



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE GUAYAQUIL

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

PROYECTO DE TITULACIÓN

Previa la obtención del Título de:

INGENIERO ELÉCTRICO

TEMA

“ANÁLISIS MATEMÁTICO DEL DISEÑO DIELECTRICO DE UN
TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN MONOFÁSICA DE
3KVA”

AUTORES

Shirley Gabriela Alarcón Loza

Edgar Antonino Jiménez Pazmiño

DIRECTOR: Ing. Teddy Jhennse Negrete Peña, MSc.

GUAYAQUIL

2018

CERTIFICADOS DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Shirley Gabriela Alarcón Loza y Edgar Antonino Jiménez Pazmiño 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, septiembre, 25, del 2018

Autor: Shirley Alarcón Loza

Cédula: 0919431221

Autor: Edgar Jiménez Pazmiño

Cédula: 0921971578

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

Yo, **SHIRLEY GABRIELA ALARCÓN LOZA**, con documento de identificación N° **0919431221**, 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 DEL DISEÑO DIELECTRICO DE UN TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN DE 3 KVA**” 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, septiembre, 25, del 2018

Autor: Shirley Alarcón Loza

Cédula: 0919431221

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

Yo, **EDGAR ANTONINO JIMÉNEZ PAZMIÑO**, con documento de identificación N° **0921971578**, 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 DEL DISEÑO DIELECTRICO DE UN TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN DE 3 KVA**” 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, septiembre, 25, del 2018

Autor: Edgar Jiménez Pazmiño

Cédula: 0921971578

**CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN SUSCRITO POR EL TUTOR**

Yo, **TEDDY JHENNSE NEGRETE PEÑA**, director del proyecto de Titulación denominado “**ANÁLISIS MATEMÁTICO DEL DISEÑO DIELÉCTRICO DE UN TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN DE 3 KVA**” realizado por los estudiantes: Shirley Gabriela Alarcón Loza y Edgar Antonino Jiménez Pazmiño, certifico que ha sido orientado y revisado durante su desarrollo, por cuanto se aprueba la presentación del mismo ante las autoridades pertinentes.

Guayaquil, septiembre, 25, del 2018

Teddy Negrete Peña

MSc.

DEDICATORIA 1

Este trabajo es dedicado con mucho amor, esfuerzo, paciencia y perseverancia.

A Dios por ser el Creador de todas las maravillas naturales que me ha permitido conocer, por aprender a amar y perdonar, por entender que todo sacrificio realizado en la vida es por el bienestar de quienes más amamos, por llenarme de fortaleza y sabiduría para continuar y obsequiarme una gran familia.

A mi esposo José Gavilanez, por ser amoroso y paciente acompañándome en esas batallas libradas cada día, por su ayuda para continuar mi camino profesional y por mostrarme como se puede vivir en armonía y paz.

A mi madre Shirley Alarcón, me llena de orgullo sus sacrificios y esfuerzos realizados para brindarme la mejor educación que haya podido tener, por su amor incondicional en todo momento, por entregarme su valioso tiempo y enseñarme a ser una mujer respetuosa, honesta y con ganas de crecer personal y profesionalmente.

A mis tíos Sarita Alarcón y Vicente Vargas, por ser mis segundos padres y ayudarnos a mi madre y abuela en todos los momentos que necesitamos apoyo, por traer al mundo a mis primos que más que eso son mis hermanos incondicionales.

A mi tío Daniel, Henry, Carmen y Eduardo que comparten conmigo sus momentos de alegría y gozo, por permanecer siempre juntos sin importar la situación y por hacer cada día que nuestra familia se mantenga unida.

A mis compañeros y amigos de aulas, gracias a sus ocurrencias, bromas y camaradería ayudaron a sobrellevar este difícil camino y continuar con alegría mi carrera profesional.

Shirley Alarcón Loza

DEDICATORIA 2

El trabajo va dedicado a Dios por permitirme la oportunidad a pesar de los errores que he cometido y poder sobrellevar las dificultades, en creer, en darme fuerzas, que el sacrificio, la responsabilidad, el ser humilde, de recapacitar y que me dé cuenta que los verdaderos momentos que tenemos que agradecer son el camino a las metas cumplidas y las personas que nos ayudan, nos aconsejan, dan cariño para cumplir todo lo que se propone, haciendo el bien y sin dañar a nadie, y dedicarse a lo importante.

Una dedicatoria especial a mi Señor padre el Ing. Galo Jiménez Criollo que a pesar de que físicamente no está con nosotros, con sus enseñanzas, su trabajo y como realizar sus responsabilidades y actividades, nos inculcó siempre como ser en los estudios y en la vida, él nos da fuerza y nos cuida siempre.

Las enseñanzas de mi Señora madre Nelly Pazmiño Ramos, que siempre me apoya, de saber cómo va todo, el ser perseverante y de lo que soy ahora se lo debo a ella, siempre voy a estar y estaré agradecido por lo que es para mi vida, este trabajo para ella.

A mi tío Vicente Pazmiño que siempre está pendiente, aunque no vivimos cerca, siempre estamos comunicados y nos da felicidad el saber de qué contamos con él.

A mis hermanos Galo, Priscilla, Ricardo y Náyade que son un ejemplo, por su dedicación, que siempre hay un camino para mejorar y seguir adelante.

A mis amistades de toda mi vida que se preocupan por el bienestar de uno, que siempre están y puedo recurrir a ellos sin importar las situaciones y distancias.

La dedicación de mis docentes, compañeras, compañeros y amistades de la Universidad me enseñó de que se aprende de cada persona y te brindan algo especial, un apoyo incondicional, que todos podemos ayudarnos sin prejuicios, sin intereses individuales, siempre como grupo unidos con un solo objetivo avanzar.

Edgar Jiménez Pazmiño

AGRADECIMIENTOS

Los más sinceros agradecimientos a Dios por la salud y vida obsequiados, a mi madre, abuela, tíos, tías, primos y primas por el apoyo brindado constantemente, a la Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil por aceptarme en su prestigiosa institución y brindarme todos los conocimientos éticos, científicos y prácticos para desarrollarme como profesional capacitada y llena de virtudes, a cada uno de los docentes que impartieron sus sapiencias a lo largo de mi vida estudiantil, al Ing. Teddy Negrete por sus conocimientos, tiempo, consejos y compromiso con esta causa; al Ing. Ervin Solano e Ing. Cecilia Grunauer por sus consejos y palabras de aliento; al resto de personas que contribuyeron para el cumplimiento de las metas alcanzadas.

Shirley Alarcón Loza

Agradezco a Dios por la oportunidad de cumplir una meta anhelada de hace mucho tiempo entregando salud, fuerzas y creer que todo se puede cuando uno se lo propone, seguir, ser perseverante y no decaer, a mi padre, mi madre, hermanas, hermanos y mis familiares que me han apoyado y se han preocupado de que siga y no desmaye en mis ideales y metas, son parte de lo que uno hace, un complemento de lo que uno es como persona y profesional.

Un agradecimiento especial al Ing. Teddy Negrete por ser parte del trabajo, que nos ha dado su apoyo como docente con sus conocimientos y como persona con sus consejos, experiencias, ánimos y la presión que nos hizo seguir y realizar lo que uno se propone haciéndolo bien y correctamente; a la Ing. Cecilia Grunauer y al Ing. Ervin Solano por su constante apoyo y preocupación por el avance no solo del trabajo sino como estamos en lo personal y por último un agradecimiento a mis amistades, compañeros y demás docentes que fueron un pilar en estos años en mi vida universitaria y que se pudo cumplir nuestro objetivo de ser un Ingeniero Eléctrico.

Edgar Jiménez Pazmiño

RESUMEN

El análisis matemático consistió en adaptar numéricamente el diseño dieléctrico de un transformador monofásico de distribución 3 kVA usando los datos geométricos y características del material para el cálculo de parámetros eléctricos empleando el modelo de la línea de transmisión multiconductora para conocer la respuesta transitoria de las capas de los devanados al introducir un pulso de frecuencia rápida.

Para el análisis se implementó una interfaz con la herramienta matemática MATLAB® para mostrar las matrices de los parámetros eléctricos en distintas frecuencias y representar gráficamente la distribución de voltaje (estado transitorio) dentro del devanado en el dominio del tiempo en el intervalo de microsegundos.

También se efectuó el análisis matemático y pruebas experimentales al transformador de distribución monofásico 15 kVA proporcionado por el Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil para constatar el estado del dieléctrico profundizando conocimientos en pruebas de rutina aplicadas a los transformadores de distribución.

Palabras clave: Diseño dieléctrico, parámetros distribuidos, análisis transitorio, modelo de la línea de transmisión multiconductora.

ABSTRACT

The mathematical analysis consisted of numerically adapting the dielectric design of a single-phase 3 kVA distribution transformer using the geometric data and material characteristics for the calculation of electrical parameters using the model of the multiconductor transmission line to know the transient response of the layers of the windings when introducing a pulse of fast frequency.

For the analysis, an interface with the mathematical tool MATLAB® implemented to show the matrices of the electrical parameters in different frequencies and graphically represent the voltage distribution (transient state) within the winding in the time domain in the microsecond interval.

Mathematical analysis and experimental tests also carried out on the 15 kVA single-phase distribution transformer provided by the High Voltage Laboratory of the Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil to verify the state of the dielectric, deepening knowledge in routine tests applied to distribution transformers.

Keywords: Dielectric design, distributed parameters, transient analysis, model of the multiconductor transmission line.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Pág.
PORTADA.....	i
CERTIFICADOS DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TIULACIÓN.....	ii
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UPS.....	iii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN SUSCRITO POR EL TUTOR.....	v
DEDICATORIA.....	vi
AGRADECIMIENTOS.....	viii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT.....	x
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiv
ÍNDICE DE TABLAS.....	xxii
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	xxvi
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xxxii
ABREVIATURAS.....	xxxii
SIMBOLOGÍA.....	xxxiii
INTRODUCCIÓN.....	35
CAPÍTULO I.....	38
1. EL PROBLEMA.....	38
1.1. Antecedentes.....	38
1.2. Descripción del Problema.....	38
1.3. Importancia y Alcances.....	39
1.4. Delimitación.....	40
1.5. Objetivos.....	41
1.5.1. Objetivo General.....	41
1.5.2. Objetivo Especifico.....	41
1.6. Marco Metodológico.....	41

1.6.1. Hipótesis.....	41
CAPÍTULO II.....	42
2. MARCO TEÓRICO.....	42
2.1. Estado del Arte.....	42
2.2. Ensayos dieléctricos.....	54
2.2.1. Prueba de Tensión de Impulso por Rayo.....	57
2.2.2. Prueba de Tensión de Impulso por Maniobra.....	58
2.2.3. Prueba de Resistencia de Aislamiento.....	59
2.2.4. Prueba de Voltaje Aplicado.....	62
CAPÍTULO III.....	64
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	64
3.1. Procedimientos para los ensayos dieléctricos en el laboratorio de Alta Tensión.....	64
3.1.1. Prueba de Tensión de Impulso tipo Rayo.....	80
3.1.2. Prueba de Tensión de Impulso tipo Maniobra.....	84
3.1.3. Prueba de Resistencia de Aislamiento.....	88
3.1.4. Prueba de Voltaje Aplicado.....	94
3.1.5. Procedimiento de la parte experimental para validar el análisis matemático.....	96
3.2. Desarrollo matemático del modelo de la línea de transmisión multiconductora en una red de dos puertos para el devanado monofásico del transformador de distribución.....	97
3.3. Cálculo de los parámetros eléctricos del devanado monofásico del transformador de distribución.....	116
3.3.1. Cálculo de la matriz de capacitancia para devanado monofásico en capas.....	117
3.3.2. Cálculo de la matriz de inductancia para devanado monofásico en capas.....	120
3.3.3. Cálculo de la matriz de impedancia para devanado monofásico en capas.....	120
3.3.4. Cálculo de la matriz de admitancia para devanado monofásico en capas.....	121

3.4. Validación del método para el cálculo de parámetros eléctricos del modelo matemático aplicado.....	122
3.5. Implementación del análisis matemático en GUIDE de MATLAB®.....	135
CAPÍTULO IV.....	149
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	149
4.1. Resultados del Modelo Matemático desarrollado en MATLAB®.....	149
4.1.1. Análisis matemático a transformador 3 kVA en los devanados de alta y baja tensión.....	149
4.1.2. Análisis matemático a transformador 15 kVA en devanado de alta tensión.....	169
4.2. Resultados de los ensayos dieléctricos aplicados al transformador de distribución 15 kVA.....	178
4.2.1. Prueba de Tensión de Impulso tipo Rayo.....	179
4.2.2. Prueba de Tensión de Impulso tipo Maniobra.....	180
4.2.3. Prueba de Resistencia de Aislamiento.....	181
4.2.4. Prueba de Voltaje Aplicado.....	184
CONCLUSIONES.....	187
RECOMENDACIONES.....	190
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	191
ANEXOS	196

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 1: REPRESENTACIÓN PARA UN DIFERENCIAL DE LONGITUD DEL TRANSFORMADOR [16].	47
FIGURA 2: DISTRIBUCIÓN DEL VOLTAJE DE IMPULSO DENTRO DEL DEVANADO [9].	49
FIGURA 3: DISTRIBUCIONES DE TENSIONES A LO LARGO DEL DEVANADO CON NEUTRO ATERRIZADO [19].	50
FIGURA 4: DISTRIBUCIONES DE TENSIONES A LO LARGO DEL DEVANADO CON NEUTRO AISLADO [19].	51
FIGURA 5: ACOPLER CAPACITIVOS EN SERIE Y EN DERIVACIÓN DE UN TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN MONOFÁSICO CON N CAPAS, CADA NODO REPRESENTA UNA CAPA.	52
FIGURA 6: TRANSITORIO IMPULSIVO PROVENIENTE DE UNA DESCARGA ATMOSFÉRICA.	53
FIGURA 7: TRANSITORIO OSCILATORIO.	54
FIGURA 8: IMPULSO DE RAYO COMPLETO [26].	57
FIGURA 9: CONMUTACIÓN DE TENSÓN DE IMPULSO TIPO MANIOBRA. [26]	58
FIGURA 10: CONEXIÓN ALTA TENSÓN Y BAJA TENSÓN MÁS TIERRA.	59
FIGURA 11: CONEXIÓN DE BAJA TENSÓN Y ALTA TENSÓN MÁS TIERRA.	60
FIGURA 12: CONEXIÓN DE ALTA TENSÓN CONTRA BAJA TENSÓN.	60
FIGURA 13: DIAGRAMA CON LA CONEXIÓN PARA LA PRUEBA DE VOLTAJE APLICADO.	62
FIGURA 14: TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE DISTRIBUCIÓN 15 KVA [31].	65
FIGURA 15: MÓDULO DE CONTROL HV9103 [32].	66
FIGURA 16: TRANSFORMADOR DE PRUEBA HV9105 [32].	67
FIGURA 17: BARRA DE DESCARGA HV9107 [32].	68
FIGURA 18: BARRA CONECTORA DE ALUMINIO HV9108 [32].	68
FIGURA 19: COPA CONECTORA DE ALUMINIO HV9109 [32].	69

FIGURA 20: BASE PEDESTAL DE PISO DE ALUMINIO HV9110 [32].	69
FIGURA 21: RECTIFICADOR DE SILICIO HV9111 [32].	70
FIGURA 22: CAPACITOR DE IMPULSO HV9112 [32].	70
FIGURA 23: BARRA CONECTORA DE ALUMINIO PARA PISO HV9118 [32].	71
FIGURA 24: TUBO CONECTOR DE ALUMINIO HV9119 [32].	71
FIGURA 25: CAPACITOR DE CARGA HV9120 [32].	71
FIGURA 26: RESISTENCIA DE CARGA HV9121 [32].	72
FIGURA 27: RESISTENCIA DE FRENTE DE ONDA HV9122 [32].	72
FIGURA 28: RESISTENCIA DE COLA DE ONDA HV9123 [32].	73
FIGURA 29: ESPINTERÓMETRO DE ESFERAS HV9125 [32].	73
FIGURA 30: TIMONEL DEL ESPINTERÓMETRO HV9126 [32].	73
FIGURA 31: RESISTENCIA DE FRENTE DE ONDA HV9127 [33].	74
FIGURA 32: RESISTENCIA COLA DE ONDA HV9128 [33].	74
FIGURA 33: DIVISOR DE BAJO VOLTAJE HV9130 [32].	75
FIGURA 34: ESPINTERÓMETRO PARA MEDICIÓN HV9133 Y ELECTRODOS [32].	75
FIGURA 35: ELECTRODO DE CORONA HV9138 [32].	76
FIGURA 36: CAPACITOR DE MEDICION HV9141 [32].	76
FIGURA 37: MEDIDOR DE VOLTAJE ALTERNO HV9150 [32].	77
FIGURA 38: MEDIDOR DE VOLTAJE DIRECTO HV9151 [32].	77
FIGURA 39: MEDIDOR DE VOLTAJE DE IMPULSO HV9152 [32].	78
FIGURA 40: MEGÓHMETRO MEGGER MIT525 [34].	78
FIGURA 41: INTERFAZ GENERAL DEL SOFTWARE POWER DB LITE [35].	79
FIGURA 42: OSCILOSCOPIO GW INSTEK GDS-1102A-U [36].	80
FIGURA 43: CIRCUITO GENERADOR DE IMPULSO TIPO RAYO PARA TRANSFORMADOR MONOFÁSICO. [37].	81
FIGURA 44: CIRCUTO DE IMPULSO TIPO RAYO SIN CARGA .	82
FIGURA 45: CONEXIÓN TRANSFORMADOR A CIRCUITO DE IMPULSO TIPO RAYO.	83
FIGURA 46: CALIBRACION DEL ESPINTEROMETRO DE MEDICIÓN HV9133 Y DEL ESPINTERÓMETRO DE ESFERAS HV9125 PARA PRUEBA DE IMPULSO TIPO RAYO.	83

FIGURA 47: TRANSFORMADOR SOMETIDO A PRUEBA DE IMPULSO TIPO RAYO.	84
FIGURA 48: CIRCUITO GENERADOR DE IMPULSO TIPO MANIOBRA PARA TRANSFORMADOR MONOFÁSICO. [33].....	85
FIGURA 49: CIRCUITO DE IMPULSO TIPO MANIOBRA SIN CARGA.	86
FIGURA 50: CONEXIÓN TRANSFORMADOR A CIRCUITO DE IMPULSO TIPO MANIOBRA.	86
FIGURA 51: CALIBRACIÓN DEL ESPINTERÓMETRO DE MEDICIÓN HV9133 Y DEL ESPINTERÓMETRO DE ESFERAS HV9125 PARA PRUEBA DE IMPULSO TIPO MANIOBRA.	87
FIGURA 52: TRANSFORMADOR SOMETIDO A PRUEBA DE IMPULSO TIPO MANIOBRA.	88
FIGURA 53: MEGÓHMETRO EN SUPERFICIE NIVELADA PARA ATERRIZAR [34].	89
FIGURA 54: TERMINALES DE ALTA Y BAJA TENSIÓN CORTOCIRCUITADOS.	89
FIGURA 55: MEGÓHMETRO CONECTADO A LA COMPUTADORA PARA ANÁLISIS CON SOFTWARE POWER DB LITE.	90
FIGURA 56: CONEXIÓN ALTA TENSIÓN - BAJA TENSIÓN MÁS TIERRA. 91	
FIGURA 57: CONEXIÓN DE BAJA TENSIÓN - ALTA TENSIÓN MÁS TIERRA.	92
FIGURA 58: CONEXIÓN DE ALTA TENSIÓN CONTRA BAJA TENSIÓN.	93
FIGURA 59: EVALUACIÓN DEL MEGÓHMETRO EN TIEMPO REAL.	93
FIGURA 60: CIRCUITO GENERADOR DE VOLTAJE ALTERNO PARA PRUEBA DE VOLTAJE APLICADO.	94
FIGURA 61: TERMINALES DE ALTA Y BAJA TENSIÓN CORTOCIRCUITADOS PARA PRUEBA DE VOLTAJE APLICADO.	95
FIGURA 62: CIRCUITO GENERADOR DE VOLTAJE ALTERNO PARA PRUEBA DE VOLTAJE APLICADO.	95
FIGURA 63: VOLTAJE APLICADO A TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN.	96
FIGURA 64: DESARROLLO MATEMÁTICO DEL MODELO DE PARÁMETROS DISTRIBUIDOS EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA.	98

FIGURA 65: REPRESENTACIÓN EQUIVALENTE DEL DEVANADO MONOFÁSICO POR UNIDAD DE LONGITUD, EN EL DOMINIO DEL TIEMPO [15].	99
FIGURA 66: APLICACIÓN DEL ANÁLISIS MATEMÁTICO CON EL MODELO DE PARÁMETROS DISTRIBUIDOS.	101
FIGURA 67: CIRCUITO EQUIVALENTE DE IMPEDANCIA Y ADMITANCIA EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA [19].	104
FIGURA 68: REPRESENTACIÓN DEL MODELO DE LA LINEA DE TRANSMISIÓN MULTICONDUCTORA COMO RED DE DOS PUERTOS CON SU MATRIZ DE PARÁMETROS DE CADENA \emptyset A BASE DE LA MATRIZ DE IMPEDANCIA Z Y MATRIZ DE ADMITANCIA Y [39].	108
FIGURA 69: MODELO DE PARÁMETROS DISTRIBUIDOS BASADOS EN EL MODELO DE LA LINEA DE TRANSMISIÓN MULTICONDUCTORA PARA EL DEVANADO DEL TRANSFORMADOR [15].	113
FIGURA 70: CORTE TRANSVERSAL CON EL DETALLE DE LAS DISTINTAS CAPACITANCIAS QUE INTERVIENEN EN EL DEVANADO DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN [15].	118
FIGURA 71: FORMA DE ONDA TIPO ESCALÓN APLICADA AL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 15 KVA EN ESTUDIO. APLICACIÓN DE LA RECOMENDACIÓN [16].	131
FIGURA 72: RESPUESTA TRANSITORIA DE VOLTAJE EN LA CAPA 2, 4, 6, 8, 10, 12, Y 14 DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN CALCULADAS AL APLICAR EL PULSO RÁPIDO TIPO ESCALÓN (TRANSFORMADOR 15KVA EN ESTUDIO).	132
FIGURA 73: VOLTAJES DE SOBREPULSO DE CADA CAPA DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN AL APLICAR EL PULSO ESCALÓN (TRANSFORMADOR 15KVA EN ESTUDIO).	133
FIGURA 74: COMPARACIÓN DE LOS VOLTAJES DE LA CAPA 2 HASTA 14 USANDO AMBOS TIPOS DE MATRICES DE INDUCTANCIA (TRANSFORMADOR 15KVA EN ESTUDIO) [15].	134
FIGURA 75: PROCEDIMIENTO DE LA APLICACIÓN DEL PULSO DE FRECUENCIA RÁPIDA AL DEVANADO ESTUDIADO DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN.	137
FIGURA 76: PORTADA DE LA INTERFAZ GRÁFICA.	138

FIGURA 77: MENÚ PARA PARA INGRESAR A LA MATRIZ DE CAPACITANCIA E INDUCTANCIA DEL TRANSFORMADOR DE 3 KVA Y 15 KVA EN DEVANADOS DE ALTA Y BAJA TENSIÓN.....	138
FIGURA 78: MODELO DE INTERFAZ PARA LA MATRIZ DE CAPACITANCIA DEL TRANSFORMADOR 3 Y 15 KVA EN DEVANADO DE ALTA TENSIÓN.	139
FIGURA 79: MODELO DE INTERFAZ PARA LA MATRIZ DE INDUCTANCIA DEL TRANSFORMADOR DE 3 Y 15 KVA EN DEVANADO DE ALTA TENSIÓN.	140
FIGURA 80: MODELO DE INTERFAZ PARA LA MATRIZ DE CAPACITANCIA E INDUCTANCIA DEL TRANSFORMADOR DE 3 KVA EN DEVANADO DE BAJA TENSIÓN.....	140
FIGURA 81: MENÚ PARA INGRESAR A LA MATRIZ DE IMPEDANCIAY ADMITANCIA DEL TRANSFORMADOR DE 3 Y 15 KVA.	141
FIGURA 82: MODELO DE INTERFAZ PARA LA MATRIZ DE IMPEDANCA EN DEVANADO DE ALTA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR DE 3 Y 15 KVA.	142
FIGURA 83: MODELO DE INTERFAZ PARA LA MATRIZ DE ADMITANCIA EN DEVANADO DE ALTA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR DE 3 Y 15 KVA.	142
FIGURA 84: MODELO DE INTERFAZ PARA LA MATRIZ DE IMPEDANCIA EN FRECUENCIAS DE 833 KHZ Y 2 MHZ EN DEVANADO DE BAJA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR DE 3 KVA.	143
FIGURA 85: MODELO DE INTERFAZ PARA LA MATRIZ DE ADMITANCIA EN FRECUENCIAS DE 833 KHZ Y 2 MHZ EN DEVANADO DE BAJA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR DE 3 KVA.	143
FIGURA 86: MODELO DE INTERFAZ PARA LAS GRÁFICAS DE VOLTAJE DE LAS CAPAS DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN (833 MHZ) DEL TRANSFORMADOR DE 3 KVA.....	144
FIGURA 87: MODELO DE INTERFAZ PARA LAS GRÁFICAS DE VOLTAJE DE LAS CAPAS DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN (2 MHZ) DEL TRANSFORMADOR DE 3 KVA.....	145

FIGURA 88: MODELO DE INTERFAZ PARA LAS GRÁFICAS DE VOLTAJE DE LAS CAPAS DEL DEVANADO DE BAJA TENSIÓN (833 KHZ) DEL TRANSFORMADOR DE 3 KVA.....	145
FIGURA 89: MODELO DE INTERFAZ PARA LAS GRÁFICAS DE VOLTAJE DE LAS CAPAS DEL DEVANADO DE BAJA TENSIÓN (2 MHZ) DEL TRANSFORMADOR DE 3 KVA.....	146
FIGURA 90: MODELO DE INTERFAZ PARA LA GRÁFICA DEL TRANSITORIO APLICADO AL TRANSFORMADOR DE 15 KVA.....	146
FIGURA 91: MODELO DE INTERFAZ PARA LAS GRÁFICAS DE VOLTAJE DE LAS CAPAS DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR DE 15 KVA.....	147
FIGURA 92: MODELO DE INTERFAZ PARA LAS GRÁFICAS EXPERIMENTALES RESULTANTES.	147
FIGURA 93: FORMA DE ONDA TIPO ESCALÓN (1.2 US) APLICADA AL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 3 KVA.....	162
FIGURA 94: RESPUESTA TRANSITORIA DE LAS CAPAS PARES (2 A 16) DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN (1.2 US) DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 3 KVA.....	163
FIGURA 95: FORMA DE ONDA TIPO ESCALÓN (0.5 US) APLICADA AL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 3 KVA.....	164
FIGURA 96: RESPUESTA TRANSITORIA DE LAS CAPAS PARES (2 A 16) DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN (0.5US) DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 3KVA.....	165
FIGURA 97: FORMA DE ONDA TIPO ESCALÓN (1.2 US) APLICADA AL DEVANADO DE BAJA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 3 KVA.....	166
FIGURA 98: RESPUESTA TRANSITORIA DE TODAS LAS CAPAS DEL DEVANADO DE BAJA TENSIÓN (1.2 US) DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 3 KVA.....	167
FIGURA 99: FORMA DE ONDA TIPO ESCALÓN (0.5 US) APLICADA AL DEVANADO DE BAJA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 3 KVA.....	168

FIGURA 100: RESPUESTA TRANSITORIA DE TODAS LAS CAPAS DEL DEVANADO DE BAJA TENSIÓN (0.5 US) DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 3 KVA.....	169
FIGURA 101: FORMA DE ONDA TIPO RAYO APLICADA AL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 15 KVA (LABORATORIO ALTA TENSIÓN).....	176
FIGURA 102: RESPUESTA TRANSITORIA DE LAS CAPAS IMPARES (1 A 5) DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 15 KVA (LABORATORIO ALTA TENSIÓN).....	177
FIGURA 103: RESPUESTA TRANSITORIA DE LAS CAPAS IMPARES (7 A 13) DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 15 KVA (LABORATORIO ALTA TENSIÓN).....	178
FIGURA 104: IMPULSO TIPO RAYO EXPERIMENTAL [36].	179
FIGURA 105: RESPUESTA TRANSITORIA DEL TOTAL DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN [36].	180
FIGURA 106: CURVA DE POLARIZACIÓN DE LA CONEXIÓN ALTA TENSIÓN - BAJA TENSIÓN MÁS TIERRA.	182
FIGURA 107: CURVA DE POLARIZACIÓN DE LA CONEXIÓN BAJA TENSIÓN - ALTA TENSIÓN MÁS TIERRA.	183
FIGURA 108: CURVA DE POLARIZACIÓN DE LA CONEXIÓN ALTA TENSIÓN - BAJA TENSIÓN.	183
FIGURA 109: CURVA DE VOLTAJE EN ALTA TENSION DE LA PRUEBA DE VOLTAJE APLICADO.	185
FIGURA 110: CORRIENTE EN BAJA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR DURANTE LA PRUEBA DE VOLTAJE APLICADO.	185
FIGURA C.1: REPRESENTACIÓN DEL NÚCLEO Y SUS DIMENSIONES.....	204
FIGURA C.2: DIMENSIONES DEL NÚCLEO DE UN TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN DE 3 KVA EN MILÍMETROS.....	210
FIGURA D. 1: TUBO DE DEVANADO O CASQUILLO EN MOLDE DE MADERA.	211
FIGURA D. 2: AISLAMIENTO ENTRE DEVANADOS DE ALTA Y BAJA TENSIÓN Y AISLAMIENTO ENTRE CAPAS.....	212
FIGURA D. 3: COLOCACIÓN DEL AISLAMIENTO EN EL TERMINAL DEL DEVANADO DE BAJA TENSIÓN.....	212

FIGURA D. 4: FIJACIÓN DEL PAPEL DIAMANTADO CON CINTA DE FILAMENTO Y VISTA DEL COLLARÍN DE LA BOBINA.	213
FIGURA D. 5: TERMINALES DE LOS DEVANADOS DE ALTA Y BAJA TENSIÓN.....	214
FIGURA D. 6: BOBINA TERMINADA PARA EL PROCESO DE SECADO. ..	215
FIGURA D. 7: HORNO CON ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA PARA SECADO DEL PROTOTIPO.	215
FIGURA E.1: INTERFAZ GRÁFICA DE COMSOL MULTIPHYSICS®.....	216
FIGURA E.2: ANÁLISIS DE GEOMETRÍA Y TIEMPO DE UN NÚCLEO EN COMSOL MULTIPHYSICS®.....	217
FIGURA G. 1: INICIO DE LA APLICACIÓN GUIDE QUICK START [49].....	222
FIGURA G. 2: BLANK GUI (DEFAULT) [49].	223
FIGURA G. 3: GUI CON UICONTROLS [49].	223
FIGURA G. 4: GUI CON AXES Y MENU [49].	224
FIGURA G. 5: ENTORNO DEL MODAL QUESTION DIALOG [49].	224

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
TABLA 1: CARACTERÍSTICAS DE LOS PARÁMETROS CONCENTRADOS Y DISTRIBUIDOS DE LOS MODELOS DE ALTA FRECUENCIA [14].	48
TABLA 2: RELACIONES DE VOLTAJE NOMINAL DEL SISTEMA, VOLTAJE MÁXIMO DEL SISTEMA Y NIVEL BÁSICO DE AISLAMIENTO. [24].	55
TABLA 3: INTERRELACIONES ENTRE LOS NIVELES DE AISLAMIENTO DIELECTRICO PARA TRANSFORMADORES CON NIVEL BÁSICO DE AISLAMIENTO DE 350KV Y MENORES. [24].	56
TABLA 4: CONDICIONES DE AISLAMIENTO BASADAS EN LA RELACIÓN DE ÍNDICE DE ABSORCIÓN DIELECTRICA Y DEL ÍNDICE DE POLARIZACIÓN [29].	61
TABLA 5: CARACTERÍSTICAS DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 15KVA [31].	65
TABLA 6: CARACTERÍSTICAS GENERALES Y TÉCNICAS DEL MÓDULO DE CONTROL HV9103.	66
TABLA 7: DATOS TÉCNICOS DEL TRANSFORMADOR DE PRUEBA HV9105.	67
TABLA 8: CARACTERÍSTICAS DEL MEGÓHMETRO MEGGER MIT525 [34].	79
TABLA 9: CARACTERISTICAS DEL OSCILOSCOPIO GW INSTEK GDS-1102A-U [36].	80
TABLA 10: TRANSFORMACIÓN DE PARÁMETROS DEL DOMINIO DEL TIEMPO AL DOMINIO DE LA FRECUENCIA.	100
TABLA 11: DATOS GEOMÉTRICOS Y DE CONSTRUCCIÓN DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 15KVA EN ESTUDIO [13].	122
TABLA 12: PORCENTAJE DE ERROR ENTRE LA MATRIZ DE CAPACITANCIA DE REFERENCIA [15] Y CALCULADA DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 15KVA EN ESTUDIO.	123

TABLA 13: MATRIZ DE INDUCTANCIA DE REFERENCIA DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN EN MILIHENRIOS DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 15KVA EN ESTUDIO [13].	124
TABLA 14: MATRIZ DE INDUCTANCIA CALCULADA DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN EN MILIHENRIOS DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 15KVA EN ESTUDIO.	125
TABLA 15: PORCENTAJE DE ERROR ENTRE LA MATRIZ DE INDUCTANCIA DE LA TABLA 8 Y LA CALCULADA DE LA TABLA 9.	126
TABLA 16: MATRIZ DE IMPEDANCIA DE REFERENCIA DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN EN OHMS DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 15KVA EN ESTUDIO [13].	127
TABLA 17: MATRIZ DE IMPEDANCIA CALCULADA DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN EN OHMS DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 15KVA EN ESTUDIO.	128
TABLA 18: MATRIZ DE ADMITANCIA DE REFERENCIA DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN EN SIEMENS DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 15KVA EN ESTUDIO [13].	129
TABLA 19: MATRIZ DE ADMITANCIA CALCULADA DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN EN SIEMENS DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 15KVA EN ESTUDIO.	130
TABLA 20: VALORES CALCULADOS DE LOS PICOS DEL SOBREPULSO DE LAS CAPAS 2, 4, 6, 8, 10, 12 Y 14 DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN (TRANSFORMADOR 15KVA EN ESTUDIO).	133
TABLA 21: VALORES DE REFERENCIA DE LOS PICOS DEL SOBREPULSO DE LAS CAPAS 2, 4, 6, 8, 10, 12 Y 14 DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN (TRANSFORMADOR 15KVA EN ESTUDIO).	134
TABLA 22: PORCENTAJE DE ERROR DE LOS VOLTAJES DE SOBREPULSO DE REFERENCIA Y LOS CALCULADOS (TRANSFORMADOR 15KVA EN ESTUDIO).	135
TABLA 23: DATOS GEOMÉTRICOS Y CONSTRUCTIVOS DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 3 KVA.	150
TABLA 24: CAPACITANCIAS EN DEVANADO DE ALTA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN DE 3 KVA.	151

TABLA 25: MATRIZ DE CAPACITANCIA EN NANOFARADIOS DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR 3 KVA.....	152
TABLA 26: CAPACITANCIAS EN DEVANADO DE BAJA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN DE 3 KVA.	153
TABLA 27: MATRIZ DE CAPACITANCIA EN FARADIOS DEL DEVANADO DE BAJA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR 3 KVA.	153
TABLA 28: MATRIZ DE INDUCTANCIA EN MILIHENRIOS DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR 3 KVA.	154
TABLA 29: MATRIZ DE INDUCTANCIA EN HENRIOS DEL DEVANADO DE BAJA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR 3 KVA.	155
TABLA 30: MATRIZ DE IMPEDANCIA EN OHMIOS DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR 3KVA EN 833 KHZ.	156
TABLA 31: MATRIZ DE IMPEDANCIA EN OHMIOS DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR 3KVA EN 2 MHZ.	157
TABLA 32: MATRIZ DE IMPEDANCIA EN OHMIOS DEL DEVANADO DE BAJA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR 3 KVA EN 833 KHZ.....	158
TABLA 33: MATRIZ DE IMPEDANCIA EN OHMIOS DEL DEVANADO DE BAJA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR 3 KVA EN 2 MHZ.....	158
TABLA 34: MATRIZ DE ADMITANCIA EN SIEMENS DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR 3 KVA EN 833 KHZ.....	159
TABLA 35: MATRIZ DE ADMITANCIA EN SIEMENS DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR 3 KVA EN 2 MHZ.	160
TABLA 36: MATRIZ DE ADMITANCIA EN SIEMENS DEL DEVANADO DE BAJA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR 3 KVA EN 833 KHZ.....	161
TABLA 37: MATRIZ DE ADMITANCIA EN SIEMENS DEL DEVANADO DE BAJA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR 3 KVA EN 2 MHZ.....	161
TABLA 38: DATOS GEOMÉTRICOS Y CONSTRUCTIVOS DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 15 KVA (LABORATORIO ALTA TENSIÓN) [31].....	170
TABLA 39: CAPACITANCIAS EN DEVANADO DE ALTA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 15 KVA (LABORATORIO ALTA TENSIÓN).	171

TABLA 40: MATRIZ DE CAPACITANCIA EN NANOFARADIOS DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR 15 KVA (LABORATORIO ALTA TENSIÓN).....	172
TABLA 41: MATRIZ DE INDUCTANCIA EN MILIHENRIOS DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR 15 KVA (LABORATORIO ALTA TENSIÓN).	173
TABLA 42: MATRIZ DE IMPEDANCIA EN OHMIOS DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR 15 KVA (LABORATORIO ALTA TENSIÓN).	174
TABLA 43: MATRIZ DE ADMITANCIA EN SIEMENS DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR 15 KVA (LABORATORIO ALTA TENSIÓN).	175
TABLA 44: RESULTADOS DE VOLTAJE Y CORRIENTE EN PRUEBA DE IMPULSO TIPO RAYO.	179
TABLA 45: RESULTADOS DE VOLTAJE Y CORRIENTE EN PRUEBA DE IMPULSO TIPO MANIOBRA.	181
TABLA 46: MEDICIONES DE LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO EN TRES CONFIGURACIONES.	182
TABLA 47: VALORES TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES DEL ÍNDICE DE POLARIZACIÓN DE LAS TRES CONFIGURACIONES EN LA PRUEBA DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO.	184
TABLA C.1: DATOS PARA EL DISEÑO TEÓRICO DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN MONOFÁSICO DE 3 KVA.....	201
TABLA C.2: ESPESOR DE LA BOBINA DE 3 KVA.....	208
TABLA G.1: COMPONENTES DEL ENTORNO GRÁFICO DE DISEÑO [49].....	225

ÍNDICE DE ECUACIONES

	Pág.
ECUACIÓN 1. MATRIZ DE ESPACIO DE ESTADO EN TÉRMINOS DE LA DERIVADA.....	45
ECUACIÓN 2. MATRIZ DE ESPACIO DE ESTADO EN TÉRMINOS DEL VOLTAJE.....	45
ECUACIÓN 3. VECTOR DE CORRIENTE NODAL DEL MODELO ANÁLISIS EN RED DE PARÁMETROS CONCENTRADOS.....	45
ECUACIÓN 4. VOLTAJE EN UN PUNTO DEL DEVANADO MONOFÁSICO EN DOMINIO DE LA FRECUENCIA	45
ECUACIÓN 5. CORRIENTE EN UN PUNTO DEL DEVANADO MONOFÁSICO EN DOMINIO DE LA FRECUENCIA	45
ECUACIÓN 6. VOLTAJE DEL MODELO DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN MULTICONDUCTORA DE PARÁMETROS DISTRIBUIDOS.....	46
ECUACIÓN 7. VOLTAJE DEL MODELO DE ANÁLISIS DE TRANSFERENCIA POR ACOPLAMIENTO INDUCTIVO.....	47
ECUACIÓN 8. CORRIENTE DEL MODELO DE ANÁLISIS DE TRANSFERENCIA POR ACOPLAMIENTO INDUCTIVO.....	47
ECUACIÓN 9. CORRIENTE DEL MODELO DE LA MATRIZ DE ADMITANCIA EN DOMINIO DE LA FRECUENCIA.....	47
ECUACIÓN 10. ÍNDICE DE POLARIZACIÓN DE LA PRUEBA DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO.....	61
ECUACIÓN 11. ÍNDICE DE ABSORCIÓN DIELECTRICA DE LA PRUEBA DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO.....	61
ECUACIÓN 12. PORCENTAJE DE ERROR ENTRE UN VALOR TEÓRICO Y EXPERIMENTAL.....	61
ECUACIÓN 13. EQUIVALENTE PARALELO DE LA IMPEDANCIA ENTRE LA RESISTENCIA Y CAPACITANCIA A TIERRA.....	102
ECUACIÓN 14. ADMITANCIA EQUIVALENTE DE LA CAPACITANCIA A TIERRA Y LA RESISTENCIA A TIERRA EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA	102

ECUACIÓN 15. EQUIVALENTE PARALELO ENTRE LA RESISTENCIA SERIE Y LA CAPACITANCIA SERIE	102
ECUACIÓN 16. ADMITANCIA DE LA RESISTENCIA SERIE Y LA CAPACITANCIA SERIE EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA.....	102
ECUACIÓN 17. ADMITANCIA QUE RELACIONA LA INDUCTANCIA, RESISTENCIA SERIE Y CAPACITANCIA SERIE.....	103
ECUACIÓN 18. IMPEDANCIA QUE RELACIONA LA RESISTENCIA E INDUCTANCIA EQUIVALENTE	103
ECUACIÓN 19. ADMITANCIA EN TÉRMINOS DE CONDUCTANCIA Y CAPACITANCIA EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA	104
ECUACIÓN 20. IMPEDANCIA EN TÉRMINOS DE LA RESISTENCIA E INDUCTANCIA EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA.....	104
ECUACIÓN 21. VECTOR DE VOLTAJE DE UN PUNTO DEL DEVANADO EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA.....	105
ECUACIÓN 22. VECTOR DE CORRIENTE DE UN PUNTO DEL DEVANADO EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA.....	105
ECUACIÓN 23. ECUACIÓN DEL TELEGRAFISTA EN TÉRMINOS DE VOLTAJE.....	106
ECUACIÓN 24. ECUACIÓN DEL TELEGRAFISTA EN TÉRMINOS DE CORRIENTE.....	106
ECUACIÓN 25. EDO MATRICIAL DE SEGUNDO ORDEN EN TÉRMINOS DE VOLTAJE	107
ECUACIÓN 26. EDO MATRICIAL DE SEGUNDO ORDEN EN TÉRMINOS DE CORRIENTE.....	107
ECUACIÓN 27. EDO MATRICIAL DE PRIMER ORDEN REPRESENTANDO LAS VARIABLES DE ESPACIOS DE ESTADO.....	108
ECUACIÓN 28. ECUACIÓN FASORIAL DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN MULTICONDUCTORA.....	108
ECUACIÓN 29. ECUACIÓN FASORIAL DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN MULTICONDUCTORA EN TÉRMINOS DE LOS PARÁMETROS DE CADENA.....	109
ECUACIÓN 30. PARÁMETRO DE IMPEDANCIA Z_{11} DE LA MATRIZ DE PARÁMETROS DE CADENA DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN MULTICONDUCTORA.....	112

ECUACIÓN 31. PARÁMETRO DE IMPEDANCIA Z_{12} DE LA MATRIZ DE PARÁMETROS DE CADENA DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN MULTICONDUCTORA.....	112
ECUACIÓN 32. ADMITANCIA CARACTERÍSTICA.....	112
ECUACIÓN 33. PARÁMETRO DE ADMITANCIA Y_{11} DE LA MATRIZ DE PARÁMETROS DE CADENA DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN MULTICONDUCTORA.....	112
ECUACIÓN 34. PARÁMETRO DE ADMITANCIA Y_{12} DE LA MATRIZ DE PARÁMETROS DE CADENA DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN MULTICONDUCTORA.....	113
ECUACIÓN 35. MODELO DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN MULTICONDUCTORA EN TÉRMINOS DE LA MATRIZ DE ADMITANCIA DE LOS PARÁMETROS DE CADENA.....	113
ECUACIÓN 36. MATRIZ F OBTENIDA DE LA REDUCCIÓN DE LA MATRIZ DE ADMITANCIA DE PARÁMETROS DE CADENA.....	114
ECUACIÓN 37. VOLTAJE EN CADA CAPA DEL DEVANADO MONOFÁSICO REPRESENTADO POR EL MODELO DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN MULTICONDUCTORA.....	116
ECUACIÓN 38. CAMPO ELÉCTRICO DE UN CILINDRO.....	118
ECUACIÓN 39. VOLTAJE DE UN CILINDRO.....	119
ECUACIÓN 40. CAPACITANCIA DE CILINDROS CONCÉNTRICOS.....	119
ECUACIÓN 41. CAPACITANCIA A TIERRA DE CILINDROS CONCÉNTRICOS.....	119
ECUACIÓN 42. MATRIZ DE INDUCTANCIA A PARTIR DE LA MATRIZ INVERSA DE CAPACITANCIA	120
ECUACIÓN 43. VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LA ONDA.....	120
ECUACIÓN 44. IMPEDANCIA EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA BASADO EN PÉRDIDAS DE CALOR.....	121
ECUACIÓN 45. MATRIZ DE IMPEDANCIA BASADA EN LA MATRIZ DE INDUCTANCIA.....	121
ECUACIÓN 46. MATRIZ DE ADMITANCIA BASADA EN LA MATRIZ DE CAPACITANCIA.....	121
ECUACIÓN 47. TANGENTE DE PÉRDIDAS DEL DEVANADO MONOFÁSICO.....	121

ECUACIÓN A.1: IDENTIDAD DE LOS PARÁMETROS DE CADENA Y SUS VALORES INVERSOS.....	196
ECUACIÓN A.2: IGUALDAD MATRICIAL DE LOS PARÁMETROS DE CADENA Y SUS VALORES INVERSOS CON LA MATRIZ IDENTIDAD.....	196
ECUACIÓN A.3: IGUALDAD DEL PARÁMETRO DE CADENA $\overline{\overline{\phi_{11}}}$ Y $\overline{\overline{\phi_{22}}}$	197
ECUACIÓN B.1: EDO DE VOLTAJE SEGUNDO ORDEN QUE RELACIONA IMPEDANCIA Y ADMITANCIA.....	198
ECUACIÓN B.2: EDO DE CORRIENTE SEGUNDO ORDEN QUE RELACIONA IMPEDANCIA Y ADMITANCIA.....	198
ECUACIÓN B.3: VECTOR DE VOLTAJE EN BASE AL SISTEMA MODAL Y LA MATRIZ DE EIGENVECTORES.....	198
ECUACIÓN B.4: VECTOR DE CORRIENTE EN BASE AL SISTEMA MODAL Y LA MATRIZ DE EIGENVECTORES.....	198
ECUACIÓN B.5: EDO DE VOLTAJE MODAL DE SEGUNDO ORDEN EN BASE A LA MATRIZ GAMMA.....	198
ECUACIÓN B.6: EDO DE CORRIENTE MODAL DE SEGUNDO ORDEN EN BASE A LA MATRIZ GAMMA.....	198
ECUACIÓN B.7: MATRIZ DIAGONAL GAMMA.....	199
ECUACIÓN B.8: ECUACIÓN DESACOPLADA DE VOLTAJE MODAL.....	199
ECUACIÓN B.9: ECUACIÓN DESACOPLADA DE CORRIENTE MODAL....	199
ECUACIÓN B.10: MATRIZ DIAGONAL EXPONENCIAL A BASE DE LA MATRIZ GAMMA.....	199
ECUACIÓN C.1: CORRIENTE NOMINAL DEL PRIMARIO.....	201
ECUACIÓN C.2: CORRIENTE NOMINAL DEL SECUNDARIO.....	201
ECUACIÓN C.3: DETERMINACIÓN NÚMERO DE ESPIRAS.....	202
ECUACIÓN C.4: CALIBRE DEL CONDUCTOR PRIMARIO.....	202
ECUACIÓN C.5: CALIBRE DEL CONDUCTOR SECUNDARIO.....	203
ECUACIÓN C.6: SECCIÓN TRANSVERSAL DEL NÚCLEO.....	203
ECUACIÓN C.7: AREA NETA DEL NÚCLEO.....	203
ECUACIÓN C.8: ESPESOR DEL NÚCLEO.....	204
ECUACIÓN C.9: LAMINACIONES DEL NÚCLEO.....	204

ECUACIÓN C.10:	ALTURA EFECTIVA DEL DEVANADO SECUNDARIO.....	205
ECUACIÓN C.11:	ESPIRAS POR CAPA DEL DEVANADO SECUNDARIO.....	205
ECUACIÓN C.12:	NÚMERO DE CAPAS DEVANADO SECUNDARIO.....	205
ECUACIÓN C.13:	ALTURA EFECTIVA DEL DEVANADO PRIMARIO.....	206
ECUACIÓN C.14:	ESPIRAS POR CAPA DEL DEVANADO PRIMARIO.....	206
ECUACIÓN C.15:	NÚMERO DE CAPAS DEVANADO PRIMARIO.....	206
ECUACIÓN C.16:	AISLAMIENTO ENTRE VUELTAS CON VOLTAJE NOMINAL.....	206
ECUACIÓN C.17:	AISLAMIENTO ENTRE VUELTAS CON VOLTAJE IMPULSO.....	207
ECUACIÓN C.18:	AISLAMIENTO ENTRE CAPAS CON VOLTAJE NOMINAL.....	207
ECUACIÓN C.19:	AISLAMIENTO ENTRE CAPAS CON VOLTAJE IMPULSO.....	207
ECUACIÓN C.20:	LONGITUD DE LA VUELTA MEDIA DEL DEVANADO SECUNDARIO.....	209
ECUACIÓN C.21:	LONGITUD REQUERIDA DEVANADO SECUNDARIO...	209
ECUACIÓN C.22:	LONGITUD DE LA VUELTA MEDIA DEL DEVANADO PRIMARIO.....	209
ECUACIÓN C.23:	LONGITUD REQUERIDA DEVANADO PRIMARIO.....	209
ECUACIÓN C.24:	ANCHO DE LA VENTANA DEL NÚCLEO.....	210
ECUACIÓN C.25:	VALOR F DE LA ARCADA.....	210
ECUACIÓN F.1:	TRANSFORMADA DE LAPLACE.....	220
ECUACIÓN F.2:	TRANSFORMADA INVERSA DE LAPLACE.....	220
ECUACIÓN F.3:	TRANSFORMADA DE FOURIER.....	220
ECUACIÓN F.4:	TRANSFORMADA INVERSA DE FOURIER.....	220
ECUACIÓN F.5:	VOLTAJE DE CAPA EN EL DOMINIO DEL TIEMPO.....	220

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA DE LA ENTIDAD $\emptyset 11=\emptyset 22$	196
ANEXO B. DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA DE LA IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA ZC	198
ANEXO C. DISEÑO DE LA PARTE ACTIVA DE UN TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN MONOFÁSICO 3 KVA	201
ANEXO D. DESCRIPCIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN ARTESANAL DE UN TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN MONOFÁSICO DE 3 KVA	211
ANEXO E. COMSOL MULTIPHYSICS® Y EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS	216
ANEXO F. LA TRANSFORMADA NUMÉRICA DE LAPLACE.....	220
ANEXO G. GUIDE DE MATLAB.....	222
ANEXO H. FOTOGRAFÍAS DE LA PRUEBA EN EL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN.....	234

ABREVIATURAS

AC	Corriente alterna
Arms	Corriente eficaz
BIL	Nivel básico de impulso
DC	Corriente directa
EDO	Ecuaciones diferenciales ordinarias
IEC	Comisión Electrotécnica Internacional
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
I_p	Corriente del primario
IP	Grado de protección
I_s	Corriente del secundario
m.s.n.m.	Metros sobre el nivel del mar
NBA	Nivel básico de aislamiento
N_p	Número de espiras del primario
N_s	Número de espiras del secundario
NTE	Norma Técnica Ecuatoriana
ONAN	Aceite natural Aire natural
PCB	Bifenilo Ploriclorado
RAM	Memoria de acceso aleatorio
ROM	Memoria de sólo lectura
VAC	Voltaje de corriente alterna
VDC	Voltaje de corriente continua
V_m	Voltaje máximo del sistema
V_n	Voltaje nominal del sistema
V_p	Voltaje del primario
V_{rms}	Voltaje eficaz
V_s	Voltaje del secundario

SIMBOLOGÍA

G_k	k-ésima columna de matriz nodal de conductancia
$\hat{\Gamma}$	Matriz nodal de inductancia inversa
Γ_k	k-ésima columna de matriz nodal de inductancia inversa
\bar{C}	Matriz de capacitancia
\hat{C}	Matriz nodal de capacitancia
C_k	k-ésima columna de la matriz nodal de capacitancia
\bar{G}	Matriz de conductancia
\hat{G}	Matriz nodal de conductancia
\vec{I}	Vector de corriente nodal
\bar{L}	Matriz de inductancia
\vec{V}	Vector de voltaje nodal
\bar{Y}	Matriz de admitancia
\hat{Y}	Matriz nodal de admitancia
\bar{Z}	Matriz de impedancia
®	Marca registrada
°C	Grado centígrado
μF	Micro Faradio
A	Amperio
F	Faradio
GHz	Giga Hertz
GΩ	Giga Ohm
H	Henrios
Hz	Hertz
j	Unidad imaginaria
kg	Kilogramos
kV	Kilo Voltio
kVA	Kilo Voltio - Amperio
KΩ	Kilo Ohmio
m	Metro
mA	Mili Amperio

MHz	Mega Hertz
mm	Milímetro
ms	Milisegundo
MΩ	Mega Ohm
nF	Nano Faradio
pF	Pico Faradio
s	Segundo
S	Siemens
V	Voltio
w	Variable del dominio de la frecuencia
Wb	Weber
μs	Microsegundo
σ	Conductividad eléctrica
ω	Frecuencia angular
Ω	Ohmio
C	Capacitancia
$I(z, s)$	Vector de corriente en el punto z del devanado
L	Inductancia
R	Resistencia
$V(z, s)$	Vector de tensión en el punto z del devanado
Y	Admitancia
Z	Impedancia
s	Variable de la transformada de Laplace

INTRODUCCIÓN

El diseño dieléctrico o sistema de aislamiento de un transformador se diseña para que soporte eventos que generan sobretensiones poniendo a prueba los materiales aislantes y comprobar que el equipo sea capaz de soportar todos los transitorios electromagnéticos.

