM	XC1/XM
-210	70	-3.00	0.146	185.20	1271.04	0.600	0.847	1.524
-200	70	-2.86	0.127	175.78	1382.60	0.606	0.921	1.675
-190	70	-2.71	0.114	166.43	1457.64	0.613	0.971	1.785
-180	70	-2.57	0.105	157.16	1492.52	0.621	0.994	1.851
-170	70	-2.43	0.097	147.99	1523.75	0.630	1.015	1.917
-160	70	-2.29	0.091	138.92	1523.80	0.640	1.015	1.949
-150	70	-2.14	0.086	130.00	1512.33	0.652	1.007	1.971
-140	70	-2.00	0.081	121.24	1504.08	0.667	1.002	2.004
-130	70	-1.86	0.076	112.69	1483.01	0.684	0.988	2.028
-120	70	-1.71	0.072	104.40	1454.08	0.706	0.969	2.051
-110	70	-1.57	0.068	96.44	1409.89	0.733	0.939	2.066
-100	70	-1.43	0.065	88.88	1369.52	0.769	0.912	2.105
-90	70	-1.29	0.061	81.85	1342.08	0.818	0.894	2.194
-80	70	-1.14	0.059	75.50	1275.31	0.889	0.850	2.265
-70	70	-1.00	0.057	70.00	1238.28	1.000	0.825	2.475
-60	70	-0.86	0.054	65.57	1208.08	1.200	0.805	2.897
-50	70	-0.71	0.053	62.45	1175.86	1.667	0.783	3.916
-40	70	-0.57	0.052	60.83	1167.52	4.000	0.778	9.333
-30	70	-0.43	0.052	60.83	1167.52	-3.000	0.778	-7.000
-20	70	-0.29	0.053	62.45	1175.86	-0.667	0.783	-1.567
-10	70	-0.14	0.054	65.57	1208.08	-0.200	0.805	-0.483
0	70	0.00	0.057	70.00	1238.28	0.000	0.825	0.000
10	70	0.14	0.059	75.50	1277.47	0.111	0.851	0.284
20	70	0.29	0.061	81.85	1342.30	0.182	0.894	0.488
30	70	0.43	0.064	88.88	1386.61	0.231	0.924	0.639
40	70	0.57	0.068	96.44	1408.04	0.267	0.938	0.750
50	70	0.71	0.072	104.40	1458.14	0.294	0.971	0.857
60	70	0.86	0.076	112.69	1483.01	0.316	0.988	0.936
70	70	1.00	0.080	121.24	1506.51	0.333	1.004	1.004
80	70	1.14	0.086	130.00	1512.33	0.348	1.007	1.051
90	70	1.29	0.091	138.92	1523.80	0.360	1.015	1.096
100	70	1.43	0.097	147.99	1519.06	0.370	1.012	1.124
110	70	1.57	0.105	157.16	1499.64	0.379	0.999	1.137
120	70	1.71	0.115	166.43	1452.55	0.387	0.968	1.124
130	70	1.86	0.129	175.78	1366.27	0.394	0.910	1.076
140	70	2.00	0.146	185.20	1270.16	0.400	0.846	1.015
150	70	2.14	0.180	194.68	1081.07	0.405	0.720	0.876
160	70	2.29	0.230	204.21	886.93	0.410	0.591	0.727
170	70	2.43	0.282	213.78	758.07	0.415	0.505	0.628
180	70	2.57	0.378	223.38	591.13	0.419	0.394	0.495