Para este estudio se precisa información geométrica detallada de la construcción de los devanados y materiales aislantes utilizados, para que sea posible aproximar la distribución del potencial frente a la propagación de un pulso de frecuencia rápida o mejor conocido como transitorio, por ello las simulaciones y el uso de métodos numéricos y computacionales entregan mayor precisión en el cálculo de parámetros eléctricos mejorando el tiempo de solución.

Por esta razón, se utiliza el modelo de la línea de transmisión multiconductora ya que en altas frecuencias el devanado del transformador se comporta como una línea de transmisión de varios conductores usando los parámetros distribuidos que señala la teoría de propagación de ondas representada con ecuaciones diferenciales parciales o más conocidas como ecuaciones del telegrafista.

Para la resolución del problema se inicia con la representación del devanado en un circuito equivalente que contenga todos los parámetros eléctricos y fenómenos electromagnéticos que influyen en el diseño dieléctrico, aplicando Leyes de Kirchhoff se resuelve mediante mallas y nodos las incógnitas de corrientes y voltajes participantes en el circuito.

Del circuito equivalente que representa un segmento diferencial del devanado se alcanzan las ecuaciones del telegrafista de la línea de transmisión de un hilo conductor que es la base para desarrollar el modelo de la red de dos puertos usando la matriz de admitancia de los parámetros de cadena para implementarlo con el modelo de parámetros distribuidos de la línea de transmisión multiconductora debido a las múltiples capas que contiene el devanado de alta y baja tensión. Los datos para la resolución de estos modelos son las medidas geométricas y constructivas del devanado y las propiedades físicas del material aislante y conductor.

Simultáneamente, se solucionan las ecuaciones matriciales que constituyen los parámetros eléctricos del devanado en el dominio de la frecuencia calculándolas con

la interfaz gráfica de MATLAB®, luego se aplica el pulso de frecuencia rápida a la matriz reducida (denominada H) que rige el sistema multiconductor y obtener gráficas de la distribución de potencial dentro del devanado en el dominio del tiempo usando la técnica de la Transformada numérica de Laplace.

La respuesta transitoria del modelo consiste en conocer la distribución de voltaje a lo largo del devanado y las sobretensiones presentes que causan envejecimiento prematuro del aislamiento además de la ejecución de ensayos dieléctricos de rutina para verificar el correcto funcionamiento del dieléctrico basados en los procedimientos impuestos por las normas nacionales e internacionales.

Una limitante para realizar una satisfactoria validación en el transformador de distribución 3 kVA es el diseño especial y la construcción para adicionar derivaciones de las capas a estudiar tanto en el devanado de alta como baja tensión ya que no se encuentra comercialmente un transformador que de acceso fácil a cada una de las capas de los devanados, esta implementación por ser especial tiene costos elevados de fabricación y conservación (mantenerlo libre de humedad) además del rápido deterioro del papel diamantado por someterlo repetidamente a transitorios de frecuencia rápida para estimar fuentes de falla y errores que permiten hacer un mejor análisis de la distribución de voltaje de los devanados en el momento justo del transitorio.

Por ello, la importancia de la simulación es predecir el comportamiento de los devanados frente a los transitorios de frecuencia rápida que indican si hay una distribución uniforme del voltaje, de esta forma las industrias fabricantes se ahorran los costos de fabricación, material, personal y tiempo.

Este proyecto de titulación está fraccionado en 5 capítulos descritos a continuación:

En el Capítulo I se describe el problema de la investigación, la importancia, alcance, delimitación, aportes, marco metodológico, hipótesis y los objetivos planteados para la resolución.

En el Capítulo II se presentan distintos modelos matemáticos que analizan los transitorios de frecuencias rápidas y muy rápidas, la explicación sobre la distribución del potencial eléctrico, definición de los transitorios impulsivos y oscilatorios; los procedimientos técnicos para las pruebas basados en la normas nacionales e internacionales.

En el Capítulo III se describe el desarrollo matemático del modelo de la red de dos puertos y los parámetros distribuidos del modelo de la línea de transmisión

multiconductora, reducción de la matriz de admitancia de parámetros de cadena, cálculo de los parámetros eléctricos en el dominio de la frecuencia mediante la aplicación de fórmulas teóricas, comparación del modelo desarrollado en este trabajo con un artículo de la IEEE Transactions on Power Delivery, implementación del análisis en la interfaz gráfica elaborada en el entorno GUIDE y el procedimiento de los ensayos dieléctricos al transformador de distribución 15 kVA.

En el Capítulo IV se exponen las matrices de los parámetros eléctricos y se analizan las gráficas de la respuesta transitoria obtenidas de la aplicación del análisis matemático al transformador de distribución de 3 kVA y 15 kVA, además de los resultados cuantitativos y cualitativos de los ensayos dieléctricos efectuadas en el transformador de distribución de 15 kVA facilitado por el Laboratorio de Alta Tensión.

En Anexos se despliega con mayor detalle la descripción matemática de la igualdad $\emptyset_{11} = \emptyset_{22}$ (Anexo A), la descripción de la impedancia característica Z_c (Anexo B), el diseño de la parte activa de un transformador de distribución de 3 kVA (Anexo C) y como se lo construye en un taller artesanal (Anexo D), información del software Comsol Multiphysics® y el método de los elementos finitos (Anexo E), definición de la transformada numérica de Laplace (Anexo F), GUIDE de MATLAB® (ANEXO G) y fotografías de la parte experimental en el Laboratorio de Alta Tensión (Anexo H).

CAPÍTULO I

1. EL PROBLEMA

1.1. Antecedentes

El crecimiento poblacional y el desarrollo de la industria obliga cada día que todos los seres humanos tengan acceso a la energía eléctrica para desarrollar las actividades cotidianas, por ello se necesitan que las redes de distribución de baja tensión sean eficientes y garanticen el servicio continuo a la población.

La parte más importante de la red de baja tensión es el transformador de distribución, que es un equipo susceptible a sufrir daños por su constante y continuo trabajo diario. Si el equipo ha tenido un diseño deficiente es probable que sufra daños mucho antes del tiempo de vida útil asignado, conllevando gastos de mantenimiento correctivo, poco tiempo de uso y pérdidas de dinero para los pequeños y grandes consumidores.

A través de esta investigación, se analiza un modelo matemático que simule la distribución de voltaje a lo largo de los devanados tipo capa de alta y baja tensión con el uso de los datos geométricos y constructivos del transformador para identificar las capas que demuestran sobretensiones provocadas por los transitorios de frecuencias rápidas.

1.2. Descripción del Problema

Un transformador de distribución ocasionalmente está expuesto a sobretensiones por descargas atmosféricas debido a la ubicación en los postes de alumbrado y la altura de los mismos y a sobretensiones de maniobra por la conexión y desconexión de los sistemas de alimentación. Estas sobretensiones se presentan en un estado transitorio del cual se desconoce la respuesta interna del equipo frente a estas frecuencias altas, siendo propenso a sufrir daños. Esto se da cuando en la etapa de diseño no se toma en cuenta que la distribución de voltaje a lo largo del devanado sea uniforme ya que de esto depende su vida útil, caso contrario la mayor parte de tensión se concentra en las primeras capas del devanado.

El propósito de esta investigación es determinar la distribución de tensión en las capas de los devanados cuando se someten a transitorios de altas frecuencias mediante el cálculo de parámetros eléctricos usando las simulaciones del modelo matemático de la línea de transmisión multiconductora para conocer el comportamiento transitorio del diseño dieléctrico y las sobretensiones.

1.3. Importancia y Alcances

Con un modelo matemático ajustable para cualquier capacidad del transformador de devanados tipo capa siempre y cuando se conozca las propiedades de los materiales y la geometría exacta del equipo, el presente estudio busca tener una predicción confiable de la respuesta transitoria del diseño dieléctrico antes de su construcción, fomentando nuevos conocimientos de los parámetros eléctricos en el análisis transitorio de un transformador.

Para el aporte técnico de este trabajo se tiene el cálculo de los parámetros eléctricos del transformador y el desarrollo del modelo multiconductor presentados en una interfaz de MATLAB® para observar la distribución del voltaje en cada capa profundizando en los conocimientos de diseño y como se construye la parte activa de un transformador en un taller artesanal (Anexo D) además de la aplicación de los procedimientos determinados en estándares nacionales e internacionales para los ensayos dieléctricos.

Para el aporte científico se tiene el desarrollo paso a paso del modelo matemático que se adapta a la configuración de los devanados en capas ya sea monofásico o trifásico para lo cual se necesitan conocer las propiedades eléctricas y dimensiones exactas del material conductor y aislante, además de un impacto académico que consiste en la ampliación de conocimientos en el análisis de los transitorios y sus efectos en las capas del devanado del transformador de distribución [1].

Para beneficio de la sociedad se busca mejorar las redes eléctricas de distribución aumentando la vida útil del transformador brindando un servicio eléctrico continuo y abastecer de energía eléctrica las áreas rurales y como impacto social, implementar los conocimientos adquiridos en una microempresa dedicada al diseño para la construcción de transformadores de distribución monofásicos [2] .

En innovación se plantea un modelo de alta precisión para pronosticar el comportamiento del diseño dieléctrico presente en las capas de los devanados antes de

su construcción y la implementación del análisis matemático en una interfaz gráfica dando las facilidades de un manejo didáctico para el usuario.

1.4. Delimitación

El diseño dieléctrico es amplio pero este estudio se concentra en la función que cumple el aislamiento sólido (papel y cartón) cuando se somete cada capa del devanado a transitorios rápidos, por ello se necesita la permitividad, permeabilidad, conductividad, distancias y radios tanto del aislamiento dieléctrico como del conductor del devanado de alta o baja tensión.

Los transitorios rápidos se dan en microsegundos, es en ese instante de tiempo que el aislamiento se ve sometido a grandes esfuerzos dieléctricos que a largo plazo generan el envejecimiento del papel, por esta razón el análisis se enfoca a los transformadores de distribución monofásicos que son comúnmente usados para las redes de distribución de baja tensión.

Las restricciones de este trabajo se detallan a continuación:

- La validación experimental del análisis es compleja debido a las pruebas en prototipos secos con derivaciones especiales en etapa de fabricación y su conservación libre de humedad e impurezas.
- El costo de fabricación, mantenimiento del prototipo y la infraestructura requeridas para la validación.
- La inversión de tiempo a largo plazo para desarrollar las pruebas y estudiar exhaustivamente el fenómeno.
- La falta de convenios interinstitucionales con los fabricantes nacionales para el uso de equipos, instalaciones e intercambio de conocimientos con los colaboradores del departamento de desarrollo e investigación.
- Mayor conocimiento y estudio sobre simulaciones con otras herramientas computacionales que impliquen mayor exactitud, cuestión que demanda tiempo y más bases académicas.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Analizar de forma matemática el diseño dieléctrico de un transformador de distribución monofásico de 3 kVA con la herramienta informática-matemática MATLAB®.

1.5.2. Objetivo Especifico

- Obtener los datos de los aislamientos dieléctricos del devanado primario y secundario del transformador de distribución monofásico de 3 kVA.
- Plantear las ecuaciones diferenciales que rigen dichos aislamientos dieléctricos.
- Desarrollar la interfaz gráfica e ingreso de ecuaciones con la herramienta informática-matemática MATLAB®
- Comparar los resultados obtenidos en MATLAB® con los resultados de las demostraciones prácticas a realizar en el laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil Edificio de Ingenierías.

1.6. Marco Metodológico

La investigación trata tres tipos de metodología que son el método de la observación y experimental para detectar fallas (olor, ruido, flameo) cuando se efectúan los ensayos dieléctricos y como se construye artesanalmente la parte activa de un transformador de distribución; el método cuantitativo y cualitativo se da por el desarrollo del análisis matemático, la evaluación de las matrices de parámetros eléctricos en distintas frecuencias y la respuesta transitoria interna de los devanados.

1.6.1. Hipótesis

El análisis de las simulaciones realizadas al modelo matemático de la línea de transmisión multiconductora de diferentes diseños dieléctricos del transformador de distribución monofásico (3 kVA y 15 kVA) permiten obtener información sobre la distribución de la tensión a lo largo del devanado que puede usarse para que el aislamiento sólido soporte los fenómenos de transitorios rápidos.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Estado del Arte

La máquina utilizada para reducir o elevar voltajes alternos mediante la inducción electromagnética es el transformador, el cual tiene devanados que operan a la misma frecuencia y con valores diferentes de voltaje y corriente. Dicha máquina se comprende de un circuito magnético elaborado de material ferromagnético que permite la circulación de flujo eléctrico alterno, alrededor de éste se encuentran los devanados primario y secundario hechos de material conductor y a través de los bornes se obtienen los distintos niveles de voltaje en la entrada y salida del transformador [3].

Como es conocido en el medio, existen partes esenciales del transformador como el núcleo magnético y los devanados. Ambos segmentos se relacionan mutuamente a través de conexiones mecánicas y eléctricas que permiten el acoplamiento del sistema de enfriamiento, sistema de aislamiento y las protecciones generales externas de la máquina.

El sistema de aislamiento consiste generalmente en materiales aislantes sólidos o líquidos con el fin de dividir las grandes caídas de tensión en caídas de voltaje más pequeñas creando pequeños volúmenes de líquido dieléctrico que tienen alto rendimiento volviendo el diseño más compacto. Por esta razón, el voltaje de salida del transformador se compone de la suma de los voltajes secuenciales internos que vienen definidos por la geometría del aislamiento y la permitividad del material aislante sólido [4].

El sistema es capaz de soportar la tensión de prueba y la tensión de impulso de manera que no presente descargas disruptivas, en base a esto se tienen los distintos aislamientos (aislamiento entre espiras, aislamiento entre capas, aislamiento entre núcleo y devanado secundario) y distancias (distancia entre devanado primario y yugo, distancia entre devanados primario y secundario y la distancia entre devanados – tanque) que son los encargados de soportar los esfuerzos dieléctricos a lo largo de los devanados [5].

Al momento de diseñar se toma en cuenta los materiales aislantes existentes y la compatibilidad con otros materiales en el sistema, no solo la capacidad térmica sino también las características químicas, mecánicas, físicas, eléctricas y el proceso de envejecimiento. En los transformadores de distribución se utiliza el aislamiento sólido porque permite el contacto íntimo con los conductores al ser envueltos y apilados, forma muros divisorios en el aceite, crea canales de circulación y aumenta la rigidez dieléctrica de los aislamientos líquidos y viene disponible en forma de papel, película, lámina y cartón. En base a esto, la vida de un transformador es evaluada por el deterioro de la resistencia mecánica del aislamiento y el grado de humedad. Se ha comprobado que a medida que aumenta la tensión se debe considerar índices como la constante dieléctrica o permitividad que influye en la distribución del campo eléctrico ($\epsilon * \vec{E} = -\nabla V$) [6].

Conociendo el sistema de aislamiento de la parte activa del transformador, es necesario escoger un material que tenga características particulares y diferencias propias siendo una de ellas la alta fuerza de rompimiento relacionada con la rigidez dieléctrica; por ello los comúnmente usados son el papel diamantado y el cartón presspan dieléctrico. El cartón presspan dieléctrico es un cartón de alta calidad que se fabrica con pulpa de madera mediante el proceso Kraft, este tipo de celulosa proporciona excelente rendimiento a los campos eléctricos, estabilidad en forma geométrica, alta densidad, maleabilidad, uniformidad, alta rigidez dieléctrica, flexibilidad, muy buena impregnación de aislante líquido y sobre todo es económico para la refrigeración del aceite del transformador [7]. Dicho material es elaborado por la compresión de varias capas finas de papel en condiciones húmedas, y mejora su calidad cuando las capas individuales son muy delgadas.

El papel aislante o también llamado papel diamantado está formado por fibras enquistadas que pueden ser de origen natural (celulosa, algodón o lino) o de origen sintético (nylon). Debe tener un proceso de secado en horno para reducir la cantidad de humedad y así fortalecer sus propiedades dieléctricas [8].

En los últimos años se han plasmado estudios del diseño dieléctrico o también llamado sistema de aislamiento que es un componente trascendental en la máquina eléctrica porque garantiza que las distintas fracciones del equipo posean diferencia de potencial diversa, estableciendo un nivel de fiabilidad alto si el aislamiento está en buen estado [9].

Desde 1919 se estudian los modelos matemáticos que representen al devanado de un transformador con sus parámetros inductivos y capacitivos, inicialmente se presentaban modelos sólo con los cálculos de parámetros resistivos e inductivos, años después se evidenció con pruebas de laboratorio las distribuciones de voltajes internas, el efecto de las sobretensiones, el correcto diseño del aislamiento basado en predicciones y otros temas que hoy en día se facilitan por las técnicas computacionales implementadas para el desarrollo de modelos matemáticos complejos de resolver analíticamente [10].

Los transitorios rápidos se enfocan en la teoría de la onda estacionaria que consiste en la propagación de los transitorios en sentido opuesto a través del conductor y la onda de desplazamiento se propaga a lo largo de los devanados, dichas teorías inicialmente permitían analizar sólo a los transformadores con uniformidades en el diseño del aislamiento y a medida que surgían nuevas necesidades de potencia en las industrias ya no se podía analizar matemáticamente los equipos porque las ecuaciones eran integro diferenciales con red de parámetros concentrados que solo pueden resolverse numéricamente en computadoras.

Mientras más compleja es la geometría interna del transformador, se simplifica el modelo agrupando los elementos resistivos, capacitivos e inductivos con acoplamientos magnéticos y eléctricos mutuos para determinar voltajes de discos y capas en función del tiempo y ubicación $f(z, t)$, la solución es representar el devanado como una red equivalente para que se convierta en un problema de circuito. Una red equivalente es la red zigzag convencional para un único devanado (compuesta de inductancias propias y mutuas, capacitancias series y de tierra) que al agruparse se extiende para múltiples devanados combinando los fenómenos electrostáticos y electromagnéticos para respuestas de tensión y transferencias a otros bobinados [11]. Posteriormente, se toman en cuenta las pérdidas causadas por el núcleo, pérdidas del cobre y pérdidas dieléctricas provenientes de los elementos en derivación que representan la conductancia entre cada nodo de bobina a tierra en una red equivalente, los cuales no se pueden relegar porque disminuyen los picos de tensión.

Se presentan distintos modelos basados en parámetros concentrados y distribuidos, cada uno de ellos resuelven la distribución de voltaje del devanado del transformador. El modelo de parámetros concentrados basado en las ecuaciones de espacios de estado consideran una conexión en escalera de segmentos iguales descuidando las pérdidas en serie basándose en las matrices nodales de capacitancias \hat{C} , inductancia inversa \hat{F} y

conductancias \widehat{G} [12]. El conjunto de ecuaciones puede resolverse por integración numérica o con el uso de otras técnicas para matrices de transición espacial. Ver Ecuación 1 y 2.

$$\frac{dx(t)}{dt} = \bar{A}x(t) + \bar{B}u(t) \quad (1)$$

$$v(t) = \bar{F}x(t) + \bar{D}u(t) \quad (2)$$

Donde $\bar{A} = \begin{bmatrix} -C^{-1}G & U \\ -C^{-1}\Gamma & 0 \end{bmatrix}$, $\bar{B} = \begin{bmatrix} C^{-1}(GC^{-1}C_k - G_k) \\ C^{-1}(\Gamma C^{-1}C_k - \Gamma_k) \end{bmatrix}$, $\bar{F} = [U \quad 0]$ y $\bar{D} = -C^{-1}C_k$

El modelo de parámetros reducidos del análisis en red está compuesto por la matriz de admitancia nodal del circuito $\widehat{Y}(s)$ y el vector de corriente nodal $\vec{I}(s)$ y se puede calcular el vector de voltaje nodal $\vec{V}(s)$ mediante transformación de frecuencia-tiempo o por aproximación racional de la matriz nodal de admitancia [13]. Ver Ecuación 3

$$\vec{I}(s) = \widehat{Y}(s) * \vec{V}(s) \quad (3)$$

Donde

$$\widehat{Y}(s) = s * \widehat{C} + \widehat{G} + \frac{\Gamma}{s}$$

$$\vec{I}(s) = -s * C_k * V(s) - G_k * V(s) - \frac{\Gamma_k}{s} * V(s)$$

El modelo de parámetros distribuidos basado en la teoría de la línea de transmisión monofásica está basado en la impedancia en serie Z y en la admitancia en derivación Y por unidad de longitud reduciéndose a las ecuaciones del telegrafista de la línea de transmisión monofásica definida en el dominio de Laplace donde el voltaje y corriente del punto z puede resolver por método de Bergeron, diferencias finitas o dominio de la frecuencia [14]. Ver Ecuación 4 y 5.

$$\frac{dV(z, s)}{dz} = -Z(s) * I(z, s) \quad (4)$$

$$\frac{dI(z, s)}{dz} = -Y(s) * V(z, s) \quad (5)$$

El modelo de parámetros distribuidos basado en la teoría de la línea de transmisión multiconductora tiene en cuenta la inductancia mutua entre las espiras del devanado para los análisis de pulsos con frentes rápidos y muy rápidos. Cada conductor representa una capa o disco preservando la continuidad del mismo en forma de zigzag donde se puede obtener el voltaje de cada capa que conforma el devanado. Las ecuaciones de este método provienen del modelo de parámetros distribuidos basado en la teoría de la línea de transmisión monofásica. La resolución de las ecuaciones es por reducción de matrices en el dominio de la frecuencia y trasladadas al dominio del tiempo usando la transformada de Fourier inversa [15]. Ver Ecuación 6.

$$\begin{bmatrix} Vs2 \\ Vs3 \\ \vdots \\ Vsn \end{bmatrix} = \overbrace{\begin{bmatrix} FF_{k+1,1} \\ FF_{1,1} \end{bmatrix}}^{H_k} * \begin{bmatrix} Vs1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Donde H_k es un elemento de la matriz H con dimensiones $(N + 1,1)$ que contiene la información en números complejos del devanado analizado siendo N el número de capas del devanado.

El modelo para análisis de transferencia se da por el acoplamiento inductivo y capacitivo entre los bobinados de alta y baja tensión cuando es incidido por un impulso, puede establecerse con parámetros distribuidos o concentrados de un segmento diferencial de devanado Δx . Ver Figura 1.

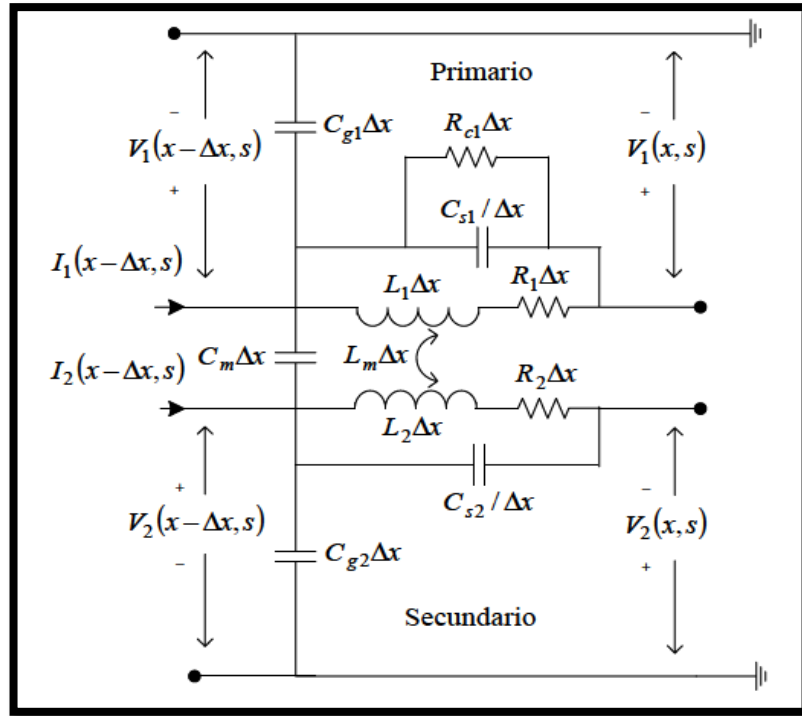


FIGURA 1: REPRESENTACIÓN PARA UN DIFERENCIAL DE LONGITUD DEL TRANSFORMADOR [16].

La resolución más adecuada es por parámetros concentrados ya que se puede aplicar el análisis de red con enfoque en los espacios de estado [16]. Ver Ecuación 7 y 8.

$$\begin{bmatrix} \frac{dV_1(x,s)}{dx} \\ \frac{dV_2(x,s)}{dx} \end{bmatrix} = \frac{1}{D(s)} * \begin{bmatrix} Z_1 + Z_1 * Y_2 * Z_2 - Z_m^2 * Y_2 & Z_m \\ Z_m & Z_2 + Z_2 * Y_1 * Z_1 - Z_m^2 * Y_1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_1(x,s) \\ I_2(x,s) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{dI_1(x,s)}{dx} \\ \frac{dI_2(x,s)}{dx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{g1} + Y_m & -Y_m \\ -Y_m & Y_{g2} + Y_m \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_1(x,s) \\ V_2(x,s) \end{bmatrix} \quad (8)$$

El modelo de admitancia de mediciones de terminales (modelo de caja negra) se describe en el dominio de la frecuencia en términos de matriz de admitancia que relaciona las corrientes y voltajes terminales cuando se aplica una tensión en un nodo terminal y el resto se cortocircuita, también implica las corrientes medidas desde tierra y la medición directa de todos los elementos. Para disminuir los errores al momento de la validación es necesario dividir en dos grupos A y B los terminales del transformador [17]. Ver Ecuación 9.

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} \\ Y_{ba} & Y_{bb} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \end{bmatrix} \quad (9)$$

En la tabla 1 se observa un resumen de los modelos descritos anteriormente con el método de resolución acorde a los parámetros concentrados o distribuidos, las limitaciones y aplicaciones dentro del estudio de transitorios.

TABLA 1: CARACTERÍSTICAS DE LOS PARÁMETROS CONCENTRADOS Y DISTRIBUIDOS DE LOS MODELOS DE ALTA FRECUENCIA [14].

MODELO	MÉTODO	LIMITACIONES	APLICACIONES
Parámetros Concentrados	Análisis de Espacios Estado	Tamaño de las matrices, tiempo de procesado computacional, inserción en dominio de la frecuencia.	Transitorios rápidos
	Análisis de Red	Tamaño de las matrices, tiempo de procesado computacional.	
	Simulación Computacional	Tamaño del circuito, inclusión del acoplamiento inductivo de los giros, inserción en dominio de la frecuencia.	
Parámetros Distribuidos	Teoría de la Línea de Transmisión Monofásica	Inclusión del acoplamiento inductivo de los giros	Transitorios rápidos y muy rápidos
	Teoría de la Línea de Transmisión Multiconductora	Complejidad de la solución	
	Combinación de la Teoría de la Línea de Transmisión Monofásica y Multiconductora	Complejidad de la solución	

Las distribuciones de voltajes a lo largo del devanado se determinan con sobretensiones de frecuencia rápida en el devanado y se cumple mediante el cálculo de los parámetros R, L y C de un circuito equivalente. Se presentan tres clases de distribución de voltajes, entre ellas: inicial, final y voltaje máximo a tierra. Ver Figura 2.

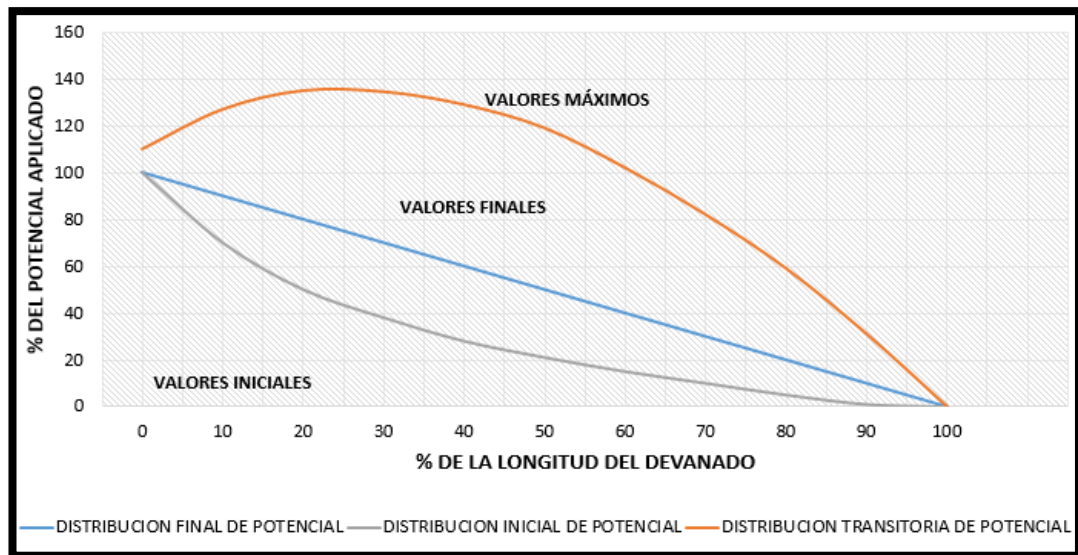


FIGURA 2: DISTRIBUCIÓN DEL VOLTAJE DE IMPULSO DENTRO DEL DEVANADO [9].

En la figura 2 se muestra la distribución inicial de tensión que depende únicamente de las capacitancias entre los giros, entre devanados y entre los devanados a tierra que hacen que el transformador tenga impulsos abruptos en un intervalo de 0,1 a $20\mu s$, esto se da porque la corriente no puede circular ya que las inductancias dependen del campo magnético y requieren de un tiempo finito para acumularse así que no hay circulación de corriente instantáneamente.

Pasado los $20\mu s$, las corrientes inductivas fluyen para llevar a una distribución uniforme de voltaje, pero la combinación de los parámetros inductivos-capacitivos provocan intercambios continuos de energía entre campos eléctricos y magnéticos sometiendo a tensiones elevadas distintas partes del devanado debido a oscilaciones típicas de un circuito RLC. Estas oscilaciones son de forma amortiguada y se mantienen de esa manera hasta alcanzar la distribución final de tensión que es uniforme y ya forma parte del estado estacionario por la intervención de los parámetros resistivos [18].

La constante de distribución “a” relaciona el potencial uniforme a lo largo del devanado determinada por $\sqrt{\frac{C_g}{C_s}}$, este parámetro indica la desviación de la tensión inicial con la tensión final siendo en lo posible muy pequeña para que la distribución de voltaje sea lo más uniforme posible disminuyendo las tensiones en los diferentes

segmentos del devanado. Por ende “a” tiene que ser el valor más pequeño posible ya que en la práctica es muy complicado que sea cero [19].

Se presenta el caso de un transformador con neutro aterrizado en el que se observa la distribución del voltaje porcentual vs la longitud porcentual del devanado y se aprecia que $a=10$ tiene una pendiente bastante pronunciada en comparación de $a=0$ y $a=2$. Para $a=0$, la distribución del voltaje es de forma gradual con crecimiento lineal y proporcional mientras que en $a=5$, en el 10% del extremo final del devanado ya se acumula el 60% del voltaje y esto provoca que esa parte sufra daños irreversibles cuando se presenta el transitorio ya que el voltaje se duplicará en una sección tan pequeña. Ver Figura 3.

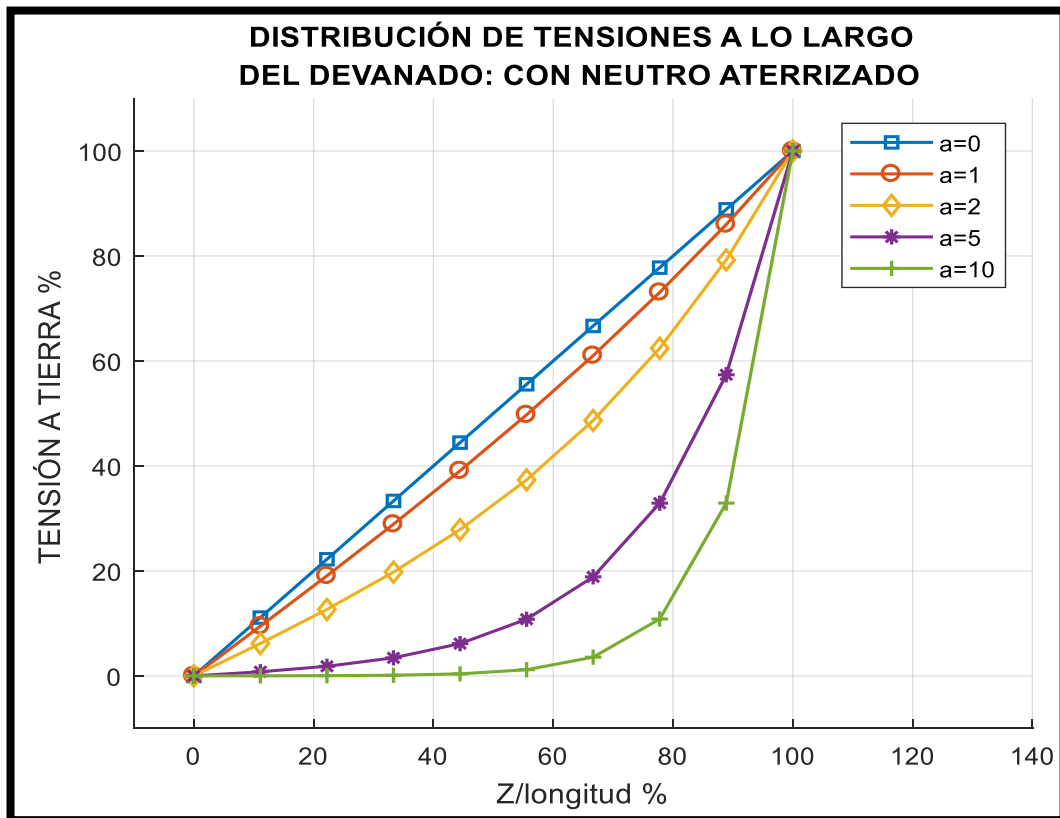


FIGURA 3: DISTRIBUCIONES DE TENSIONES A LO LARGO DEL DEVANADO CON NEUTRO ATERRIZADO [19].

Para el caso del transformador con neutro abierto se tiene que $a=0$ es un valor constante y cada porcentaje del devanado recibe la misma cantidad de voltaje, a diferencia de $a=5$ tiene un 60% del voltaje en tan solo el 10% final de la longitud del devanado. También se observa que solo en el extremo final hay tendencia de acumulación de voltaje cuando se presente un transitorio. El valor del gradiente inicial en el extremo

de la línea es el mismo para las condiciones de neutro aterrizado y neutro abierto en impulsos de frente de onda muy inclinados. Ver Figura 4.

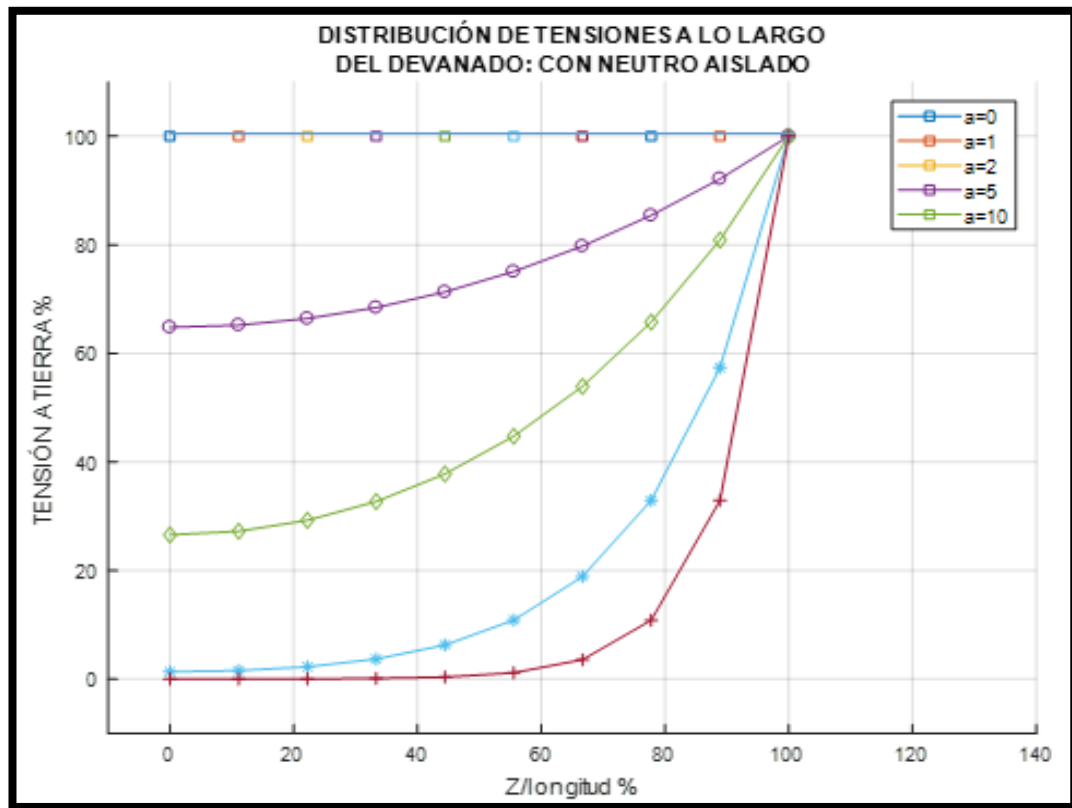


FIGURA 4: DISTRIBUCIONES DE TENSIONES A LO LARGO DEL DEVANADO CON NEUTRO AISLADO [19].

Se deduce que la distribución de voltaje depende mucho de las capacitancias presentes en el devanado que son concebidas por el número de capas, número de vueltas y el espaciado entre capas provocando la capacitancia serie C_s mientras que la capacitancia a tierra C_g se da por la distancia del devanado con objetos metálicos como el núcleo y tanque.

Se presentan dos casos para que $a=0$ (valor ideal), aumentar la capacitancia serie o reducir la capacitancia a tierra. Si se disminuye la capacitancia a tierra, se incrementa la corriente en los elementos serie volviendo más uniforme la tensión. Ver Figura 5.

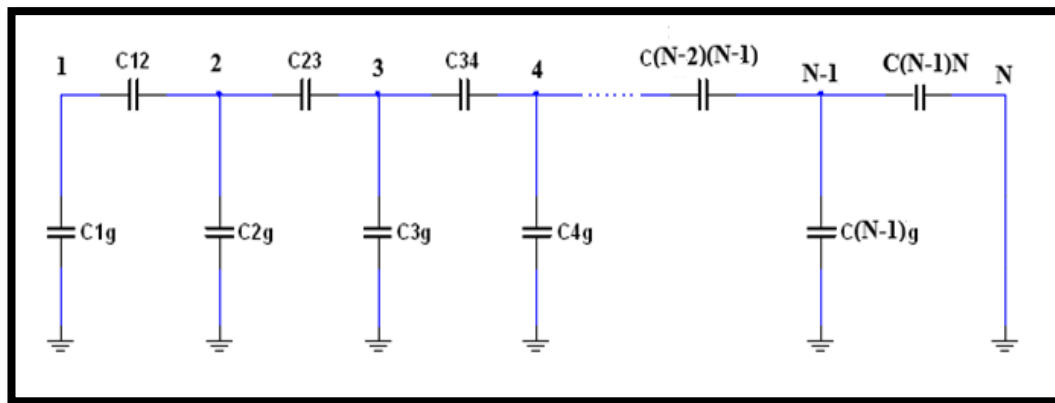


FIGURA 5: ACOPLES CAPACITIVOS EN SERIE Y EN DERIVACIÓN DE UN TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN MONOFÁSICO CON N CAPAS, CADA NODO REPRESENTA UNA CAPA.

Lo que se opta generalmente es aumentar la cantidad de capacitancias en serie introduciendo una capa metálica hecha de papel diamantado, cartón prensado y barniz para agrandar el valor de capacitancia fluyendo corrientes a través de esta nueva capa en el lado de alta tensión. Otra forma es añadir vueltas “falsas” en las primeras espiras del devanado dejando abierto en un extremo, es decir, se separan dos espiras consecutivas para ahorrar material aislante disminuyendo la altura de la bobina, pero su desventaja está en el costo ya que se utiliza más cantidad de conductor [10].

Transitorios y su clasificación.

Según la normativa internacional IEC TR 6100-2-5:2017 existen fenómenos que dependiendo de su frecuencia causan perturbaciones electromagnéticas y se clasifican:

- Fenómenos de baja frecuencia conducidos: armónicos, interarmónicos, variaciones de frecuencia de potencia, voltajes de baja frecuencia inducidos, fluctuaciones, caídas, interrupciones y desequilibrios de voltaje.
- Fenómenos de baja frecuencia irradiados: campos magnéticos, campos eléctricos.
- Fenómenos de alta frecuencia conducidos: tensiones o corrientes de onda continua inducida, transitorios unidireccionales, transitorios oscilatorios.
- Fenómenos de alta frecuencia irradiados: campos magnéticos, campos eléctricos, campos electromagnéticos, transitorios, ondas continuas [20].

Centrándonos en el tema de esta investigación, se considera a los transitorios como un fenómeno de alta frecuencia y se toma como un evento indeseable de naturaleza

momentánea clasificándose en impulsivos y oscilatorios reflejados en una onda de corriente o voltaje.

El transitorio impulsivo demuestra un cambio repentino de frecuencia de la onda de voltaje y/o corriente con una polaridad unidireccional caracterizado por tiempos de subida y bajada (rango típico de duración < 50 ns, 50 ns – 1 ms y > 1 ms) que son amortiguados por los elementos resistivos del circuito y estos son capaces de provocar transitorios oscilatorios al excitar circuitos de resonancia [21]. Ver Figura 6.

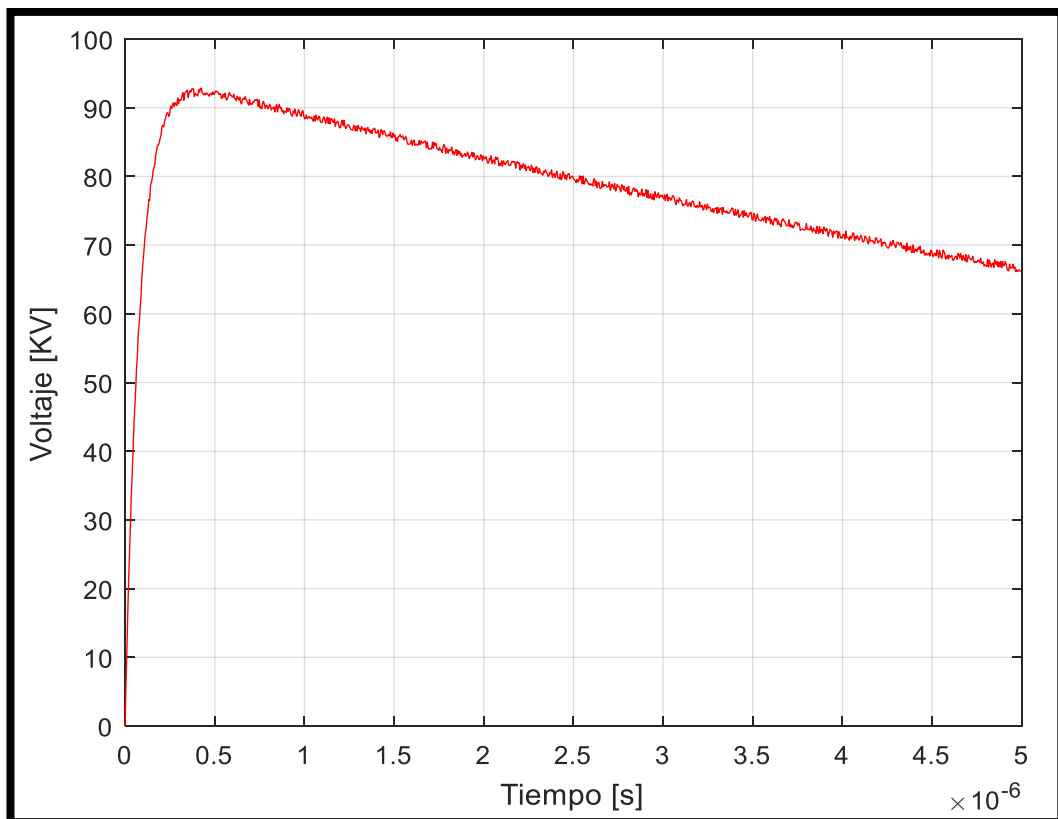


FIGURA 6: TRANSITORIO IMPULSIVO PROVENIENTE DE UNA DESCARGA ATMOSFÉRICA.

Mientras que un transitorio oscilatorio tiene cambios repentinos de frecuencia y cambia su polaridad rápidamente clasificándose por su magnitud, duración y espectro de frecuencia y también son provenientes de transitorios impulsivos. Ver Figura 7.

Oscilatorio baja frecuencia: menores a 5KHz con duración de 0.3 a 50ms.

Oscilatoria mediana frecuencia: de 5 a 500KHz con duración de 20 μ s.

Oscilatorio alta frecuencia: de 0.5 a 5MHz con duración de 5 μ s [22].

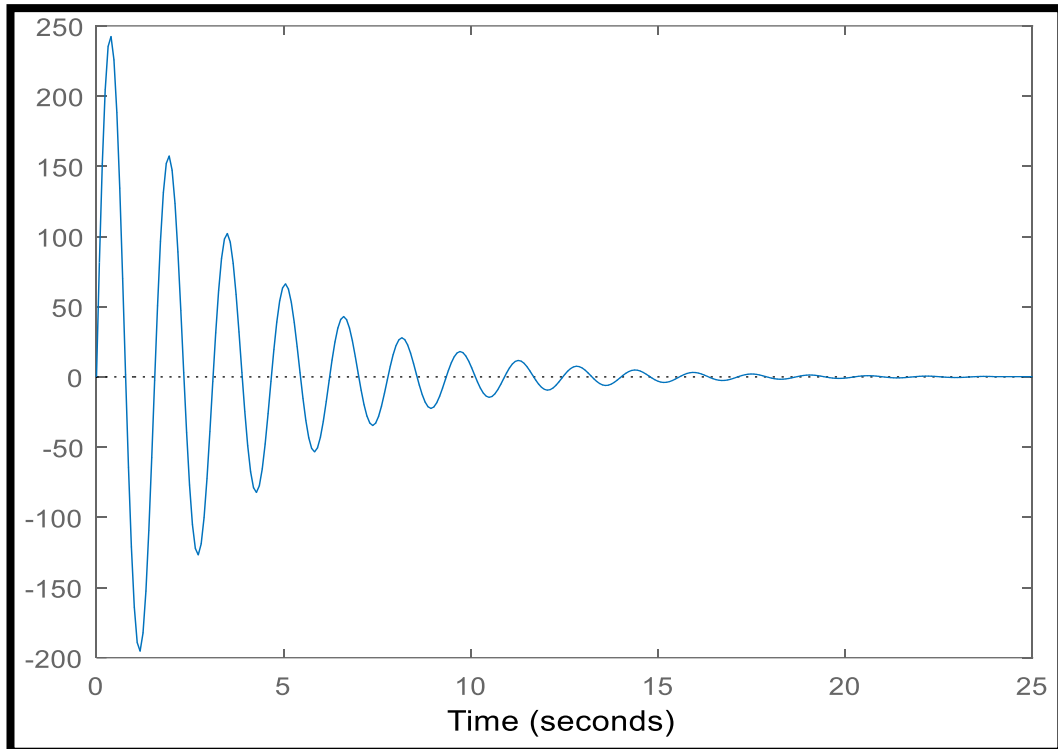


FIGURA 7: TRANSITORIO OSCILATORIO.

2.2. Ensayos dieléctricos

Para cumplir con las pruebas al transformador es indispensable revisar las normas vigentes, por ello se ha acudido a la norma ecuatoriana NTE INEN y a la norma internacional IEEE, estándares importantes que son aplicados en el Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil, para lo cual el transformador tiene que cumplir ciertos requerimientos por encontrarse a una altitud no mayor de 1000 m.s.n.m.

Entre los requisitos generales se tiene que los experimentos de aislamiento deben ser en instalaciones apropiadas y con los equipos necesarios a temperatura ambiente no menor de 10°C, y si llega a fallar un buje es permitido el reemplazo temporal del mismo para continuar con los ensayos sin retraso alguno. Con respecto a las tensiones máximas del equipo y del aislamiento es necesario que cada bobinado del transformador se le asigne un valor de voltaje máximo del equipo V_m y estos valores generalizados que se indican en la tabla 2 sean igual al voltaje nominal inmediato superior del devanado [23].

TABLA 2: RELACIONES DE VOLTAJE NOMINAL DEL SISTEMA, VOLTAJE MÁXIMO DEL SISTEMA Y NIVEL BÁSICO DE AISLAMIENTO. [24]

APLICACIÓN	VOLTAJE NOMINAL DEL SISTEMA V_n (kV eficaces)	VOLTAJE MÁXIMO DEL SISTEMA V_m (kV eficaces)	NIVEL BÁSICO DE AISLAMIENTO (kV)
DISTRIBUCIÓN HASTA 500 KVA INCLUSIVE	1,2	1,2	30
	2,5	2,5	45
	5,0	5,0	60
	8,7	8,7	75
	15,0	15,0	95
	25	25	150-125
	34,5	36	200-150
	46	52	250-200
POTENCIA	1,2	1,2	45
	2,5	2,5	60
	5,0	5,0	75
	8,7	8,7	95
	15,0	15,0	110
	25	25	150
	34,5	36	200
	46	52	250
	69,0	72,5	350

El requisito más importante para los transformadores sumergidos en aceite es que el aislamiento sólido sea diseñado para resistir una tensión de prueba de impulso de onda completa indicado en la tabla 3 a una frecuencia industrial de 60Hz.

TABLA 3: INTERRELACIONES ENTRE LOS NIVELES DE AISLAMIENTO DIELECTRICO PARA TRANSFORMADORES CON NIVEL BÁSICO DE AISLAMIENTO DE 350KV Y MENORES. [24]

APLICACIÓN	NIVEL BÁSICO DE AISLAMIENTO (NBA) (kV)	NIVEL DE VOLTAJE DE AISLAMIENTO PARA BAJA FRECUENCIA (kV eficaces)	NIVELES DE AISLAMIENTO DE IMPULSO		
			ONDA COMPLETA	ONDA RECORTADA	
			(kV cresta)	(kV cresta)	Tiempo mínimo al recorte (µs)
DISTRIBUCIÓN	30	10	30	36	1,0
	45	15	45	54	1,5
	60	19	60	69	1,5
	75	26	75	88	1,6
	95	34	95	110	1,8
	125	45	125	140	2,0
	150	60	150	170	2,1
	200	75	200	225	2,3
	250	90	250	280	2,4
POTENCIA	45	10	45	54	1,5
	60	15	60	69	1,5
	75	19	75	88	1,6
	95	26	95	110	1,8
	110	34	110	145	2,25
	150	50	150	175	3,0
	200	70	200	230	3,0
	250	95	250	290	3,0
	350	140	350	400	3,0

2.2.1. Prueba de Tensión de Impulso por Rayo

El rayo es una descarga natural que genera una pulsación, se presenta en la época invernal y afecta a los transformadores ubicados en lo alto de los postes de energía eléctrica. Cuando un transformador es alcanzado por un rayo, el flujo de corriente y tensión que se genera viaja a lo largo de los conductores como ondas provocando una distribución de tensión desequilibrada que daña el aislamiento interno. Por esta razón el transformador es diseñado para resistir este tipo de descargas destructivas y al final de su fabricación es sometido a esta prueba para constatar su robustez frente a este evento natural [25].

Este ensayo de impulso que simula la descarga del rayo es de onda completa y se aplica al terminal de línea del devanado de alta tensión, el valor de cresta del voltaje aplicado está especificado en la tabla 3.

La forma de onda se la conoce como $T_1 \times T_2$ y el valor de cresta de la tensión es alcanzado en $1,2\mu s$ con una tolerancia no mayor del $\pm 30\%$ mientras que el punto de la mitad de la cola de onda se alcanza en $50\mu s$ con tolerancia no mayor del $\pm 20\%$ [26]. Ver Figura 8.

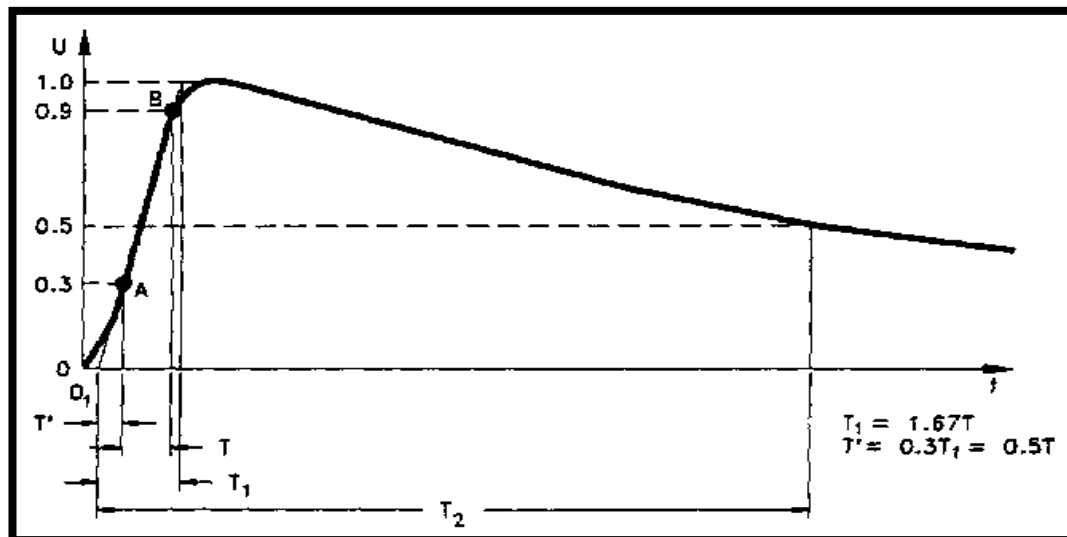


FIGURA 8: IMPULSO DE RAYO COMPLETO [26].

Para la preparación es importante la puesta a tierra del transformador y la tensión de impulso estará entre el 50% y 75% del voltaje pleno de ensayo mientras los tres

impulsos consiguientes a tensión plena; en caso de presentarse una descarga se efectuará un nuevo procedimiento.

Se ajustan los elementos del circuito (generador de impulsos conectado al terminal del devanado del transformador, aparatos de medida y registro de voltaje) a una tensión reducida para dar la forma de onda requerida 1,2/50 μs . Para las conexiones, se debe conectar un terminal de línea del devanado al generador de impulsos y los demás terminales que no están sometidos al experimento quedarán a tierra directamente [27]. Si al término se evidencia fallas, es necesario ejecutar ensayos sucesivos a 100% del valor del voltaje de prueba.

2.2.2. Prueba de Tensión de Impulso por Maniobra

El procedimiento consiste en generar una señal de voltaje reducido del 50% al 70% del nivel de prueba especificado seguido de tres ondas de voltaje completas. También conocida como la señal de tensión de impulso de conmutación tendrá un valor de cresta de acuerdo con el nivel de aislamiento, sujeto a una tolerancia de $\pm 3\%$, y sobrepasa el 90% del valor de cresta para al menos 200 μs . El tiempo real de cresta debe ser superior a 100 μs , y el tiempo hasta la primera tensión en la cola de la onda sea al menos 1000 μs [28]. El impulso tiene un tiempo hasta el pico de 250 μs y un tiempo hasta el valor medio T_2 de 2500 μs . Ver Figura 9.

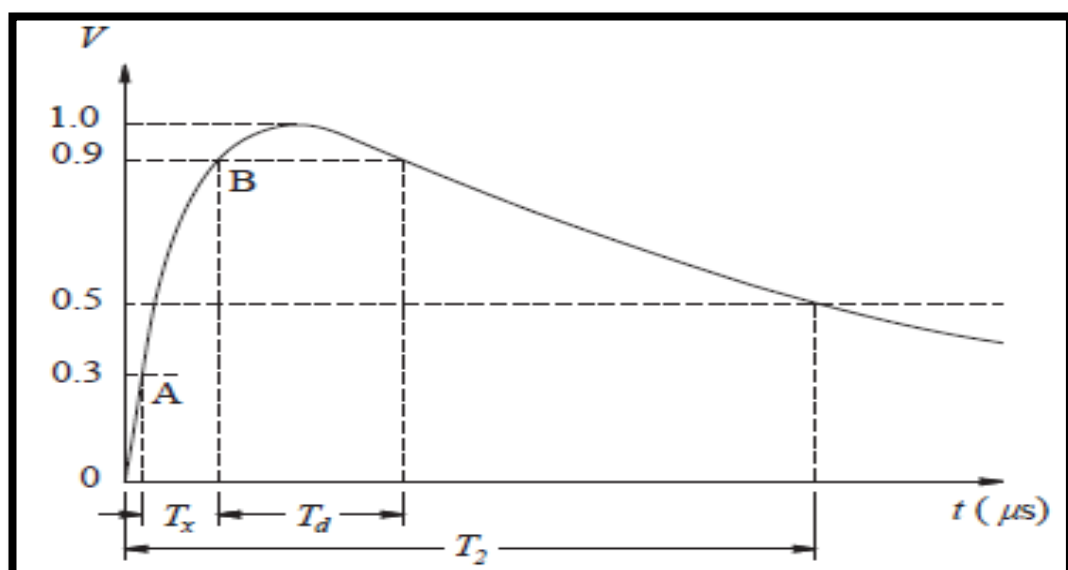


FIGURA 9: CONMUTACIÓN DE TENSÓN DE IMPULSO TIPO MANIOBRA. [26]

T_x es el intervalo de tiempo entre 30% y 90% del valor máximo. T_2 es el intervalo de tiempo entre el origen real y el instante en que la tensión ha disminuido por primera vez a la mitad del valor máximo. T_d es el intervalo de tiempo durante el cual la tensión de impulso supera el 90% de su valor máximo [26].

2.2.3. Prueba de Resistencia de Aislamiento

Su principal función es conocer la resistencia de los aislamientos de los bobinados individuales a tierra y/o entre arrollamientos individuales. Este valor medido es dado en $M\Omega$ por medio de un megóhmetro.

El diagrama de conexiones involucra tres tipos de circuitos descritos a continuación:

- alto voltaje y tierra
- bajo voltaje y tierra
- alto voltaje y bajo voltaje

La configuración de alto voltaje y tierra consiste en conectar todos los terminales de alta tensión al pin positivo del megóhmetro, mientras que el lado de baja tensión y la tierra se conectan al pin negativo del megóhmetro con una tensión de 5000 voltios de corriente continua proporcionados por dicho equipo. Ver Figura 10.

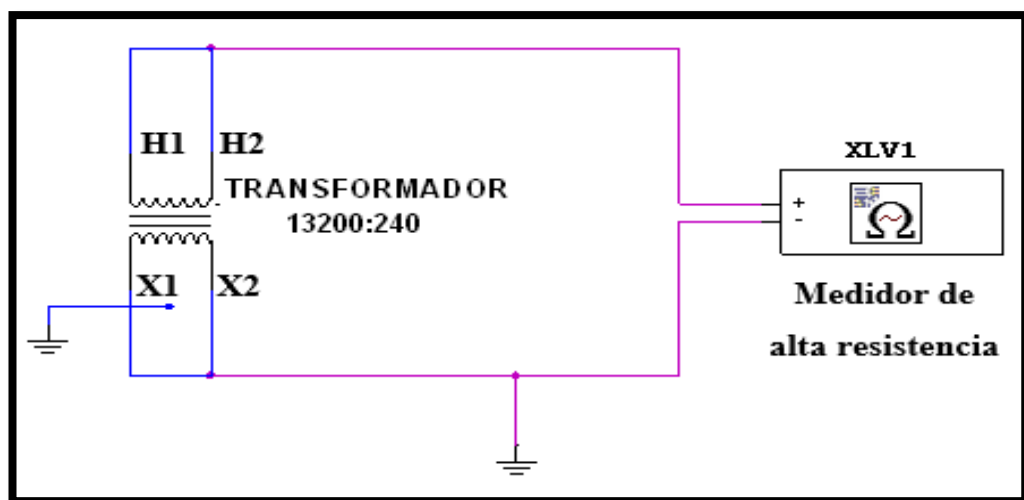


FIGURA 10: CONEXIÓN ALTA TENSIÓN Y BAJA TENSIÓN MÁS TIERRA.

La configuración de bajo voltaje y tierra consiste en conectar todos los terminales de alta tensión y la tierra al pin positivo del megóhmetro, mientras que el lado de baja tensión se conecta al pin negativo del megóhmetro sometido a una tensión de 500 voltios de corriente continua proporcionados por dicho equipo. Ver Figura 11.

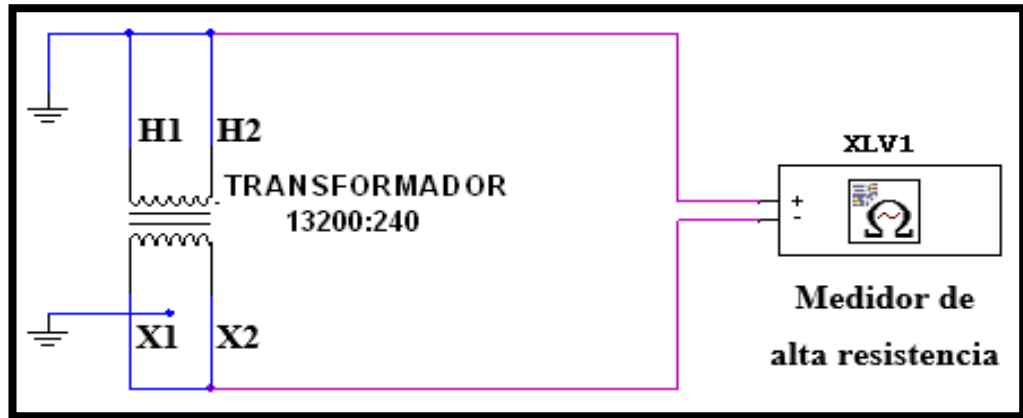


FIGURA 11: CONEXIÓN DE BAJA TENSIÓN Y ALTA TENSIÓN MÁS TIERRA.

La configuración de alto voltaje y bajo voltaje consiste en conectar todos los terminales de alta tensión al pin positivo del megóhmetro, mientras que el lado de baja tensión se conecta al pin negativo del megóhmetro. Adicional a esto se conecta la tierra de manera separada a un pin de tierra del megóhmetro con una tensión de 5000 voltios de corriente continua proporcionados por dicho equipo. Ver Figura 12.

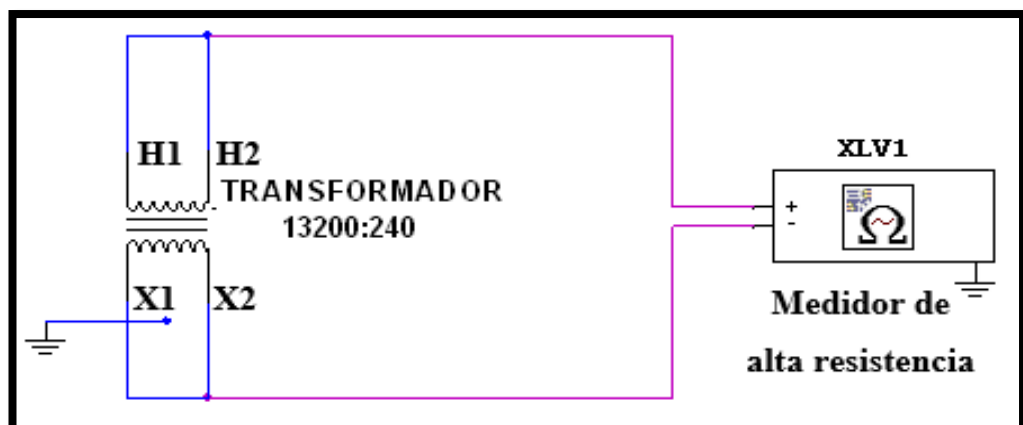


FIGURA 12: CONEXIÓN DE ALTA TENSIÓN CONTRA BAJA TENSIÓN.

La tensión de ensayo es de 500 y 5000 voltios de corriente continua según la conexión y con una duración de 10 minutos se va tomando lectura de los valores mostrados a los 25 segundos, 50 segundos, 75 segundos, 1 minuto y cada minuto siguiente hasta cumplir los 10 minutos establecidos.

También es posible encontrar el índice de polarización con la división de las resistencias de 10 a 1 minutos, y este valor se considera como bueno cuando está en un rango de 2 a 4 como lo indica la tabla 4 de manera que si el valor es inferior se requiere inspección detallada o reparación del transformador. Ver Ecuación 10.

$$I_p = \frac{\text{Resistencia de aislamiento a 10 minutos}}{\text{Resistencia de aislamiento a 1 minuto}} \quad (10)$$

De igual manera existe la relación de la absorción dieléctrica que es la división de las resistencias de 60 a 30 segundos, el rango ideal considerado va desde 1,4 a 1,6 indicado en la tabla 4. Ver Ecuación 11.

$$RAD = \frac{\text{Resistencia de aislamiento a 60 segundos}}{\text{Resistencia de aislamiento a 30 segundos}} \quad (11)$$

TABLA 4: CONDICIONES DE AISLAMIENTO BASADAS EN LA RELACIÓN DE ÍNDICE DE ABSORCIÓN DIELÉCTRICA Y DEL ÍNDICE DE POLARIZACIÓN [29].

CONDICIONES	RELACION 60/30 SEG.	RELACION 10/1 MIN.
DEFICIENTE	Menos de 1	Menos de 1
CUESTIONABLE	-----	1 a 2
ACEPTABLE	1 a 1,4	2 a 4
EXCELENTE	1,4 a 1,6	Arriba de 4

La siguiente ecuación calcula el porcentaje de error de los resultados experimentales y los resultados teóricos obtenidos del índice de polarización y la absorción dieléctrica. Ver Ecuación 12.

$$\%error = \frac{|\text{valor teórico} - \text{valor experimental}|}{\text{valor teórico}} * 100 \quad (12)$$

Durante la aplicación de la tensión no se permiten descargas parciales porque da lugar a valores erróneos de los resultados, y emplear un espacio de alivio para proteger el

aislamiento cuando se exceda el voltaje de operación eficaz. Concluido el ensayo se aterrizan todos los terminales por un tiempo establecido para liberar cualquier carga residual [27].

2.2.4. Prueba de Voltaje Aplicado

Es un ensayo de rutina que consiste en confirmar que la clase y cantidad de material aislante utilizado en el diseño sea el apropiado, de esta manera se certifica que el aislamiento de los bobinados primario y secundario sean capaces de resistir esfuerzos eléctricos durante la vida útil del transformador.

Se ejecuta con voltaje alterno monofásico de forma sinusoidal de amplitud de 34KV con frecuencia nominal de 60Hz, cuyo valor se puede verificar en las tablas 2 y 3.

La duración del procedimiento es de 1 minuto, el bobinado debe tener todas sus piezas unidas y conectadas al terminal de línea del transformador, mientras que los demás terminales y piezas (núcleo y tanque) deben estar conectados a tierra [27]. Ver Figura 13.

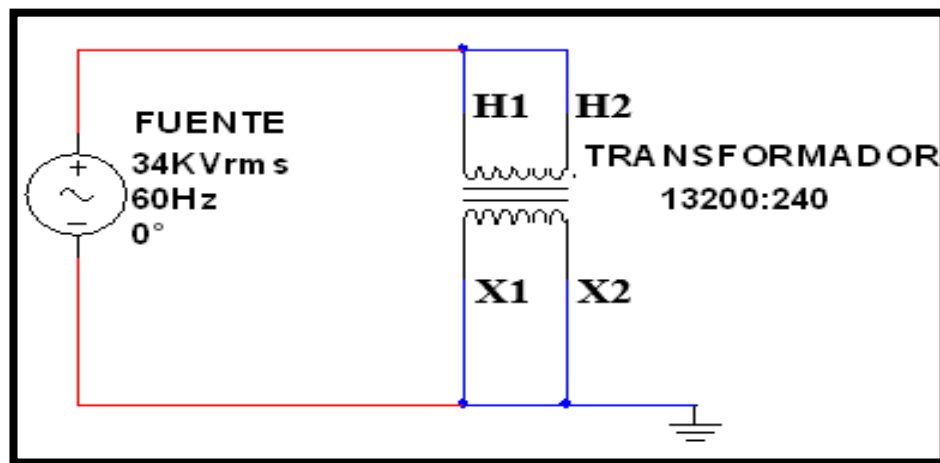


FIGURA 13: DIAGRAMA CON LA CONEXIÓN PARA LA PRUEBA DE VOLTAJE APLICADO.

Para ejecutar el experimento se inicia con un valor no mayor que un tercio de la tensión de prueba y subirá gradualmente a su valor máximo en un tiempo límite de 15 segundos. Una vez alcanzado el minuto, la tensión se reduce paulatinamente hasta un tercio del valor máximo antes de desconectar.

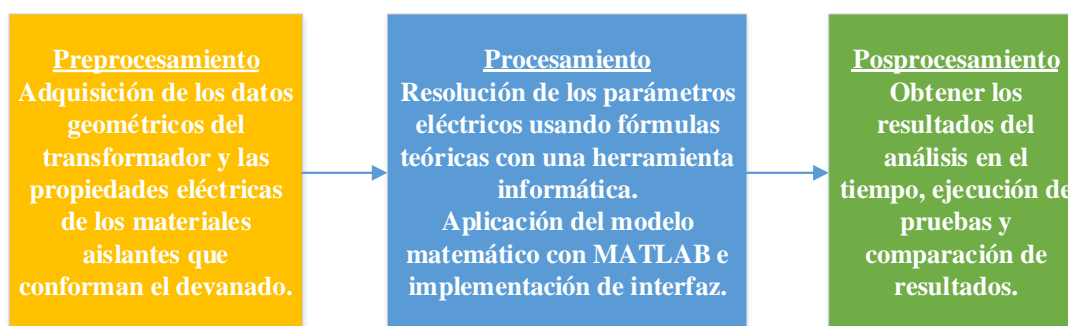
El resultado final es cualitativo y se detecta fallas como humo, burbujas en el líquido aislante e incremento brusco de corriente que significa una falla a tierra o entre los bobinados primario y secundario; sonidos como golpes simboliza exceso de humedad. Cualquier detección debe investigarse mediante observación, repetición o aplicación de otros procedimientos de diagnóstico como la prueba física química al aceite del transformador, prueba de la corriente de excitación o prueba del factor de potencia del aislamiento [30].

CAPÍTULO III

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Este capítulo comprende los materiales físicos involucrados en el estudio que son: transformador, equipos, dispositivos y/o consumibles de pruebas y medición; materiales virtuales tales como el software utilizado para los cálculos e implementación del modelo (EXCEL® y MATLAB®), además de materiales para presentación de resultados (GUIDE y POWER POINT).

El trabajo se descompone en 3 etapas que son:



3.1. Procedimientos para los ensayos dieléctricos en el laboratorio de Alta Tensión

En este enunciado se presentan los procesos que se aplican al transformador monofásico de distribución de 15 kVA en el laboratorio de Alta Tensión ubicado en la Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil Bloque B de Ingenierías.

La finalidad de los ensayos dieléctricos es conocer la robustez del aislamiento sólido, la respuesta gráfica de la aplicación del impulso tipo rayo al devanado de alta tensión y los procedimientos que se deben ejecutar indicados por las normas nacionales e internacionales. Todo transformador fabricado y comercializado en el mercado nacional e internacional se somete a pruebas de rutina y especiales para probar la robustez, eficiencia y correcta funcionalidad del equipo.

Transformador monofásico de distribución

Trabaja con niveles de media y baja tensión indicados en la tabla 5, por esta razón se lo conoce como distribución tipo poste ya que es usado en áreas urbanas y rurales. Ver Figura 14.



FIGURA 14: TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE DISTRIBUCIÓN 15 KVA [31].

TABLA 5: CARACTERÍSTICAS DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 15KVA [31].

MARCA	MORETRAN	FRECUENCIA	60 Hz
SERIE	125135	CORRIENTE PRIMARIO	2.38 / 1.97
FABRICADO EN	ECUADOR	CORRIENTE SECUNDARIO	62.50
FECHA DE FABRICACIÓN	OCTUBRE 2017	NÚMERO DE FASES	2 / 1
POTENCIA	15 KVA	REFRIGERACIÓN	ONAN
VOLTAJE ALTA TENSIÓN	POS. 1 = 6300V POS. 2 = 13200 GRDY / 7620 V	ACEITE	Mineral sin PCB
VOLTAJE BAJA TENSIÓN	240 V	BIL MT/BT	95 KV / 30 KV
BUSHING ALTA TENSIÓN	H1 y H2	BUSHING BAJA TENSIÓN	X1, X2 y X3

Módulo de control HV9103.

El módulo vigila y opera los equipos de prueba AC, DC e impulso en alta tensión, contiene elementos de control, señalización e instrumentos de medición que anuncian posibles fallas. En la tabla 6 se expone la información de entrada y salida [32]. Ver Figura 15.



FIGURA 15: MÓDULO DE CONTROL HV9103 [32].

TABLA 6: CARACTERÍSTICAS GENERALES Y TÉCNICAS DEL MÓDULO DE CONTROL HV9103.

VOLTAJE DE ALIMENTACIÓN	220-230 V 50/60Hz, monofásico/25 A
REGULACIÓN DEL TRANSFORMADOR	5 KVA, impulsado por un motor que es accionado por tensión nominal de 24 VDC
VOLTAJE REGULADO	0-220 V corriente alterna
SALIDA	5 KVA continua y 10 KVA (corto tiempo de servicio 2 min)
INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN	Voltímetro AC (HV9150) Voltímetro DC (HV9151) Voltaje de impulso (HV9152)
DIMENSIONES	1220mm alto x 105mm ancho x 800mm largo
PESO	275 kg.

Transformador de prueba HV9105

Está formado por arrollamientos, tapa aislante y corona de aluminio, el aislamiento está impregnado y aislado con aceite de alta calidad, fabricado con resina epóxica y fibra de vidrio. Incrementa el voltaje del variac contenido en el módulo de control HV9103 a una relación de 100 KV/220 V. En la tabla 7 se indican sus características técnicas principales [32]. Ver Figura 16.



FIGURA 16: TRANSFORMADOR DE PRUEBA HV9105 [32].

TABLA 7: DATOS TÉCNICOS DEL TRANSFORMADOR DE PRUEBA HV9105.

RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN	2x220 V/100 KV/220 V
RELACIÓN DE CORRIENTE	2x11,45 A/50 mA/15.2 A continuos
SALIDA	5 KVA, 10 KVA para 60 minutos, salida AC
IMPEDANCIA DE VOLTAJE	4%
FRECUENCIA	50 o 60 Hz
NIVEL DE DESCARGA PARCIAL	a 100 KV < 3pC
DIÁMETRO	550mm
PESO	215 kg

Barra de descarga HV9107 (pértiga)

Usada para la descarga manual a tierra de todos los componentes de alta y media tensión que intervienen en las pruebas, tiene una resistencia de descarga de 100 ohmios y una longitud de 2.5 metros [32]. Ver Figura 17.



FIGURA 17: BARRA DE DESCARGA HV9107 [32].

Barra conectora de aluminio HV9108

Se utiliza como cable conductor entre los elementos del circuito, se posa sobre la copa conectora de aluminio. Tiene una distancia de 665 milímetros y peso de 1 kilogramo [32]. Ver Figura 18.



FIGURA 18: BARRA CONECTORA DE ALUMINIO HV9108 [32].

Copa conectora de aluminio HV9109

Elemento conductor que sirve de nodo para la conexión entre los elementos. Tiene diámetro de 150 milímetros y peso de 2.2 kilogramos [32]. Ver Figura 19.



FIGURA 19: COPA CONECTORA DE ALUMINIO HV9109 [32].

Base pedestal de piso de aluminio HV9110

Elemento conductor en el que se montan los dispositivos y cumple con la conexión a tierra de los mismos. Tiene diámetro de 200 milímetros y peso de 2 kilogramos [32]. Ver Figura 20.

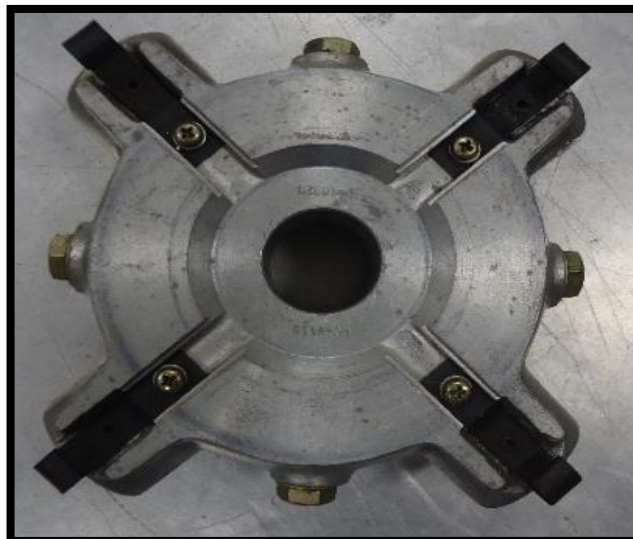


FIGURA 20: BASE PEDESTAL DE PISO DE ALUMINIO HV9110 [32].

Rectificador de Silicio HV9111

Se usa como rectificador de media onda en las pruebas de impulso y en pruebas de corriente directa. Trabaja con un voltaje máximo de 140 KV, corriente nominal de 20 miliamperios y resistencia de protección de 100 K Ω [32]. Ver Figura 21.



FIGURA 21: RECTIFICADOR DE SILICIO HV9111 [32].

Capacitor de impulso HV9112

Utilizado para la generación del voltaje de impulso o como capacitor de rizado para generar voltaje de corriente directa, tiene una capacitancia de 25000pF con un voltaje nominal de 140 KV [32]. Ver Figura 22.



FIGURA 22: CAPACITOR DE IMPULSO HV9112 [32].

Barra conectora de aluminio para piso HV9118

Permite la conexión del espinterómetro de medición con la base pedestal de piso, este elemento es más pequeño que los tubos conectores. La longitud de la barra es 563 milímetros con 1 kilogramo de peso [32]. Ver Figura 23.



FIGURA 23: BARRA CONECTORA DE ALUMINIO PARA PISO HV9118 [32].

Tubo conector de aluminio HV9119

Provoca una conexión mecánica y eléctrica a nivel de tierra cuando se inserta la base pedestal de piso. La longitud es 665 milímetros y peso de 1 kilogramo [32]. Ver Figura 24.



FIGURA 24: TUBO CONECTOR DE ALUMINIO HV9119 [32].

Capacitor de carga HV9120

Mide el voltaje de impulso junto con el divisor de bajo voltaje HV9130. La capacitancia es de 1200 pF a tensión nominal de 140 KV [32]. Ver Figura 25.



FIGURA 25: CAPACITOR DE CARGA HV9120 [32].

Resistencia de carga HV9121

Empleado como resistencia limitadora de corriente para la generación DC y como resistencia de carga para la prueba de impulso. El voltaje de impulso nominal es 140 KV con resistencia de $10\text{M}\Omega$ [32]. Ver Figura 26.



FIGURA 26: RESISTENCIA DE CARGA HV9121 [32].

Resistencia de frente de onda HV9122

Ayuda para la generación de voltajes de impulso, establece el tiempo de subida de la onda de impulso tipo rayo. El voltaje de impulso nominal es de 140 KV y resistencia de 350 ohmios [32]. Ver Figura 27.



FIGURA 27: RESISTENCIA DE FRENTE DE ONDA HV9122 [32].

Resistencia de cola de onda HV9123

La resistencia establece el tiempo medio de la onda impulso tipo rayo. El voltaje nominal de impulso es 140 KV y la resistencia de 2400 ohmios [32]. Ver Figura 28.



FIGURA 28: RESISTENCIA DE COLA DE ONDA HV9123 [32].

Espinterómetro de esferas HV9125

Usado para la generación del voltaje de impulso y efectúa un ajuste del voltaje pico de la señal de impulso tipo rayo o maniobra que se quiera alcanzar [32]. Ver Figura 29.



FIGURA 29: ESPINTERÓMETRO DE ESFERAS HV9125 [32].

Timonel del espinterómetro HV9126

Control de distancia en forma remota para variar el espacio entre explosores. El voltaje de alimentación es 220 voltios a una frecuencia de 50/60 Hz [32]. Ver Figura 30.



FIGURA 30: TIMONEL DEL ESPINTERÓMETRO HV9126 [32].

Resistencia de frente de onda HV9127

Ayuda para la generación de voltajes de impulso, establece el tiempo de subida de la señal de impulso tipo maniobra. El voltaje nominal es de 140KV y una resistencia de 55 K Ω [33]. Ver Figura 31.



FIGURA 31: RESISTENCIA DE FRENTE DE ONDA HV9127 [33].

Resistencia de cola de onda HV9128

La resistencia establece el tiempo de medio valor de la señal de impulso tipo maniobra. El voltaje nominal es de 140KV y una resistencia de 118 K Ω [33]. Ver Figura 32.



FIGURA 32: RESISTENCIA COLA DE ONDA HV9128 [33].

Divisor de bajo voltaje HV9130

Tiene disponible en su interior un capacitor de bajo voltaje que ayuda a tomar la señal de impulso con el cable adaptador de 50 ohmios, llevarla al capacitor de carga HV9120 para reflejar el valor en el medidor de voltaje de impulso HV9152. El rango de medición es de 0 a 150 KV [32]. Ver Figura 33.

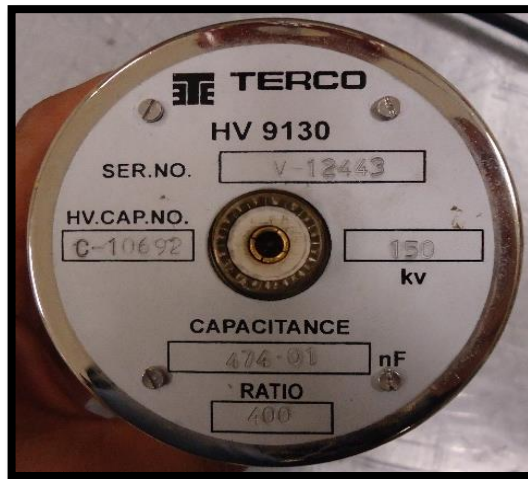


FIGURA 33: DIVISOR DE BAJO VOLTAJE HV9130 [32].

Espinterómetro para medición HV9133

Dispositivo de medición de voltaje de ruptura donde se pueden usar arreglos de electrodos y controlar la distancia de manera remota o manual. El voltaje AC nominal es 100 KV efectivos, el voltaje DC e impulso es 140 KV, el voltaje de alimentación es 220-240 voltios [32]. Ver Figura 34.



FIGURA 34: ESPINTERÓMETRO PARA MEDICIÓN HV9133 Y ELECTRODOS [32].

Electrodo de corona HV9138

Es una terminación en forma de casco que trabaja con el interruptor a tierra para protección. Tiene un diámetro de 300 milímetros [32]. Ver Figura 35.



FIGURA 35: ELECTRODO DE CORONA HV9138 [32].

Capacitor de medición HV9141

Provisto de un capacitor divisor de bajo voltaje para la medición de los voltajes de corriente alterna, permitiendo la conexión del medidor de voltaje alterno. La capacitancia que maneja es de 100pF y un voltaje nominal alterno de 100 KV [32]. Ver Figura 36.



FIGURA 36: CAPACITOR DE MEDICION HV9141 [32].

Medidor de voltaje alterno HV9150

Equipo que viene incluido en el módulo de control HV9103, trabajando junto con el capacitor de medición HV9141 para la medición de voltaje alterno y se alimenta con 220 V, tiene un rango de medición de 0 a $(1000/\sqrt{2})$ KV [32]. Ver Figura 37.

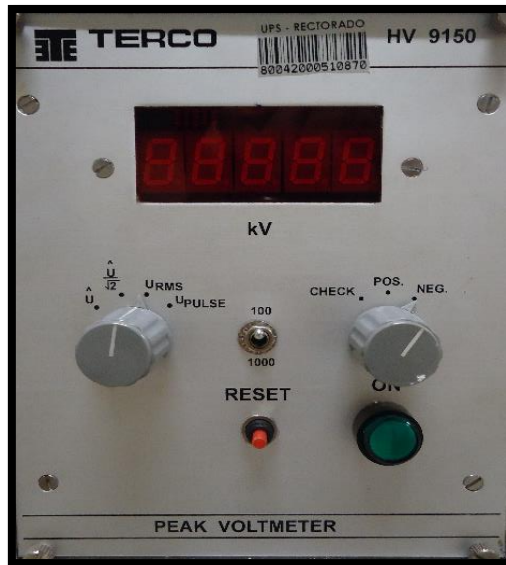


FIGURA 37: MEDIDOR DE VOLTAJE ALTERNO HV9150 [32].

Medidor de voltaje directo HV9151

Está ensamblado con el módulo de control HV9103, se usa en conjunto con la resistencia de medida HV9113 para el reflejar el voltaje directo, trabaja con un voltaje de alimentación de 220 voltios con un rango de medición de 0 a 140 KV/280 KV [32]. Ver Figura 38.

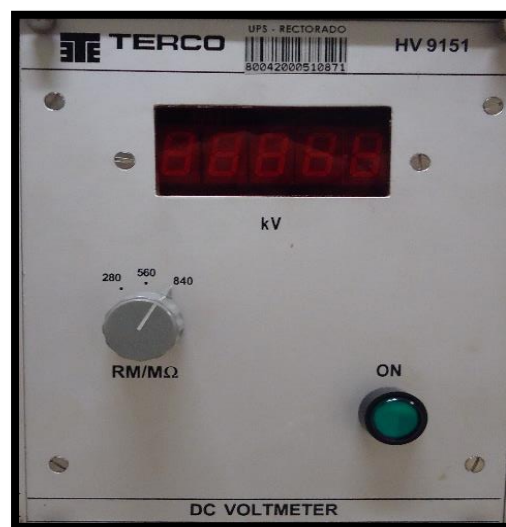


FIGURA 38: MEDIDOR DE VOLTAJE DIRECTO HV9151 [32].

Medidor de voltaje de impulso HV9152

Acoplado con el módulo de control HV9103, mide el voltaje de impulso pico y trabaja en conjunto con el capacitor de carga HV9120. El voltaje de alimentación es de 220 voltios con un rango de medición de 0 a 1000 KV [32]. Ver Figura 39.

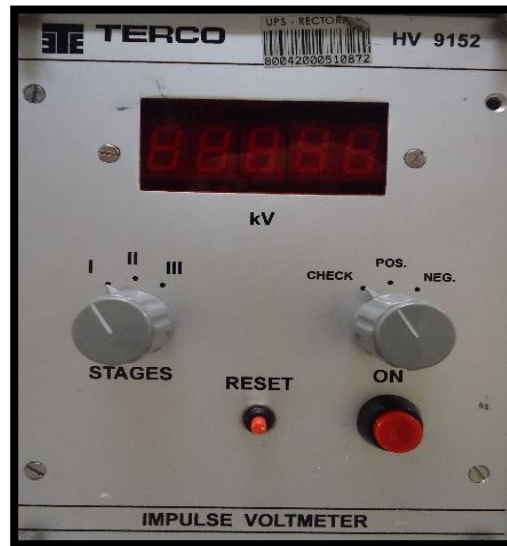


FIGURA 39: MEDIDOR DE VOLTAJE DE IMPULSO HV9152 [32].

Megóhmetro (Megger®) MIT525

Equipo digital utilizado para medir la resistencia de aislamiento en alta y baja tensión de cables, transformadores, motores y aisladores; viene expresado en $M\Omega$ midiendo en la actualidad el índice de polarización y la relación de absorción dieléctrica. En la tabla 8 se indican las características del equipo [34]. Ver Figura 40.



FIGURA 40: MEGÓHMETRO MEGGER MIT525 [34].

TABLA 8: CARACTERÍSTICAS DEL MEGÓHMETRO MEGGER MIT525 [34].

MARCA	Megger
MODELO	MIT525
DIMENSIONES	315 mm de largo x 285 mm de ancho x 181 mm de alto
PESO	4.57 kg
TEMPERATURA DE FUNCIONAMIENTO	-20 °C a 50 °C
BATERÍA	11.1V, 5.2ª hora, IEC 62133:2003
VOLTAJE DE ENTRADA	5KV, 10KV: 90-264V rms, 47/63 Hz, 100 VA 15KV: 90-264V rms, 47/63 Hz, 200 VA
VOLTAJE DE PRUEBAS	250V, 500V, 1000V, 2500V, 5000V
VOLTAJE DE PRUEBA DEFINIDO POR USUARIO	100 V a 1 KV en pasos de 10 V 1 KV a 5 KV en pasos de 25 V
RANGO DE CAPACITANCIA	10nF A 25µF
RANGO DE VISUALIZACIÓN	De 10KΩ a 10TΩ

Software de administración de datos de prueba de aceptación y mantenimiento Power DB Lite

Software que ayuda con el procesamiento de datos que genera el megóhmetro MIT525, el cual sincroniza los resultados de la prueba en tiempo real y emite un informe con tablas y gráficos. Se puede obtener los parámetros del mismo equipo o ingresarlos de manera manual. Ver Figura 41.

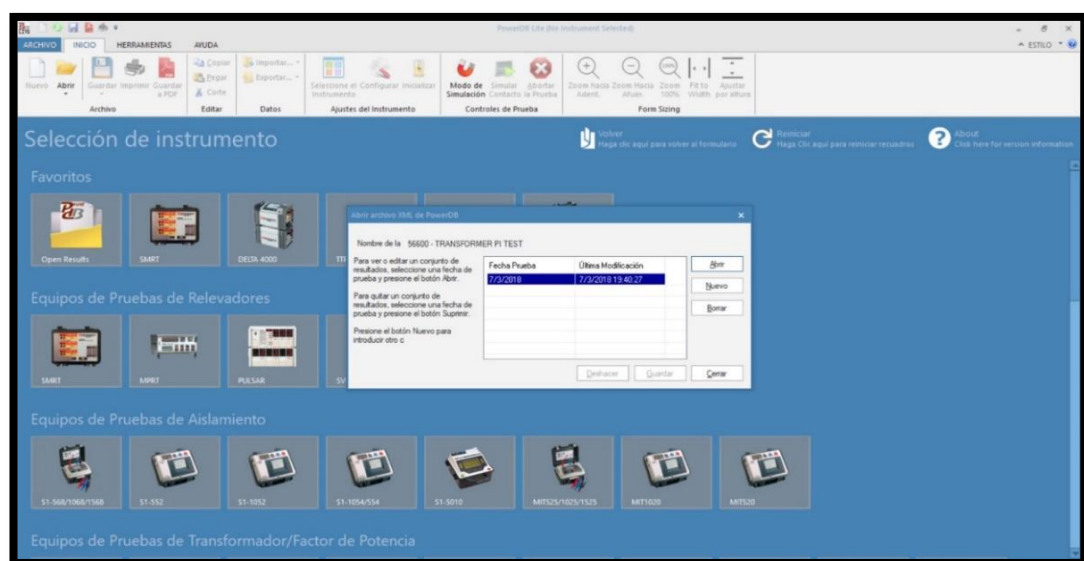


FIGURA 41: INTERFAZ GENERAL DEL SOFTWARE POWER DB LITE [35].

Osciloscopio (GW INSTEK) GDS-1102A-U

Equipo de medición digital de clase DSO para visualizar señales en un ancho de banda máximo de 100MHz, tensión máxima de entrada de 300 voltios, en la tabla 9 se especifican más características del equipo. Ver Figura 42.



FIGURA 42: OSCILOSCOPIO GW INSTEK GDS-1102A-U [36]

TABLA 9: CARACTERISTICAS DEL OSCILOSCOPIO GW INSTEK GDS-1102A-U [36]

DISPLAY	LCD TFT 5,7" (320x234), colores
MUESTREO	1Gps (en tiempo real), 25Gps (en tiempo equivalente)
RESOLUCIÓN VERTICAL	8 bit
IMPEDANCIA DE SALIDA	1MΩ/15pF
MODOS DE DISPARO	automático, normal
PESO	2,5 kg
MEDIDAS	310 x 142 x 140 mm
FUENTE DE ALIMENTACIÓN	100...240VCA, 48...63Hz

3.1.1. Prueba de Tensión de Impulso tipo Rayo

Recrear la forma de onda tipo rayo con un circuito generador de impulsos para probar que el aislamiento diseñado soporta las sobretensiones transitorias originadas por descargas atmosféricas.

Materiales.

El circuito generador de impulso está conformado por las resistencias de frente de onda de 350Ω y de cola de onda de 2400Ω , capacitores y fuentes especializadas en pruebas de alta tensión e impulso. Ver Figura 43.

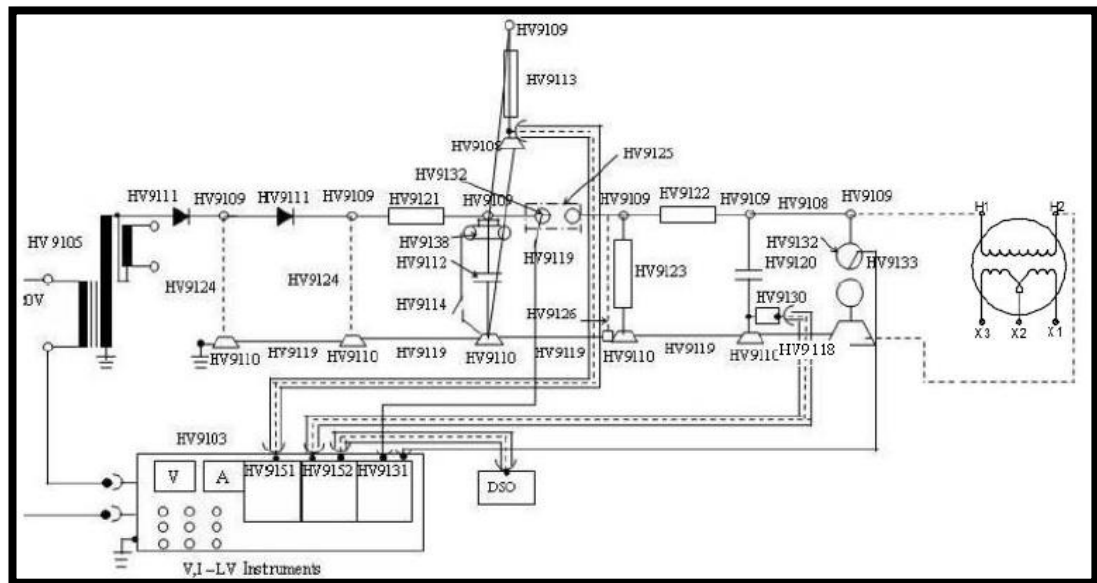


FIGURA 43: CIRCUITO GENERADOR DE IMPULSO TIPO RAYO PARA TRANSFORMADOR MONOFÁSICO. [37]

Módulo de control HV9103, transformador de prueba HV9105, barra de descarga HV9107, Barra conectora de aluminio HV9108, Copa conectora de aluminio HV9109, Base pedestal de piso de aluminio HV9110, Rectificador de Silicio HV9111, Capacitor de impulso HV9112, Barra conectora de aluminio para piso HV9118, Tubo conector de aluminio HV9119, Capacitor de carga HV9120, Resistencia de frente de onda de 350Ω - HV9122, Resistencia de cola de onda de 2400Ω - HV9123, Espinterómetro de esferas HV9125, Timonel del espinterómetro HV9126, Divisor de bajo voltaje HV9130, Espinterómetro para medición HV9133, Electrodo de corona HV9138, Medidor de voltaje directo HV9151, Medidor de voltaje de impulso HV9152, Guantes de protección, cables con pinzas tipo lagarto, osciloscopio, transformador de distribución monofásico.

Procedimiento.

Realizada el 28 de febrero del 2018 a las 21:27 horas a temperatura de 20° centígrados.

- Identificar la clase de aislamiento en la tabla 2 y escoger el nivel básico de aislamiento.
- El tanque del transformador estará conectado a tierra directamente.
- Montar el circuito generador de impulso tipo rayo. Ver Figura 44.

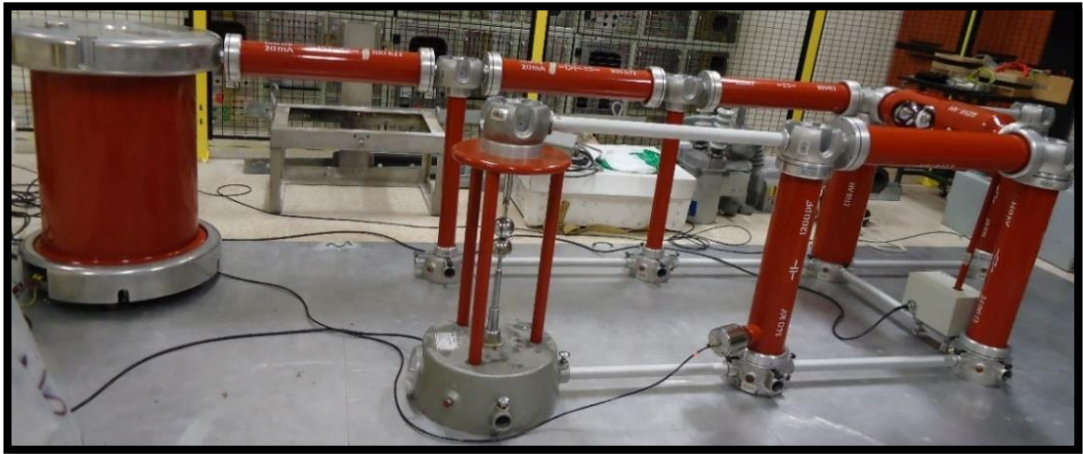


FIGURA 44: CIRCUITO DE IMPULSO TIPO RAYO SIN CARGA .

- Confirmar que el circuito esté armado correctamente y los instrumentos de medición conectados y calibrados.
- Todos los terminales que no participan debe estar conectados a tierra directamente.
- Acoplar el terminal H2 al circuito generador (se coloca el terminal más cercano para que no se produzca arcos eléctricos) y el terminal H1 se conecta a tierra, los terminales de baja tensión quedan directamente a tierra. Ver Figura 45.

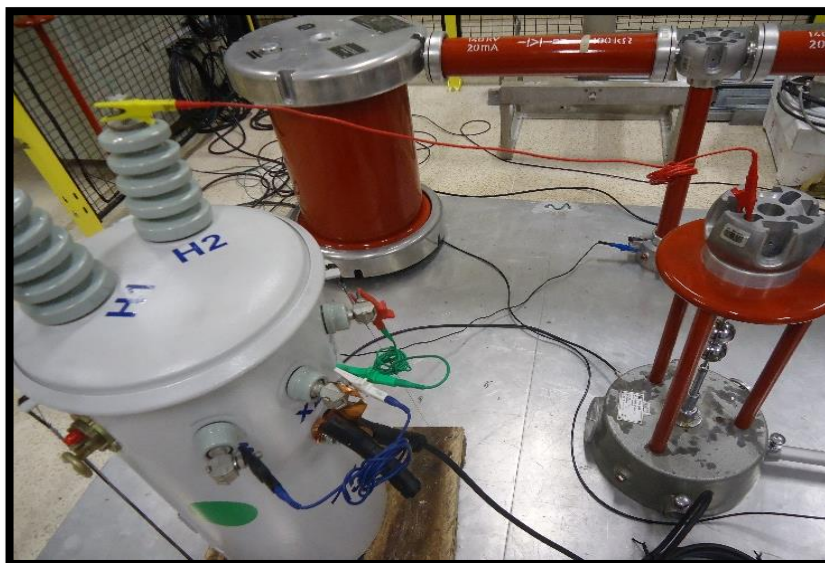


FIGURA 45: CONEXIÓN TRANSFORMADOR A CIRCUITO DE IMPULSO TIPO RAYO.