En la tabla podemos observar los valores para distintos valor de V_C supuestos





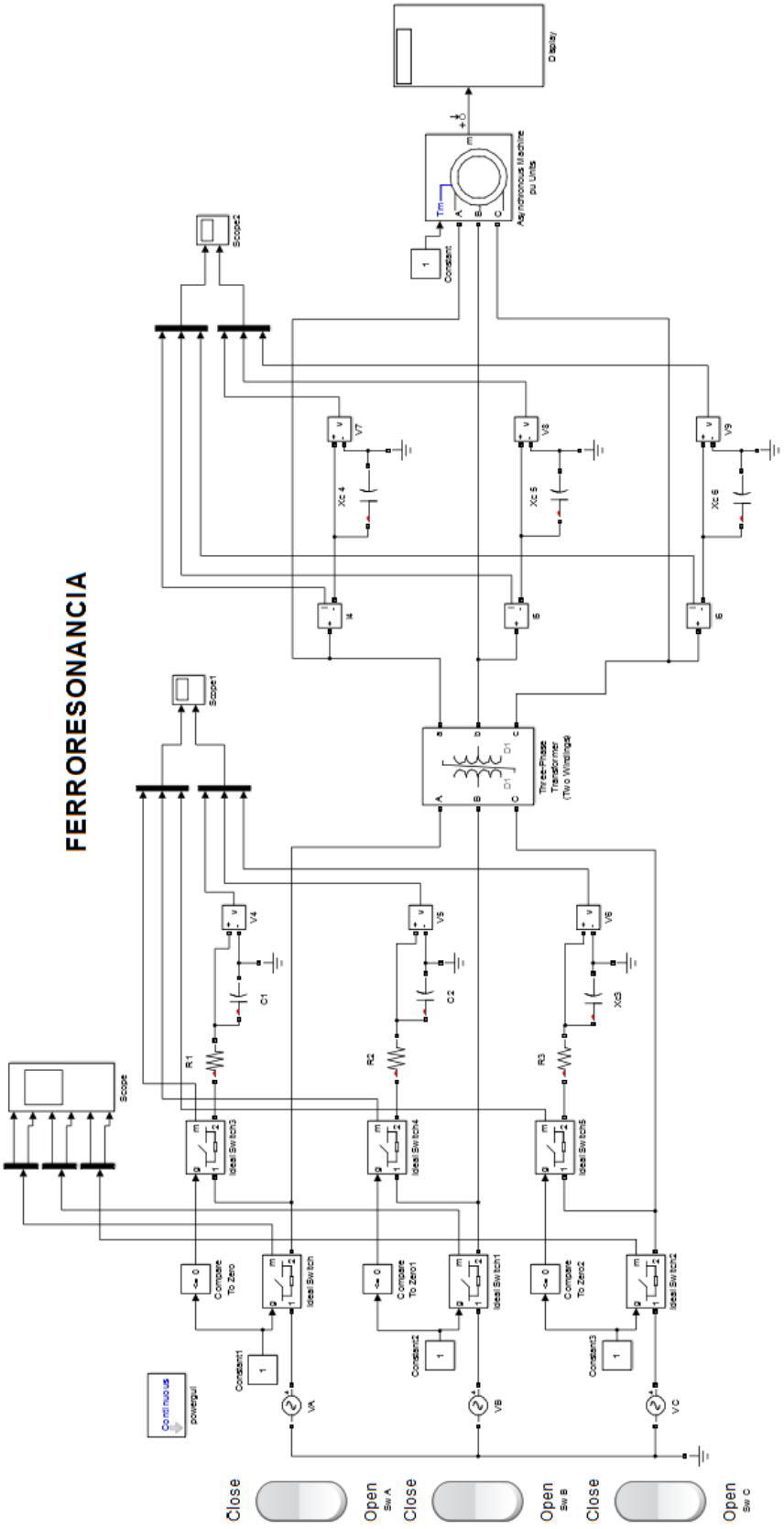
En la gráfica se puede observar que existen 3 puntos para VCN

De la gráfica: $X_{C1(crítica)}$ = 1.1367 X_m = (1.1367)(1501.2) = 1,706.4, cuya capacitancia correspondiente es:

$$C_{1(crítica)} = C_{1(mínima)} = 1/(w\ X_{c1(crítica)})$$

Donde f = 60 Hz, w = 377 rad/seg, substituyendo se obtiene:

$$C_{1(crítica)} = C_{1(mínima)} = 1.5\ \mu F$$

APENDICE C

Circuito del simulador armado en MATLAB/Simulink