- Regular la distancia de las esferas del espinterómetro de medición HV9133 y del espinterómetro de esferas HV9125, los cuales queda en 0.6 milímetros y 0.25 milímetros respectivamente. Ver Figura 46.



FIGURA 46: CALIBRACION DEL ESPINTEROMETRO DE MEDICIÓN HV9133 Y DEL ESPINTERÓMETRO DE ESFERAS HV9125 PARA PRUEBA DE IMPULSO TIPO RAYO.

- Efectuar las tres descargas de impulso al 50% del voltaje pleno de ensayo que son 47.5 KV y las dos siguientes a tensión plena máxima de 95 KV con intervalo de 2 segundos entre descargas. Ver Figura 47.



FIGURA 47: TRANSFORMADOR SOMETIDO A PRUEBA DE IMPULSO TIPO RAYO.

3.1.2. Prueba de Tensión de Impulso tipo Maniobra

Generar un impulso de corta duración y alto amortiguamiento (pulso de muy rápida frecuencia) comprobando si el transformador tolera las operaciones de maniobra que se dan en casos de conexión y desconexión del sistema eléctrico.

Materiales.

El circuito generador que simula el impulso tipo maniobra es el mismo utilizado en el tipo rayo, con la diferencia que el elemento para formar el frente de onda es de 55 K Ω y el de cola de onda es de 118 K Ω . Ver Figura 48.

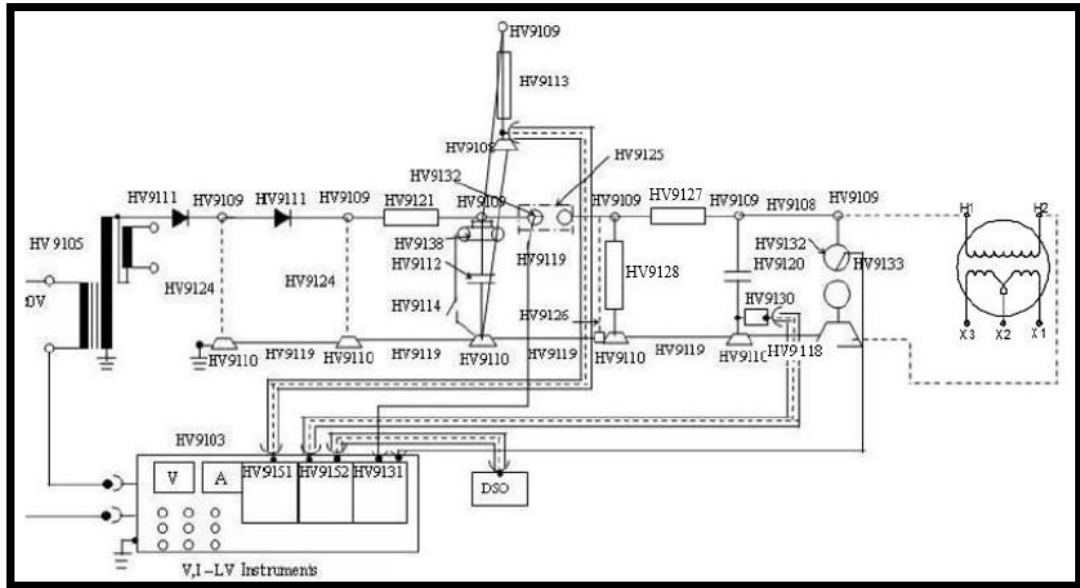


FIGURA 48: CIRCUITO GENERADOR DE IMPULSO TIPO MANIOBRA PARA TRANSFORMADOR MONOFÁSICO.

[33]

Módulo de control HV9103, transformador de prueba HV9105, barra de descarga HV9107, Barra conectora de aluminio HV9108, Copa conectora de aluminio HV9109, Base pedestal de piso de aluminio HV9110, Rectificador de Silicio HV9111, Capacitor de impulso HV9112, Barra conectora de aluminio para piso HV9118, Tubo conector de aluminio HV9119, Capacitor de carga HV9120, Espinterómetro de esferas HV9125, Timonel del espinterómetro HV9126, Resistencia de frente de onda 55K Ω - HV9127, Resistencia de cola de onda 118K Ω - HV9128, Divisor de bajo voltaje HV9130, Espinterómetro para medición HV9133, Electrodo de corona HV9138, Medidor de voltaje directo HV9151, Medidor de voltaje de impulso HV9152, Guantes de protección, cables con pinzas tipo lagarto, transformador de distribución monofásico.

Procedimiento.

Realizada el 10 de marzo del 2018 a las 09:30 horas a temperatura de 20° centígrados.

- Identificar la clase de aislamiento en la tabla 2 y escoger el nivel básico de aislamiento.
- El tanque del transformador estará conectado a tierra directamente.
- Montar el circuito generador de impulso tipo maniobra. Ver Figura 49.



FIGURA 49: CIRCUITO DE IMPULSO TIPO MANIOBRA SIN CARGA.

- Confirmar que el circuito esté armado correctamente y los instrumentos de medición conectados y calibrados.
- Todos los terminales que no participan debe estar conectados a tierra directamente.
- Acoplar el terminal H2 al circuito generador (se coloca el terminal más cercano para que no se produzcan arcos eléctricos) y el terminal H1 se conecta a tierra, los terminales de baja tensión quedan directamente a tierra. Ver Figura 50.

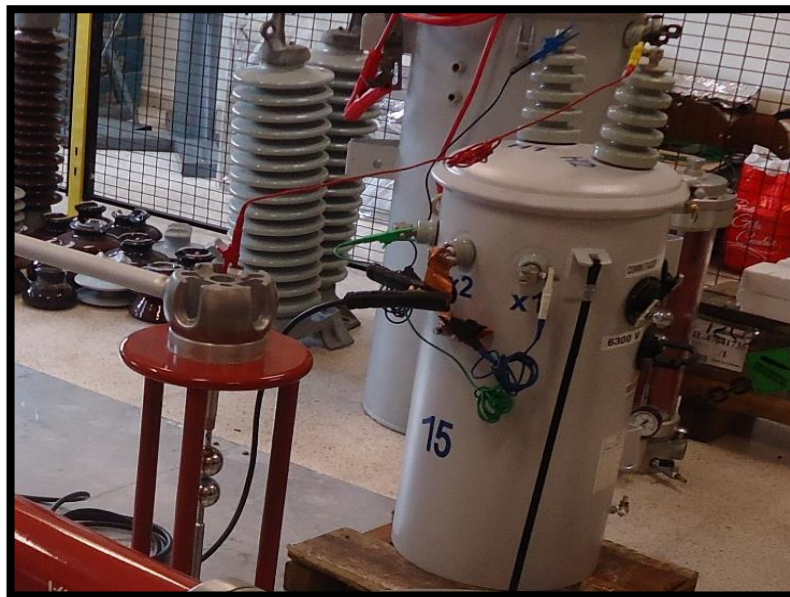


FIGURA 50: CONEXIÓN TRANSFORMADOR A CIRCUITO DE IMPULSO TIPO MANIOBRA.

- Regular la distancia de las esferas del espinterómetro de medición HV9133 y del espinterómetro de esferas HV9125, los cuales queda en 0.2 milímetros y 0.25 milímetros respectivamente. Ver Figura 51.



FIGURA 51: CALIBRACIÓN DEL ESPINTERÓMETRO DE MEDICIÓN HV9133 Y DEL ESPINTERÓMETRO DE ESFERAS HV9125 PARA PRUEBA DE IMPULSO TIPO MANIOBRA.

- Efectuar las tres descargas de impulso al 50% del voltaje pleno de ensayo que son 47.5 KV y las dos siguientes a tensión plena máxima de 95 KV con intervalo de 2 segundos entre descargas. Ver Figura 52.



FIGURA 52: TRANSFORMADOR SOMETIDO A PRUEBA DE IMPULSO TIPO MANIOBRA.

3.1.3. Prueba de Resistencia de Aislamiento

Determina la cantidad de humedad e impurezas contenidos en el transformador.

Materiales.

Esta prueba es realizada en un transformador de media tensión, por lo tanto, se necesita un megóhmetro digital adecuado para evaluar en este nivel.

Megóhmetro digital MEGGER MIT525, software Power DB Lite, Guantes de protección eléctrica, cables con pinzas tipo lagarto, transformador de distribución monofásico.

Procedimiento.

Realizada el 07 de marzo del 2018 a las 18:55 horas a temperatura de 20° centígrados.

- El ensayo se efectúa sin tensión, desconectar todos los equipos y desenergizar el transformador.
- Instalar el software Power DB Lite en la computadora para visualizar el informe a tiempo real.
- Colocar el equipo de medición en una base firme, segura, nivelada que permita aterrizar el equipo. Ver Figura 53.



FIGURA 53: MEGÓHMETRO EN SUPERFICIE NIVELADA PARA ATERRIZAR [34].

- Cortocircuitar los terminales de alta tensión y de baja tensión. Ver Figura 54.



FIGURA 54: TERMINALES DE ALTA Y BAJA TENSIÓN CORTOCIRCUITADOS.

- Revisar la calibración del megóhmetro digital y conectarlo a la computadora, ver el estado de las puntas de prueba. Ver Figura 55.

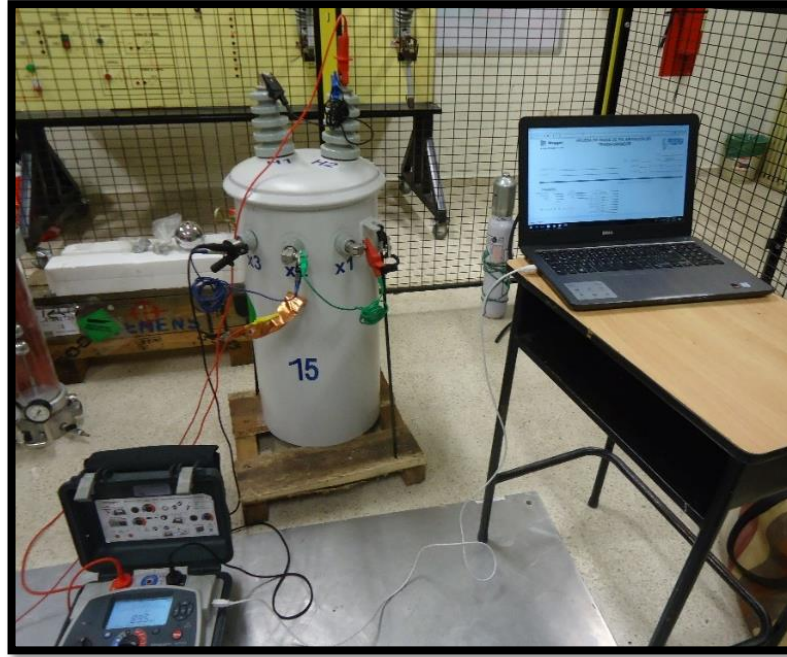


FIGURA 55: MEGÓHMETRO CONECTADO A LA COMPUTADORA PARA ANÁLISIS CON SOFTWARE POWER DB LITE.

- Realizar la conexión correspondiente del megóhmetro en el transformador para cada caso.

a) Alta tensión – Baja tensión más tierra

Conectar terminal positivo (rojo) del megóhmetro al buje de alta tensión (terminal H).
Conectar terminal negativo (negro) del megóhmetro al buje de baja tensión (terminal X).

Conectar el terminal de baja tensión a tierra del sistema.

Se calibra el nivel de tensión del megóhmetro a 5000 voltios. Ver Figura 56.



FIGURA 56: CONEXIÓN ALTA TENSIÓN - BAJA TENSIÓN MÁS TIERRA.

b) Baja tensión – Alta tensión más tierra

Conectar terminal positivo (rojo) del megóhmetro al buje de baja tensión (terminal X).
Conectar terminal negativo (negro) del megóhmetro al buje de alta tensión (terminal H).

Conectar el terminal de alta tensión a tierra del sistema.

Se calibra el nivel de tensión del megóhmetro a 500 voltios. Ver Figura 57.

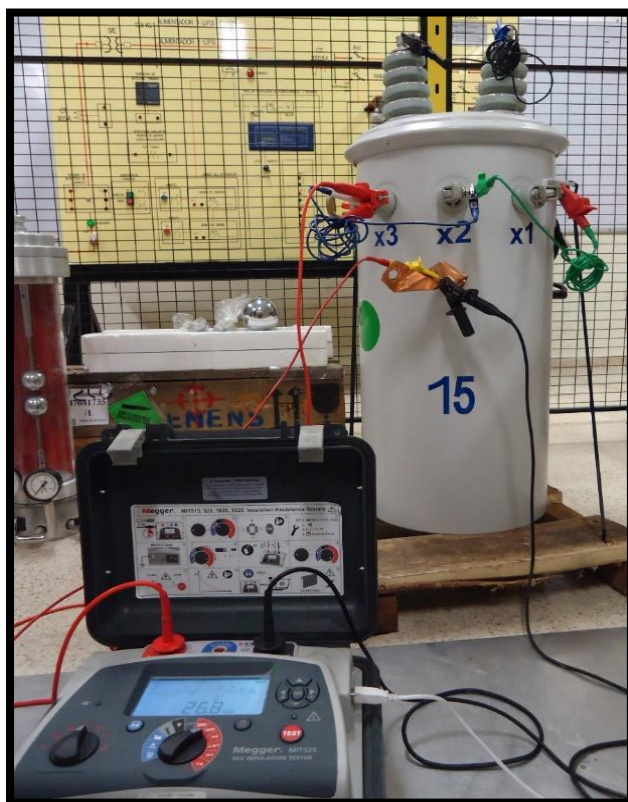


FIGURA 57: CONEXIÓN DE BAJA TENSIÓN - ALTA TENSIÓN MÁS TIERRA.

c) Alta tensión – Baja tensión

Conectar terminal positivo (rojo) del megóhmetro al buje de alta tensión (terminal H).
Conectar terminal negativo (negro) del megóhmetro al buje de baja tensión (terminal X).

Se calibra el nivel de tensión del megóhmetro a 5000 voltios. Ver Figura 58.

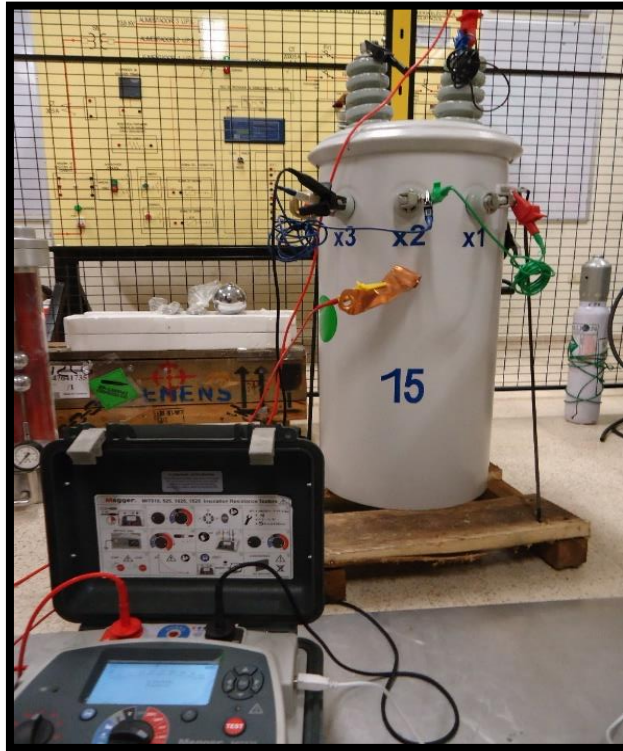


FIGURA 58: CONEXIÓN DE ALTA TENSIÓN CONTRA BAJA TENSIÓN.

- Tomar las medidas dadas por el instrumento en los siguientes tiempos: 25 segundos, 30 segundos, 50 segundos, 75 segundos, 60 segundos y posteriormente cada minuto hasta alcanzar los 10 minutos. Ver Figura 59.

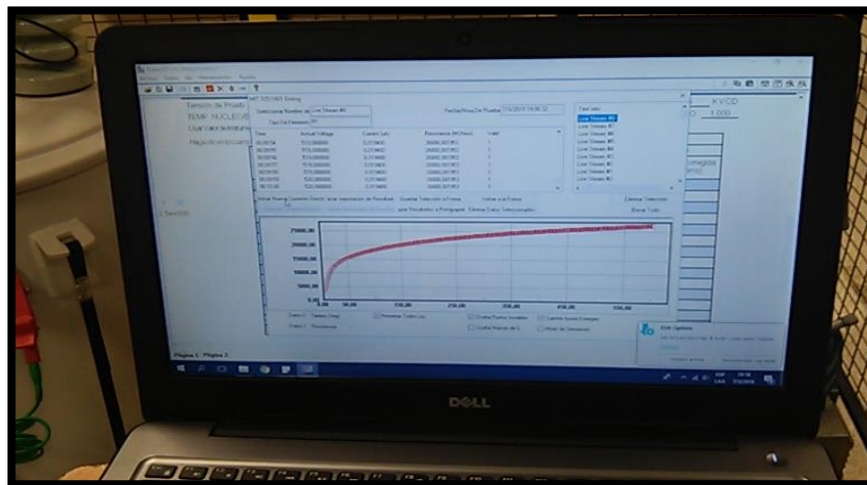


FIGURA 59: EVALUACIÓN DEL MEGÓHMETRO EN TIEMPO REAL.

3.1.4. Prueba de Voltaje aplicado

La finalidad es verificar la clase de aislamiento y que el material usado sea conveniente para resistir los esfuerzos eléctricos durante la operación.

Materiales.

Con los elementos descritos a continuación se aplica al transformador de distribución el voltaje solicitado durante el intervalo del tiempo permitido. Ver Figura 60.

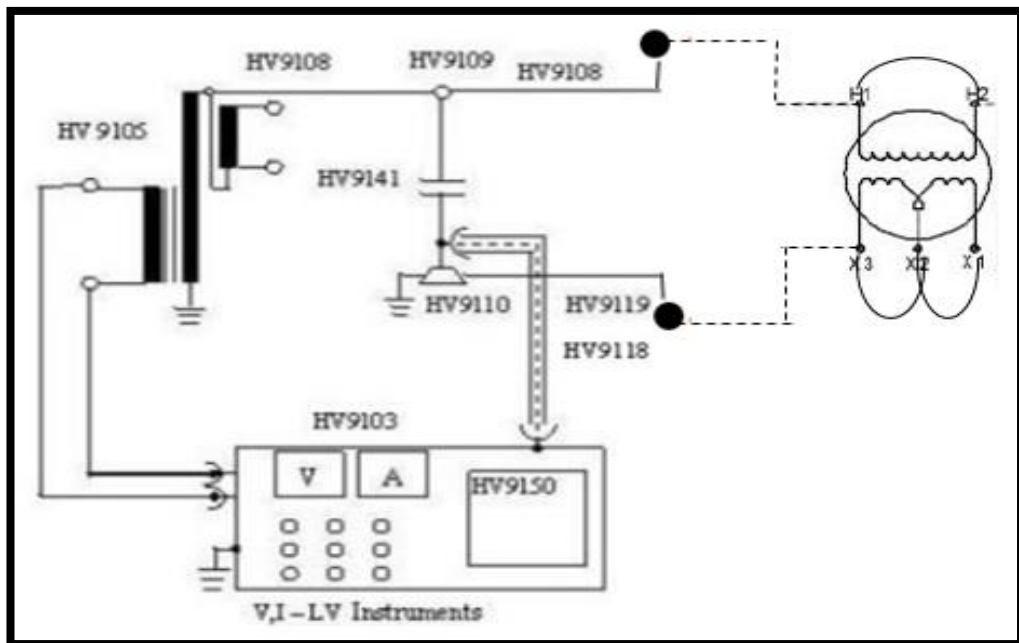


FIGURA 60: CIRCUITO GENERADOR DE VOLTAJE ALTERNO PARA PRUEBA DE VOLTAJE APLICADO.

Módulo de control HV9103, transformador de prueba HV9105, Barra de descarga HV9107, Barra conectora de aluminio HV9108, Copa conectora de aluminio HV9109, Base pedestal de piso de aluminio HV9110, Capacitor de medición V9141, Medidor de voltaje alterno HV9150, Guantes de protección eléctrica, cables con pinzas tipo lagarto, transformador de distribución monofásico.

Procedimiento.

Realizada el 23 de febrero del 2018 a las 20:53 horas a temperatura de 20° centígrados.

- Se cortocircuitan los terminales de alta y baja tensión. Ver Figura 61.



FIGURA 61: TERMINALES DE ALTA Y BAJA TENSIÓN CORTOCIRCUITADOS PARA PRUEBA DE VOLTAJE APLICADO.

- El voltaje a inducir es alterno de forma sinusoidal a frecuencia de 60 Hz.
- Armar el circuito generador de voltaje alterno. Ver Figura 62.



FIGURA 62: CIRCUITO GENERADOR DE VOLTAJE ALTERNO PARA PRUEBA DE VOLTAJE APLICADO.

- Verificar que el circuito y conexiones al transformador estén correctas.
- Al iniciar la prueba se tiene un tercio del valor total del voltaje que es 11 KV, esta tensión se eleva paulatinamente en un tiempo límite de 15 segundos.
- La tensión de 34 KV debe permanecer durante un minuto. Ver Figura 63.

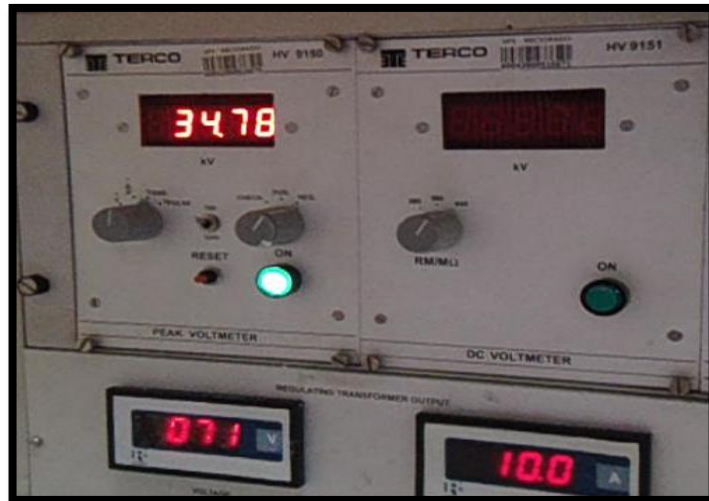


FIGURA 63: VOLTAJE APLICADO A TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN.

- Una vez terminado el minuto, se reduce el voltaje lentamente hasta llegar a 11 KV y desconectar la fuente de alimentación.

3.1.5. Procedimiento de la parte experimental para validar el análisis matemático

Para la validación de este modelo matemático se tienen que cumplir algunos requerimientos en el transformador y los equipos a utilizar para la medición de la respuesta transitoria.

El transformador de distribución se tiene que diseñar y construir como un prototipo de prueba de tal manera que permita al investigador tener acceso a cada una de las capas de los devanados a estudiar, estos son denominados puntos de medición especiales (proviene directamente del conductor) que van en medio y al final de la primera capa y al final de las capas restantes del devanado de alta tensión, siendo imperioso derivaciones accesibles para realizar las mediciones de los voltajes directamente de cada una de las capas.

La disposición de los devanados exclusivamente es tipo capa o sánduche ya que el modelo de la línea de transmisión multiconductora se enfoca específicamente en este tipo de configuración, el que indica que primero se bobina el devanado de baja tensión, se coloca el aislamiento entre devanados y luego se bobina el devanado de alta tensión. Como el estudio de respuesta transitoria se centra en el aislamiento sólido, el experimento se debe efectuar en la etapa de fabricación, antes de colocar la parte activa del transformador dentro del tanque, por ello el aislamiento sólido de estar absolutamente seco sin impregnarlo de aceite [18].

Para conservarlo en buenas condiciones se necesita un horno que entregue mínimo 120°C de temperatura e ingresarlo por 12 horas después de utilizarlo ya que el calor elimina la humedad, impurezas o residuos de sudor.

El experimento consiste en aplicar un impulso de tensión con amplitud reducida (respecto a las especificaciones del BIL) y se necesita un generador de impulsos para generar la onda deseada ya sea una descarga atmosférica o un pulso escalón que permita regular la amplitud y la frecuencia (rango de 500KHz a 2MHz), sondas de voltaje y corriente para la fuente y un osciloscopio digital [15].

Para la ejecución de la prueba, tiene que ser un lugar adecuado a temperatura ambiente ya que el uso de acondicionador de aire influye negativamente en los resultados, evitar tanto como sea posible un lugar húmedo o con líquidos. Se conecta el generador de impulso al terminal de línea del devanado de alta tensión y las sondas de voltaje y corriente miden los parámetros de la fuente, los terminales del devanado de baja tensión se conectan directamente a tierra y en las derivaciones especiales se conecta el osciloscopio para observar las gráficas de voltaje resultantes.

3.2. Desarrollo matemático del modelo de la línea de transmisión multiconductora en una red de dos puertos para el devanado monofásico del transformador de distribución.

Para el desarrollo de este modelo se necesita información completa de la construcción interna de los devanados de alta y baja tensión de un transformador monofásico de distribución para implementarlo en el software MATLAB®.

Se presentan varios modelos matemáticos que se fusionan entre sí para llegar a una solución que se adapte a las múltiples capas que posee el devanado de un transformador. Ver Figura 64.

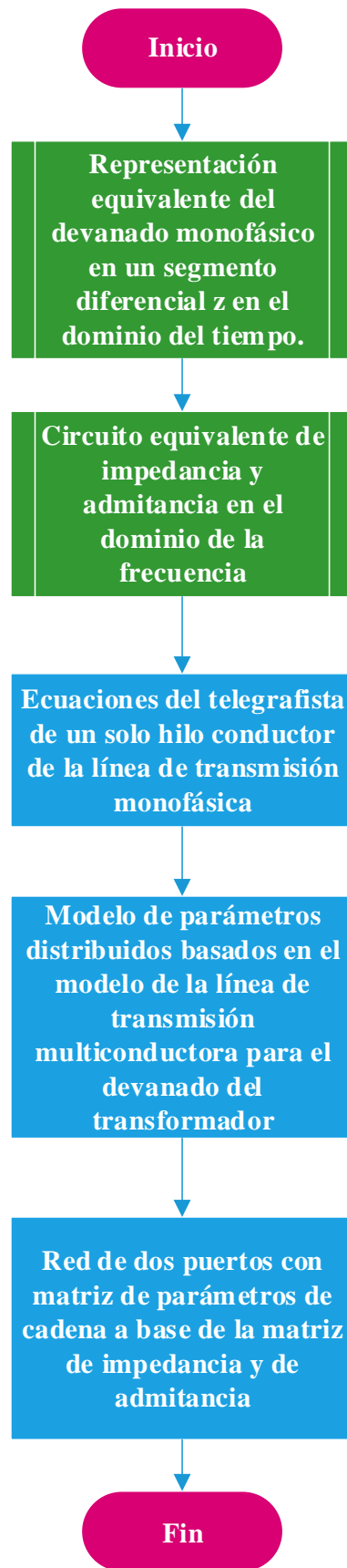


FIGURA 64: DESARROLLO MATEMÁTICO DEL MODELO DE PARÁMETROS DISTRIBUIDOS EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA.

El desarrollo se enfoca en determinar la propagación y distribución de la onda de frente rápido a lo largo del devanado monofásico del transformador, a continuación se proyecta el circuito equivalente interno del devanado, donde Δz es un segmento diferencial. Ver Figura 65.

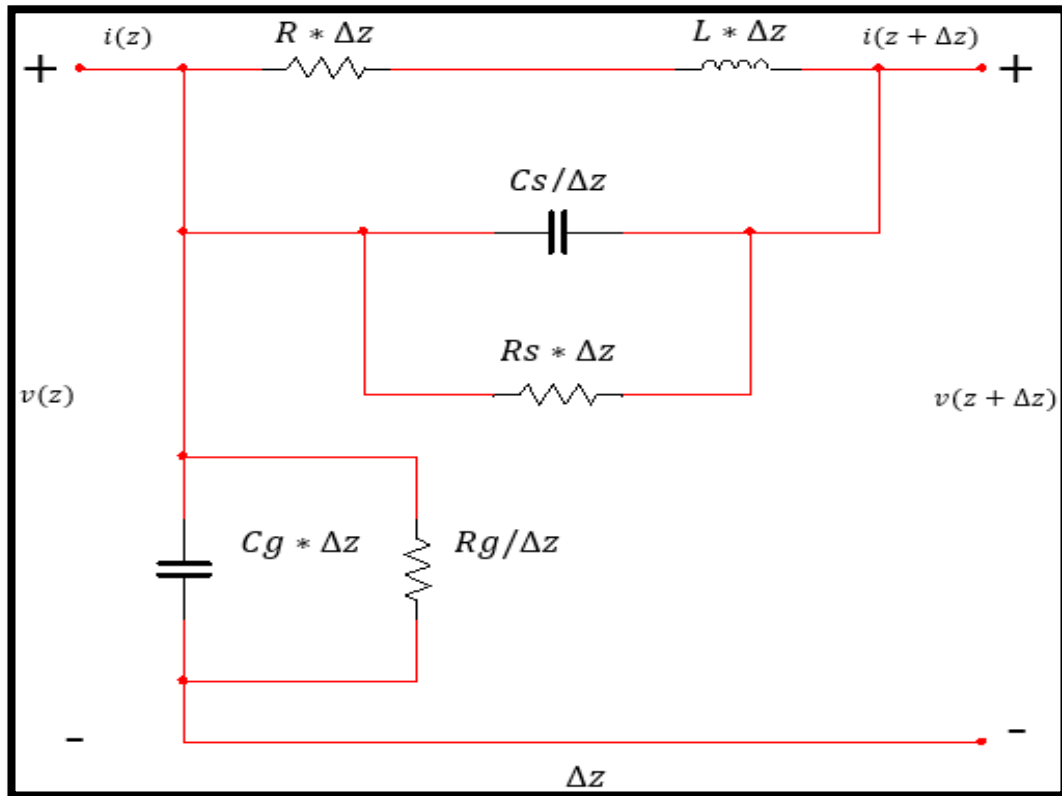


FIGURA 65: REPRESENTACIÓN EQUIVALENTE DEL DEVANADO MONOFÁSICO POR UNIDAD DE LONGITUD, EN EL DOMINIO DEL TIEMPO [15].

En [14] cada uno de los parámetros se encuentran por unidad de longitud, descritos de la siguiente manera:

R es la resistencia en serie o pérdida por corrientes de fuga entre aislamientos de espiras.

L es la inductancia en serie.

C_s es la capacitancia en serie situada entre espiras contiguas del devanado.

R_s es la pérdida generada de la capacitancia serie C_s .

C_g es la capacitancia a tierra del devanado situada de giro a tierra.

R_g es la pérdida generada de la capacitancia a tierra C_g .

i es la corriente del devanado monofásico.

v es el voltaje del devanado monofásico.

Δz simboliza la posición relativa de un punto del devanado.

El análisis a cumplir se da en el dominio de la frecuencia, en la tabla 10 se presenta la transformación de los parámetros y se resuelve los equivalentes paralelos y series presentes en el circuito.

TABLA 10: TRANSFORMACIÓN DE PARÁMETROS DEL DOMINIO DEL TIEMPO AL DOMINIO DE LA FRECUENCIA.

DOMINIO DEL TIEMPO	DOMINIO DE LA FRECUENCIA
C	$Z_c = \frac{1}{j * w * C}$
L	$Z_l = j * w * L$
R	R

En un diagrama de flujo se resume el proceso a desarrollar en esta sección. Ver Figura 66.

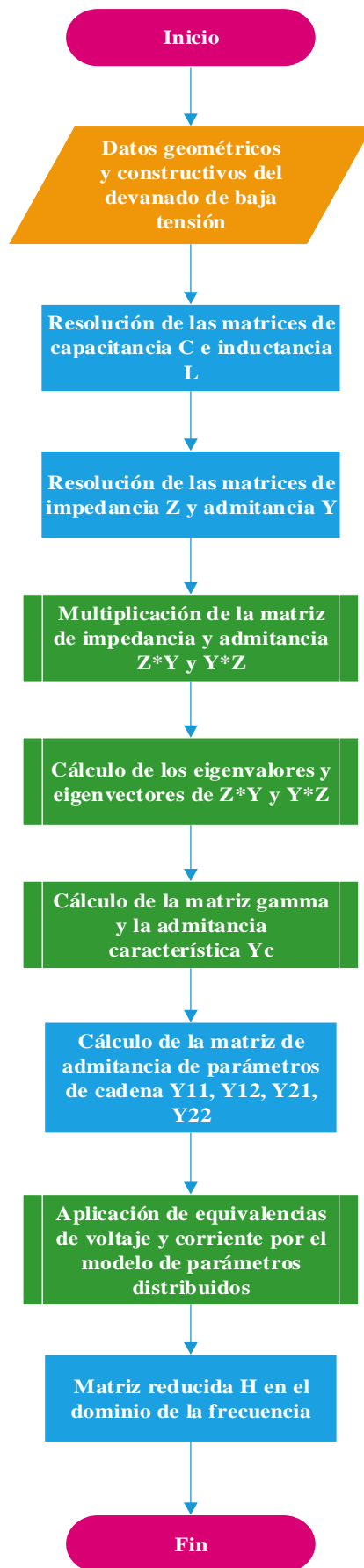


FIGURA 66: APLICACIÓN DEL ANÁLISIS MATEMÁTICO CON EL MODELO DE PARÁMETROS DISTRIBUIDOS.

Resolución del equivalente paralelo entre C_g y R_g . Ver Ecuación 13 y 14.

$$Z_g = \frac{1}{\frac{1}{R_g} + \frac{1}{C_g}} ; \text{ en el dominio del tiempo}$$

$$Z_g(w) = \frac{1}{\frac{1}{R_g} + \frac{1}{j * w * C_g}}$$

$$Z_g(w) = \frac{1}{\frac{1}{R_g} + j * w * C_g} \quad (13)$$

$$Y_g(w) = \frac{1}{Z_g(w)}$$

$$Y_g(w) = \frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{R_g} + j * w * C_g}} \quad (14)$$

$$Y_g(w) = \frac{1}{R_g} + j * w * C_g$$

Resolución del equivalente paralelo entre C_s y R_s . Ver Ecuación 15 y 16.

$$Z_s = \frac{1}{\frac{1}{R_s} + \frac{1}{C_s}} ; \text{ en el dominio del tiempo}$$

$$Z_s(w) = \frac{1}{\frac{1}{R_s} + \frac{1}{C_s}}$$

$$Z_s(w) = \frac{1}{\frac{1}{R_s} + \frac{1}{j * w * C_s}} \quad (15)$$

$$Y_s(w) = \frac{1}{Z_s(w)}$$

$$Y_s(w) = \frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{R_s} + j * w * C_s}}$$

$$Y_s(w) = \frac{1}{R_s} + j * w * C_s \quad (16)$$

Resolución del equivalente serie de R y L

$$Z = R + L$$

$$Z(w) = R + j * w * L$$

$$Y(w) = \frac{1}{R + j * w * L}$$

Resolución del equivalente paralelo $Y_s(w)$ y $Y(w)$. Ver Ecuación 17 y 18.

$$Y_d(w) = Y_s(w) + Y(w)$$

$$Y_d = \frac{1}{R_s} + j * w * C_s + \frac{1}{R + j * w * L}$$

$$Y_d = \frac{(R + j * w * L) + [R_s * (R + j * w * L)(j * w * C_s)] + R_s}{R_s * (R + j * w * L)}$$

$$Y_d = \frac{(R + j * w * L) + j * w * R_s * C_s * (R + j * w * L) + R_s}{R_s * (R + j * w * L)}$$

$$Y_d = \frac{\frac{R + j * w * L}{R_s} + j * w * C_s * (R + j * w * L) + 1}{R + j * w * L}$$

$$Y_d = \frac{R + j * w * L * \left(\frac{1}{R_s} + j * w * C_s\right) + 1}{R + j * w * L}$$

$$Y_d = \frac{1 + (R + j * w * L) \left(\frac{1}{R_s} + j * w * C_s\right)}{R + j * w * L} \quad (17)$$

$$Z_d = \frac{1}{Y_d}$$

$$Z_d = \frac{R + j * w * L}{1 + (R + j * w * L) * \left(\frac{1}{R_s} + j * w * C_s\right)} \quad (18)$$

$$Z_d = R_{eq} + j * w * L_{eq}$$

Reemplazando $s = j * w$ en $Y_g(w)$. Ver Ecuación 19.

$$Y_g(w) = Y_s(w) = Y_o(w)$$

$$Y_o(s) = \frac{1}{R_g} + j * w * C_g$$

$$Y_o(s) = \frac{1}{R_g} + s * C_g$$

$$Y_o(s) = G(s) + s * C \tag{19}$$

Reemplazando $s = j * w$ en $Z_d(w)$. Ver Ecuación 20.

$$Z_d(w) = Z_s(w) = Z_o(w)$$

$$Z_o(s) = \frac{1}{1 + (R + s * L) * \left(\frac{1}{R_s} + s * C_s\right)}$$

$$Z_o(s) = R + s * L \tag{20}$$

Construyendo el circuito equivalente en términos de $s = j * w$, se representa en términos de impedancia y admitancia. Ver Figura 67.

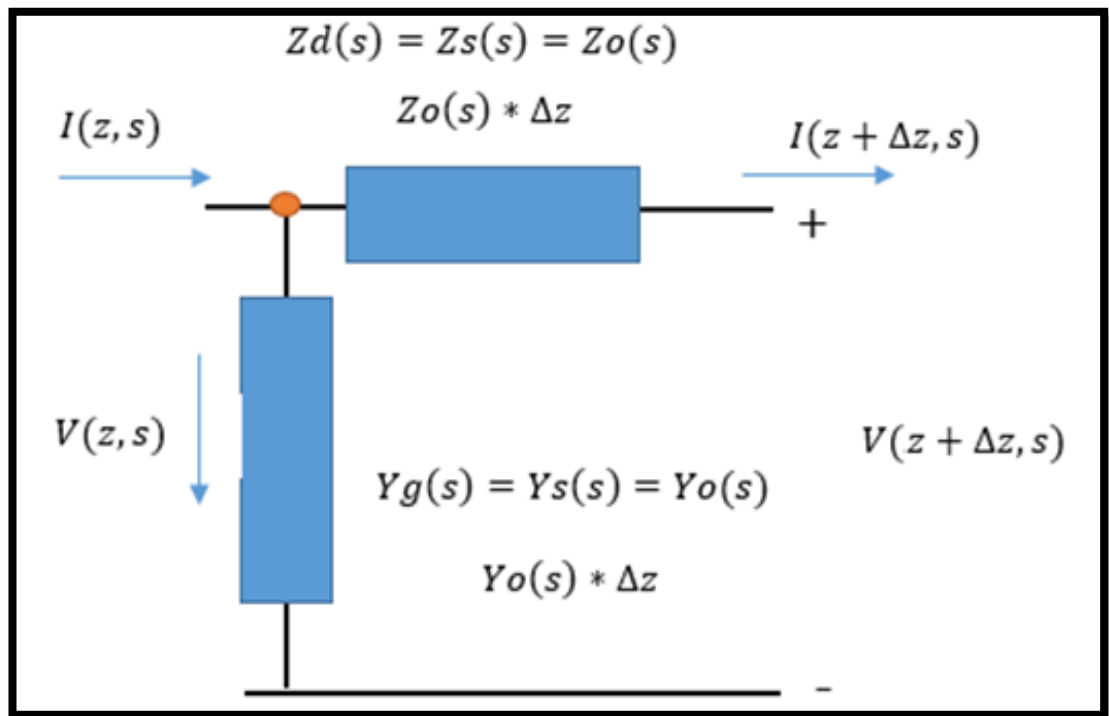


FIGURA 67: CIRCUITO EQUIVALENTE DE IMPEDANCIA Y ADMITANCIA EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA [19].

Resolviendo la malla del circuito equivalente (Ley de Kirchhoff) representado en la figura 16, se tiene el vector de tensión en el punto z del devanado $V(z, s)$:

$$-V(z, s) + Z_0(s) * \Delta z * I(z + \Delta z, s) + V(z + \Delta z, s) = 0$$

$$V(z, s) = Z_0(s) * \Delta z * I(z + \Delta z, s) + V(z + \Delta z, s)$$

Resolviendo el nodo del circuito equivalente (Ley de Kirchhoff) representado en la figura 16, se tiene el vector de corriente en el punto z del devanado $I(z, s)$:

$$I(z, s) = I_{Y_0(s)} + I(z + \Delta z, s)$$

$$I(z, s) = V(z + \Delta z, s) * Y_0(s) * \Delta z + I(z + \Delta z, s)$$

Reescribiendo la ecuación de voltaje de la malla en términos de la derivada y reemplazando la impedancia. Ver Ecuación 21.

$$V(z + \Delta z, s) - V(z, s) = -Z_0(s) * \Delta z * I(z + \Delta z, s)$$

$$\lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{V(z + \Delta z, s) - V(z, s)}{\Delta z} = -Z_0(s) * I(z + \Delta z, s)$$

$$\frac{dV(z, s)}{dz} = -Z_0(s) * I(z, s)$$

$$\frac{dV(z, s)}{dz} = -[R(s) * I(z, s) + s * L(s) * I(z, s)] \quad (21)$$

R es la resistencia y representa las pérdidas serie del devanado, pérdidas del conductor, pérdidas dieléctricas que se ven influenciadas por la frecuencia.

L es la inductancia y representa la inductancia propia y mutua del devanado, la capacitancia serie, la resistencia del conductor y la resistencia de fuga.

Reescribiendo la ecuación de corriente del nodo en términos de la derivada y reemplazando la admitancia. Ver Ecuación 22.

$$I(z + \Delta z, s) - I(z, s) = -Y_0(s) * \Delta z * V(z + \Delta z, s)$$

$$\lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{I(z + \Delta z, s) - I(z, s)}{\Delta z} = -Y_0(s) * V(z + \Delta z, s)$$

$$\frac{dI(z, s)}{dz} = -Y_0(s) * V(z, s)$$

$$\frac{dI(z, s)}{dz} = -[G(s) * V(z, s) + s * C(s) * I(z, s)] \quad (22)$$

G es la conductancia del devanado y representa las pérdidas producidas por las corrientes de fuga que van desde el devanado hasta tierra (culatas, tanques, pernos, etc.)

C es la capacitancia del devanado y representa la capacitancia de los devanados a tierra y el campo eléctrico presente en el conductor y aislamientos existentes; este parámetro depende de la geometría de las bobinas, tipo de aislamiento, material y distancias.

A la ecuación $\frac{dV(z,s)}{dz} = -Z_0(s) * I(z, s)$ se aplica la segunda derivada y se reemplaza por $\frac{dI(z,s)}{dz} = -Y_0(s) * V(z, s)$. Ver Ecuación 23.

$$\begin{aligned}\frac{d^2V(z)}{dz^2} &= -Z_0(s) * \frac{dI(z, s)}{dz} \\ \frac{d^2V(z)}{dz^2} &= Z_0(s) * Y_0(s) * V(z, s) \\ \frac{d^2V(z)}{dz^2} &= Z_0(s) * Y_0(s) * V(z) \end{aligned} \quad (23)$$

A la ecuación $\frac{dI(z,s)}{dz} = -Y_0(s) * V(z, s)$ se le aplica la segunda derivada y se reemplaza por la ecuación $\frac{dV(z,s)}{dz} = -Z_0(s) * I(z, s)$. Ver Ecuación 24.

$$\begin{aligned}\frac{d^2I(z)}{dz^2} &= -Y_0(s) * \frac{dV(z, s)}{dz} \\ \frac{d^2I(z)}{dz^2} &= Y_0(s) * Z_0(s) * I(z, s) \\ \frac{d^2I(z)}{dz^2} &= Y_0(s) * Z_0(s) * I(z) \end{aligned} \quad (24)$$

Las ecuaciones 23 y 24 se conocen como las ecuaciones del telegrafista o las ecuaciones de la línea de transmisión fasoriales para la línea de transmisión de un solo conductor (EDO de segundo orden); para el caso del transformador monofásico son varios conductores debido al número de capas que lo conforman.

A partir de este modelo de único conductor se cimienta el modelo del devanado de un transformador monofásico representado como línea de transmisión multiconductora ya que se adaptan las ecuaciones a la forma matricial con un número N de elementos para facilitar los procesos computacionales.

En la representación matricial se considera colocar un símbolo especial ($\bar{=}$) encima de las letras, obteniendo la matriz de voltaje para finitos conductores.

$$\bar{V}(z) = \begin{bmatrix} V1(z) \\ V2(z) \\ V3(z) \\ \vdots \\ Vn(z) \end{bmatrix}$$

$$\bar{Z} = R + j * w * L, \quad \text{donde } \bar{Z} \text{ es matriz de } N \times N \text{ elementos}$$

$$\bar{Y} = G + j * w * C, \quad \text{donde } \bar{Y} \text{ es matriz de } N \times N \text{ elementos}$$

La ecuación 23 y 24 se la lleva a representación matricial. Ver Ecuación 25 y 26.

$$\frac{d^2 \bar{V}(z)}{dz^2} = \bar{Z}_0(s) * \bar{Y}_0(s) * \bar{V}(z) \quad (25)$$

$$\frac{d^2 \bar{I}(z)}{dz^2} = \bar{Y}_0(s) * \bar{Z}_0(s) * \bar{I}(z) \quad (26)$$

Donde $\bar{Z}_0 * \bar{Y}_0 \neq \bar{Y}_0 * \bar{Z}_0$, por ello se aplica un proceso de descomposición matricial denominado la transformada de similitud (herramienta algebraica) que aplica un cambio de variables a las ecuaciones diferenciales para convertirlas en varias ecuaciones separadas que representen varias líneas aisladas, todo esto apoyado en la matriz transpuesta, matriz de eigenvalores y de eigenvectores [38].

Lo explicado con antelación es llevado a la representación de una red de dos puertos que es un método efectivo y comprobado [39] , [40] para relacionar los voltajes y corrientes a la entrada y salida del devanado monofásico. La variable independiente del sistema es z ubicada en el eje de línea. Ver Figura 68.

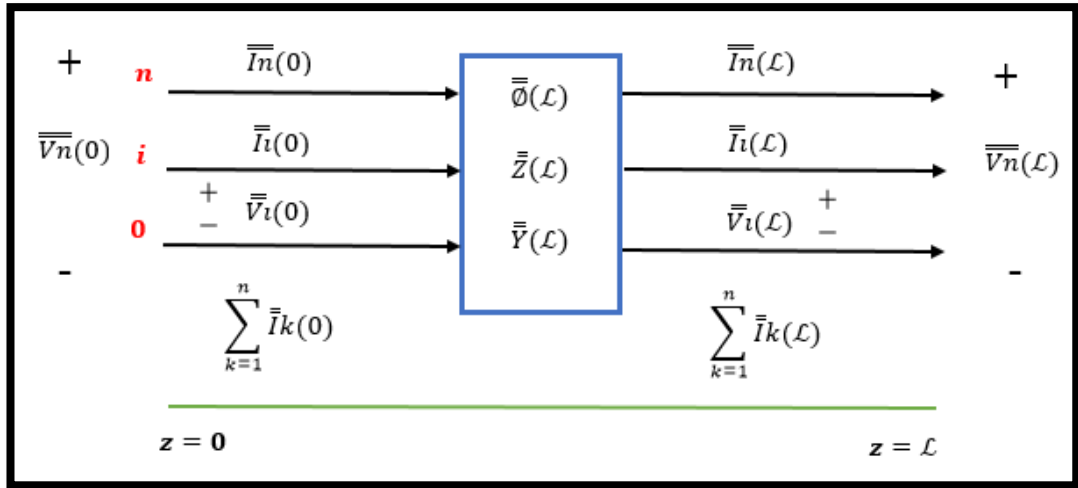


FIGURA 68: REPRESENTACIÓN DEL MODELO DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN MULTICONDUCTORA COMO RED DE DOS PUERTOS CON SU MATRIZ DE PARÁMETROS DE CADENA $\bar{\bar{O}}(L)$ A BASE DE LA MATRIZ DE IMPEDANCIA $\bar{\bar{Z}}(L)$ Y MATRIZ DE ADMITANCIA $\bar{\bar{Y}}(L)$ [39].

A las ecuaciones $\frac{d^2 \bar{\bar{V}}(z)}{dz^2} = \bar{\bar{Z}}_0(s) * \bar{\bar{Y}}_0(s) * \bar{\bar{V}}(z)$ y $\frac{d^2 \bar{\bar{I}}(z)}{dz^2} = \bar{\bar{Y}}_0(s) * \bar{\bar{Z}}_0(s) * \bar{\bar{I}}(z)$ se las representa como una red de dos puertos. Ver Ecuación 27.

$$\frac{d \bar{\bar{X}}(z)}{dz} = \bar{\bar{A}}(z) * \bar{\bar{X}}(z)$$

$$\frac{d \bar{\bar{X}}(z)}{dz} = \begin{bmatrix} 0 & -\bar{\bar{Z}} \\ -\bar{\bar{Y}} & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \bar{\bar{V}}(z) \\ \bar{\bar{I}}(z) \end{bmatrix} \quad (27)$$

Donde $\bar{\bar{A}}(z) = \begin{bmatrix} 0 & -\bar{\bar{Z}} \\ -\bar{\bar{Y}} & 0 \end{bmatrix}$ y $\bar{\bar{X}}(z) = \begin{bmatrix} \bar{\bar{V}}(z) \\ \bar{\bar{I}}(z) \end{bmatrix}$ tienen similitud con las ecuaciones de variables de estado usadas en sistemas de control automático, en esta identificación la variable independiente de las ecuaciones es z del eje de la línea y se adapta esta variable a las ecuaciones fasor de la línea de transmisión multiconductora. Ver Ecuación 28.

$$\bar{\bar{X}}(z_2) = \bar{\bar{\phi}}(z_2 - z_1) * \bar{\bar{X}}(z_1) \quad (28)$$

Donde $z_2 \geq z_1$ son puntos de posición dentro del devanado, $\bar{\bar{\phi}}_{ij}$ es la matriz de parámetros de cadena de $N \times N$. Ver Ecuación 29.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \bar{V}(z_2) \\ \bar{I}(z_2) \end{bmatrix}}_{\bar{X}(z_2)} = \underbrace{\begin{bmatrix} \bar{\phi}_{11}(z_2 - z_1) & \bar{\phi}_{12}(z_2 - z_1) \\ \bar{\phi}_{21}(z_2 - z_1) & \bar{\phi}_{22}(z_2 - z_1) \end{bmatrix}}_{\bar{\phi}(z_2 - z_1)} * \underbrace{\begin{bmatrix} \bar{V}(z_1) \\ \bar{I}(z_1) \end{bmatrix}}_{\bar{X}(z_1)} \quad (29)$$

Se determina que $z_2 = \mathcal{L}$ y $z_1 = 0$, así se obtiene la matriz de parámetros de cadena para la línea generalizada.

$$\begin{bmatrix} \bar{V}(\mathcal{L}) \\ \bar{I}(\mathcal{L}) \end{bmatrix} = \bar{\phi}(\mathcal{L}) * \begin{bmatrix} \bar{V}(0) \\ \bar{I}(0) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{V}(\mathcal{L}) \\ \bar{I}(\mathcal{L}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\phi}_{11}(\mathcal{L}) & \bar{\phi}_{12}(\mathcal{L}) \\ \bar{\phi}_{21}(\mathcal{L}) & \bar{\phi}_{22}(\mathcal{L}) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \bar{V}(0) \\ \bar{I}(0) \end{bmatrix}$$

Es necesario determinar las entradas en las submatrices de $N \times N$ de $\bar{\phi}_{ij}$; para ello se relacionan las corrientes y voltajes con los parámetros de impedancia y los parámetros de admitancia. La matriz de impedancia se representa:

$$\begin{bmatrix} \bar{V}(0) \\ \bar{V}(\mathcal{L}) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \bar{Z}_{11} & \bar{Z}_{12} \\ \bar{Z}_{21} & \bar{Z}_{22} \end{bmatrix}}_{Z(\mathcal{L})} * \begin{bmatrix} \bar{I}(0) \\ -\bar{I}(\mathcal{L}) \end{bmatrix}$$

La matriz de admitancia se representa:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}(0) \\ -\bar{I}(\mathcal{L}) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \bar{Y}_{11} & \bar{Y}_{12} \\ \bar{Y}_{21} & \bar{Y}_{22} \end{bmatrix}}_{Y(\mathcal{L})} * \begin{bmatrix} \bar{V}(0) \\ \bar{V}(\mathcal{L}) \end{bmatrix}$$

Las submatrices del parámetro de impedancia se definen al establecer las corrientes iguales a cero.

$$\begin{bmatrix} \bar{V}(0) \\ \bar{V}(\mathcal{L}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{11} * \bar{I}(0) - \bar{Z}_{12} * \bar{I}(\mathcal{L}) \\ \bar{Z}_{21} * \bar{I}(0) - \bar{Z}_{22} * \bar{I}(\mathcal{L}) \end{bmatrix}$$

Utilizando los valores de frontera o mejor llamadas las condiciones de Dirichlet.

$$\bar{V}(0) = -\bar{Z}_{12} * \bar{I}(\mathcal{L}) ; \text{cuando } \bar{I}(0) = 0$$

$$\bar{V}(\mathcal{L}) = \bar{Z}_{21} * \bar{I}(0); \text{cuando } \bar{I}(\mathcal{L}) = 0$$

$$\bar{V}(0) = \bar{Z}_{11} * \bar{I}(0) ; \text{cuando } \bar{I}(\mathcal{L}) = 0$$

$$\bar{V}(\mathcal{L}) = -\bar{Z}_{22} * \bar{I}(\mathcal{L}); \text{cuando } \bar{I}(0) = 0$$

En la matriz de parámetros de cadena se define $\bar{I}(0) = 0$

$$\begin{bmatrix} V(\mathcal{L}) \\ I(\mathcal{L}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\phi}_{11}(\mathcal{L}) * \bar{V}(0) + \bar{\phi}_{12}(\mathcal{L}) * \bar{I}(0) \\ \bar{\phi}_{21}(\mathcal{L}) * \bar{V}(0) + \bar{\phi}_{22}(\mathcal{L}) * \bar{I}(0) \end{bmatrix}$$

Utilizando los valores de frontera o mejor llamadas las condiciones de Dirichlet.

$$\bar{V}(\mathcal{L}) = \bar{\phi}_{11}(\mathcal{L}) * \bar{V}(0)$$

$$\bar{I}(\mathcal{L}) = \bar{\phi}_{21}(\mathcal{L}) * \bar{V}(0)$$

$$\bar{V}(\mathcal{L}) = -\bar{Z}_{22} * \bar{I}(\mathcal{L})$$

$$\bar{\phi}_{11}(\mathcal{L}) * \bar{V}(0) = -\bar{Z}_{22} * \bar{\phi}_{21}(\mathcal{L}) * \bar{V}(0)$$

$$\frac{\bar{\phi}_{11}(\mathcal{L}) * \bar{V}(0)}{\bar{\phi}_{21}(\mathcal{L}) * \bar{V}(0)} = -\bar{Z}_{22}$$

$$\bar{Z}_{22} = -\frac{\bar{\phi}_{11}(\mathcal{L})}{\bar{\phi}_{21}(\mathcal{L})}$$

$$\bar{Z}_{22} = -\bar{\phi}_{11}(\mathcal{L}) * \bar{\phi}_{21}^{-1}(\mathcal{L})$$

$$\bar{Z}_{22} = -\bar{\phi}_{22}(\mathcal{L}) * \bar{\phi}_{21}^{-1}(\mathcal{L})$$

$$\bar{Z}_{22} = -\bar{\phi}_{21}^{-1}(\mathcal{L})$$

Para tener la ecuación $\bar{Z}_{22} = -\bar{\phi}_{21}^{-1}(\mathcal{L})$ se presenta la igualdad $\bar{\phi}_{11} = \bar{\phi}_{22}$, esto se debe que la matriz de impedancia y admitancia son simétricas permitiendo reducir las expresiones de matrices grandes.

Se define $\bar{I}(\mathcal{L}) = 0$ para la ecuación $\begin{bmatrix} V(\mathcal{L}) \\ I(\mathcal{L}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\phi}_{11}(\mathcal{L}) * \bar{V}(0) + \bar{\phi}_{12}(\mathcal{L}) * \bar{I}(0) \\ \bar{\phi}_{21}(\mathcal{L}) * \bar{V}(0) + \bar{\phi}_{22}(\mathcal{L}) * \bar{I}(0) \end{bmatrix}$

$$\bar{I}(\mathcal{L}) = \bar{\phi}_{21}(\mathcal{L}) * \bar{V}(0) + \bar{\phi}_{22}(\mathcal{L}) * \bar{I}(0)$$

$$0 = \bar{\phi}_{21}(\mathcal{L}) * \bar{V}(0) + \bar{\phi}_{22}(\mathcal{L}) * \bar{I}(0)$$

$$-\frac{\bar{\phi}_{21}(\mathcal{L}) * \bar{V}(0)}{\bar{\phi}_{22}(\mathcal{L})} = \bar{I}(0)$$

$$-\bar{\phi}_{21}(\mathcal{L}) * \bar{V}(0) * \bar{\phi}_{22}(\mathcal{L})^{-1} = \bar{I}(0)$$

Para obtener $\bar{V}(\mathcal{L}) = \bar{Z}_{21} * \bar{I}(0)$ se deduce

$$\bar{V}(\mathcal{L}) = \bar{\phi}_{11}(\mathcal{L}) * \bar{V}(0) + \bar{\phi}_{12}(\mathcal{L}) * \bar{I}(0)$$

$$\bar{Z}_{21} * \bar{I}(0) = \bar{\phi}_{11}(\mathcal{L}) * \bar{V}(0) + \bar{\phi}_{12}(\mathcal{L}) * \bar{I}(0)$$

$$\bar{Z}_{21} = \frac{\bar{\phi}_{11}(\mathcal{L}) * \bar{V}(0)}{-\bar{\phi}_{21}(\mathcal{L}) * \bar{V}(0)} + \bar{\phi}_{12}(\mathcal{L})$$

$$\bar{Z}_{21} = \frac{\bar{\phi}_{11}(\mathcal{L}) * \bar{V}(0) * \bar{\phi}_{22}(\mathcal{L})}{-\bar{\phi}_{21}(\mathcal{L}) * \bar{V}(0)} + \bar{\phi}_{12}(\mathcal{L})$$

$$\bar{Z}_{21} = -\bar{\phi}_{21}^{-1}(\mathcal{L}) * \bar{\phi}_{11}(\mathcal{L}) * \bar{\phi}_{22}(\mathcal{L}) + \bar{\phi}_{12}(\mathcal{L})$$

$$\bar{Z}_{21} = \bar{\phi}_{12}(\mathcal{L}) * -\bar{\phi}_{21}^{-1}(\mathcal{L}) * \bar{\phi}_{11}(\mathcal{L}) * \bar{\phi}_{22}(\mathcal{L})$$

$$\bar{Z}_{21} = -\bar{\phi}_{21}^{-1}(\mathcal{L})$$

Para obtener $\bar{V}(0) = \bar{Z}_{11} * \bar{I}(0)$ se deduce

$$\bar{V}(0) = \bar{Z}_{11} * [-\bar{\phi}_{21}(\mathcal{L}) * \bar{\phi}_{22}(\mathcal{L})^{-1} * \bar{V}(0)]$$

$$\bar{Z}_{11} = \frac{\bar{V}(0)}{-\bar{\phi}_{21}(\mathcal{L}) * \bar{\phi}_{22}(\mathcal{L})^{-1} * \bar{V}(0)}$$

$$\bar{Z}_{11} = -\bar{\phi}_{21}^{-1}(\mathcal{L}) * \bar{\phi}_{22}(\mathcal{L})$$

$$\bar{Z}_{11} = -\bar{\phi}_{21}^{-1}(\mathcal{L}) * \bar{\phi}_{11}(\mathcal{L})$$

$\bar{Z}_{11} = \bar{Z}_{22}$ y $\bar{Z}_{12} = \bar{Z}_{21}$ son matrices recíprocas porque $\bar{\phi}_{11}(\mathcal{L}) = \bar{\phi}_{22}(\mathcal{L})$ y $\bar{\phi}_{12}(\mathcal{L}) = \bar{\phi}_{21}(\mathcal{L})$. Ver Anexo A.

La impedancia característica está representada por $\bar{Z}_c = \bar{Y}^{-1}(\mathcal{L}) * \bar{T}_1(\mathcal{L}) * \bar{\gamma}(\mathcal{L}) * \bar{T}_1^{-1}(\mathcal{L})$ y parten de las ecuaciones del telegrafista que son ecuaciones diferenciales de segundo orden. Ver Anexo B.

Dado el caso se tiene los elementos \bar{Z}_{11} y \bar{Z}_{12} de la matriz de parámetros de cadena de impedancia. Ver Ecuación 30 y 31.

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{11} &= \bar{Z}_{22} \\ \bar{Z}_{11} &= \bar{Y}^{-1}(\mathcal{L}) * \bar{T}_1(\mathcal{L}) * \bar{\gamma}(\mathcal{L}) * [e^{\bar{\gamma}(\mathcal{L})} - e^{-\bar{\gamma}(\mathcal{L})}]^{-1} [e^{\bar{\gamma}(\mathcal{L})} + e^{-\bar{\gamma}(\mathcal{L})}] * \bar{T}_1^{-1}(\mathcal{L}) \\ \bar{Z}_{11} &= \bar{Z}_c * [e^{\bar{\gamma}(\mathcal{L})} - e^{-\bar{\gamma}(\mathcal{L})}]^{-1} * [e^{\bar{\gamma}(\mathcal{L})} + e^{-\bar{\gamma}(\mathcal{L})}] \\ \bar{Z}_{11} &= \bar{Z}_c * \coth[\bar{\gamma}(\mathcal{L})]\end{aligned}\quad (30)$$

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{12} &= \bar{Z}_{21} \\ \bar{Z}_{12} &= 2 * \bar{Y}^{-1}(\mathcal{L}) * \bar{T}_1(\mathcal{L}) * \bar{\gamma}(\mathcal{L}) * [e^{\bar{\gamma}(\mathcal{L})} - e^{-\bar{\gamma}(\mathcal{L})}]^{-1} * \bar{T}_1^{-1}(\mathcal{L}) \\ \bar{Z}_{12} &= 2 * \bar{Z}_c * [e^{\bar{\gamma}(\mathcal{L})} - e^{-\bar{\gamma}(\mathcal{L})}]^{-1} \\ \bar{Z}_{12} &= \bar{Z}_c * \operatorname{csch}[\bar{\gamma}(\mathcal{L})]\end{aligned}\quad (31)$$

Como los parámetros de la matriz de admitancia son la inversa de los parámetros de la matriz de impedancia se tiene la admitancia característica. Ver Ecuación 32.

$$\begin{aligned}\bar{Y}_c &= \frac{1}{\bar{Z}_c} \\ \bar{Y}_c &= \frac{1}{\bar{Y}^{-1}(\mathcal{L}) * \bar{T}_1(\mathcal{L}) * \bar{\gamma}(\mathcal{L}) * \bar{T}_1^{-1}(\mathcal{L})} \\ \bar{Y}_c &= \bar{Y} * \bar{T}_1^{-1}(\mathcal{L}) * \bar{\gamma}^{-1}(\mathcal{L}) * \bar{T}_1(\mathcal{L})\end{aligned}\quad (32)$$

Entonces \bar{Y}_{11} y \bar{Y}_{12} son los parámetros de cadena de la matriz de admitancia. Ver Ecuación 33 y 34.

$$\begin{aligned}\bar{Y}_{11} &= \bar{Y} * \bar{T}_1^{-1}(\mathcal{L}) * \bar{\gamma}^{-1}(\mathcal{L}) * [e^{\bar{\gamma}(\mathcal{L})} - e^{-\bar{\gamma}(\mathcal{L})}]^{-1} * [e^{\bar{\gamma}(\mathcal{L})} + e^{-\bar{\gamma}(\mathcal{L})}] * \bar{T}_1 \\ \bar{Y}_{11} &= \bar{Y}_c * [e^{\bar{\gamma}(\mathcal{L})} - e^{-\bar{\gamma}(\mathcal{L})}]^{-1} * [e^{\bar{\gamma}(\mathcal{L})} + e^{-\bar{\gamma}(\mathcal{L})}] \\ \bar{Y}_{11} &= \bar{Y}_c * \coth[\bar{\gamma}(\mathcal{L})]\end{aligned}\quad (33)$$

$$\begin{aligned}\bar{Y}_{12} &= -2 * \bar{T}_I * [e^{\bar{\gamma}(\mathcal{L})} - e^{-\bar{\gamma}(\mathcal{L})}]^{-1} * \bar{\gamma}^{-1}(\mathcal{L}) * \bar{T}_I^{-1}(\mathcal{L}) * \bar{Y} \\ \bar{Y}_{12} &= -\bar{Y}_c * [e^{\bar{\gamma}(\mathcal{L})} - e^{-\bar{\gamma}(\mathcal{L})}]^{-1} \\ \bar{Y}_{12} &= -\bar{Y}_c * \operatorname{csch}[\bar{\gamma}(\mathcal{L})]\end{aligned}\quad (34)$$

Otra manera de hallar las ecuaciones de parámetros de cadena es por N capas dividiendo el devanado en grupo de espiras, por lo tanto cada capa representa una línea de transmisión. Este modelo de la línea multiconductora es un método comprobado y eficaz [41] , [42] , [43] para el estudio de transitorios, sobretensiones hasta transferencia de energía entre los devanados. Ver Figura 69.

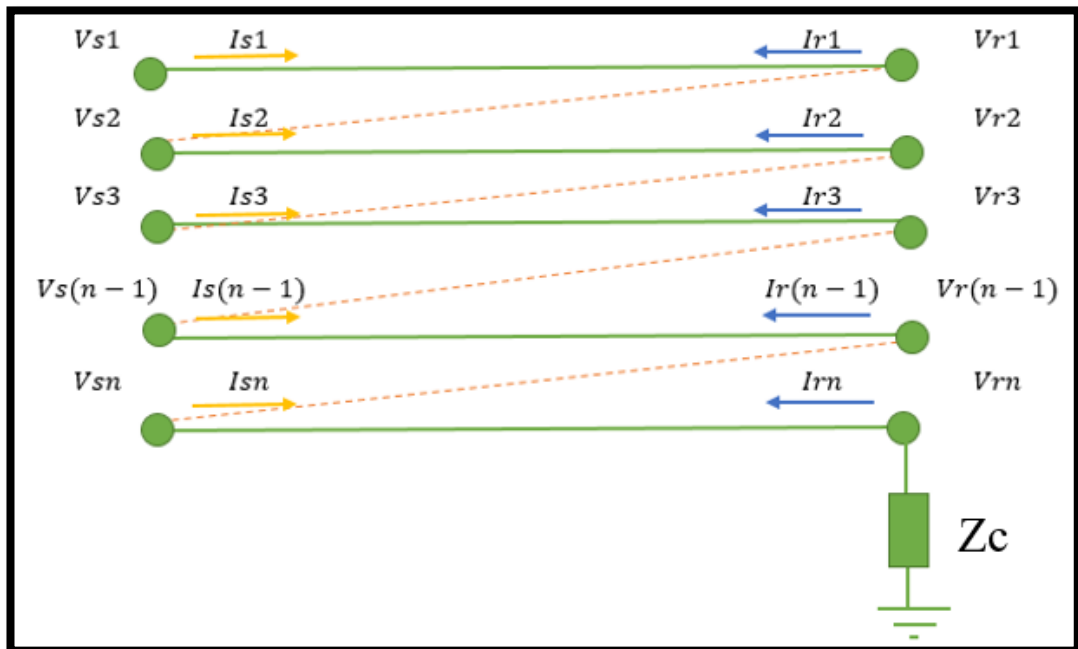


FIGURA 69: MODELO DE PARÁMETROS DISTRIBUIDOS BASADOS EN EL MODELO DE LA LINEA DE TRANSMISIÓN MULTICONDUCTORA PARA EL DEVANADO DEL TRANSFORMADOR [15].

Matemáticamente, la gráfica queda definida en parámetros distribuidos. Ver Ecuación 35.

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_s \\ \bar{I}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11} & \bar{Y}_{12} \\ \bar{Y}_{21} & \bar{Y}_{22} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \bar{V}_s \\ \bar{V}_r \end{bmatrix}\quad (35)$$

$$\begin{bmatrix} Is1 \\ Is2 \\ Is3 \\ \vdots \\ Ir1 \\ Ir2 \\ Ir3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11} & \bar{Y}_{12} \\ \bar{Y}_{21} & \bar{Y}_{22} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} Vs1 \\ Vs2 \\ Vs3 \\ \vdots \\ Vr1 \\ Vr2 \\ Vr3 \end{bmatrix}$$

$\bar{Y}_{11}, \bar{Y}_{12}, \bar{Y}_{21}, \bar{Y}_{22}$ son matrices de $N \times N$ donde N es el número de capas del devanado.

Observando la gráfica, se nota que las tensiones y corrientes son iguales en ciertos nodos ya que están compartidos.

$$Ir1 = -Is2; Ir2 = -Is3; \dots Ir(n-1) = -Isn; Irn = -\frac{Vrn}{Zc}$$

$$Vr1 = Vs2; Vr2 = Vs3; \dots Vr(n-1) = Vsn$$

Se procede con una reducción de matrices. Ver Ecuación 36.

$$\begin{bmatrix} Is1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = |F| * \begin{bmatrix} Vs1 \\ Vs2 \\ \vdots \\ Vsn \\ Vrn \end{bmatrix} \quad (36)$$

Donde F es una matriz con dimensiones $(N+1) * (N+1)$ que se genera después de la reducción, se conserva el voltaje $Vs1, Vsn$ y Vrn de la matriz de voltajes mientras que de la matriz de corrientes solo se conserva $Is1$ porque ya se considera la impedancia conectada al final de la N -ésima capa siendo $Is1 = \frac{Vrn}{Zc}$ por el comportamiento serie del circuito.

De la matriz solo se conoce $Vs1$, es necesario redistribuir las matrices y vectores para encontrar las demás variables.

$$\begin{bmatrix} I_{(1 \times 1)} \\ \text{Ceros}_{(N \times 1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F1_{(1 \times 1)} & F2_{(1 \times N)} \\ F3_{(N \times 1)} & F4_{(N \times N)} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V1_{(1 \times 1)} \\ V2_{(N \times 1)} \end{bmatrix}$$

Donde

$I_{(1 \times 1)} = Is1$, corriente del punto inicial del devanado

$\text{Ceros}_{(N \times 1)} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$, es una matriz de N ceros

$F1_{(1 \times 1)} = F11$, elemento de la matriz F

$F2_{(1 \times N)} = [F12 \quad F13 \quad F14 \quad \dots \quad F1, (n + 1)]$

$F3_{(N \times 1)} = \begin{bmatrix} F21 \\ \vdots \\ F(n + 1), 1 \end{bmatrix}$

$F4_{(N \times N)} = \begin{bmatrix} F22 & F2, (n + 1) \\ F(n + 1), 2 & F(n + 1), (n + 1) \end{bmatrix}$

$V1_{(1 \times 1)} = Vs1$, voltaje del punto inicial del devanado

$V2_{(N \times 1)} = \begin{bmatrix} Vs2 \\ \vdots \\ Vsn \\ Vrn \end{bmatrix}$, es la incógnita del modelo

Se resuelve la multiplicación de las matrices:

$$I_{(1 \times 1)} = F1_{(1 \times 1)} * V1_{(1 \times 1)} + F2_{(1 \times N)} * V2_{(N \times 1)}$$

$$Ceros_{(N \times 1)} = F3_{(N \times 1)} * V1_{(1 \times 1)} + F4_{(N \times N)} * V2_{(N \times 1)}$$

Despejando el factor $V1_{(1 \times 1)}$

$$I_{(1 \times 1)} - F2_{(1 \times N)} * V2_{(N \times 1)} = F1_{(1 \times 1)} * V1_{(1 \times 1)}$$

$$Ceros_{(N \times 1)} - F4_{(N \times N)} * V2_{(N \times 1)} = F3_{(N \times 1)} * V1_{(1 \times 1)}$$

Escribiendo en forma matricial

$$\begin{bmatrix} 1 & -F2_{(1 \times N)} \\ Cero_{(N \times 1)} & -F4_{(N \times N)} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_{(1 \times 1)} \\ V2_{(N \times 1)} \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} F1_{(1 \times 1)} & Ceros_{(1 \times N)} \\ F3_{(N \times 1)} & Ceros_{(N \times N)} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V1_{(1 \times 1)} \\ Ceros_{(N \times 1)} \end{bmatrix}$$

Reubicando según las variables que se necesitan

$$\begin{bmatrix} I_{(1 \times 1)} \\ V2_{(N \times 1)} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & -F2_{(1 \times N)} \\ Cero_{(N \times 1)} & -F4_{(N \times N)} \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} F1_{(1 \times 1)} & Ceros_{(1 \times N)} \\ F3_{(N \times 1)} & Ceros_{(N \times N)} \end{bmatrix}}_{FF} \\ * \begin{bmatrix} V1_{(1 \times 1)} \\ Ceros_{(N \times 1)} \end{bmatrix}$$

Resolviendo únicamente la multiplicación de matrices representada por FF

$$FF = \begin{bmatrix} 1 & -F2_{(1 \times N)} \\ \text{Cero}_{(N \times 1)} & -F4_{(N \times N)} \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} F1_{(1 \times 1)} & \text{Ceros}_{(1 \times N)} \\ F3_{(N \times 1)} & \text{Ceros}_{(N \times N)} \end{bmatrix}$$

$$FF = [FF_{(N+1 \times 1)} \quad \text{Ceros}_{(N+1 \times N)}]$$

Ahora queda

$$\begin{bmatrix} I_{(1 \times 1)} \\ V2_{(N \times 1)} \end{bmatrix} = [FF_{(N+1 \times N+1)}] * \begin{bmatrix} V1_{(1 \times 1)} \\ \text{Ceros}_{(N \times 1)} \end{bmatrix}$$

Que es lo mismo decir

$$\begin{bmatrix} I_{(1 \times 1)} \\ V2_{(N \times 1)} \end{bmatrix} = [H_{(N+1 \times 1)}] * [V1_{(1 \times 1)}]$$

H es la matriz nueva de los valores que quedan ya que solo se presentaron valores en la primera columna de la matriz FF . Se determina que es suficiente conocer la tensión de la fuente para hallar el voltaje en cada capa del devanado. Ver Ecuación 37.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Is1} \\ \mathbf{Vs2} \\ \vdots \\ \mathbf{Vsn} \\ \mathbf{Vrn} \end{bmatrix}_{(N+1,1)} = \begin{bmatrix} \mathbf{H11} \\ \mathbf{H21} \\ \mathbf{H}_{n,1} \\ \mathbf{H}_{n+1,1} \end{bmatrix}_{(N+1,1)} * [\mathbf{Vs1}] \quad (37)$$

Esta ecuación representa el devanado monofásico tipo capas de un transformador de distribución representado en la Figura 69.

3.3. Cálculo de los parámetros eléctricos del devanado monofásico del transformador de distribución

Al someter el transformador en altas frecuencias, se requiere parámetros eléctricos y para encontrar dichos valores se distinguen tres metodologías básicas:

- Aplicación de fórmulas teóricas que dependen de la configuración geométrica del devanado o ecuaciones experimentales a partir de mediciones.
- Determinación mediante pruebas de laboratorio con equipos especializados.
- Simulaciones matemáticas de campos electromagnéticos.

Indistintamente del método a usar, los parámetros que participan constantemente en este desarrollo son los inductivos, capacitivos, pérdidas de efecto piel y de proximidad, conductancia, impedancia y admitancia siendo cada uno de ellos dependientes de la frecuencia ya que en este dominio el análisis es más riguroso y exacto [18]. Para efectos de esta investigación se establecen los parámetros eléctricos por el método de aplicación de fórmulas teóricas siendo necesarios información muy detallada de la composición geométrica que solo está disponible para los fabricantes.

Típicamente, la forma constructiva de los devanados de los transformadores monofásicos de distribución es en capas en el que se va aglomerando conductor sobre conductor hasta completar la altura de la bobina, seguido de esto se coloca una lámina de papel diamantado y sobre ella se vuelve a aglomerar el conductor; este procedimiento se repite varias veces hasta completar el número de vueltas y capas obtenidos en los cálculos. Al final se aprecian capas de conductor, material aislante y ductos de ventilación en forma rectangular con puntas redondas (no es un cilindro de múltiples capas por la forma del núcleo); en este procedimiento el cable permanece continuo hasta que existe alguna derivación para el conmutador.

3.3.1. Cálculo de la matriz de capacitancia para devanado monofásico en capas

Se necesita dos elementos importantes para elaborar la matriz de capacitancias, el cálculo de capacitancia propia y mutua en cada capa usando la fórmula de los cilindros concéntricos y el cálculo de capacitancia a tierra con los valores equivalentes de cada capa.

Se efectúa el corte transversal de la bobina para apreciar la ubicación de cada una de las capacitancias propias y mutuas dentro del bobinado, es necesario conocer todos los valores para la aplicación de las respectivas fórmulas. Se tiene la capacitancia a tierra C_{HG} , la capacitancia serie o entre espiras C_S , la capacitancia entre capas C_{HH} y la capacitancia entre devanados de alta y baja C_{HL} . Ver Figura 70.

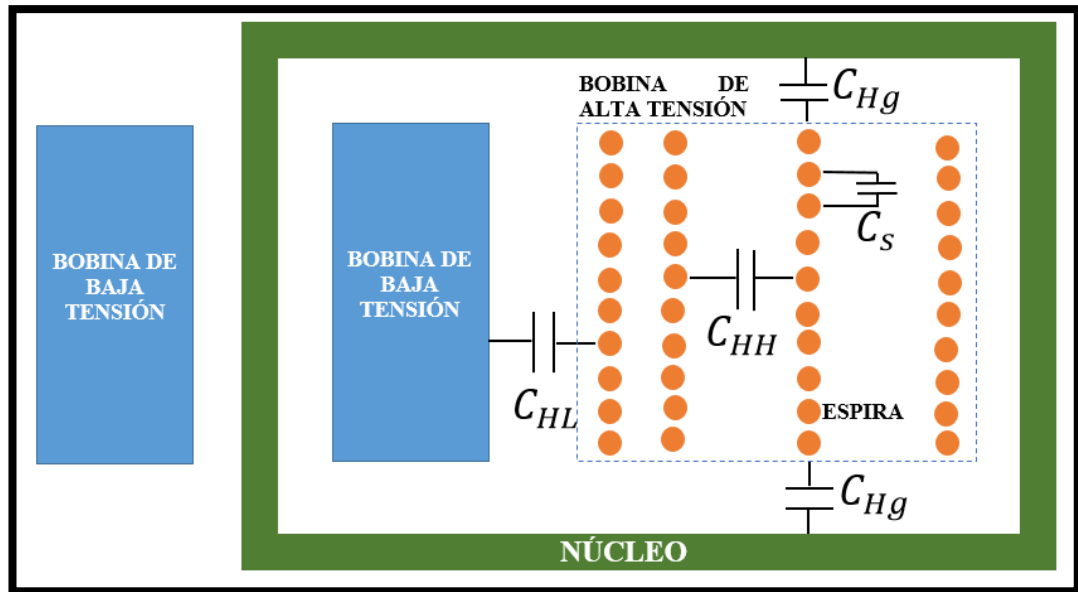


FIGURA 70: CORTE TRANSVERSAL CON EL DETALLE DE LAS DISTINTAS CAPACITANCIAS QUE INTERVIENEN EN EL DEVANADO DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN [15].

A continuación, se deduce la fórmula de capacitancia de cilindros concéntricos a partir de la carga eléctrica y el campo. Ver Ecuación 38.

$$\begin{aligned}
 Q &= \oint_s \vec{D}_s \cdot \vec{ds} \\
 Q &= D_s * \iint_{z=0}^{z=L} r \, d\theta \, dz \\
 Q &= D_s * r * \iint_0^L d\theta \, dz \\
 Q &= D_s * r * \left[\int_{\theta=0}^{\theta=2\pi} d\theta \right] * L \\
 Q &= D_s * r * 2\pi * L \\
 Q &= \epsilon * E * r * 2\pi * L \\
 \vec{E} &= \frac{Q}{2\pi * \epsilon * r * L} \vec{a}_r
 \end{aligned} \tag{38}$$

El voltaje está determinado por la carga eléctrica, altura y permitividad del material dieléctrico. Ver Ecuación 39.

$$\begin{aligned}
 V &= - \int_{\text{Punto final}}^{\text{Punto inicial}} \vec{E} \cdot d\vec{l} \\
 V &= - \int_{r_{i+1}}^{r_i} \frac{Q}{2\pi * \epsilon * r * h} a_r \cdot (dr a_r + r d\theta u_\theta + dz u_z) \\
 V &= - \int_{r_{i+1}}^{r_i} \frac{Q}{2\pi * \epsilon * r * h} dr \\
 V &= - \frac{Q}{2\pi * \epsilon * h} \int_{r_{i+1}}^{r_i} \frac{dr}{r} \\
 V &= - \frac{Q}{2\pi * \epsilon * h} [\ln(r_i) - \ln(r_{i+1})] \\
 V &= \frac{Q}{2\pi * \epsilon * h} \ln\left(\frac{r_{i+1}}{r_i}\right) \tag{39}
 \end{aligned}$$

La capacitancia es influida por el tipo de material usado. Ver Ecuación 40.

$$\begin{aligned}
 C &= \frac{Q}{V} \\
 C &= \frac{2\pi * \epsilon * h}{\ln\left(\frac{r_{i+1}}{r_i}\right)} \\
 C_{HH} &= \frac{2\pi * \epsilon_o * \epsilon_r * h}{\ln\left(\frac{r_{i+1}}{r_i}\right)} \tag{40}
 \end{aligned}$$

Donde r_i y $r_i + 1$ corresponden al radio interno y externo de la capa en la que se plasma el cálculo, h es la altura total de la bobina, ϵ_r es la permitividad relativa o constante dieléctrica del material aislante y ϵ_o es la permitividad dieléctrica del vacío [19].

Para calcular la capacitancia a tierra se hace un equivalente de todos los valores de las capacitancias por capa en el bobinado, las mismas que están en serie. Ver Ecuación 41.

$$C_{HG} = \left(\frac{1}{C_{HH1}} + \frac{1}{C_{HH2}} + \frac{1}{C_{HH3}} + \dots + \frac{1}{C_{HHN-1}} \right)^{-1} \tag{41}$$

Determinada la capacitancia entre capas y la capacitancia a tierra se procede a elaborar la matriz con una dimensión acorde al N número de capas del devanado.

Donde $C_{HH} = C_{H-G \text{ eq}} + C_{i,j} + C_{i,j-1}$ equivale a la suma la capacitancia a tierra de la capa más las capacitancias vecinas a la capa sobre el cual se plasma el cálculo.

3.3.2. Cálculo de la matriz de inductancia para devanado monofásico en capas

Para el cálculo de esta matriz se toma el método de la matriz de capacitancia inversa tomando en cuenta las longitudes de cada capa del transformador. Ver Ecuación 42 y 43.

$$\bar{L} = \frac{\bar{C}^{-1}}{v_s^2} * N_{\text{esp.x capa}}^2 * \bar{I}_{\text{turn}} \quad (42)$$

$$v_s = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (43)$$

De la ecuación anterior se tiene que $c = 3 \times 10^8 \left[\frac{m}{\text{seg}} \right]$ es la velocidad de la luz, ϵ_r es la permitividad relativa del material aislante entre las capas, $N_{\text{esp.x capa}}$ es el número de espiras por capa del devanado, \bar{I}_{turn} es una matriz de $n \times n$ elementos conformada por los cuadrados de las longitudes de cada capa considerando todas las capas del transformador.

3.3.3. Cálculo de la matriz de impedancia para devanado monofásico en capas

La matriz de impedancia se basa en las pérdidas de calor generadas por el conductor dentro del devanado siendo la resistividad del cobre el causante principal, entre las más importantes está el efecto piel provocado por la corriente variable circulante en los conductores dando paso a las corrientes de Eddy que se concentran en los segmentos más alejados del centro del conductor, estas pérdidas obedecen al incremento de la frecuencia en el estado transitorio mientras que el efecto de proximidad se da en los conductores contiguos energizados ya que el campo magnético de uno influye sobre el otro disminuyendo el área efectiva por la que circula la corriente eléctrica, esto aumenta las pérdidas en el conductor [15]. Ver Ecuación 44.

$$\bar{Z} = Z_{\text{skin}} + j * \omega * \bar{L} \quad (44)$$

\bar{L} es la matriz de inductancias y Z_{skin} son las pérdidas Joule combinadas del efecto piel y el efecto de proximidad. Ver Ecuación 45.

$$Z_{\text{skin}} = R_{\text{skin}} + j * \omega * L_{\text{skin}} = \sqrt{\frac{2 * \omega}{\sigma_{\text{cond}} * \mu_{\text{cond}} * d^2}}$$

$$\bar{Z} = \left(j * \omega + \sqrt{\frac{2 * \omega}{\sigma_{\text{cond}} * \mu_{\text{cond}} * d^2}} \right) * \bar{L} \quad (45)$$

Donde σ_{cond} es la conductividad del conductor del devanado, μ_{cond} es la permeabilidad magnética del conductor del devanado, ω es la frecuencia angular y d es la distancia entre capas.

3.3.4. Cálculo de la matriz de admitancia para devanado monofásico en capas

Se conoce que la matriz de admitancia está representada por las pérdidas dieléctricas. Ver Ecuación 46.

$$\bar{Y} = \bar{G} + j * \omega * \bar{C}$$

$$\bar{Y} = (\omega * \tan \delta * \bar{C}) + j * \omega * \bar{C}$$

$$\bar{Y} = (j * \omega + \omega * \tan \delta) * \bar{C} \quad (46)$$

Donde \bar{G} es una matriz cuadrada de conductancia representada por $\omega * \tan \delta * \bar{C}$ siendo $\tan \delta$ el tangente de pérdidas del aislamiento, ω es la frecuencia angular y \bar{C} la matriz de capacitancia.

El $\tan \delta$ se debe al movimiento de las moléculas dentro de un campo eléctrico y por los cambios de frecuencia provocados durante la operación, también conocido como factor de disipación. Ver Ecuación 47.

$$\tan \delta = \frac{\sigma_{\text{diel}}}{\omega * \epsilon_r} \quad (47)$$

Donde σ_{diel} es la conductividad del material dieléctrico, ω es la frecuencia angular y ϵ_r es la permitividad relativa del material aislante.

3.4. Validación del método para el cálculo de parámetros del modelo matemático aplicado

Con la finalidad de constatar que el modelo matemático aplicado en esta investigación tiene validez y concordancia, se efectúa una comparación de las matrices de capacitancia, inductancia, impedancia y admitancia del devanado de alta tensión con los datos obtenidos en [15] y [19] para comprobar que el procedimiento desarrollado en la sección 3.1 y 3.2 es correcto.

A continuación, se presenta en la tabla 11 la información requerida para implementar el modelo y todas las matrices de referencia y calculadas por los investigadores para obtener tablas del porcentaje de error de cada una.

TABLA 11: DATOS GEOMÉTRICOS Y DE CONSTRUCCIÓN DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 15KVA EN ESTUDIO [13].

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
POTENCIA	KVA	15
VOLTAJE DE ALTA TENSIÓN	V	6600
VOLTAJE DE BAJA TENSIÓN	V	69
NÚMERO DE CAPAS DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN	-	15
NÚMERO DE ESPIRAS POR CAPA DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN	-	200
RADIO INTERIOR DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN	mm	73.3
RADIO EXTERIOR DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN	mm	97.4
DIÁMETRO DEL CONDUCTOR DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN	mm	1.16
AISLAMIENTO DOBLE DEL CONDUCTOR DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN	mm	0.09
DISTANCIA ENTRE CAPAS	mm	0.182
ALTURA DE LA BOBINA	mm	250
PERMITIVIDAD DIELECTRICA PAPEL AISLANTE	-	4

Matriz de Capacitancia.

El porcentaje de error presente en cada uno de los valores está por debajo del 1% demostrado en la tabla 12.

TABLA 12: PORCENTAJE DE ERROR ENTRE LA MATRIZ DE CAPACITANCIA DE REFERENCIA [15] Y CALCULADA DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 15KVA EN ESTUDIO.

CAPACITANCIA (FARADIOS)	REFERENCIA	CALCULADA	ERROR (%)
CHH1	0.000000015249997	0.000000015259180	0.060218150133529
CHH2	0.000000015542747	0.000000015551931	0.059087491934640
CHH3	0.000000015835498	0.000000015844681	0.057992245804428
CHH4	0.000000016128248	0.000000016137432	0.056942895236567
CHH5	0.000000016420998	0.000000016430182	0.055930895838419
CHH6	0.000000016713748	0.000000016722933	0.054954288232656
CHH7	0.000000017006499	0.000000017015683	0.054005364468601
CHH8	0.000000017299240	0.000000017308434	0.053146342371035
CHH9	0.000000017591990	0.000000017601184	0.052264674704294
CHH10	0.000000017884740	0.000000017893935	0.051411825245884
CHH11	0.000000018177490	0.000000018186685	0.050586403796782
CHH12	0.000000018470250	0.000000018479436	0.049732940077862
CHH13	0.000000018763000	0.000000018772186	0.048959394753023
CHH14	0.000000019055750	0.000000019064937	0.048209582046099
CH-G eq (PARALELO)	0.000000001210000	0.830022961928623	0.830022961928623

Matriz de Inductancia.

El porcentaje de error en la tabla 15 está por debajo del 1% y en otros valores el porcentaje de error más alto es de 1.219% demostrado con las matrices de referencia y calculada en la tabla 13 y 14 respectivamente.

TABLA 13: MATRIZ DE INDUCTANCIA DE REFERENCIA DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN EN MILIHENRIOS DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 15KVA EN ESTUDIO [13].

0.951	0.985	1.019	1.054	1.090	1.126	1.163	1.201	1.240	1.280	1.321	1.362	1.405	1.448	1.493
0.948	1.008	1.043	1.079	1.116	1.153	1.191	1.230	1.270	1.311	1.353	1.395	1.439	1.483	1.528
0.945	1.005	1.068	1.104	1.142	1.180	1.219	1.259	1.300	1.341	1.384	1.427	1.472	1.517	1.564
0.943	1.003	1.065	1.129	1.167	1.206	1.246	1.287	1.329	1.371	1.415	1.459	1.505	1.551	1.599
0.941	1.000	1.062	1.126	1.193	1.233	1.273	1.315	1.358	1.401	1.446	1.491	1.538	1.585	1.634
0.938	0.998	1.060	1.124	1.190	1.259	1.300	1.343	1.386	1.431	1.476	1.523	1.570	1.619	1.668
0.937	0.996	1.058	1.121	1.188	1.256	1.327	1.371	1.415	1.460	1.507	1.554	1.603	1.652	1.703
0.935	0.994	1.056	1.120	1.186	1.254	1.325	1.398	1.443	1.490	1.537	1.585	1.635	1.685	1.737
0.934	0.993	1.054	1.118	1.184	1.252	1.323	1.396	1.471	1.519	1.567	1.616	1.667	1.718	1.771
0.932	0.992	1.053	1.116	1.182	1.251	1.321	1.394	1.470	1.548	1.597	1.647	1.698	1.751	1.804
0.931	0.991	1.052	1.115	1.181	1.249	1.320	1.393	1.468	1.546	1.626	1.678	1.73	1.783	1.838
0.931	0.990	1.051	1.114	1.180	1.248	1.319	1.392	1.467	1.545	1.625	1.708	1.761	1.816	1.871
0.930	0.989	1.050	1.114	1.179	1.247	1.318	1.391	1.466	1.544	1.624	1.707	1.792	1.848	1.904
0.930	0.989	1.050	1.113	1.179	1.247	1.317	1.390	1.465	1.543	1.623	1.706	1.792	1.880	1.973
0.930	0.989	1.050	1.113	1.179	1.247	1.317	1.390	1.465	1.543	1.623	1.706	1.791	1.879	1.970

La matriz está representada en mili henrios (1×10^{-3})

TABLA 14: MATRIZ DE INDUCTANCIA CALCULADA DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN EN MILIHENRIOS DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 15KVA EN ESTUDIO.

0.942	0.976	1.010	1.045	1.081	1.117	1.153	1.191	1.230	1.270	1.311	1.351	1.394	1.437	1.482
0.939	0.999	1.034	1.070	1.107	1.143	1.181	1.220	1.260	1.300	1.342	1.384	1.428	1.472	1.517
0.936	0.996	1.059	1.095	1.132	1.170	1.209	1.249	1.289	1.330	1.373	1.416	1.461	1.506	1.553
0.934	0.994	1.056	1.119	1.157	1.196	1.236	1.276	1.318	1.360	1.404	1.448	1.493	1.539	1.587
0.930	0.988	1.050	1.113	1.179	1.217	1.255	1.299	1.343	1.386	1.432	1.477	1.524	1.571	1.620
0.929	0.989	1.051	1.114	1.180	1.249	1.289	1.332	1.375	1.420	1.464	1.511	1.558	1.607	1.656
0.928	0.987	1.049	1.111	1.178	1.246	1.316	1.360	1.404	1.448	1.492	1.542	1.591	1.640	1.691
0.926	0.985	1.047	1.110	1.176	1.244	1.314	1.387	1.432	1.478	1.525	1.573	1.623	1.672	1.724
0.925	0.984	1.045	1.108	1.174	1.241	1.312	1.385	1.459	1.507	1.555	1.604	1.654	1.705	1.758
0.923	0.983	1.044	1.106	1.172	1.240	1.310	1.383	1.458	1.536	1.585	1.634	1.685	1.738	1.791
0.922	0.982	1.042	1.105	1.171	1.238	1.309	1.382	1.456	1.534	1.613	1.665	1.717	1.770	1.825
0.922	0.981	1.041	1.104	1.170	1.237	1.308	1.381	1.455	1.533	1.612	1.695	1.748	1.803	1.858
0.921	0.980	1.040	1.104	1.169	1.236	1.307	1.380	1.454	1.532	1.611	1.694	1.779	1.835	1.891
0.921	0.980	1.040	1.103	1.169	1.236	1.306	1.379	1.453	1.531	1.610	1.693	1.779	1.867	1.960
0.921	0.980	1.040	1.103	1.169	1.236	1.306	1.379	1.453	1.531	1.610	1.693	1.778	1.866	1.956

La matriz está representada en mili henrios (1×10^{-3})

TABLA 15: PORCENTAJE DE ERROR ENTRE LA MATRIZ DE INDUCTANCIA DE LA TABLA 8 Y LA CALCULADA DE LA TABLA 9.

0.910	0.887	0.873	0.854	0.844	0.844	0.834	0.824	0.815	0.805	0.795	0.786	0.769	0.753	0.730
0.928	0.884	0.872	0.853	0.842	0.841	0.831	0.821	0.819	0.809	0.798	0.789	0.771	0.755	0.733
0.942	0.898	0.861	0.851	0.841	0.839	0.829	0.818	0.815	0.805	0.795	0.785	0.768	0.751	0.729
0.953	0.909	0.873	0.850	0.840	0.829	0.827	0.824	0.813	0.802	0.799	0.781	0.771	0.754	0.732
1.219	1.181	1.168	1.181	1.215	1.290	1.398	1.247	1.141	1.056	0.996	0.946	0.910	0.883	0.857
0.968	0.924	0.887	0.863	0.840	0.818	0.815	0.812	0.808	0.804	0.793	0.781	0.771	0.754	0.731
0.972	0.929	0.898	0.874	0.850	0.828	0.814	0.810	0.806	0.801	0.989	0.779	0.767	0.751	0.728
0.976	0.933	0.900	0.875	0.852	0.837	0.823	0.801	0.797	0.792	0.787	0.776	0.765	0.748	0.725
0.979	0.936	0.901	0.877	0.861	0.847	0.824	0.809	0.795	0.790	0.785	0.774	0.762	0.745	0.723
0.982	0.938	0.902	0.887	0.863	0.847	0.833	0.818	0.803	0.782	0.776	0.771	0.760	0.742	0.721
0.984	0.940	0.913	0.888	0.864	0.849	0.833	0.818	0.804	0.789	0.775	0.763	0.751	0.740	0.718
0.984	0.941	0.913	0.889	0.864	0.849	0.834	0.826	0.811	0.796	0.782	0.761	0.750	0.732	0.711
0.985	0.942	0.914	0.889	0.865	0.850	0.842	0.827	0.812	0.797	0.782	0.762	0.742	0.725	0.704
0.985	0.942	0.914	0.889	0.865	0.850	0.843	0.827	0.812	0.804	0.783	0.768	0.742	0.718	0.684
0.986	0.943	0.914	0.889	0.874	0.858	0.843	0.827	0.812	0.804	0.783	0.768	0.748	0.718	0.690

Matriz de Impedancia.

En esta matriz se manejan números complejos lo cual complica el cálculo de error, por medio de la observación de la matriz de referencia y calculada se nota una variación muy pequeña en los datos, se deduce que el porcentaje de error presente está por debajo del 1% y en otros valores el porcentaje de error más alto es de 1.219% ya que esta matriz se genera a partir de la matriz de inductancia en la que se constató previamente el porcentaje de error. Ver tabla 16 y 17.

TABLA 16: MATRIZ DE IMPEDANCIA DE REFERENCIA DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN EN OHMS DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 15KVA EN ESTUDIO [13].

0.756+598j	0.783+619j	0.81+640j	0.838+662j	0.867+685j	0.895+707j	0.925+731j	0.955+755j	0.986+779j	1.018+804j	1.05+830j	1.083+856j	1.117+883j	1.151+910j	1.187+938j
0.754+596j	0.802+633j	0.829+655j	0.858+678j	0.887+701j	0.917+724j	0.947+748j	0.978+773j	1.01+798j	1.042+824j	1.076+850j	1.109+877j	1.144+904j	1.179+932j	1.215+960j
0.751+594j	0.799+631j	0.849+671j	0.878+694j	0.908+718j	0.938+741j	0.969+766j	1.001+791j	1.034+817j	1.066+843j	1.101+870j	1.135+897j	1.171+925j	1.206+953j	1.244+983j
0.750+593j	0.798+630j	0.847+669j	0.898+709j	0.928+733j	0.959+758j	0.991+783j	1.023+809j	1.057+835j	1.09+861j	1.125+889j	1.16+917j	1.197+946j	1.233+975j	1.271+1005j
0.748+591j	0.795+628j	0.844+667j	0.895+707j	0.949+750j	0.98+775j	1.012+800j	1.046+826j	1.08+853j	1.114+880j	1.15+909j	1.186+937j	1.223+966j	1.26+996j	1.299+1027j
0.746+589j	0.794+627j	0.843+666j	0.894+706j	0.946+748j	1.001+791j	1.034+817j	1.068+844j	1.102+871j	1.138+899j	1.174+927j	1.211+957j	1.248+986j	1.287+1017j	1.326+1048j
0.745+589j	0.792+626j	0.841+665j	0.891+704j	0.945+746j	0.999+789j	1.055+834j	1.09+861j	1.125+889j	1.161+917j	1.198+947j	1.236+976j	1.275+1007j	1.314+1038j	1.354+1070j
0.743+587j	0.79+625j	0.84+664j	0.891+704j	0.943+745j	0.997+788j	1.054+833j	1.112+878j	1.147+907j	1.185+936j	1.222+966j	1.26+996j	1.3+1027j	1.34+1059j	1.381+1091j
0.743+587j	0.79+624j	0.838+662j	0.889+702j	0.941+744j	0.996+787j	1.052+831j	1.11+877j	1.17+924j	1.208+954j	1.246+985j	1.285+1015j	1.326+1047j	1.366+1079j	1.408+1113j
0.741+586j	0.789+623j	0.837+662j	0.887+701j	0.94+743j	0.995+786j	1.05+830j	1.108+876j	1.169+924j	1.231+973j	1.27+1003j	1.31+1035j	1.35+1067j	1.392+1100j	1.435+1133j
0.740+585j	0.788+623j	0.837+661j	0.887+701j	0.939+742j	0.993+785j	1.05+829j	1.108+875j	1.167+922j	1.229+971j	1.293+1022j	1.334+1054j	1.376+1087j	1.418+1120j	1.462+1155j
0.740+585j	0.787+622j	0.836+660j	0.886+700j	0.938+741j	0.992+784j	1.049+829j	1.107+875j	1.167+922j	1.229+971j	1.292+1021j	1.358+1073j	1.4+1106j	1.444+1141j	1.488+1176j
0.740+584j	0.786+621j	0.835+660j	0.886+700j	0.938+741j	0.992+784j	1.048+828j	1.106+874j	1.166+921j	1.228+970j	1.291+1020j	1.357+1073j	1.425+1126j	1.469+1161j	1.514+1196j
0.740+584j	0.786+621j	0.835+660j	0.885+699j	0.938+741j	0.992+784j	1.047+827j	1.105+873j	1.165+920j	1.227+969j	1.291+1020j	1.357+1072j	1.425+1126j	1.495+1181j	1.569+1240j
0.740+584j	0.786+621j	0.835+660j	0.885+699j	0.938+741j	0.992+784j	1.047+827j	1.105+873j	1.165+920j	1.227+969j	1.291+1020j	1.357+1072j	1.424+1125j	1.494+1181j	1.567+1238j

La matriz está representada en ohmios.

TABLA 17: MATRIZ DE IMPEDANCIA CALCULADA DEL DEVANADO DE ALTA TENSION EN OHMS DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 15KVA EN ESTUDIO.

0.749+592j	0.776+613j	0.803+635j	0.831+657j	0.859+679j	0.888+702j	0.917+725j	0.947+748j	0.978+773j	1.01+798j	1.042+823j	1.075+849j	1.109+876j	1.143+903j	1.178+931j
0.747+590j	0.794+628j	0.822+650j	0.851+672j	0.88+695j	0.909+718j	0.939+742j	0.97+766j	1.002+791j	1.034+817j	1.067+843j	1.101+870j	1.135+897j	1.17+925j	1.206+953j
0.744+588j	0.792+626j	0.842+665j	0.87+688j	0.9+711j	0.93+735j	0.961+760j	0.993+785j	1.025+810j	1.058+836j	1.092+863j	1.126+890j	1.161+918j	1.197+946j	1.235+975j
0.743+587j	0.79+624j	0.839+663j	0.89+703j	0.92+727j	0.951+751j	0.983+776j	1.015+802j	1.048+828j	1.081+854j	1.116+882j	1.151+910j	1.188+938j	1.224+967j	1.262+997j
0.739+584j	0.786+621j	0.835+659j	0.885+699j	0.937+740j	0.968+765j	0.998+789j	1.033+816j	1.068+844j	1.102+871j	1.138+900j	1.174+928j	1.212+958j	1.249+987j	1.288+1018j
0.739+584j	0.786+621j	0.835+660j	0.886+700j	0.938+741j	0.993+785j	1.025+810j	1.059+837j	1.093+864j	1.129+892j	1.164+920j	1.202+949j	1.239+979j	1.278+1010j	1.317+1040j
0.738+583j	0.785+620j	0.834+659j	0.884+698j	0.937+740j	0.99+783j	1.047+827j	1.081+854j	1.116+882j	1.152+910j	1.189+939j	1.226+969j	1.265+999j	1.304+1030j	1.344+1062j
0.736+582j	0.783+619j	0.832+658j	0.883+698j	0.935+739j	0.989+781j	1.045+826j	1.103+871j	1.138+899j	1.175+929j	1.213+958j	1.251+988j	1.29+1019j	1.33+1051j	1.371+1083j
0.735+581j	0.782+618j	0.831+656j	0.881+696j	0.933+738j	0.987+780j	1.043+824j	1.101+870j	1.16+917j	1.198+947j	1.236+977j	1.275+1007j	1.315+1039j	1.356+1071j	1.398+1105j
0.734+580j	0.781+617j	0.83+656j	0.88+695j	0.932+736j	0.986+779j	1.042+823j	1.099+869j	1.16+916j	1.221+965j	1.26+996j	1.3+1027j	1.34+1059j	1.382+1092j	1.424+1125j
0.733+579j	0.781+617j	0.829+655j	0.879+694j	0.931+736j	0.985+778j	1.041+822j	1.099+868j	1.158+915j	1.22+964j	1.283+1014j	1.324+1046j	1.365+1079j	1.407+1112j	1.451+1147j
0.733+579j	0.78+616j	0.828+654j	0.878+694j	0.93+735j	0.984+777j	1.04+822j	1.098+867j	1.157+914j	1.219+963j	1.282+1013j	1.348+1065j	1.39+1098j	1.433+1133j	1.477+1167j
0.732+579j	0.779+616j	0.827+654j	0.878+694j	0.929+734j	0.983+777j	1.039+821j	1.097+867j	1.156+914j	1.218+962j	1.281+1012j	1.347+1064j	1.414+1118j	1.459+1153j	1.503+1188j
0.732+579j	0.779+616j	0.827+654j	0.877+693j	0.929+734j	0.983+777j	1.038+821j	1.096+866j	1.155+913j	1.217+962j	1.28+1012j	1.346+1064j	1.414+1118j	1.484+1173j	1.558+1231j
0.732+579j	0.779+616j	0.827+654j	0.877+693j	0.929+734j	0.983+777j	1.038+821j	1.096+866j	1.155+913j	1.217+962j	1.28+1012j	1.346+1064j	1.414+1117j	1.483+1172j	1.556+1229j

La matriz está representada en ohmios.

Matriz de Admitancia.

En esta matriz se manejan números complejos lo cual complica el cálculo de error, por medio de la observación de la matriz de referencia y calculada se nota una variación muy pequeña en los datos, se deduce que el porcentaje de error presente está por debajo del 1% ya que esta matriz se genera a partir de la matriz de capacitancia en la que se constató previamente el porcentaje de error. Ver tabla 18 y 19.

TABLA 18: MATRIZ DE ADMITANCIA DE REFERENCIA DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN EN SIEMENS DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 15KVA EN ESTUDIO [13].

2.06+10342j	-1.91-9582j	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-1.91-9582j	4+20108j	-1.94-9766j	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-1.94-9766j	4.08+20476j	-1.98-9950j	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	-1.98-9950j	4.15+20844j	-2.02-10134j	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	-2.02-10134j	4.22+21212j	-2.05-10318j	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	-2.05-10318j	4.3+21579j	-2.09-10502j	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	-2.09-10502j	4.37+21947j	-2.13-10685j	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	-2.13-10685j	4.44+22315j	-2.16-10869j	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	-2.16-10869j	4.52+22683j	-2.2-11053j	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	-2.2-11053j	4.59+23051j	-2.24-11237j	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2.24-11237j	4.66+23419j	-2.27-11421j	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2.27-11421j	4.74+23787j	-2.31-11605j	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2.31-11605j	4.81+24155j	-2.35-11789j	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2.35-11789j	4.88+24522j	-2.38-11973j	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2.38-11973j	2.38+11973j

La matriz está representada en Siemens, la parte real en zepto Siemens (1×10^{-21}) y la parte imaginaria en micro Siemens (1×10^{-6})

TABLA 19: MATRIZ DE ADMITANCIA CALCULADA DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN EN SIEMENS DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 15KVA EN ESTUDIO.

2.06+10354j	-1.91-9588j	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-1.91-9588j	4.01+20126j	-1.95-9772j	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-1.95-9772j	4.08+20494j	-1.98-9956j	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	-1.98-9956j	4.15+20862j	-2.02-10139j	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	-2.02-10139j	4.23+21229j	-2.06-10323j	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	-2.06-10323j	4.3+21597j	-2.09-10507j	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	-2.09-10507j	4.37+21965j	-2.13-10691j	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	-2.13-10691j	4.45+22333j	-2.17-10875j	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	-2.17-10875j	4.52+22701j	-2.2-11059j	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	-2.2-11059j	4.59+23069j	-2.24-11243j	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2.24-11243j	4.67+23437j	-2.28-11427j	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2.28-11427j	4.74+23805j	-2.31-11611j	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2.31-11611j	4.81+24172j	-2.35-11795j	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2.35-11795j	4.89+24540j	-2.39-11979j	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2.39-11979j	2.39+11979j	0

La matriz está representada en Siemens, la parte real en zepto Siemens (1×10^{-21}) y la parte imaginaria en micro Siemens (1×10^{-6})

Al finalizar las matrices se aplica el análisis matemático en el dominio de la frecuencia para encontrar la matriz de admitancia de parámetros de cadena con dimensiones de 30x30, dicha matriz se resuelve algebraicamente para reducirla a dimensiones de 15x1. Cada elemento de la matriz (denominada H) representa una capa del devanado de alta tensión en el dominio de la frecuencia y a estos valores se multiplica una señal pulso con frente de onda de $0.2\mu\text{s}$, esta señal es considerada como un transitorio impulsivo de frecuencia rápida. La señal aplicada es tipo escalón con voltaje de 50V vista en un intervalo de 0 a $3\mu\text{s}$ que se utiliza para las simulaciones y la parte experimental usando un valor reducido de voltaje para tener mejor visualización de la respuesta transitoria en el equipo de medición. Ver Figura 71.

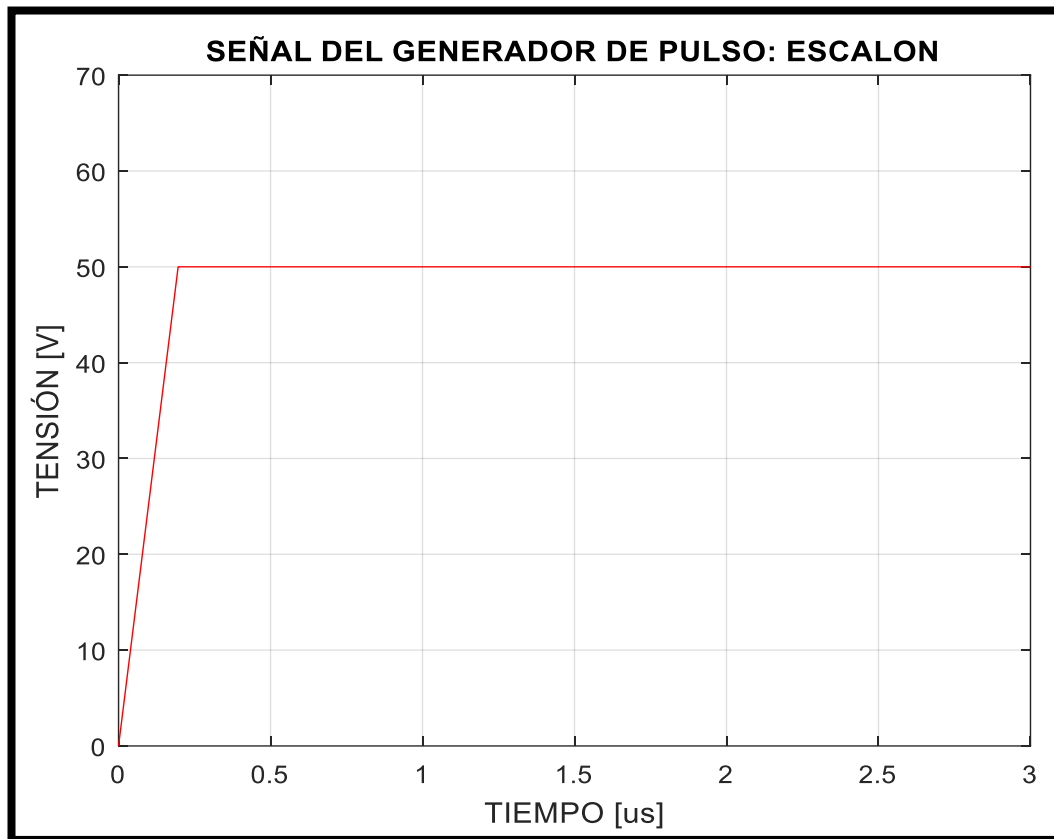


FIGURA 71: FORMA DE ONDA TIPO ESCALÓN APLICADA AL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 15 KVA EN ESTUDIO. APLICACIÓN DE LA RECOMENDACIÓN [16].

Al pasar del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo se tienen las siguientes respuestas transitorias tomadas de las capas pares que conforman el devanado de alta tensión del transformador de distribución de 15KVA. Ver Figura 72.

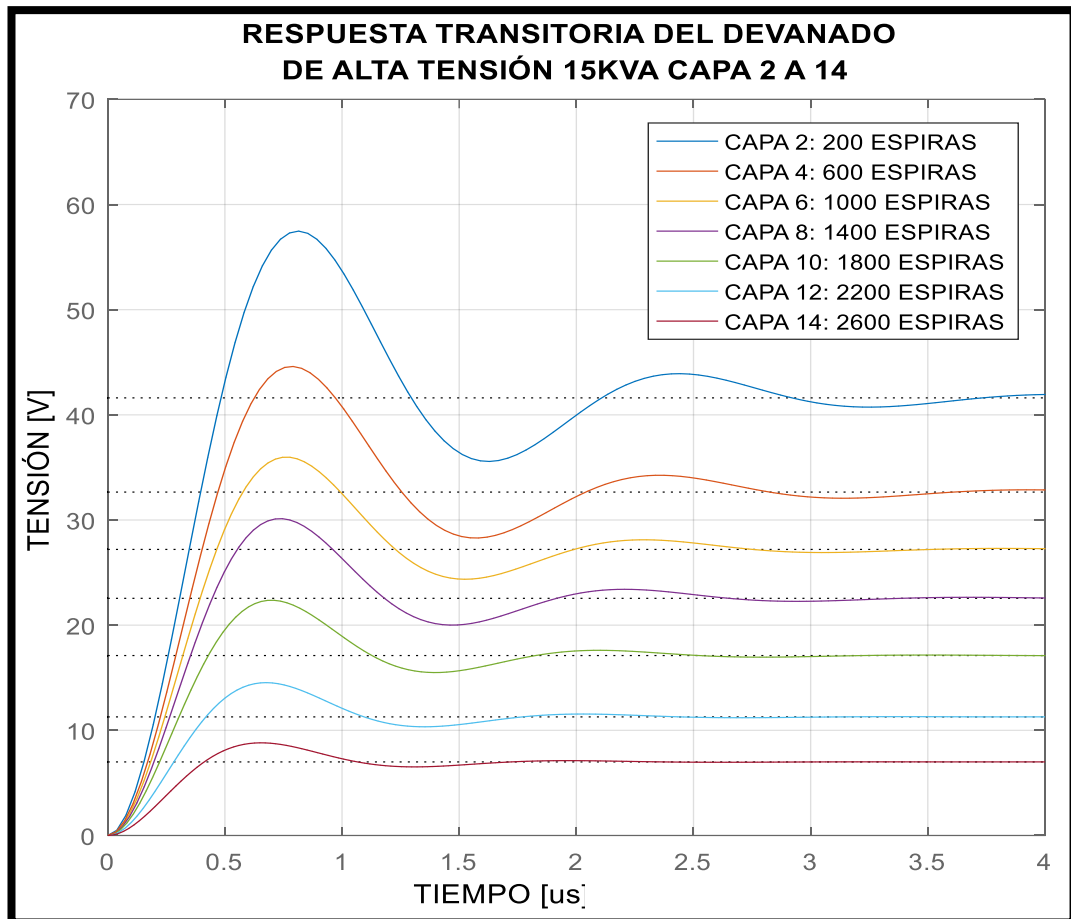


FIGURA 72: RESPUESTA TRANSITORIA DE VOLTAJE EN LA CAPA 2, 4, 6, 8, 10, 12, Y 14 DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN CALCULADAS AL APLICAR EL PULSO RÁPIDO TIPO ESCALÓN (TRANSFORMADOR 15KVA EN ESTUDIO).

Los picos de sobreimpulso calculados de cada capa se presentan en la tabla 20. Ver Figura 73.

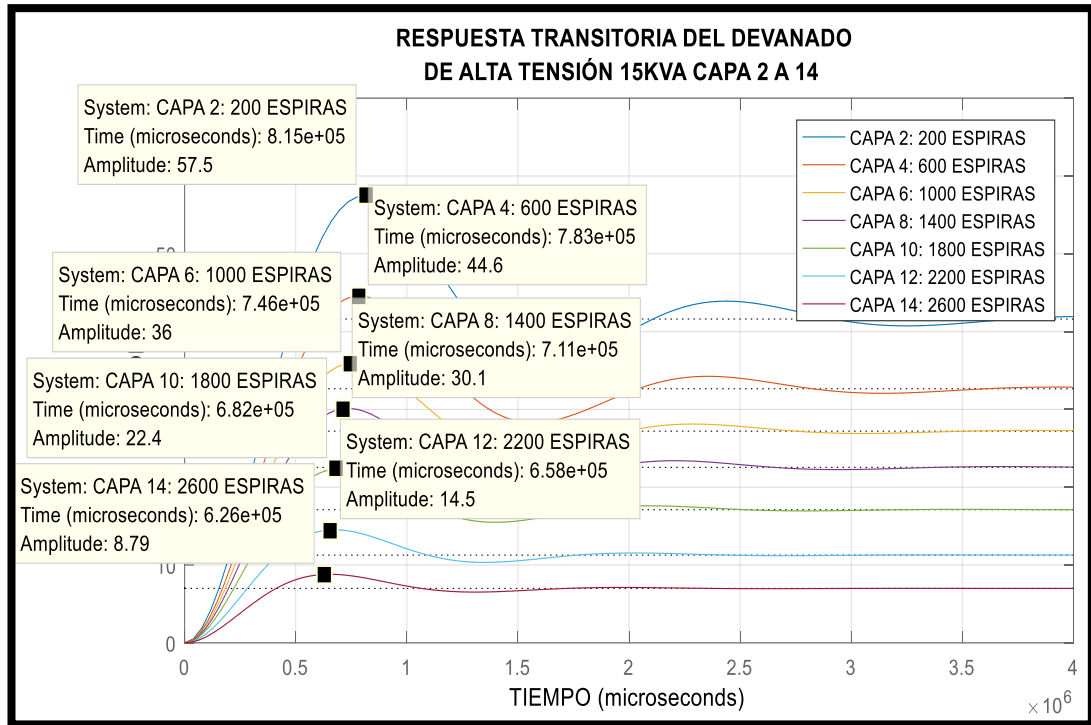


FIGURA 73: VOLTAJES DE SOBREPULSO DE CADA CAPA DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN AL APLICAR EL PULSO ESCALÓN (TRANSFORMADOR 15KVA EN ESTUDIO).

TABLA 20: VALORES CALCULADOS DE LOS PICOS DEL SOBREPULSO DE LAS CAPAS 2, 4, 6, 8, 10, 12 Y 14 DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN (TRANSFORMADOR 15KVA EN ESTUDIO).

VALORES CALCULADOS	
CAPAS DEL DEVANADO ALTA TENSIÓN	VOLTAJE DE SOBREPULSO (V)
2	57.5
4	44.6
6	36
8	30.1
10	22.4
12	14.5
14	8.79

En la gráfica se aprecian dos tipos de señales, se escoge la señal Linv de línea entre cortada que hace referencia a una matriz de inductancia calculada con el método de la matriz de capacitancia inversa. Ver Figura 74.

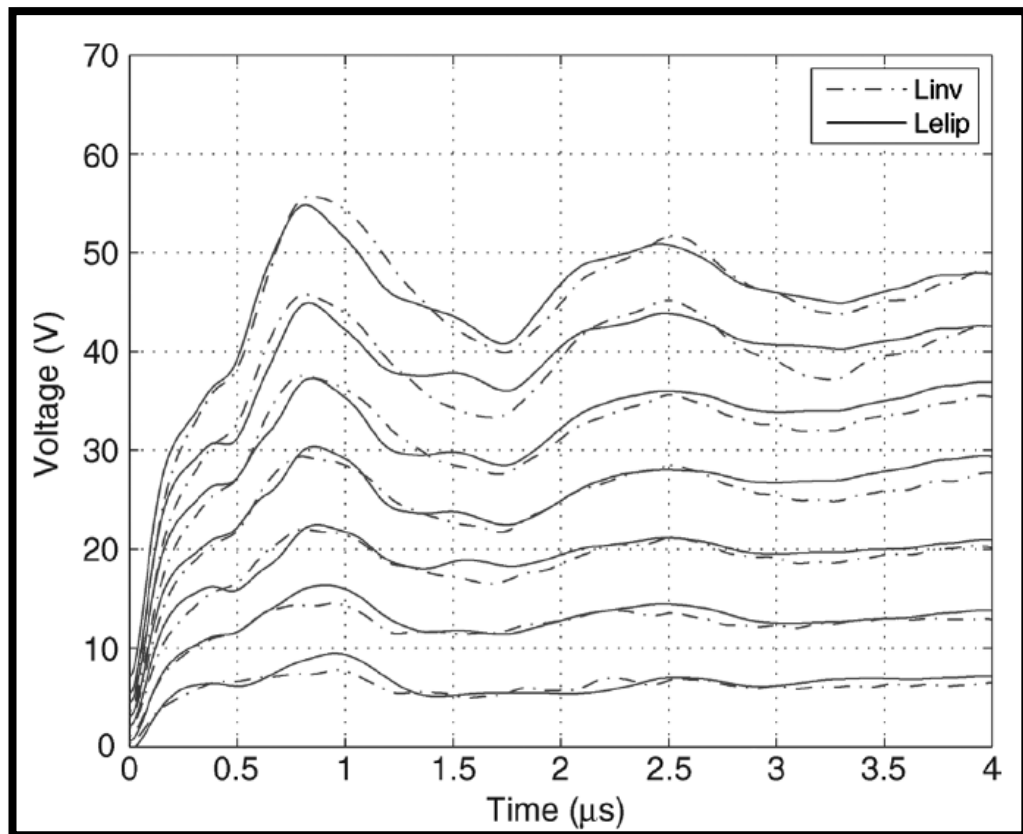


FIGURA 74: COMPARACIÓN DE LOS VOLTAJES DE LA CAPA 2 HASTA 14 USANDO AMBOS TIPOS DE MATRICES DE INDUCTANCIA (TRANSFORMADOR 15KVA EN ESTUDIO) [15].

Los valores aproximados de los picos de sobreimpulso de cada capa (se toma como referencia las señales de Linv) de la figura 74 se presentan en la tabla 21.

TABLA 21: VALORES DE REFERENCIA DE LOS PICOS DEL SOBREPULSO DE LAS CAPAS 2, 4, 6, 8, 10, 12 Y 14 DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN (TRANSFORMADOR 15KVA EN ESTUDIO).

VALORES DE REFERENCIA	
CAPAS DEL DEVANADO ALTA TENSIÓN	VOLTAJE DE SOBREPULSO (V)
2	55
4	46
6	38
8	30
10	23
12	14
14	8.5

Realizando una comparación visual y numérica de la Figura 72 que es resultado de la simulación desarrollada por los investigadores de este trabajo y la Figura 74 que es el resultado de la simulación de la referencia, tomando en consideración que la resolución de la matriz de inductancia es usando el método de la matriz de capacitancia inversa se llega a la conclusión que el análisis matemático de este trabajo ha sido correctamente aplicado y estudiado como se muestra en la tabla 22.

TABLA 22: PORCENTAJE DE ERROR DE LOS VOLTAJES DE SOBREPULSO DE REFERENCIA Y LOS CALCULADOS (TRANSFORMADOR 15KVA EN ESTUDIO).

CAPAS DEL DEVANADO ALTA TENSIÓN	VOLTAJE DE SOBREPULSO CALCULADO (V)	VOLTAJE DE SOBREPULSO DE REFERENCIA (V)	ERROR RELATIVO (%)
2	57.5	55	4.3478
4	44.6	46	3.1390
6	36	38	5.5555
8	30.1	30	0.3322
10	22.4	23	0.0267
12	14.5	14	3.4482
14	8.79	8.5	3.2992

En las figuras 72 y 74 se muestra un comportamiento bastante parecido a las respuestas transitorias alcanzadas por [15] determinando que al introducirse una señal tipo escalón con frente de onda de $0.2\mu\text{s}$ se obtiene una señal de voltaje oscilatoria que se estabiliza. Como las respuestas obtenidas en este trabajo son satisfactorias se utiliza el modelo planteado en la sección 3.1 y 3.2 de este trabajo para ejecutarlo con el diseño de un transformador monofásico de distribución de 3 kVA y de 15 kVA perteneciente al Laboratorio de Alta Tensión.

3.5. Implementación del análisis matemático en GUIDE de MATLAB®

La resolución de los parámetros eléctricos del transformador se efectúa en EXCEL® por la facilidad de crear las matrices en distintas frecuencias. En MATLAB® se desarrolla un código para cargar la información que está en el dominio de la frecuencia para proceder con la diagonalización de matrices, cálculo de la matriz gamma, cálculo de la matriz de impedancia y admitancia característica, formulación y reducción de la

matriz de admitancia de parámetros de cadena aplicando el modelo de la línea de transmisión multiconductora.

De la resolución del modelo matemático se consigue la matriz reducida (denominada H) que representa cada capa del devanado estudiado en el dominio de la frecuencia. Para el estudio del transitorio impulsivo se ha escogido la frecuencia de 833KHz y 2MHz (rango de frecuencias rápidas de 500KHz a 5MHz) para evaluar el comportamiento de los voltajes del devanado frente a frecuencias rápidas; por ello, se elabora una matriz de impedancia y admitancia por cada frecuencia planteada.

A la matriz reducida se le aplica la señal en el dominio de la frecuencia (se usa la técnica de la transformada numérica de Laplace) para obtener los voltajes de capa del devanado en el dominio de la frecuencia. Esta respuesta se la lleva al dominio del tiempo usando el comando un comando de MATLAB® que utiliza la función de transferencia de cada capa desplegando gráficas de voltaje vs tiempo. Ver Figura 75.

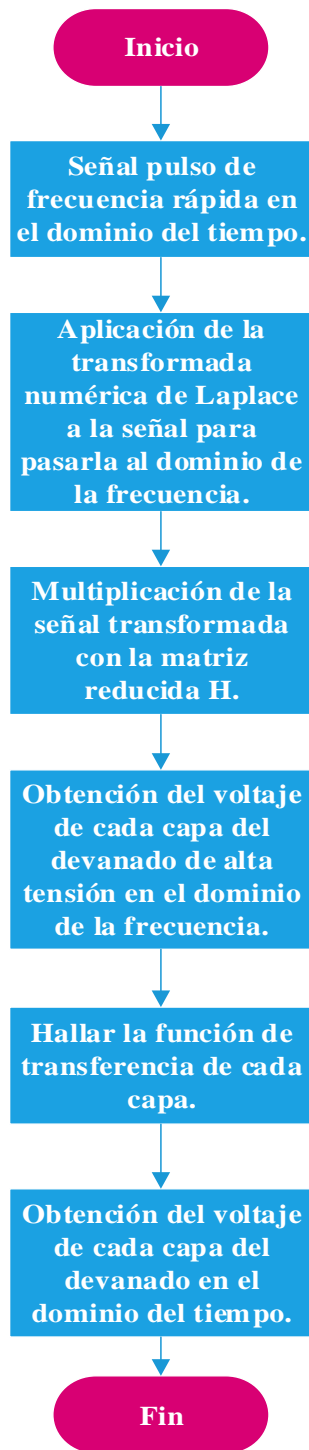


FIGURA 75: PROCEDIMIENTO DE LA APLICACIÓN DEL PULSO DE FRECUENCIA RÁPIDA AL DEVANADO ESTUDIADO DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN.

Procediendo a cumplir uno de los objetivos específicos de este trabajo, se adjunta imágenes de la interfaz gráfica que presenta todas las matrices calculadas y las imágenes de los voltajes en todas las frecuencias de estudio. Ver Figura 76.



FIGURA 76: PORTADA DE LA INTERFAZ GRÁFICA.

Este menú da acceso a las matrices de capacitancia y de inductancia del devanado de alta y baja tensión del transformador de distribución de 3 kVA y al devanado de alta tensión del transformador de distribución de 15 kVA (Laboratorio Alta Tensión). Ver Figura 77.



FIGURA 77: MENÚ PARA PARA INGRESAR A LA MATRIZ DE CAPACITANCIA E INDUCTANCIA DEL TRANSFORMADOR DE 3 KVA Y 15 KVA EN DEVANADOS DE ALTA Y BAJA TENSIÓN.

Este modelo de interfaz se utiliza para presentar la matriz de capacitancia del transformador de 3 kVA y 15 kVA, la tabla se ajusta según el número de capas del devanado de alta tensión. Ver Figura 78.

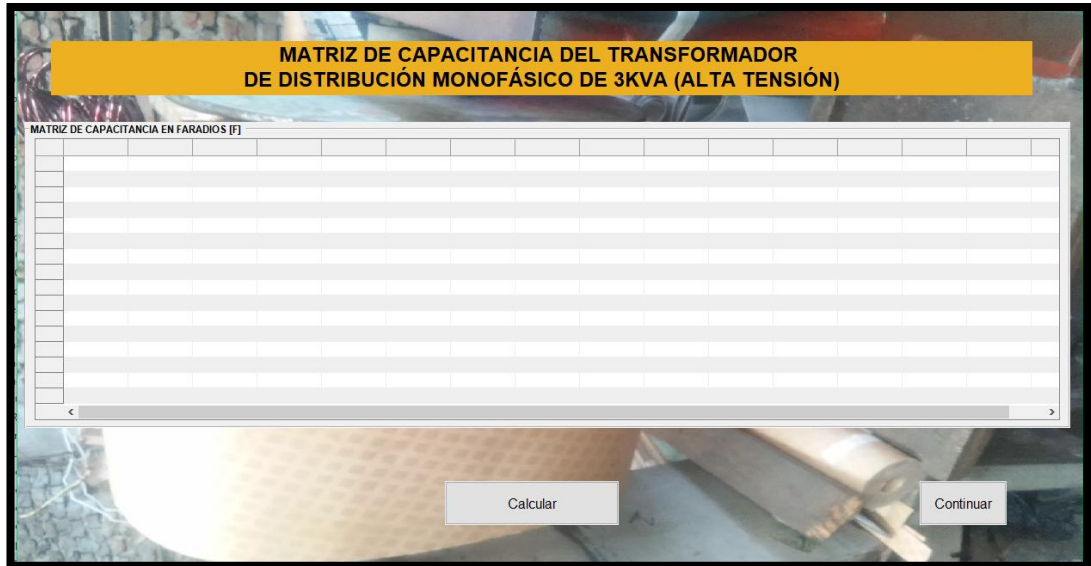


FIGURA 78: MODELO DE INTERFAZ PARA LA MATRIZ DE CAPACITANCIA DEL TRANSFORMADOR 3 Y 15 KVA EN DEVANADO DE ALTA TENSIÓN.

Este modelo de interfaz se utiliza para presentar la matriz de inductancia del transformador de 3 kVA y 15 kVA, la tabla se ajusta según el número de capas del devanado de alta tensión. Ver Figura 79.

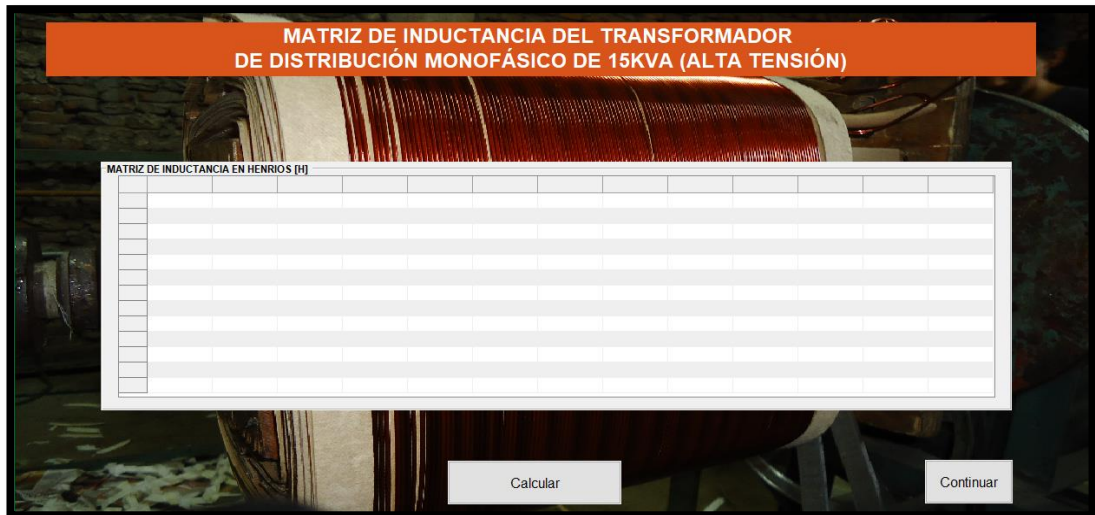


FIGURA 79: MODELO DE INTERFAZ PARA LA MATRIZ DE INDUCTANCIA DEL TRANSFORMADOR DE 3 Y 15 KVA EN DEVANADO DE ALTA TENSIÓN.

Este modelo presenta la matriz de capacitancia e inductancia del devanado de baja tensión del transformador de 3 kVA, la tabla está ajustada para la matriz de 3x3. Ver Figura 80.

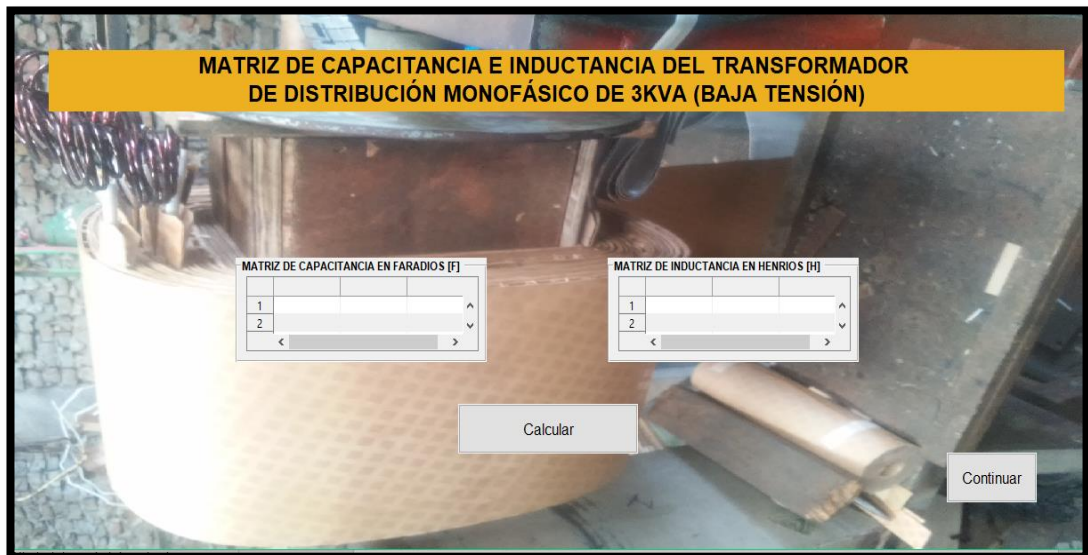


FIGURA 80: MODELO DE INTERFAZ PARA LA MATRIZ DE CAPACITANCIA E INDUCTANCIA DEL TRANSFORMADOR DE 3 KVA EN DEVANADO DE BAJA TENSIÓN.

Este menú da acceso a las matrices de impedancia y admitancia del devanado de alta y baja tensión del transformador de distribución de 3 kVA y del devanado de alta

tensión del transformador de distribución de 15 kVA (Laboratorio Alta Tensión). Ver Figura 81.

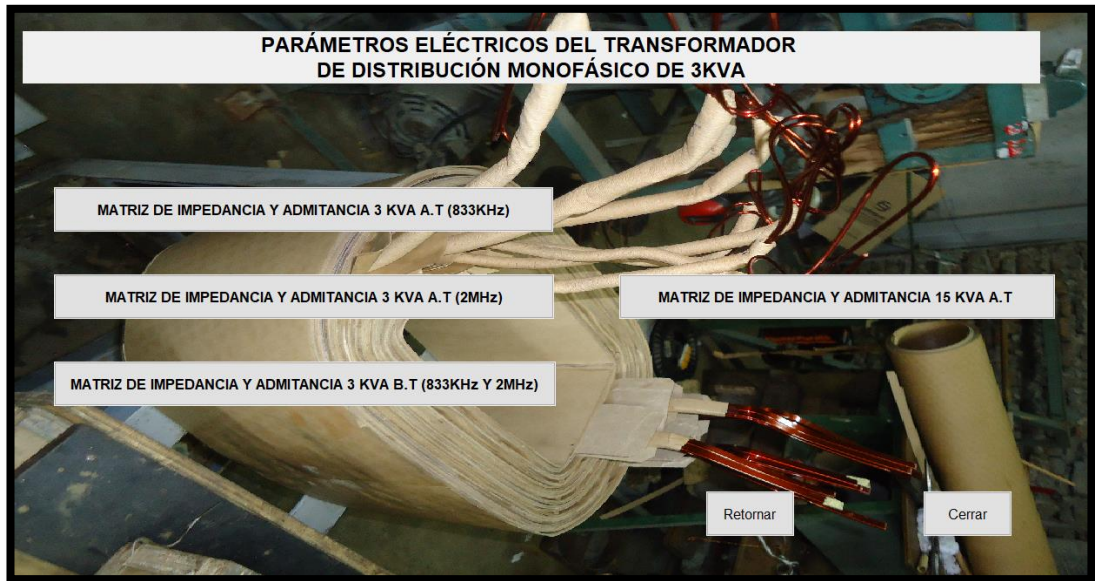


FIGURA 81: MENÚ PARA INGRESAR A LA MATRIZ DE IMPEDANCIA Y ADMITANCIA DEL TRANSFORMADOR DE 3 Y 15 KVA.

La matriz de impedancia y admitancia se divide en dos partes, en la primera tabla se muestran los valores de la parte real y en la segunda tabla se muestran los valores imaginarios; se utiliza este formato para mejor visualización de los datos porque las matrices del devanado de alta tensión son de gran dimensión. Ver Figura 82 y 83.

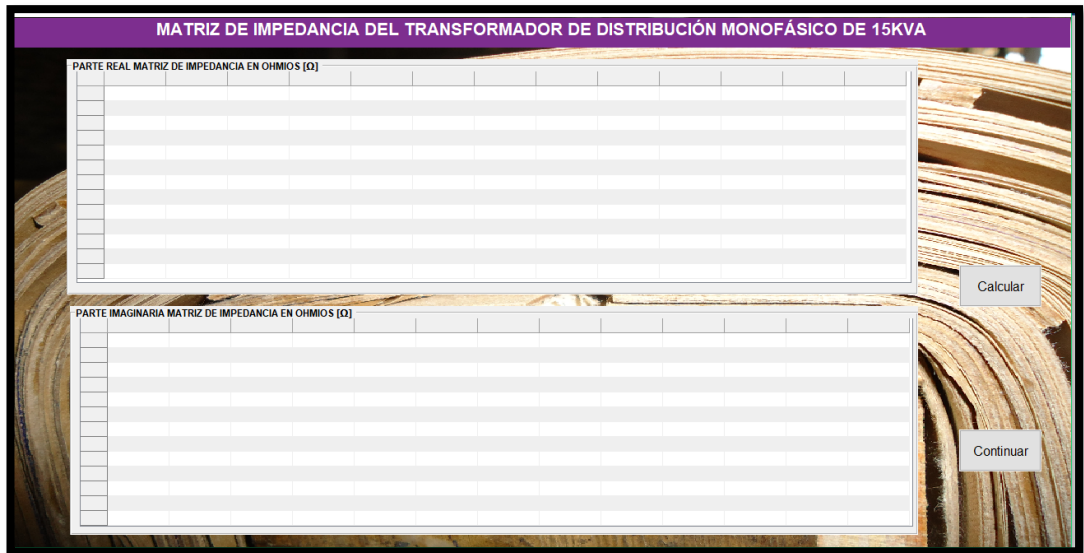


FIGURA 82: MODELO DE INTERFAZ PARA LA MATRIZ DE IMPEDANCA EN DEVANADO DE ALTA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR DE 3 Y 15 KVA.

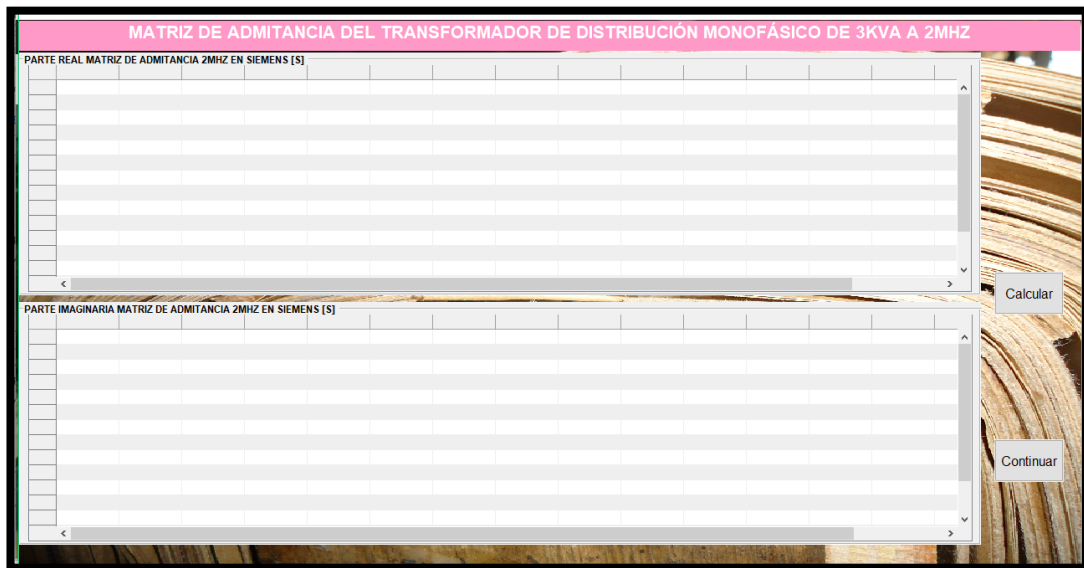


FIGURA 83: MODELO DE INTERFAZ PARA LA MATRIZ DE ADMITANCIA EN DEVANADO DE ALTA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR DE 3 Y 15 KVA.

La matriz de impedancia y admitancia del devanado de baja tensión del transformador de 3 kVA tiene dimensiones de 3x3 por ello se ha ubicado las matrices de 833 KHZ Y 2 MHZ en la misma ventana. Ver Figura 84 y 85.

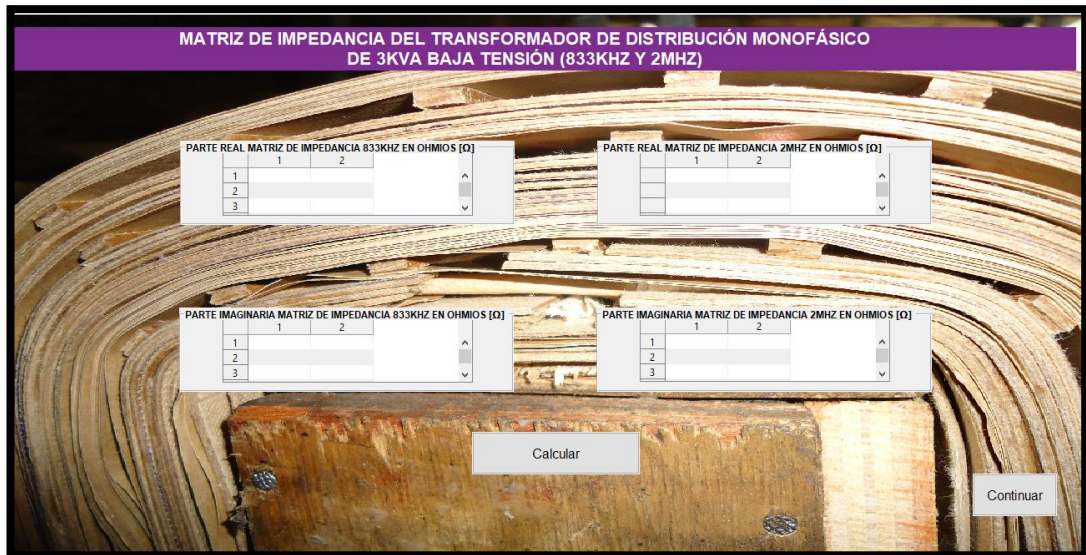


FIGURA 84: MODELO DE INTERFAZ PARA LA MATRIZ DE IMPEDANCIA EN FRECUENCIAS DE 833 KHZ Y 2 MHZ EN DEVANADO DE BAJA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR DE 3 KVA.

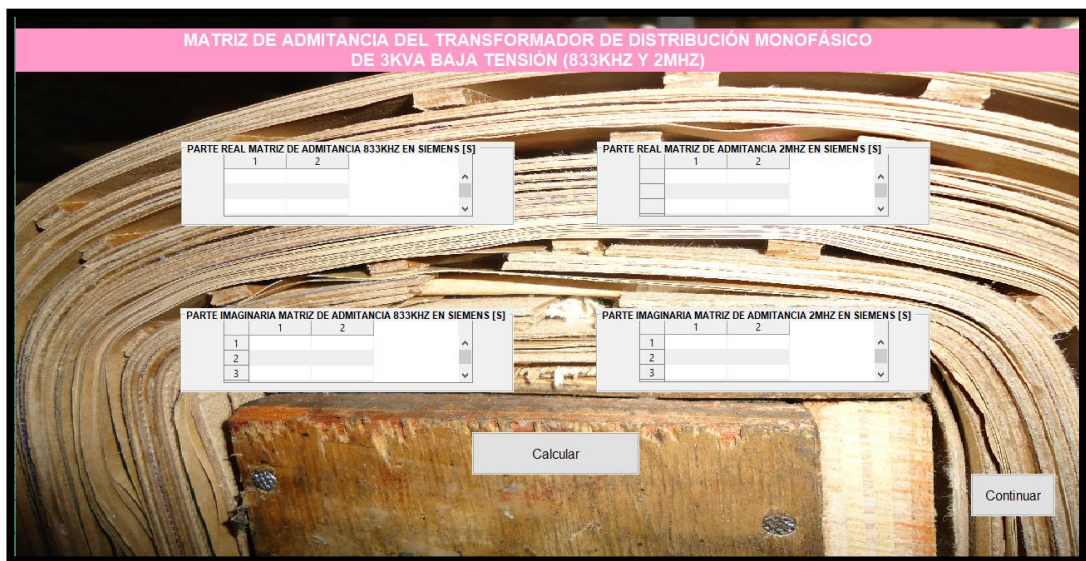


FIGURA 85: MODELO DE INTERFAZ PARA LA MATRIZ DE ADMITANCIA EN FRECUENCIAS DE 833 KHZ Y 2 MHZ EN DEVANADO DE BAJA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR DE 3 KVA.

Se muestran las gráficas de los voltajes de cada capa para cada una de las frecuencias de estudio del devanado de alta y baja tensión del transformador de distribución de 3 kVA y del devanado de alta tensión del transformador de distribución de 15 kVA (Laboratorio Alta Tensión).

Se presenta la señal escalón y la respuesta transitoria simulada para el devanado de alta tensión para el transformador de 3 kVA en la frecuencia de 833 KHz. Ver Figura 86.

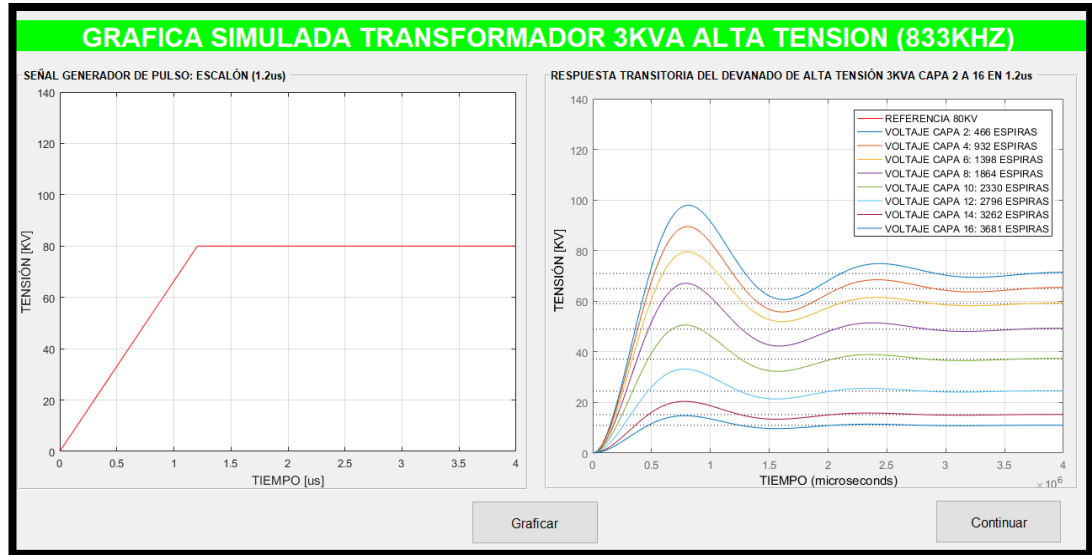


FIGURA 86: MODELO DE INTERFAZ PARA LAS GRÁFICAS DE VOLTAJE DE LAS CAPAS DEL DEVANADO DE ALTA TENSION (833 MHZ) DEL TRANSFORMADOR DE 3 KVA.

Se despliega la señal escalón y la respuesta transitoria simulada para el devanado de alta tensión para el transformador de 3 kVA en la frecuencia de 2 MHz. Ver Figura 87.

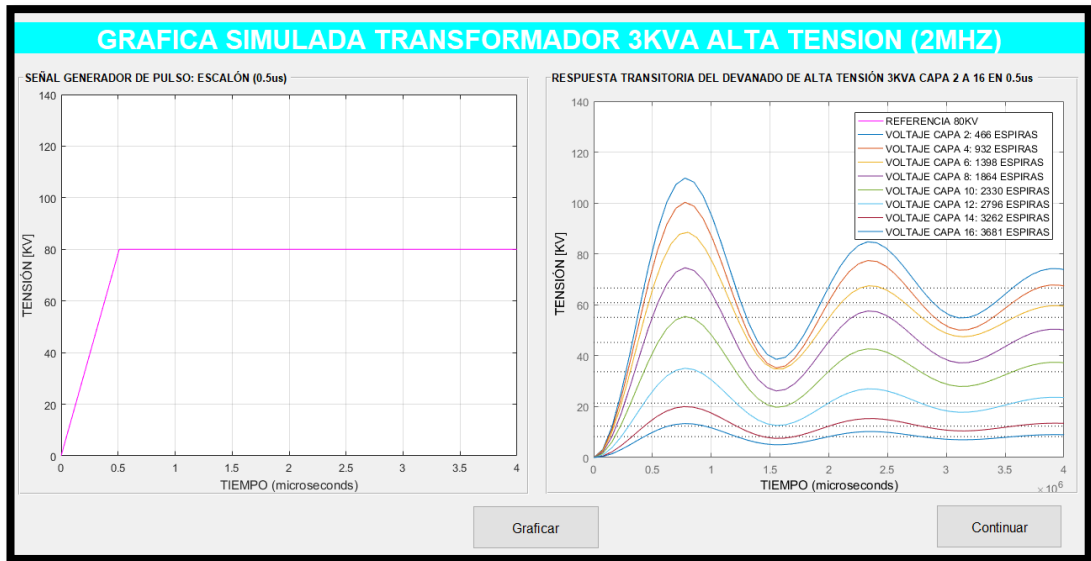


FIGURA 87: MODELO DE INTERFAZ PARA LAS GRÁFICAS DE VOLTAJE DE LAS CAPAS DEL DEVANADO DE ALTA TENSION (2 MHZ) DEL TRANSFORMADOR DE 3 KVA.

Se presenta la señal escalón y la respuesta transitoria simulada para el devanado de baja tension para el transformador de 3 kVA en la frecuencia de 833 KHz. Ver Figura 88.

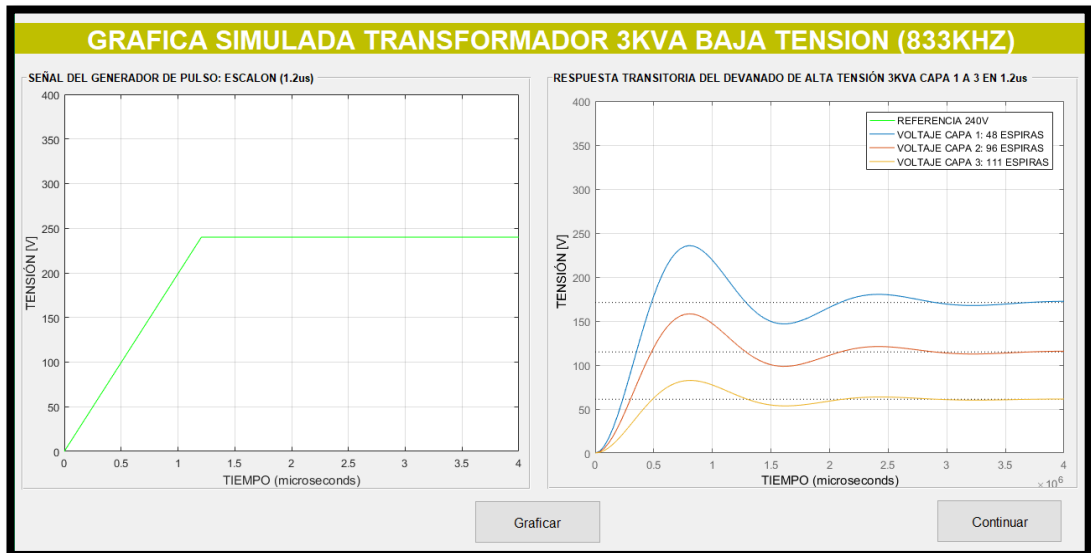


FIGURA 88: MODELO DE INTERFAZ PARA LAS GRÁFICAS DE VOLTAJE DE LAS CAPAS DEL DEVANADO DE BAJA TENSION (833 KHZ) DEL TRANSFORMADOR DE 3 KVA.

Se despliega la señal escalón y la respuesta transitoria simulada para el devanado de baja tensión para el transformador de 3 kVA en la frecuencia de 2 MHz. Ver Figura 89.

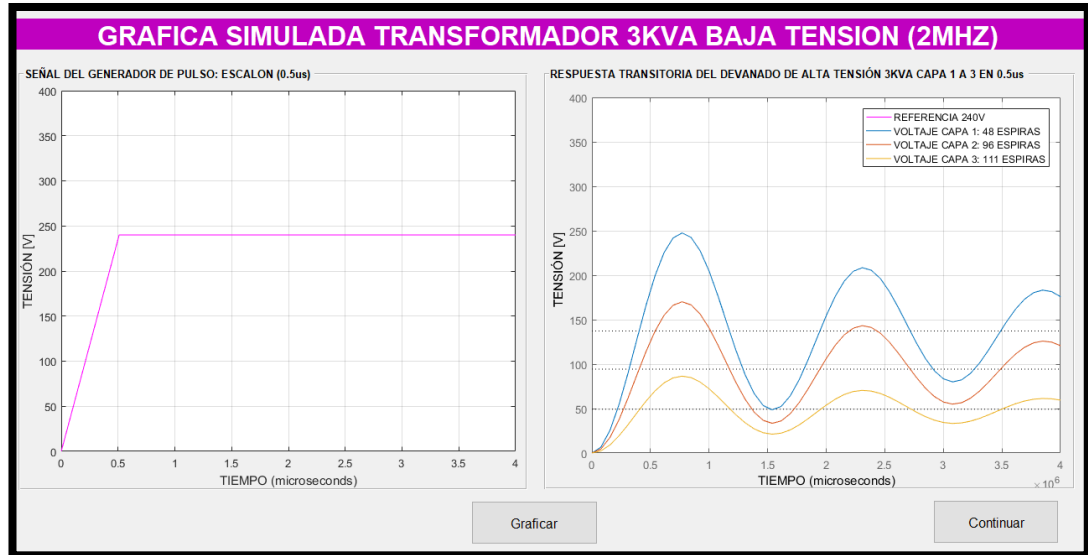


FIGURA 89: MODELO DE INTERFAZ PARA LAS GRÁFICAS DE VOLTAJE DE LAS CAPAS DEL DEVANADO DE BAJA TENSION (2 MHZ) DEL TRANSFORMADOR DE 3 KVA.

Se muestra la gráfica simulada aplicada al transformador de 15 kVA en el lado de alta tensión que representa un transitorio tipo rayo. Ver Figura 90.

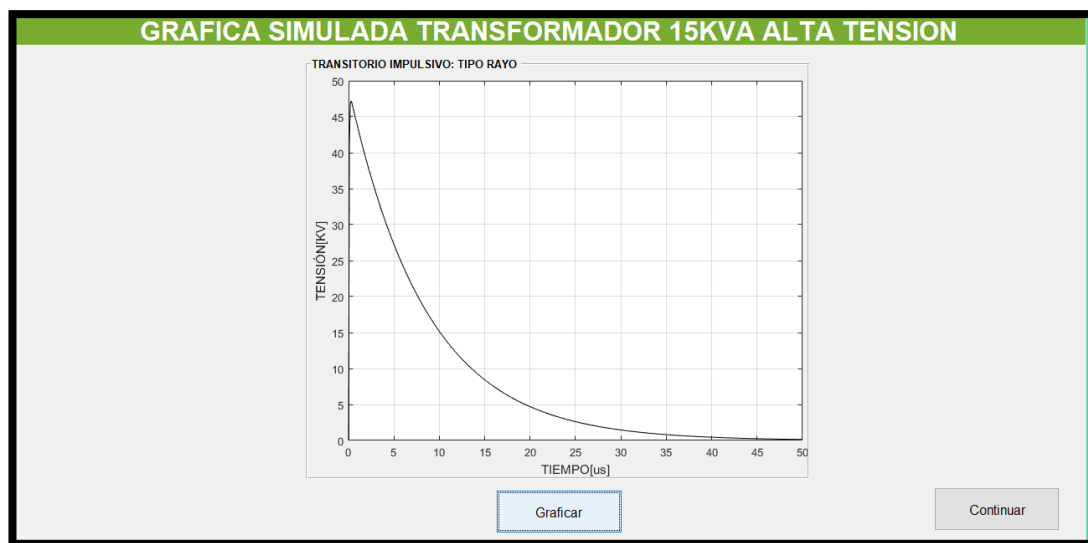


FIGURA 90: MODELO DE INTERFAZ PARA LA GRÁFICA DEL TRANSITORIO APLICADO AL TRANSFORMADOR DE 15 KVA.

Se muestra las gráficas simuladas después la aplicación del impulso tipo rayo. Ver Figura 91.

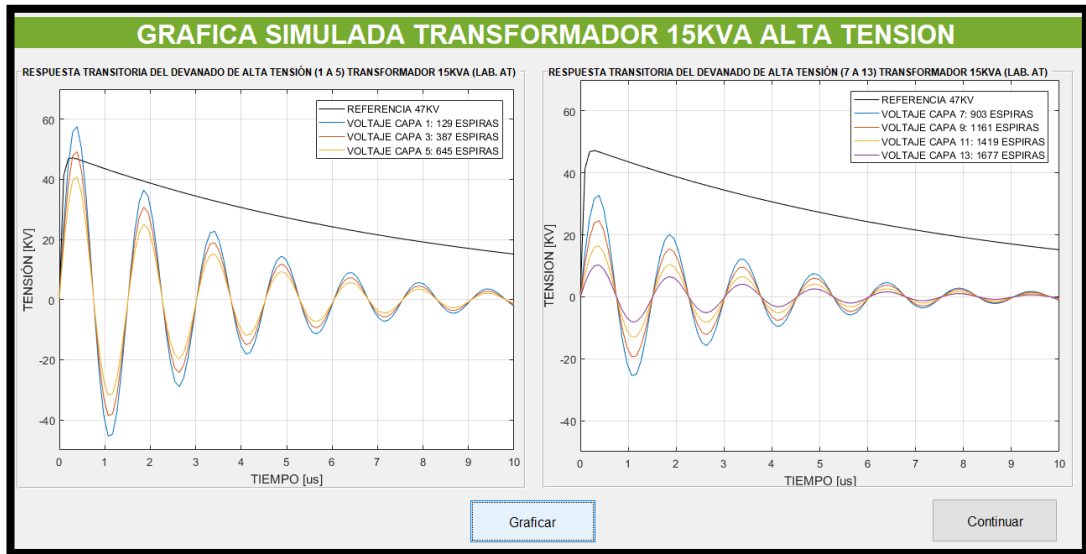


FIGURA 91: MODELO DE INTERFAZ PARA LAS GRÁFICAS DE VOLTAJE DE LAS CAPAS DEL DEVANADO DE ALTA TENSION DEL TRANSFORMADOR DE 15 KVA.

La grafica muestra los resultados obtenidos de la practica experimental. Ver Figura 92.

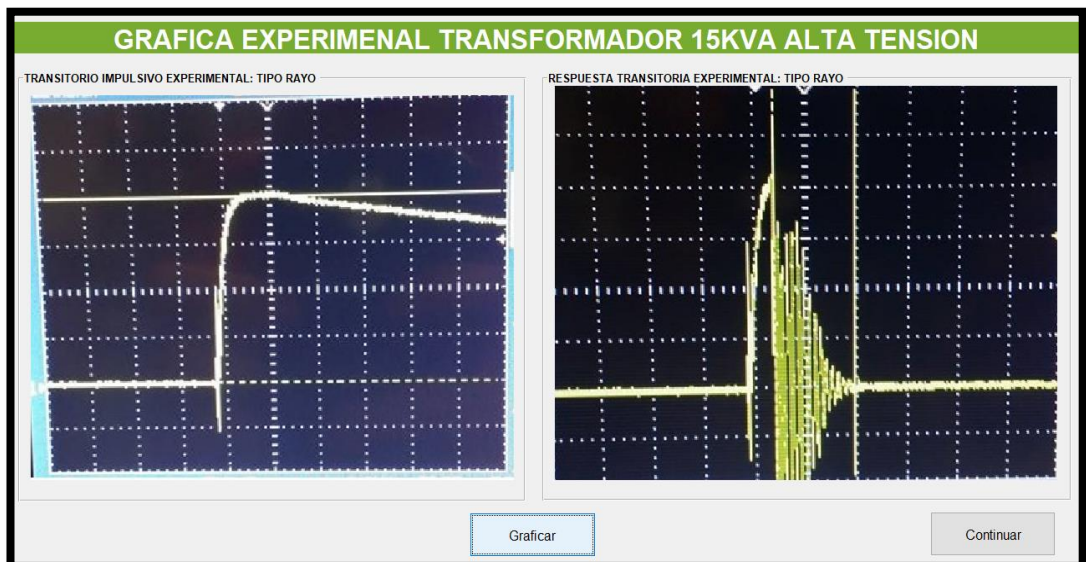


FIGURA 92: MODELO DE INTERFAZ PARA LAS GRÁFICAS EXPERIMENTALES RESULTANTES.

Esta implementación de la interfaz gráfica es manejable por cualquier usuario ya que a través de los botones de selección puede calcular todos los parámetros eléctricos del transformador y visualizar los resultados en el dominio del tiempo en intervalo de microsegundos. El análisis de las gráficas mostradas se realiza en el Capítulo 4.

CAPÍTULO IV

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Resultados del Modelo Matemático desarrollado en MATLAB®

En este apartado se presentan las matrices de los parámetros eléctricos y las gráficas de respuesta transitoria obtenidas del análisis matemático para los devanados de alta y baja tensión tipo capas de un transformador monofásico de distribución 3 kVA y para el devanado de alta tensión tipo capa de un transformador monofásico de distribución 15 kVA facilitado por el Laboratorio de Alta tensión de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil además de los resultados cualitativos y cuantitativos de las ensayos dieléctricos efectuadas.

4.1.1. Análisis matemático a transformador 3 kVA en los devanados de alta y baja tensión

Con los datos proporcionados por la tabla 23 se procede a aplicar las fórmulas teóricas de la sección 3.3 para conseguir las matrices de capacitancia, inductancia, impedancia y admitancias en las frecuencias de 833 KHz y 2 MHz, cada una de ellas especificadas en sus respectivas unidades de medida.

TABLA 23: DATOS GEOMÉTRICOS Y CONSTRUCTIVOS DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 3 KVA.

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
POTENCIA	KVA	3
VOLTAJE DE ALTA TENSIÓN	V	$\frac{13800}{\sqrt{3}} = 7967$
VOLTAJE DE BAJA TENSIÓN	V	120-240
NÚMERO DE CAPAS DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN	-	16 15(233) y 1(186)
NÚMERO DE ESPIRAS TOTALES DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN	-	3681
NÚMERO DE CAPAS DEL DEVANADO DE BAJA TENSIÓN	-	3 2(48) y 1(15)
NÚMERO DE ESPIRAS TOTALES DEL DEVANADO DE BAJA TENSIÓN	-	111
DISTANCIA TRANSVERSAL INTERNA DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN	mm	39.007
DISTANCIA TRANSVERSAL EXTERNA DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN	mm	49.569
DISTANCIA TRANSVERSAL INTERNA DEL DEVANADO DE BAJA TENSIÓN	mm	24.372
DISTANCIA TRANSVERSAL EXTERNA DEL DEVANADO DE BAJA TENSIÓN	mm	33.007
DISTANCIA LONGITUDINAL INTERNA DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN	mm	76.735
DISTANCIA LONGITUDINAL EXTERNA DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN	mm	87.297
DISTANCIA LONGITUDINAL INTERNA DEL DEVANADO DE BAJA TENSIÓN	mm	62.100
DISTANCIA LONGITUDINAL EXTERNA DEL DEVANADO DE BAJA TENSIÓN	mm	70.735
DIÁMETRO DEL CONDUCTOR DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN	mm	0.405
AISLAMIENTO DOBLE DEL CONDUCTOR DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN	mm	0.052
DIÁMETRO DEL CONDUCTOR DEL DEVANADO DE BAJA TENSIÓN	mm	2.305
AISLAMIENTO DOBLE DEL CONDUCTOR DEL DEVANADO DE BAJA TENSIÓN	mm	0.09
DISTANCIA ENTRE CAPAS	mm	0.150
ALTURA DE LA BOBINA	mm	106.481
PERMITIVIDAD DIELECTRICA PAPEL AISLANTE	-	4
CONDUCTIVIDAD DEL CONDUCTOR DEL DEVANADO (COBRE)	$\Omega^{-1} * m^{-1}$	$5,9998 \times 10^7$

PERMEABILIDAD MAGNÉTICA DEL CONDUCTOR (COBRE)	$\frac{Wb}{A * m}$	1
CONDUCTIVIDAD DEL MATERIAL DIELECTRICO (PAPEL DIAMANTADO)	$\Omega^{-1} * m^{-1}$	$1 \times 10^{-12} - 1 \times 10^{-15}$

Matriz de capacitancia en devanado de alta y baja tensión.

Para el devanado de alta tensión compuesto de 16 capas se presentan los valores y la matriz de capacitancia en las tablas 24 y 25.

TABLA 24: CAPACITANCIAS EN DEVANADO DE ALTA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN DE 3 KVA.

CAPACITANCIAS DEVANADO DE ALTA TENSIÓN (FARADIO)	
CHH1	5.14397588605707E-09
CHH2	5.22036346063395E-09
CHH3	5.29675103137560E-09
CHH4	5.37313859844585E-09
CHH5	5.44952616199848E-09
CHH6	5.52591372217985E-09
CHH7	5.60230127912735E-09
CHH8	5.67868883297206E-09
CHH9	5.75507638383742E-09
CHH10	5.83146393184040E-09
CHH11	5.90785147709190E-09
CHH12	5.98423901969736E-09
CHH13	6.06062655975721E-09
CHH14	6.13701409736577E-09
CHH15	6.21340163261394E-09
CH-G eq (PARALELO)	3.77297115216892E-10

TABLA 25: MATRIZ DE CAPACITANCIA EN NANOFARADIOS DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR 3 KVA.

5.5213	-5.1440	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
-5.1440	10.7416	-5.2204	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	-5.2204	10.8944	-5.2968	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	-5.2968	11.0472	-5.3731	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	-5.3731	11.2000	-5.4495	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-5.4495	11.3527	-5.5259	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-5.5259	11.5055	-5.6023	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-5.6023	11.6583	-5.6787	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-5.6787	11.8111	-5.7551	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-5.7551	11.9638	-5.8315	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-5.8315	12.1166	-5.9079	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-5.9079	12.2694	-5.9842	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-5.9842	12.4222	-6.0606	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-6.0606	12.5749	-6.1370	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-6.1370	12.7277	-6.2134
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-6.2134	6.2134

La matriz está representada en nano faradio (1×10^{-9})

Para el devanado de baja tensión compuesto de 3 capas se presentan los valores y la matriz de capacitancia en las tablas 26 y 27.

TABLA 26: CAPACITANCIAS EN DEVANADO DE BAJA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN DE 3 KVA.

CAPACITANCIAS DEVANADO DE BAJA TENSIÓN (FARADIO)	
CHH1	6.37197841816793E-09
CHH2	6.62312789480053E-09
CH-G eq (PARALELO)	3.24756312030469E-09

TABLA 27: MATRIZ DE CAPACITANCIA EN FARADIOS DEL DEVANADO DE BAJA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR 3 KVA.

$$\begin{bmatrix} 9.61954153847262E-09 & -6.37197841816793E-09 & 0 \\ -6.37197841816793E-09 & 1.62426694332731E-08 & -6.62312789480053E-09 \\ 0 & -6.62312789480053E-09 & 6.62312789480053E-09 \end{bmatrix}$$

La matriz está representada en faradio

Matriz de inductancia en devanado de alta y baja tensión.

Para el devanado de alta tensión compuesto de 16 capas se despliega la matriz de inductancia en la tabla 28.

TABLA 28: MATRIZ DE INDUCTANCIA EN MILIHENRIOS DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR 3 KVA.

1.5280	1.4962	1.4804	1.4772	1.4839	1.4988	1.5206	1.5487	1.5829	1.6232	1.6702	1.7247	1.7881	1.8621	1.9492	1.3079
1.5036	1.5200	1.5017	1.4975	1.5067	1.5235	1.5470	1.5765	1.6119	1.6534	1.7016	1.7573	1.8220	1.8975	1.9862	1.3327
1.4998	1.5139	1.5406	1.5320	1.5372	1.5503	1.5698	1.5951	1.6255	1.6609	1.7016	1.7480	1.8009	1.8615	1.9313	1.2824
1.5033	1.5156	1.5385	1.5735	1.5734	1.5817	1.5967	1.6172	1.6424	1.6717	1.7051	1.7425	1.7842	1.8307	1.8828	1.2526
1.5051	1.5154	1.5344	1.5631	1.6032	1.6083	1.6199	1.6366	1.6572	1.6811	1.7076	1.7363	1.7671	1.7997	1.8569	1.2373
1.5106	1.5192	1.5346	1.5577	1.5900	1.6335	1.6419	1.6548	1.6709	1.6891	1.7086	1.7284	1.7478	1.7872	1.8485	1.2330
1.5190	1.5261	1.5384	1.5566	1.5820	1.6159	1.6605	1.6700	1.6817	1.6942	1.7062	1.7165	1.7433	1.7879	1.8525	1.2367
1.5299	1.5356	1.5451	1.5589	1.5779	1.6034	1.6367	1.6800	1.6875	1.6942	1.6984	1.7164	1.7490	1.7977	1.8653	1.2460
1.5433	1.5478	1.5548	1.5648	1.5783	1.5962	1.6196	1.6500	1.6891	1.6911	1.7027	1.7264	1.7632	1.8152	1.8853	1.2599
1.5690	1.5731	1.5795	1.5884	1.6003	1.6162	1.6368	1.6635	1.6979	1.7421	1.7506	1.7723	1.8083	1.8603	1.9312	1.2904
1.5967	1.6007	1.6066	1.6148	1.6259	1.6404	1.6593	1.6838	1.7154	1.7558	1.8075	1.8258	1.8597	1.9111	1.9827	1.3243
1.6256	1.6295	1.6351	1.6429	1.6533	1.6669	1.6847	1.7076	1.7371	1.7750	1.8234	1.8852	1.9164	1.9666	2.0385	1.3611
1.6555	1.6593	1.6648	1.6723	1.6822	1.6953	1.7123	1.7343	1.7626	1.7988	1.8451	1.9042	1.9796	2.0280	2.0999	1.4015
1.6868	1.6906	1.6960	1.7035	1.7134	1.7263	1.7432	1.7650	1.7930	1.8290	1.8749	1.9335	2.0082	2.1013	2.1726	1.4490
1.7189	1.7227	1.7282	1.7357	1.7457	1.7588	1.7759	1.7979	1.8262	1.8625	1.9089	1.9681	2.0436	2.1376	2.2554	1.5030
1.7506	1.7544	1.7598	1.7673	1.7772	1.7901	1.8070	1.8287	1.8566	1.8925	1.9383	1.9967	2.0712	2.1659	2.2862	1.5541

La matriz está representada en mili henrios (1×10^{-3})

Para el devanado de baja tensión compuesto de 3 capas se despliega la matriz de inductancia en la tabla 29.

TABLA 29: MATRIZ DE INDUCTANCIA EN HENRIOS DEL DEVANADO DE BAJA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR 3 KVA.

$$\begin{bmatrix} 1.22470976999903E-05 & 1.64583823529152E-05 & 2.27279285182487E-05 \\ 1.29189310780515E-05 & 1.84188249960413E-05 & 2.46883711613748E-05 \\ 1.27783695285670E-06 & 1.81423226769717E-06 & 2.64836867718687E-06 \end{bmatrix}$$

La matriz está representada en henrios

Matriz de impedancia en devanado de alta y baja tensión.

Para el devanado de alta tensión compuesto de 16 capas se despliega la matriz de impedancia en 833 KHz en la tabla 30 y matriz de impedancia en 2 MHz en la tabla 31.

TABLA 30: MATRIZ DE IMPEDANCIA EN OHMIOS DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR 3KVA EN 833 KHZ.

4.255+7997j	4.1663+7831j	4.1225+7748j	4.1135+7732j	4.1322+7767j	4.1735+7844j	4.2343+7959j	4.3126+8106j	4.4077+8285j	4.52+8496j	4.6508+8741j	4.8026+9027j	4.9791+9359j	5.1853+9746j	5.4278+10202j	3.6419+6845j
4.187+7870j	4.2327+7956j	4.1818+7860j	4.17+7838j	4.1955+7886j	4.2424+7974j	4.3078+8097j	4.39+8251j	4.4887+8437j	4.6042+8654j	4.7383+8906j	4.8935+9198j	5.0736+9536j	5.2838+9931j	5.5309+10396j	3.7111+6975j
4.1765+7850j	4.2157+7924j	4.29+8063j	4.266+8018j	4.2805+8046j	4.3169+8114j	4.3715+8216j	4.4417+8348j	4.5264+8508j	4.6251+8693j	4.7384+8906j	4.8675+9149j	5.0148+9426j	5.1835+9743j	5.378+10108j	3.5711+6712j
4.1862+7868j	4.2203+7932j	4.2842+8052j	4.3817+8236j	4.3814+8235j	4.4045+8279j	4.4462+8357j	4.5033+8464j	4.5734+8596j	4.6552+8750j	4.7481+8924j	4.8523+9120j	4.9684+9338j	5.0979+9582j	5.2429+9854j	3.4881+6556j
4.1912+7878j	4.2199+7932j	4.2726+8031j	4.3525+8181j	4.4644+8391j	4.4786+8418j	4.5108+8478j	4.5572+8566j	4.6147+8674j	4.6811+8798j	4.7549+8937j	4.835+9088j	4.9207+9249j	5.0116+9420j	5.1709+9719j	3.4454+6476j
4.2064+7906j	4.2303+7951j	4.2732+8032j	4.3377+8153j	4.4277+8322j	4.5486+8549j	4.572+8593j	4.6079+8661j	4.6528+8745j	4.7036+8841j	4.7577+8942j	4.8129+9046j	4.8669+9148j	4.9766+9354j	5.1473+9675j	3.4335+6453j
4.23+7950j	4.2496+7987j	4.2838+8052j	4.3347+8147j	4.4052+8280j	4.4997+8457j	4.624+8691j	4.6504+8741j	4.6829+8802j	4.7176+8867j	4.7511+8930j	4.7797+8984j	4.8544+9124j	4.9786+9358j	5.1587+9696j	3.4439+6473j
4.2602+8007j	4.276+8037j	4.3024+8087j	4.341+8159j	4.394+8259j	4.4648+8392j	4.5576+8566j	4.6782+8793j	4.6991+8832j	4.7177+8867j	4.7295+8889j	4.7796+8984j	4.8702+9154j	5.0059+9409j	5.194+9763j	3.4696+6521j
4.2976+8078j	4.3101+8101j	4.3296+8138j	4.3573+8190j	4.395+8261j	4.4449+8354j	4.5101+8477j	4.5946+8636j	4.7035+8841j	4.7091+8851j	4.7415+8912j	4.8073+9036j	4.9099+9228j	5.0548+9501j	5.2497+9867j	3.5084+6594j
4.369+8212j	4.3806+8234j	4.3982+8267j	4.423+8313j	4.4564+8376j	4.5004+8459j	4.5579+8567j	4.6323+8707j	4.7281+8887j	4.8511+9118j	4.8748+9163j	4.9353+9276j	5.0353+9464j	5.1802+9737j	5.3777+10108j	3.5932+6754j
4.4462+8357j	4.4573+8378j	4.4738+8409j	4.4967+8452j	4.5274+8510j	4.5679+8586j	4.6207+8685j	4.6889+8813j	4.7766+8978j	4.8892+9190j	5.0333+9460j	5.0841+9556j	5.1787+9734j	5.3218+10003j	5.521+10377j	3.6878+6931j
4.5267+8508j	4.5374+8528j	4.5531+8558j	4.5748+8599j	4.6037+8653j	4.6417+8724j	4.6912+8817j	4.7551+8937j	4.8373+9092j	4.9427+9290j	5.0775+9544j	5.2497+9867j	5.3365+10030j	5.4763+10293j	5.6766+10669j	3.7903+7124j
4.6101+8665j	4.6206+8685j	4.6358+8713j	4.6566+8752j	4.6844+8805j	4.7209+8873j	4.7682+8962j	4.8294+9077j	4.9081+9225j	5.0089+9415j	5.1379+9657j	5.3026+9967j	5.5123+10361j	5.6472+10614j	5.8476+10991j	3.9026+7335j
4.6971+8828j	4.7076+8848j	4.7228+8877j	4.7435+8916j	4.7711+8968j	4.8072+9036j	4.8542+9124j	4.9149+9238j	4.9929+9385j	5.093+9573j	5.2209+9813j	5.3842+10120j	5.5922+10511j	5.8512+10998j	6.05+11371j	4.035+7584j
4.7864+8996j	4.797+9016j	4.8123+9045j	4.8333+9084j	4.8611+9137j	4.8977+9205j	4.9451+9295j	5.0064+9410j	5.0852+9558j	5.1863+9748j	5.3155+9991j	5.4805+10301j	5.6906+10696j	5.9523+11188j	6.2804+11804j	4.1853+7866j
4.8747+9162j	4.8853+9182j	4.9005+9211j	4.9212+9250j	4.9488+9302j	4.9849+9369j	5.0317+9457j	5.0923+9571j	5.1701+9717j	5.2698+9905j	5.3973+10145j	5.5601+10451j	5.7675+10840j	6.0312+11336j	6.3662+11966j	4.3276+8134j

La matriz está representada en ohmios.

TABLA 31: MATRIZ DE IMPEDANCIA EN OHMIOS DEL DEVANADO DE ALTA TENSION DEL TRANSFORMADOR 3KVA EN 2 MHZ.

6.593+19202j	6.456+18802j	6.388+18604j	6.374+18563j	6.403+18647j	6.467+18834j	6.561+19109j	6.682+19462j	6.83+19891j	7.004+20398j	7.206+20988j	7.442+21673j	7.715+22470j	8.035+23400j	8.41+24494j	5.643+16435j
6.488+18895j	6.559+19101j	6.48+18871j	6.461+18818j	6.501+18933j	6.574+19145j	6.675+19440j	6.802+19811j	6.955+20256j	7.134+20778j	7.342+21383j	7.582+22083j	7.862+22896j	8.187+23845j	8.57+24960j	5.75+16747j
6.472+18848j	6.532+19024j	6.647+19360j	6.61+19251j	6.633+19317j	6.689+19481j	6.774+19727j	6.882+20044j	7.014+20426j	7.167+20872j	7.342+21383j	7.542+21966j	7.77+22631j	8.032+23392j	8.333+24269j	5.533+16116j
6.486+18891j	6.539+19045j	6.638+19334j	6.789+19774j	6.789+19772j	6.825+19877j	6.889+20065j	6.978+20322j	7.086+20638j	7.213+21008j	7.357+21427j	7.519+21897j	7.699+22421j	7.899+23006j	8.124+23660j	5.405+15741j
6.494+18914j	6.539+19043j	6.62+19281j	6.744+19642j	6.918+20147j	6.94+20211j	6.99+20356j	7.061+20566j	7.15+20825j	7.253+21125j	7.368+21458j	7.492+21819j	7.625+22206j	7.766+22616j	8.012+23335j	5.339+15548j
6.518+18983j	6.555+19090j	6.621+19284j	6.721+19575j	6.861+19981j	7.048+20527j	7.084+20632j	7.14+20794j	7.21+20997j	7.288+21226j	7.372+21470j	7.458+21719j	7.541+21963j	7.711+22458j	7.976+23229j	5.32+15494j
6.554+19089j	6.585+19177j	6.638+19332j	6.717+19561j	6.826+19879j	6.972+20306j	7.165+20867j	7.206+20986j	7.256+21133j	7.31+21289j	7.362+21440j	7.406+21570j	7.522+21907j	7.714+22467j	7.993+23280j	5.336+15541j
6.601+19225j	6.626+19297j	6.667+19416j	6.726+19590j	6.808+19829j	6.918+20148j	7.062+20567j	7.249+21112j	7.281+21206j	7.31+21290j	7.328+21343j	7.406+21569j	7.546+21978j	7.757+22591j	8.048+23439j	5.376+15658j
6.659+19394j	6.678+19450j	6.709+19538j	6.752+19664j	6.81+19834j	6.887+20059j	6.988+20353j	7.119+20734j	7.288+21226j	7.297+21251j	7.347+21397j	7.449+21694j	7.608+22157j	7.832+22811j	8.134+23691j	5.436+15832j
6.77+19716j	6.788+19769j	6.815+19848j	6.853+19960j	6.905+20110j	6.973+20309j	7.062+20569j	7.178+20905j	7.326+21337j	7.517+21892j	7.554+21999j	7.647+22272j	7.802+22723j	8.027+23377j	8.333+24268j	5.568+16215j
6.889+20065j	6.907+20115j	6.932+20189j	6.968+20292j	7.015+20431j	7.078+20614j	7.16+20852j	7.265+21160j	7.401+21556j	7.576+22064j	7.799+22714j	7.878+22943j	8.024+23370j	8.246+24016j	8.555+24915j	5.714+16642j
7.014+20428j	7.031+20476j	7.055+20547j	7.089+20645j	7.133+20775j	7.192+20947j	7.269+21170j	7.368+21458j	7.495+21829j	7.659+22305j	7.868+22914j	8.134+23690j	8.269+24082j	8.486+24713j	8.796+25617j	5.873+17105j
7.143+20804j	7.16+20852j	7.183+20920j	7.215+21014j	7.259+21140j	7.315+21304j	7.388+21518j	7.483+21794j	7.605+22149j	7.761+22604j	7.961+23186j	8.216+23929j	8.541+24876j	8.75+25484j	9.061+26389j	6.047+17612j
7.278+21197j	7.294+21244j	7.318+21313j	7.35+21406j	7.393+21531j	7.449+21694j	7.522+21906j	7.616+22180j	7.737+22532j	7.892+22983j	8.09+23561j	8.343+24297j	8.665+25236j	9.067+26405j	9.374+27302j	6.252+18209j
7.417+21600j	7.433+21648j	7.457+21717j	7.489+21811j	7.532+21937j	7.589+22102j	7.662+22316j	7.757+22593j	7.88+22948j	8.036+23405j	8.236+23988j	8.492+24732j	8.818+25680j	9.223+26861j	9.732+28342j	6.485+18887j
7.553+21999j	7.57+22046j	7.593+22115j	7.625+22208j	7.668+22333j	7.724+22496j	7.797+22707j	7.89+22980j	8.011+23331j	8.166+23781j	8.363+24357j	8.615+25091j	8.937+26027j	9.345+27217j	9.864+28729j	6.706+19529j

La matriz está representada en ohmios.

Para el devanado de baja tensión compuesto de 3 capas se despliega la matriz de impedancia en 833 KHz en la tabla 32 y matriz de impedancia en 2 MHz en la tabla 33.

TABLA 32: MATRIZ DE IMPEDANCIA EN OHMIOS DEL DEVANADO DE BAJA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR
3 KVA EN 833 KHZ.

$$\begin{bmatrix} 0.0341+64.10j & 0.0458+86.14j & 0.0633+118.96j \\ 0.0360+67.62j & 0.0513+96.40j & 0.0687+129.22j \\ 0.0036+6.690j & 0.0051+9.500j & 0.0074+13.860j \end{bmatrix}$$

La matriz está representada en ohmios.

TABLA 33: MATRIZ DE IMPEDANCIA EN OHMIOS DEL DEVANADO DE BAJA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR
3 KVA EN 2 MHZ.

$$\begin{bmatrix} 0.0528+153.90j & 0.0710+206.82j & 0.0981+285.61j \\ 0.0557+162.34j & 0.0795+231.46j & 0.1065+310.24j \\ 0.0055+16.060j & 0.0078+22.800j & 0.0114+33.280j \end{bmatrix}$$

La matriz está representada en ohmios.

Matriz de admitancia en devanado de alta y baja tensión.

Para el devanado de alta tensión compuesta de 16 capas se despliega la matriz de admitancia en 833 KHz en la tabla 34 y matriz de admitancia en 2 MHz en la tabla 35.

TABLA 34: MATRIZ DE ADMITANCIA EN SIEMENS DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR 3 KVA EN 833 KHZ.

0.691+28.898j	-0.644-26.923j	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-0.644-26.923j	1.344+56.221j	-0.653-27.323j	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-0.653-27.323j	1.363+57.02j	-0.663-27.723j	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	-0.663-27.723j	1.382+57.82j	-0.672-28.122j	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	-0.672-28.122j	1.401+58.619j	-0.682-28.522j	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	-0.682-28.522j	1.421+59.419j	-0.691-28.922j	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	-0.691-28.922j	1.44+60.219j	-0.701-29.322j	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	-0.701-29.322j	1.459+61.018j	-0.711-29.722j	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	-0.711-29.722j	1.478+61.818j	-0.72-30.121j	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	-0.72-30.121j	1.497+62.617j	-0.73-30.521j	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.73-30.521j	1.516+63.417j	-0.739-30.921j	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.739-30.921j	1.535+64.217j	-0.749-31.321j	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.749-31.321j	1.554+65.016j	-0.758-31.721j	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.758-31.721j	1.573+65.816j	-0.768-32.12j	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.768-32.12j	1.593+66.615j	-0.777-32.52j	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.777-32.52j	0.777+32.52j

La matriz está representada en Siemens, la parte real en zepto Siemens (1×10^{-21}) y la parte imaginaria en mili Siemens (1×10^{-3})

TABLA 35: MATRIZ DE ADMITANCIA EN SIEMENS DEL DEVANADO DE ALTA TENSION DEL TRANSFORMADOR 3 KVA EN 2 MHZ.

0.691+69.38j	-0.644-64.64j	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-0.644-64.64j	1.344+134.98j	-0.653-65.6j	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-0.653-65.6j	1.363+136.9j	-0.663-66.56j	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	-0.663-66.56j	1.382+138.82j	-0.672-67.52j	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	-0.672-67.52j	1.401+140.74j	-0.682-68.48j	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	-0.682-68.48j	1.421+142.66j	-0.691-69.44j	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	-0.691-69.44j	1.44+144.58j	-0.701-70.4j	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	-0.701-70.4j	1.459+146.5j	-0.711-71.36j	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	-0.711-71.36j	1.478+148.42j	-0.72-72.32j	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	-0.72-72.32j	1.497+150.34j	-0.73-73.28j	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.73-73.28j	1.516+152.26j	-0.739-74.24j	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.739-74.24j	1.535+154.18j	-0.749-75.2j	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.749-75.2j	1.554+156.1j	-0.758-76.16j	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.758-76.16j	1.573+158.02j	-0.768-77.12j	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.768-77.12j	1.593+159.94j	-0.777-78.08j	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.777-78.08j	0.777+78.08j	0

La matriz está representada en Siemens, la parte real en zepto Siemens (1×10^{-21}) y la parte imaginaria en mili Siemens (1×10^{-3})

Para el devanado de baja tensión compuesto de 3 capas se despliega la matriz de admitancia en 833 KHz en la tabla 36 y matriz de admitancia en 2 MHz en la tabla 37.

TABLA 36: MATRIZ DE ADMITANCIA EN SIEMENS DEL DEVANADO DE BAJA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR 3 KVA EN 833 KHZ.

$$\begin{bmatrix} 1.2036+0.0503j & -0.7973-0.0334j & 0 \\ -0.7973-0.0334j & 2.0324+0.0850j & -0.8287-0.0347j \\ 0 & -0.8287-0.0347j & 0.8287+0.0347j \end{bmatrix}$$

La matriz está representada en Siemens, la parte real en zepto Siemens (1×10^{-21}) y la parte imaginaria en Siemens.

TABLA 37: MATRIZ DE ADMITANCIA EN SIEMENS DEL DEVANADO DE BAJA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR 3 KVA EN 2 MHZ.

$$\begin{bmatrix} 1.2036+0.1209j & -0.7973-0.0801j & 0 \\ -0.7973-0.0801j & 2.0324+0.2041j & -0.8287-0.0832j \\ 0 & -0.8287-0.0832j & 0.8287+0.0832j \end{bmatrix}$$

La matriz está representada en Siemens, la parte real en zepto Siemens (1×10^{-21}) y la parte imaginaria en Siemens.

Se despliegan las gráficas resultantes, en las cuales se presentan los voltajes de las capas y se indica en un cuadro de leyenda a que capa pertenece la señal y el valor de la última espira presente de esa capa, todos los valores de espiras son múltiplos de 233 que es el número de espiras por capa a excepción de la última capa.

La señal pulso de frecuencia rápida aplicada es un pulso que cumple las características de frente de onda $1.2 \mu s$ vista en un intervalo de $4 \mu s$ con un voltaje de 80 kV (voltaje menor en consideración al BIL) calificada como un transitorio de frente rápido. Ver Figura 93.

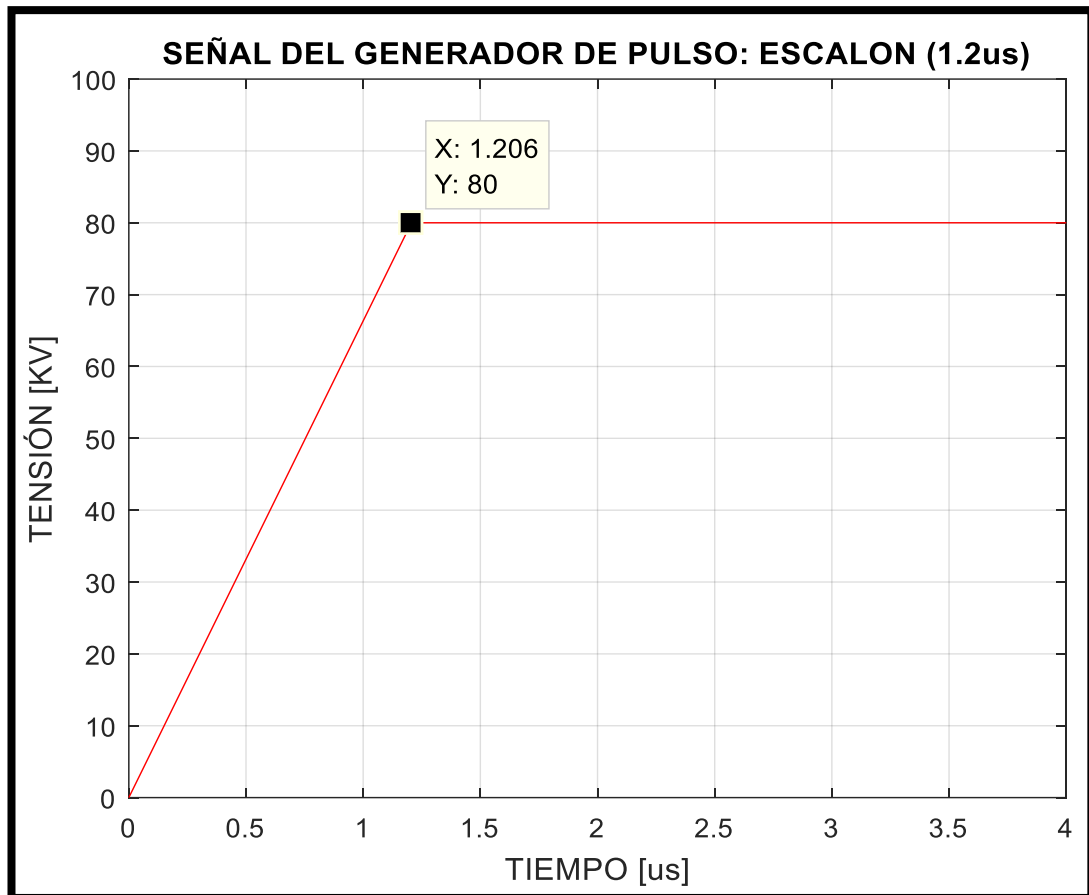


FIGURA 93: FORMA DE ONDA TIPO ESCALÓN (1.2 us) APLICADA AL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 3 KVA.

Se visualiza la respuesta transitoria en el dominio del tiempo desde la segunda a la décima sexta capa del devanado de alta tensión e indican que la segunda y cuarta capa están por encima del valor de referencia (80 kV). La grafica indica que se presenta una sobretensión de voltaje del 122% para la segunda capa y el 110% para la cuarta capa, además de una forma oscilatoria no tan pronunciada en respuesta a la aplicación de una señal escalón, esto indica que en frecuencias de kilo Hertz se provoca un esfuerzo adicional en el aislamiento respecto al valor para el que fue diseñado, se aprecia que este esfuerzo se da en las primeras capas del devanado y por lo tanto no hay una distribución uniforme de la tensión. Para el resto de capas también se produce un estado oscilatorio que se estabiliza rápidamente. Ver Figura 94.

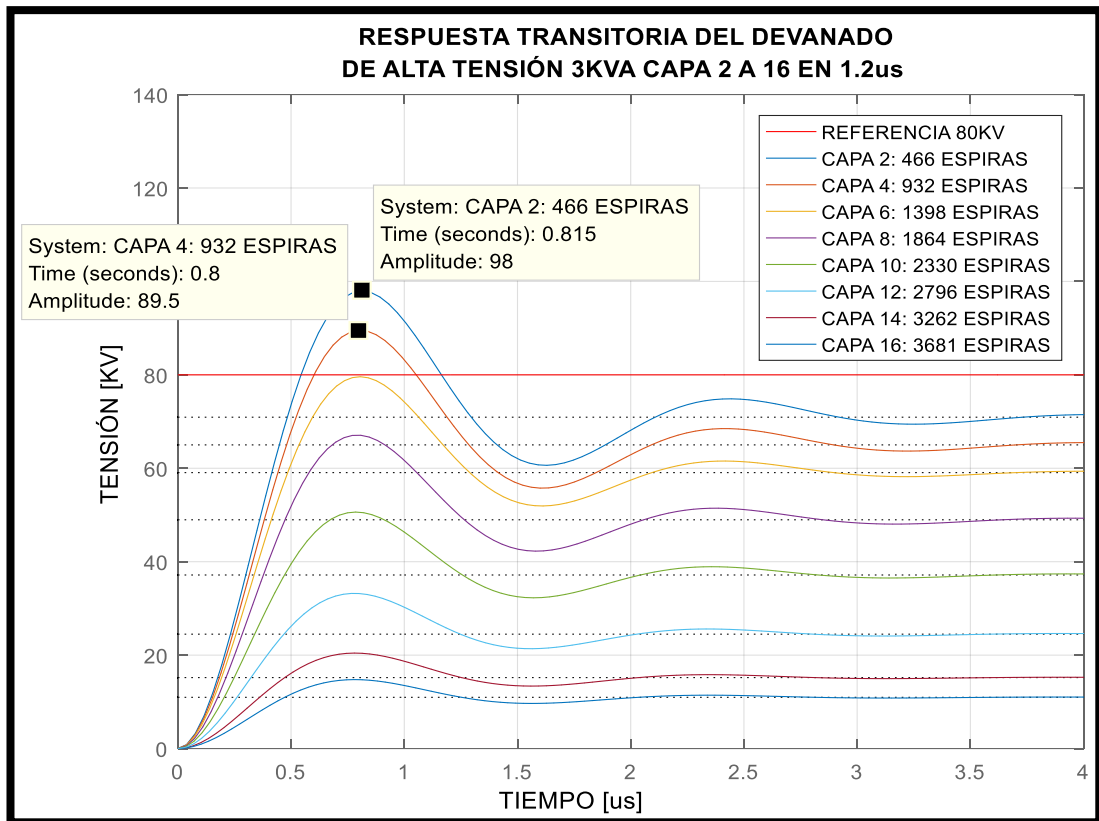


FIGURA 94: RESPUESTA TRANSITORIA DE LAS CAPAS PARES (2 A 16) DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN (1.2 μ s) DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 3 KVA.

La señal pulso de frecuencia rápida aplicada es un pulso que cumple las características de frente de onda 0.5μ s vista en un intervalo de 4μ s con un voltaje de 80 kV (voltaje menor en consideración al BIL) calificada como un transitorio de frente rápido. Ver Figura 95.

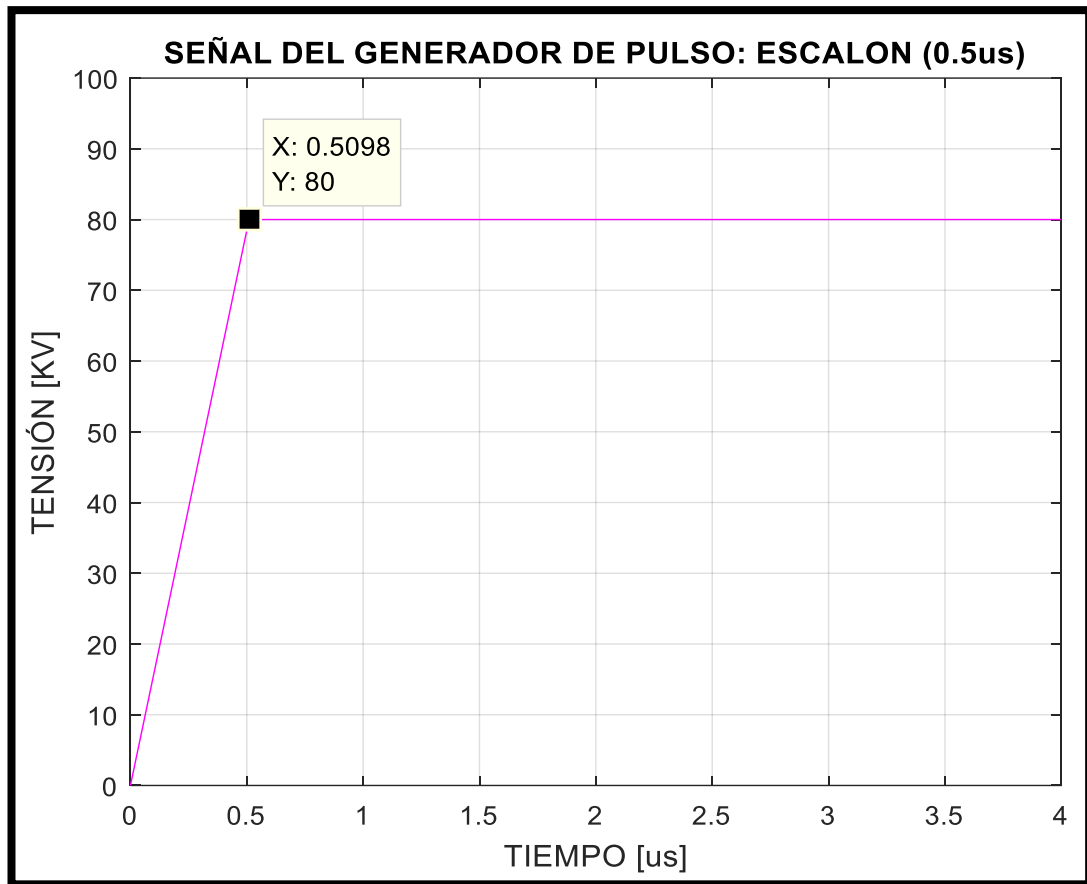


FIGURA 95: FORMA DE ONDA TIPO ESCALÓN (0.5 us) APLICADA AL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 3 KVA.

Se visualiza la respuesta transitoria de la segunda a la décima sexta capa del devanado de alta tensión después de aplicar una señal escalón con un frente de onda de $0.5 \mu\text{s}$ y se observa que la capa 2, 4 y 6 presentan una sobretensión de voltaje del 143%, 125% y 106% respectivamente, con oscilaciones más pronunciadas por estar en el rango de mega Hertz y es por ello que la capa 6 sobrepasa el valor de referencia, se concluye que a medida que aumenta la frecuencia, los voltajes de la capa van en aumento y no hay una distribución uniforme del voltaje. Ver Figura 96.

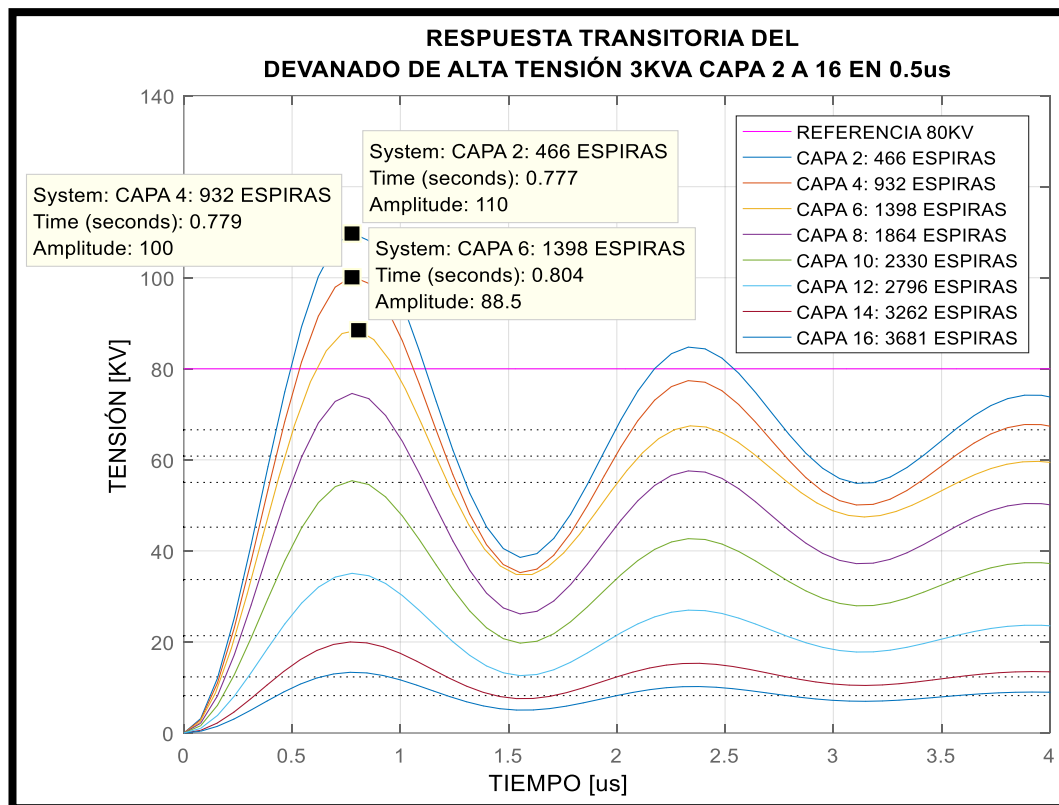


FIGURA 96: RESPUESTA TRANSITORIA DE LAS CAPAS PARES (2 A 16) DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN (0.5μs) DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 3KVA.

Se concluye que el transformador de 3 kVA en su lado de alta tensión está sufriendo elevaciones de tensión considerables que provocan el envejecimiento prematuro del material aislante (papel diamantado, cartón presspan dieléctrico, papel crepé dieléctrico, cintas de filamento) ya que por esos esfuerzos adicionales se concluye que no hay una distribución de tensión uniforme a lo largo del devanado y se enfatiza este suceso en las primeras capas del devanado [19]. Se sabe que el transformador es diseñado para soportar de manera ocasional este tipo de transitorios, por ende, el transformador si se mantiene en operación, pero menos tiempo del estimado por el fabricante.

Para el devanado de baja tensión se tiene una señal pulso de frecuencia rápida que cumple las características de frente de onda 1.2 μs vista en un intervalo de 4μs con un voltaje de 240 V (voltaje nominal del devanado) considerada como un transitorio de frente rápido. Cabe recalcar que los impulsos generalmente se aplican en el devanado de alta tensión, en este caso se hace el tratamiento para el lado de baja para ver su comportamiento y cumplir con uno de los objetivos específicos. Ver Figura 97.

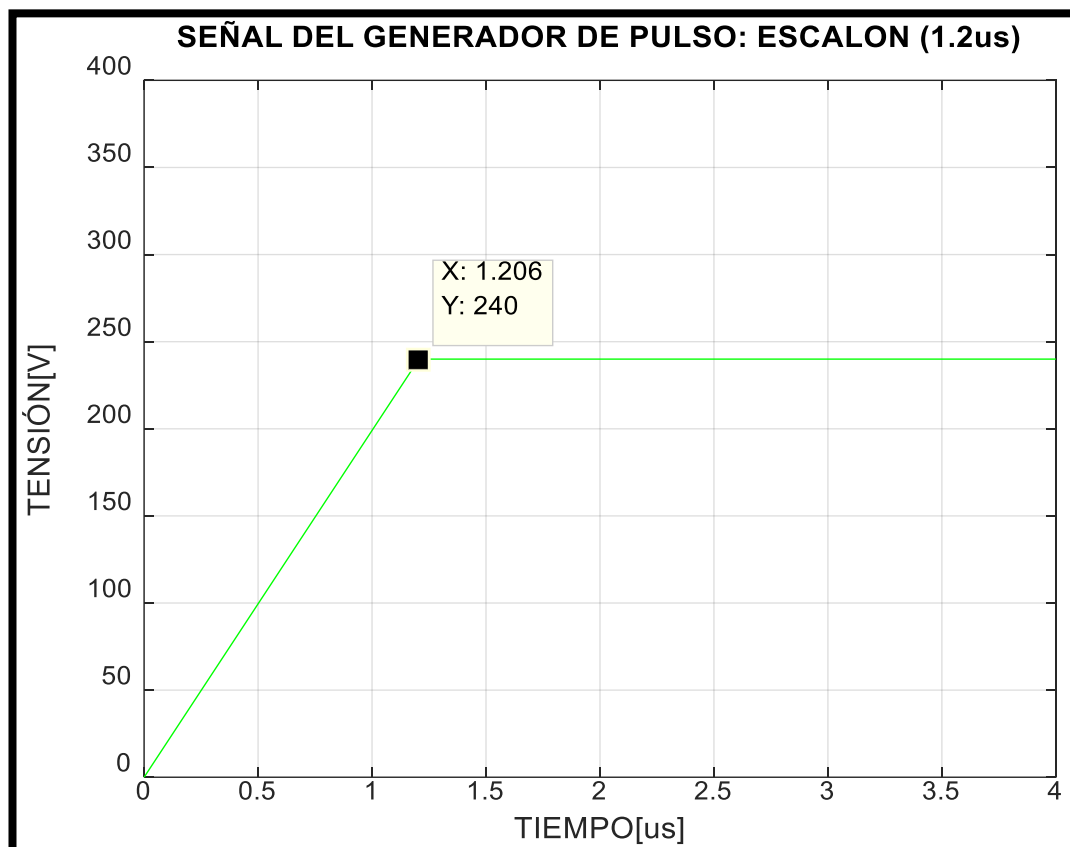


FIGURA 97: FORMA DE ONDA TIPO ESCALÓN (1.2 us) APLICADA AL DEVANADO DE BAJA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 3 KVA.

No se presentan sobretensiones en ninguna de las capas del devanado de baja tensión ya que todos los voltajes están por debajo del valor de referencia (240 V), se aprecia que hay movimiento oscilatorio ligero que se estabiliza prontamente, mostrando una distribución de voltaje uniforme. Ver Figura 98.

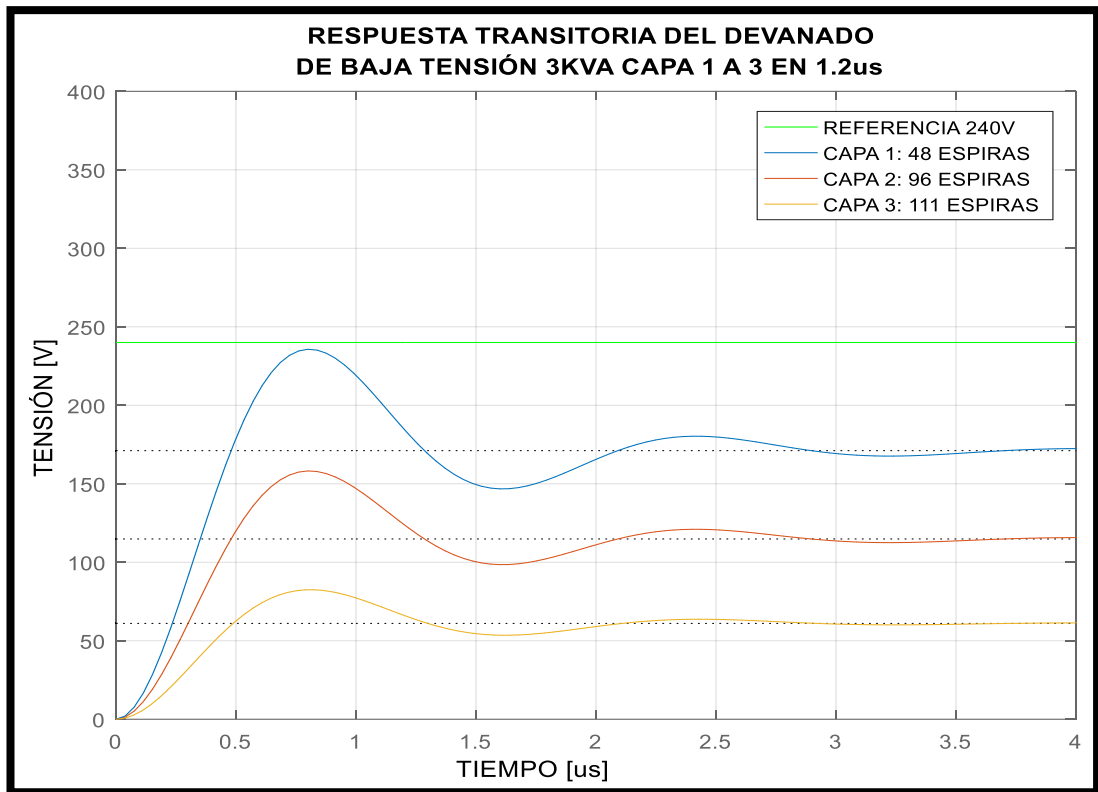


FIGURA 98: RESPUESTA TRANSITORIA DE TODAS LAS CAPAS DEL DEVANADO DE BAJA TENSIÓN (1.2 us) DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 3 KVA.

Para el devanado de baja tensión se tiene una señal pulso de frecuencia rápida aplicada es un pulso que cumple las características de frente de onda $0.5 \mu\text{s}$ vista en un intervalo de $4 \mu\text{s}$ con un voltaje de 240 V (voltaje nominal del devanado) calificada como un transitorio de frente rápido. Ver Figura 99.

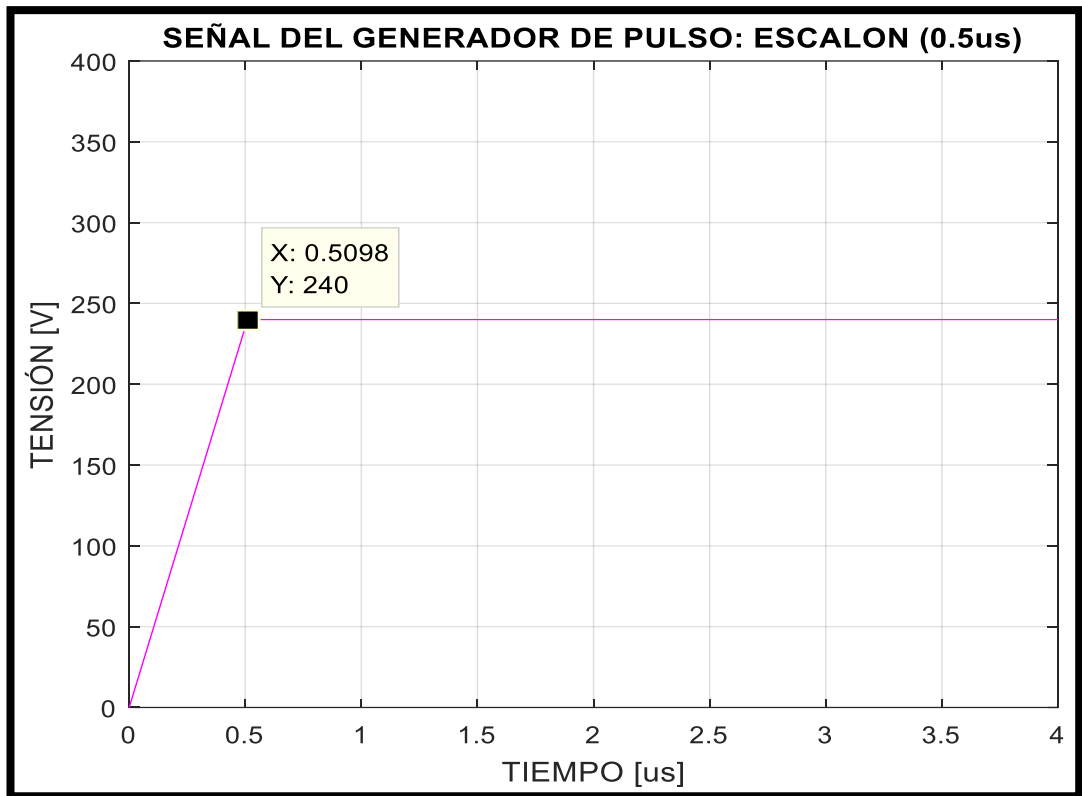


FIGURA 99: FORMA DE ONDA TIPO ESCALÓN (0.5 us) APLICADA AL DEVANADO DE BAJA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 3 KVA.

Cuando el frente de onda de la señal aplicada aumenta, las oscilaciones se vuelven más pronunciadas, para este caso, el voltaje de la primera capa está muy cercano al valor de referencia, se nota una distribución de voltaje uniforme, pero a medida que siga aumentando la frecuencia y pase a ser un transitorio de frecuencia muy rápida puede cambiar esta condición. Ver Figura 100.

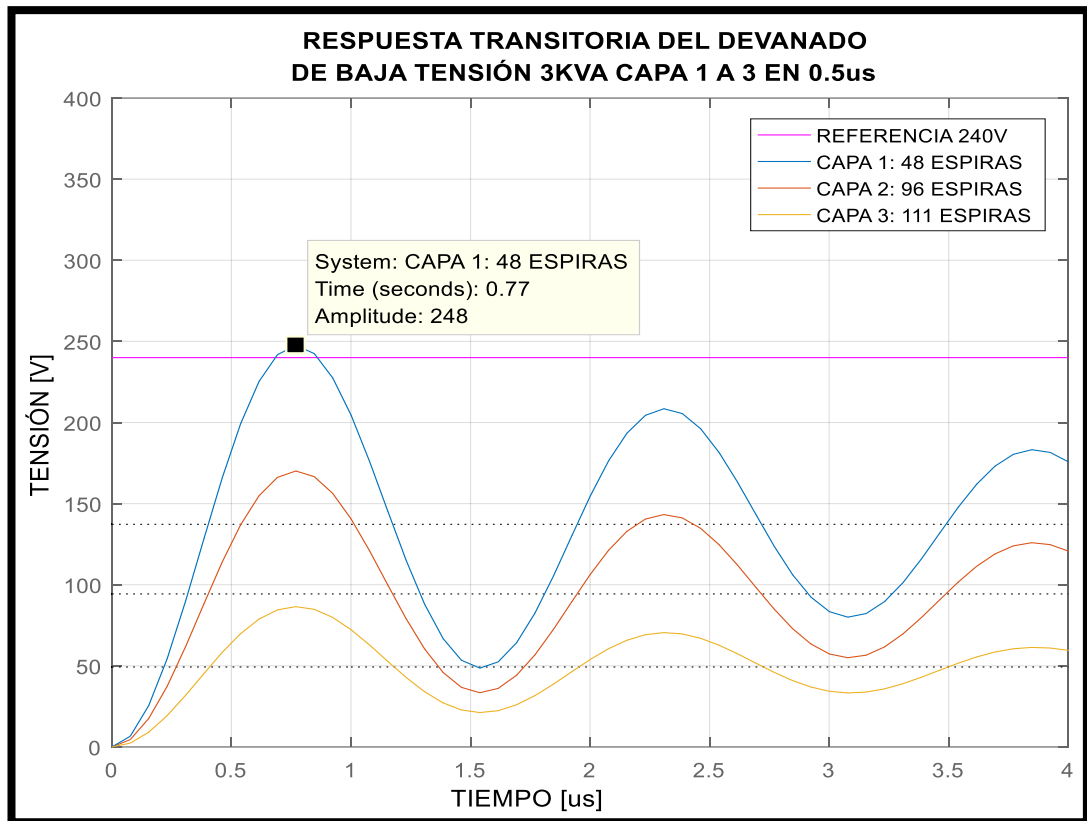


FIGURA 100: RESPUESTA TRANSITORIA DE TODAS LAS CAPAS DEL DEVANADO DE BAJA TENSIÓN (0.5 µs) DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 3 KVA.

Para el devanado de baja tensión del transformador de 3 kVA se concluye que tiene una distribución uniforme de voltaje a lo largo del devanado y es capaz de soportar los transitorios esporádicos a lo largo de la vida útil del transformador.

4.1.2. Análisis matemático a transformador 15 kVA en alta tensión

Con los datos proporcionados por la tabla 38 se procede a aplicar las fórmulas teóricas de la sección 3.3 para conseguir las matrices de capacitancia, inductancia, impedancia y admitancias cada una de ellas especificadas en sus respectivas unidades de medida.

TABLA 38: DATOS GEOMÉTRICOS Y CONSTRUCTIVOS DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 15 KVA
(LABORATORIO ALTA TENSIÓN) [31].

PARÁMETRO	VALOR		UNIDAD
PERMITIVIDAD DIELECTRICA DEL VACÍO	8.85E-12		F/m
POTENCIA DEL TRANSFORMADOR	15		KVA
VOLTAJE PRIMARIO 1	6300		V
VOLTAJE PRIMARIO 2	7620		V
VOLTAJE DEL DEVANADO SECUNDARIO	240/120		V
SELECTOR DE VOLTAJE	POSICIÓN	POSICIÓN	
	1	2	
TAP	VOLTAJE PRIMARIO		
A	6457.5	7810.5	V
B	6300.0	7620.0	V
C	6142.5	7429.5	V
D	5985.0	7239.0	V
E	5827.5	7048.5	V
ALAMBRE DE COBRE PARA ALTA TENSION (16)			
ALAMBRE DESNUDO	1.290		mm
AISLANTE DOBLE DEL AISLANTE	0.094		mm
NÚMERO DE CAPAS (LADO AT)	13		capas
NÚMERO DE VUELTAS EN UNA CAPA	129		espiras
NUMERO DE ESPIRAS	POSICIÓN	POSICIÓN	
	1	2	
TAP			
A	1345	1627	espiras
B	1313	1588	espiras
C	1280	1548	espiras
D	1247	1508	espiras
E	1214	1468	espiras
DISTANCIAS BOBINADO DE ALTA TENSION			
DISTANCIA INTERNA TRANSVERSAL	69.200		mm
DISTANCIA EXTERNA TRANSVERSAL	91.700		mm
DISTANCIA INTERNA LONGITUDINAL	90.700		mm
DISTANCIA EXTERNA LONGITUDINAL	113.192		mm
DISTANCIA ENTRE CAPAS EN BAJA TENSÍÓN	0.127		mm
DISTANCIA ENTRE CAPAS EN ALTA TENSÍÓN	0.375		mm
ALTURA DE LA BOBINA DE BAJA TENSÍÓN	178		mm
ALTURA DE LA BOBINA DE ALTA TENSÍÓN	182		mm
PERMITIVIDAD DIELECTRICA RELATIVA DEL AISLAMIENTO EN ALTA TENSÍÓN	3.1		

Matriz de capacitancia en devanado de alta tensión.

Para el devanado de alta tensión compuesto de 13 capas se presentan los valores y la matriz de capacitancia en las tablas 39 y 40.

TABLA 39: CAPACITANCIAS EN DEVANADO DE ALTA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 15 KVA (LABORATORIO ALTA TENSIÓN).

CAPACITANCIAS DEVANADO DE ALTA TENSIÓN (FARADIO)	
CHH1	2.55820150412598E-08
CHH2	2.61352740037795E-08
CHH3	2.66885329662992E-08
CHH4	2.72417919288189E-08
CHH5	2.77950508913386E-08
CHH6	2.83483098538583E-08
CHH7	2.89015688163780E-08
CHH8	2.94548277788976E-08
CHH9	3.00080867414173E-08
CHH10	3.05613457039370E-08
CHH11	3.11146046664567E-08
CHH12	3.16678636289764E-08
CH-G eq (PARALELO)	2.37475528007306E-09

TABLA 40: MATRIZ DE CAPACITANCIA EN NANOFARADIOS DEL DEVANADO DE ALTA TENSION DEL TRANSFORMADOR 15 KVA (LABORATORIO ALTA TENSION).

27.95677	-25.58202	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-25.58202	54.09204	-26.13527	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-26.13527	55.19856	-26.68853	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	-26.68853	56.30508	-27.24179	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	-27.24179	57.4116	-27.79505	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	-27.79505	58.51812	-28.34831	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	-28.34831	59.62463	-28.90157	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	-28.90157	60.73115	-29.45483	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	-29.45483	61.83767	-30.00809	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	-30.00809	62.94419	-30.56135	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	-30.56135	64.05071	-31.1146	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-31.1146	65.15722	-31.66786	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-31.66786	31.66786	0

La matriz está representada en nano faradio (1×10^{-9})

Matriz de inductancia en devanado de alta tensión.

Para el devanado de alta tensión compuesto de 13 capas se despliega la matriz de inductancia en la tabla 41.

TABLA 41: MATRIZ DE INDUCTANCIA EN MILIHENRIOS DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR 15 KVA (LABORATORIO ALTA TENSIÓN).

0.1537	0.1600	0.1661	0.1723	0.1786	0.1848	0.1912	0.1979	0.2047	0.2119	0.2193	0.2269	0.2351
0.1525	0.1638	0.17	0.1763	0.1827	0.1891	0.1957	0.2024	0.2093	0.2165	0.2239	0.2315	0.2396
0.1516	0.1628	0.1744	0.1807	0.1873	0.1938	0.2006	0.2075	0.2147	0.222	0.2298	0.2377	0.2463
0.1510	0.1622	0.1735	0.185	0.1915	0.1982	0.2051	0.2122	0.2195	0.227	0.2349	0.2431	0.2518
0.1501	0.1610	0.1722	0.1835	0.1953	0.2018	0.2083	0.2159	0.2236	0.2313	0.2395	0.2479	0.2568
0.1498	0.1609	0.1721	0.1835	0.1952	0.2074	0.2143	0.2217	0.2292	0.2371	0.2452	0.2539	0.2628
0.1495	0.1604	0.1716	0.1828	0.1946	0.2065	0.2190	0.2265	0.2341	0.2420	0.2504	0.2591	0.2684
0.1491	0.1600	0.1711	0.1825	0.1941	0.2059	0.2184	0.2313	0.2390	0.2472	0.2556	0.2644	0.2739
0.1488	0.1597	0.1707	0.182	0.1936	0.2054	0.2178	0.2306	0.2439	0.2522	0.2608	0.2697	0.2794
0.1484	0.1595	0.1705	0.1816	0.1931	0.2051	0.2172	0.23	0.2433	0.2572	0.2658	0.2749	0.2845
0.1483	0.1594	0.1704	0.1816	0.1931	0.205	0.2174	0.2302	0.2435	0.2575	0.2722	0.2819	0.2922
0.1489	0.1599	0.171	0.1823	0.194	0.2062	0.2191	0.2325	0.2465	0.2616	0.2776	0.2949	0.3076
0.1466	0.1573	0.168	0.1788	0.1895	0.2004	0.2115	0.2225	0.2335	0.2446	0.2553	0.2658	0.2756

La matriz está representada en mili henrios (1×10^{-3})

Matriz de impedancia en devanado de alta tensión.

Para el devanado de alta tensión compuesto de 13 capas se despliega la matriz de impedancia a frecuencia fundamental en la tabla 42.

TABLA 42: MATRIZ DE IMPEDANCIA EN OHMIOS DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR 15 KVA (LABORATORIO ALTA TENSIÓN).

0.0015+0.0579j	0.0015+0.0603j	0.0016+0.0626j	0.0016+0.0649j	0.0017+0.0673j	0.0017+0.0697j	0.0018+0.0721j	0.0019+0.0746j	0.0019+0.0772j	0.002+0.0799j	0.0021+0.0827j	0.0021+0.0855j	0.0022+0.0886j
0.0014+0.0575j	0.0015+0.0617j	0.0016+0.0641j	0.0017+0.0665j	0.0017+0.0689j	0.0018+0.0713j	0.0018+0.0738j	0.0019+0.0763j	0.002+0.0789j	0.002+0.0816j	0.0021+0.0844j	0.0022+0.0873j	0.0023+0.0903j
0.0014+0.0572j	0.0015+0.0614j	0.0016+0.0657j	0.0017+0.0681j	0.0018+0.0706j	0.0018+0.0731j	0.0019+0.0756j	0.002+0.0782j	0.002+0.0809j	0.0021+0.0837j	0.0022+0.0866j	0.0022+0.0896j	0.0023+0.0928j
0.0014+0.0569j	0.0015+0.0611j	0.0016+0.0654j	0.0017+0.0697j	0.0018+0.0722j	0.0019+0.0747j	0.0019+0.0773j	0.002+0.08j	0.0021+0.0828j	0.0021+0.0856j	0.0022+0.0886j	0.0023+0.0916j	0.0024+0.0949j
0.0014+0.0566j	0.0015+0.0607j	0.0016+0.0649j	0.0017+0.0692j	0.0018+0.0736j	0.0019+0.0761j	0.002+0.0785j	0.002+0.0814j	0.0021+0.0843j	0.0022+0.0872j	0.0023+0.0903j	0.0023+0.0935j	0.0024+0.0968j
0.0014+0.0565j	0.0015+0.0607j	0.0016+0.0649j	0.0017+0.0692j	0.0018+0.0736j	0.002+0.0782j	0.002+0.0808j	0.0021+0.0836j	0.0022+0.0864j	0.0022+0.0894j	0.0023+0.0924j	0.0024+0.0957j	0.0025+0.0991j
0.0014+0.0564j	0.0015+0.0605j	0.0016+0.0647j	0.0017+0.0689j	0.0018+0.0734j	0.002+0.0779j	0.0021+0.0826j	0.0021+0.0854j	0.0022+0.0883j	0.0023+0.0912j	0.0024+0.0944j	0.0024+0.0977j	0.0025+0.1012j
0.0014+0.0562j	0.0015+0.0603j	0.0016+0.0645j	0.0017+0.0688j	0.0018+0.0732j	0.0019+0.0776j	0.0021+0.0823j	0.0022+0.0872j	0.0023+0.0901j	0.0023+0.0932j	0.0024+0.0963j	0.0025+0.0997j	0.0026+0.1032j
0.0014+0.0561j	0.0015+0.0602j	0.0016+0.0644j	0.0017+0.0686j	0.0018+0.073j	0.0019+0.0774j	0.0021+0.0821j	0.0022+0.0869j	0.0023+0.0919j	0.0024+0.0951j	0.0025+0.0983j	0.0025+0.1017j	0.0026+0.1053j
0.0014+0.056j	0.0015+0.0601j	0.0016+0.0643j	0.0017+0.0685j	0.0018+0.0728j	0.0019+0.0773j	0.0021+0.0819j	0.0022+0.0867j	0.0023+0.0917j	0.0024+0.097j	0.0025+0.1002j	0.0026+0.1036j	0.0027+0.1073j
0.0014+0.0559j	0.0015+0.0601j	0.0016+0.0642j	0.0017+0.0684j	0.0018+0.0728j	0.0019+0.0773j	0.0021+0.0819j	0.0022+0.0868j	0.0023+0.0918j	0.0024+0.0971j	0.0026+0.1026j	0.0027+0.1063j	0.0028+0.1101j
0.0014+0.0561j	0.0015+0.0603j	0.0016+0.0644j	0.0017+0.0687j	0.0018+0.0732j	0.0019+0.0777j	0.0021+0.0826j	0.0022+0.0876j	0.0023+0.0929j	0.0025+0.0986j	0.0026+0.1046j	0.0028+0.1112j	0.0029+0.116j
0.0014+0.0553j	0.0015+0.0593j	0.0016+0.0633j	0.0017+0.0674j	0.0018+0.0714j	0.0019+0.0755j	0.002+0.0797j	0.0021+0.0839j	0.0022+0.088j	0.0023+0.0922j	0.0024+0.0962j	0.0025+0.1002j	0.0026+0.1039j

La matriz está representada en ohmios.

Matriz de admitancia en devanado de alta y baja tensión.

Para el devanado de alta tensión compuesta de 13 capas se despliega la matriz de admitancia a frecuencia fundamental en la tabla 43.

TABLA 43: MATRIZ DE ADMITANCIA EN SIEMENS DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR 15 KVA (LABORATORIO ALTA TENSIÓN).

4.514+10.539j	-4.13-9.644j	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-4.13-9.644j	8.733+20.392j	-4.22-9.853j	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-4.22-9.853j	8.912+20.809j	-4.309-10.061j	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	-4.309-10.061j	9.091+21.227j	-4.398-10.27j	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	-4.398-10.27j	9.269+21.644j	-4.488-10.478j	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	-4.488-10.478j	9.448+22.061j	-4.577-10.687j	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	-4.577-10.687j	9.626+22.478j	-4.666-10.896j	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	-4.666-10.896j	9.805+22.895j	-4.756-11.104j	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	-4.756-11.104j	9.984+23.312j	-4.845-11.313j	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	-4.845-11.313j	10.162+23.729j	-4.934-11.521j	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	-4.934-11.521j	10.341+24.147j	-5.024-11.73j	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-5.024-11.73j	10.52+24.564j	-5.113-11.939j	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-5.113-11.939j	5.113+11.939j	0

La matriz está representada en Siemens, la parte real en zepto Siemens (1×10^{-21}) y la parte imaginaria en micro Siemens (1×10^{-6})

La señal pulso de frecuencia rápida aplicada es de una descarga atmosférica que cumple las características de frente de onda $1.2 \mu\text{s}$ vista en un intervalo de $50 \mu\text{s}$ con un voltaje de 47 kV que es el 49.47% del impulso de tensión plena (95 kV) considerada como un transitorio de frente rápido. Ver Figura 101.

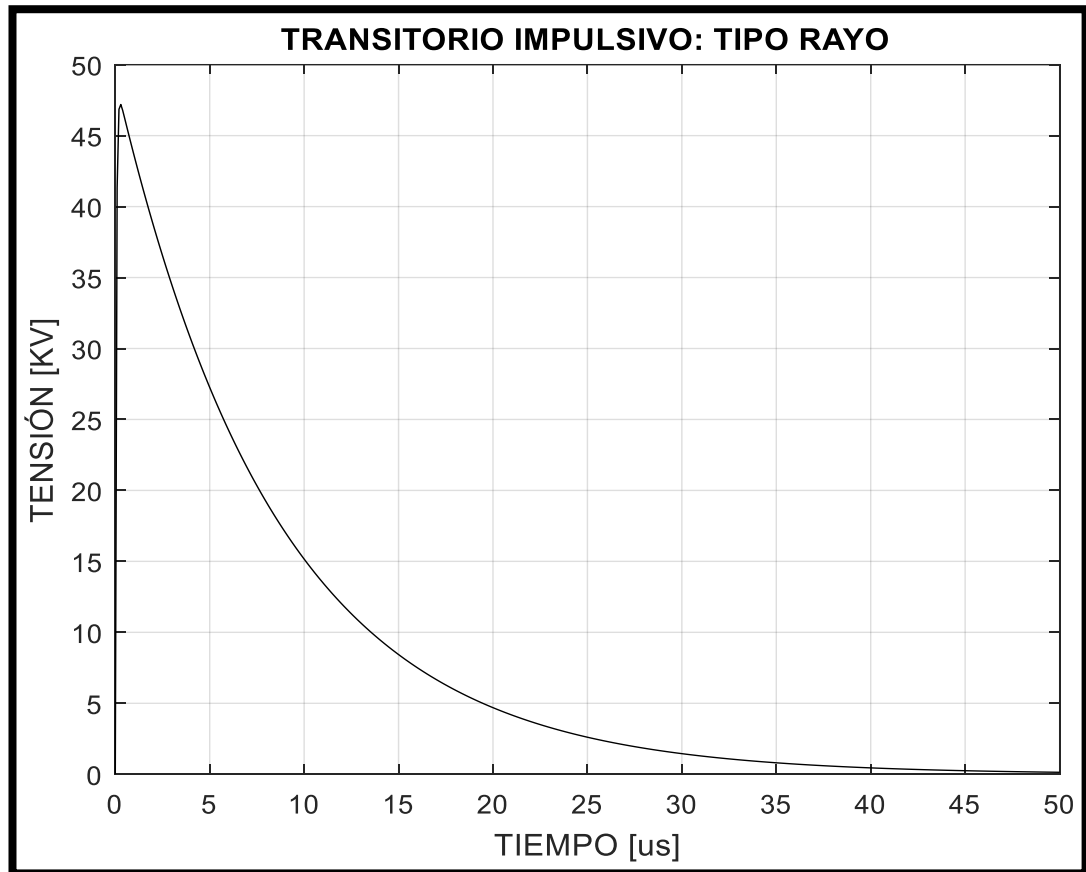


FIGURA 101: FORMA DE ONDA TIPO RAYO APLICADA AL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 15 KVA (LABORATORIO ALTA TENSIÓN).

Se visualiza la respuesta transitoria de las capas impares (1 a 5) del devanado de alta tensión e indican que hay sobretensión del 123% en la capa 1 mientras que en la capa 3 hay una elevación de voltaje del 104% que no es considerada sobretensión ya que tiene que ser igual o mayor al 110% [21]. Para el caso de la primera capa es un esfuerzo adicional que soporta cada vez que sus bushing de alta tensión reciben una descarga atmosférica. Ver Figura 102.

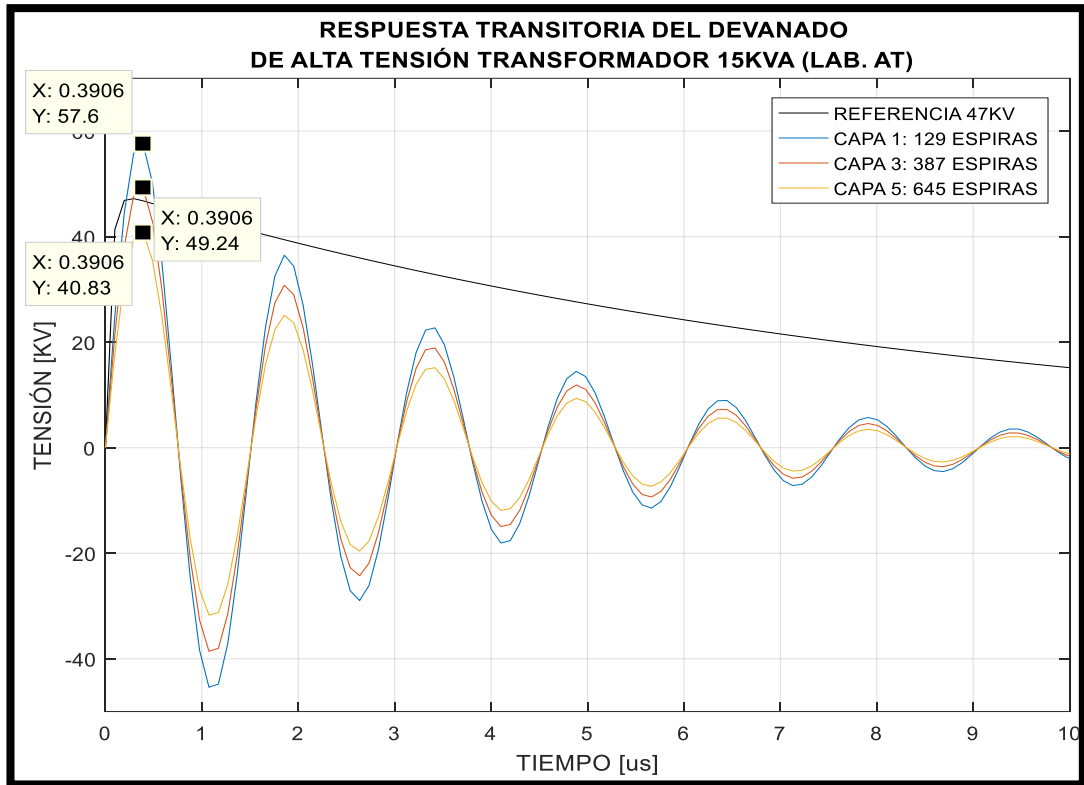


FIGURA 102: RESPUESTA TRANSITORIA DE LAS CAPAS IMPARES (1 A 5) DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN 15 KVA (LABORATORIO ALTA TENSIÓN).

Para el caso de las capas impares desde el 7 hasta el 13, se presenta un comportamiento oscilatorio por debajo de la señal de referencia, esto quiere decir que se mantiene una distribución de voltaje uniforme a lo largo del devanado y la parte dieléctrica está cumpliendo la función para la que fue diseñada. Ver Figura 103.

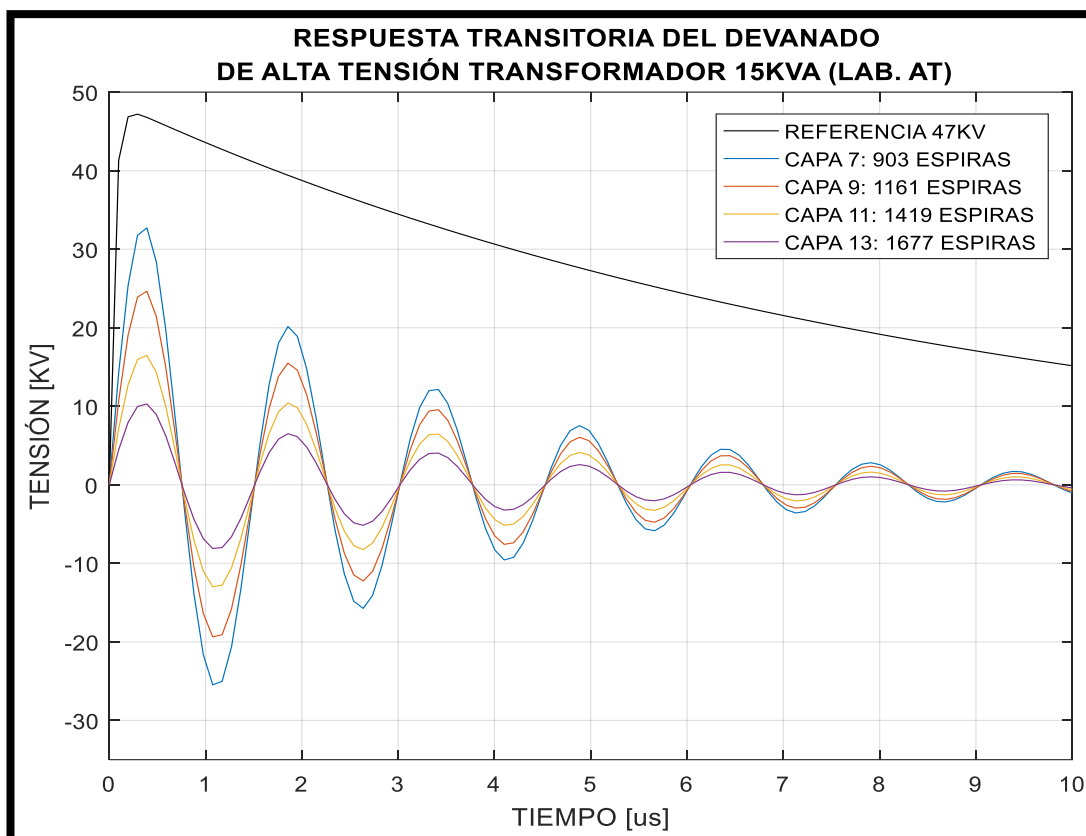


FIGURA 103: RESPUESTA TRANSITORIA DE LAS CAPAS IMPARES (7 A 13) DEL DEVANADO DE ALTA TENSION DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCION 15 KVA (LABORATORIO ALTA TENSION).

Se concluye que las dos primeras capas del devanado de alta tension están sufriendo un sobre esfuerzo y esto se ocasiona porque la mayor concentracion de energía se da en las primeras capas, el comportamiento oscilatorio y amortiguado se debe a los componentes resistivos, capacitivos e inductivos presentes en los devanados. En este caso el transformador es apto para seguir trabajando ya que los transitorios impulsivos que incidan en el terminal de línea son ocasionales.

4.2. Resultados de los ensayos dieléctricos aplicados al Transformador de Distribución 15KVA

En este apartado se presenta de forma detallada los resultados obtenidos de las pruebas cumplidas, en cada una de ellas se evalúa el estado del equipo.

4.2.1. Prueba de Tensión de Impulso por Rayo

Con una temperatura de 20°C se llevó a cabo la prueba de tensión de impulso por rayo con los elementos del conjunto de entrenamiento modular HV 9000 High Voltage.

En la tabla 44 se presentan los resultados del ensayo en tensión reducida y tensión plena con tres impulsos por cada caso, en los cuales no se llega al voltaje máximo por razones de seguridad de los equipos. Ver Figura 104.

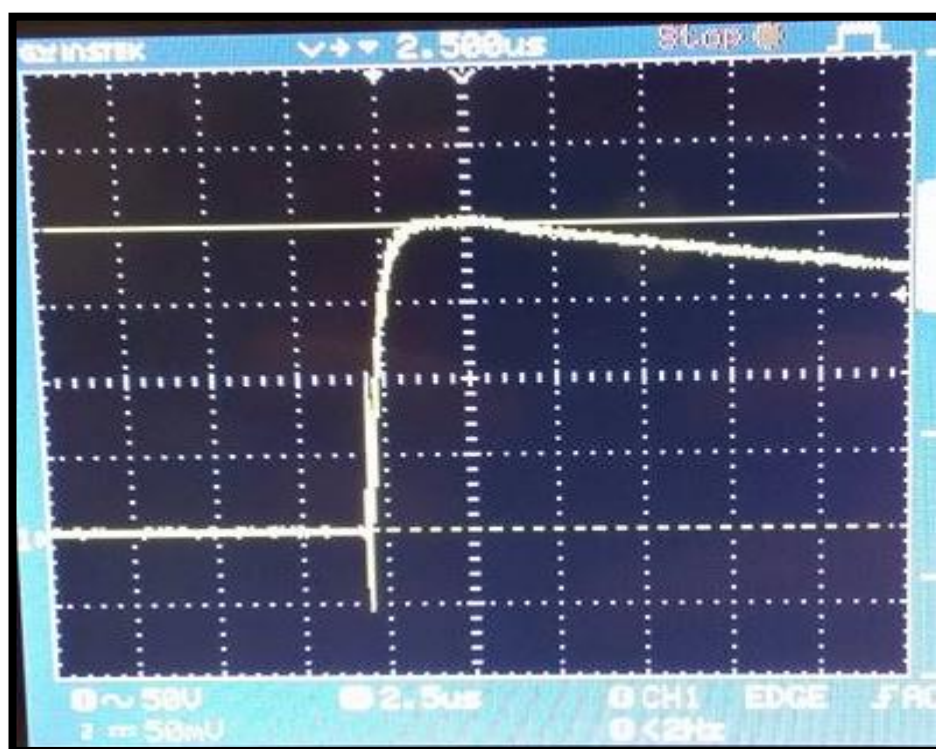


FIGURA 104: IMPULSO TIPO RAYO EXPERIMENTAL [36].

TABLA 44: RESULTADOS DE VOLTAJE Y CORRIENTE EN PRUEBA DE IMPULSO TIPO RAYO.

IMPULSO TIPO RAYO		
VOLTAJE DE IMPULSO ALTA TENSION	VOLTAJE BAJA TENSION	CORRIENTE BAJA TENSION
KV	V	A
47.00	30	0.4
47.00	30	0.4
46.90	30	0.4
90.40	60	0.8
90.90	60	0.8
90.70	60	0.8

Durante el proceso no se evidenció flameos entre bujes, variación de corriente o arcos eléctricos; concluyendo que el transformador está en óptimas condiciones para trabajar a la intemperie siendo capaz de soportar las descargas atmosféricas durante su vida útil.

La gráfica de respuesta transitoria obtenida es de todo el devanado de alta tensión en el intervalo de microsegundos ya que el transformador no se presta para tomar mediciones de cada una de las capas, se demuestra que la señal es oscilatoria y tiene un pico de voltaje inicial que va descendiendo de forma amortiguada hasta estabilizarse, esta forma de onda tiene mucha similitud con las señales de voltaje presentadas en la sección 4.1.2. Ver Figura 105.

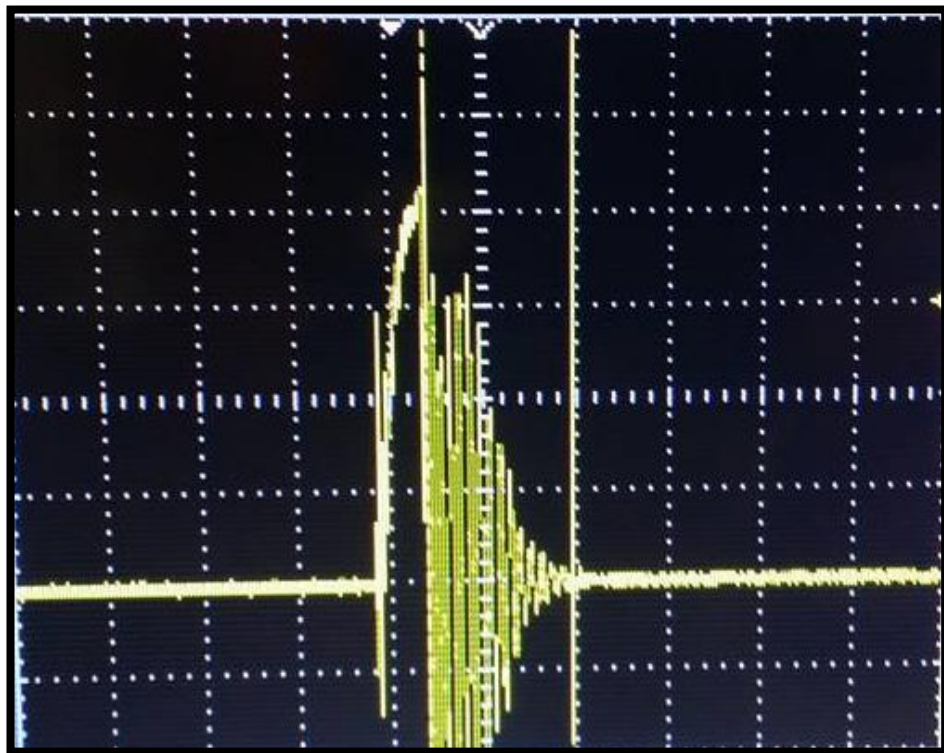


FIGURA 105: RESPUESTA TRANSITORIA DEL TOTAL DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN [36].

4.2.2. Prueba de Tensión de Impulso por Maniobra

Con una temperatura de 20°C se llevó a cabo la prueba de tensión de impulso por maniobra con los elementos del conjunto de entrenamiento modular HV 9000 High Voltage.

En la tabla 45 se presentan los resultados del ensayo en tensión reducida y tensión plena con tres impulsos para cada caso, en los cuales no se llega al voltaje máximo por razones de seguridad de los equipos.

TABLA 45: RESULTADOS DE VOLTAJE Y CORRIENTE EN PRUEBA DE IMPULSO TIPO MANIOBRA.

IMPULSO TIPO MANIOBRA		
VOLTAJE DE IMPULSO ALTA TENSION	VOLTAJE BAJA TENSION	CORRIENTE BAJA TENSION
KV	V	A
46.70	31	0.4
46.90	31	0.4
47.00	31	0.4
90.10	60	0.8
90.30	60	0.8
90.60	60	0.8

No se presentó flameo, descargas y arcos eléctricos durante la ejecución del ensayo; el transformador puede sobrellevar los impulsos por conmutación con normalidad.

4.2.3. Prueba de Resistencia de Aislamiento

Con una temperatura de 20°C en el laboratorio de Alta tensión de la Universidad Politécnica Salesiana se llevó a cabo la prueba de resistencia de aislamiento del transformador de distribución monofásico de 15 KVA con el equipo Megger MIT 525 y el software Power DB Lite.

En la tabla 46 se presentan los resultados de las mediciones en las tres configuraciones, cada una se analizó por 10 minutos sin necesidad de usar el factor de corrección por temperatura, todas las lecturas del megóhmetro fueron procesadas por el software en tiempo real.

TABLA 46: MEDICIONES DE LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO EN TRES CONFIGURACIONES.

	ALTA – BAJA MÁS TIERRA	BAJA – ALTA MÁS TIERRA	ALTA - BAJA
TIEMPO (MINUTOS)	RESISTENCIA DE AISLAMIENTO (MΩ)	RESISTENCIA DE AISLAMIENTO (MΩ)	RESISTENCIA DE AISLAMIENTO (MΩ)
0.25	14.26	9.19	18.84
0.30	22.40	12.98	32.90
0.50	22.30	13.07	32.60
0.75	26.50	14.8	39.80
1	29.70	15.99	45.40
2	37.80	18.98	60.20
3	42.80	20.90	68.80
4	46.30	22.30	74.60
5	48.80	23.40	78.50
6	50.70	24.40	81.70
7	52.20	25.10	84.10
8	53.30	25.80	86.20
9	54.60	26.30	87.90
10	55.60	26.80	89.50

Se exponen las curvas de polarización ascendentes en el tiempo. Ver Figura 106, 107 y 108.

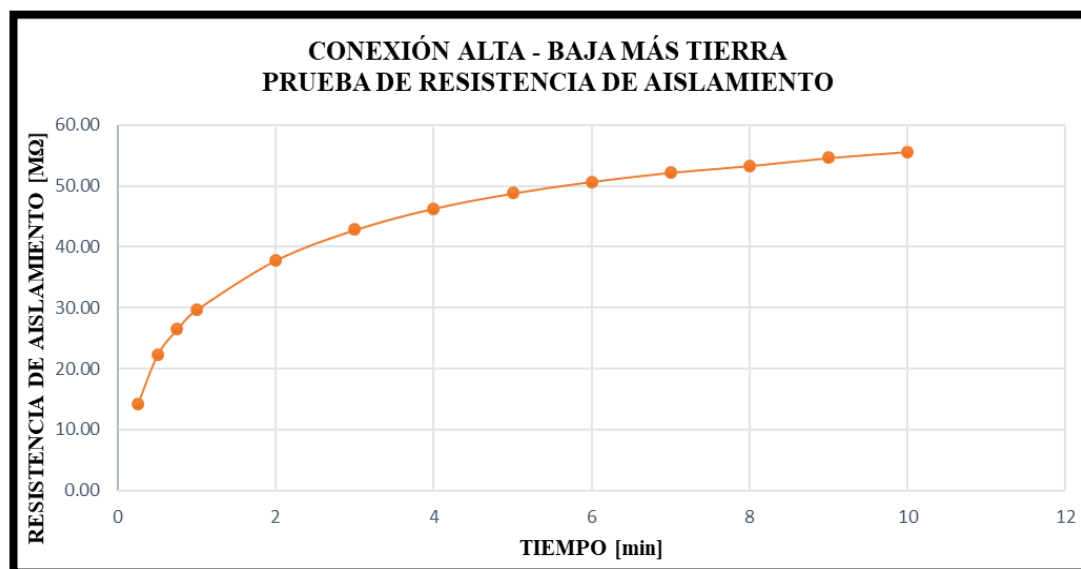


FIGURA 106: CURVA DE POLARIZACIÓN DE LA CONEXIÓN ALTA TENSIÓN - BAJA TENSIÓN MÁS TIERRA.

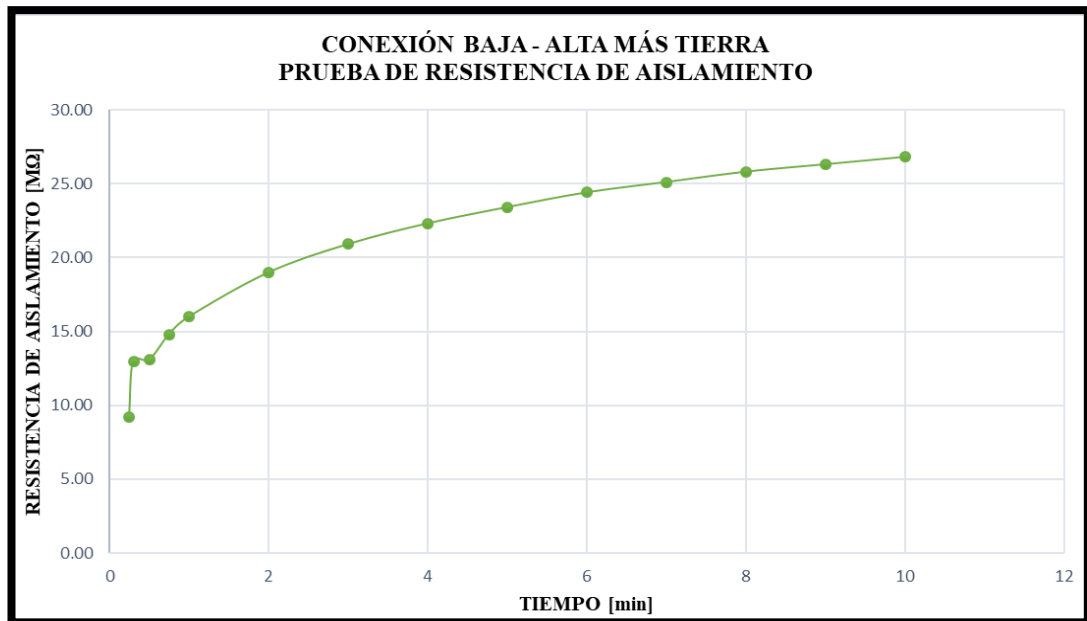


FIGURA 107: CURVA DE POLARIZACIÓN DE LA CONEXIÓN BAJA TENSIÓN - ALTA TENSIÓN MÁS TIERRA.

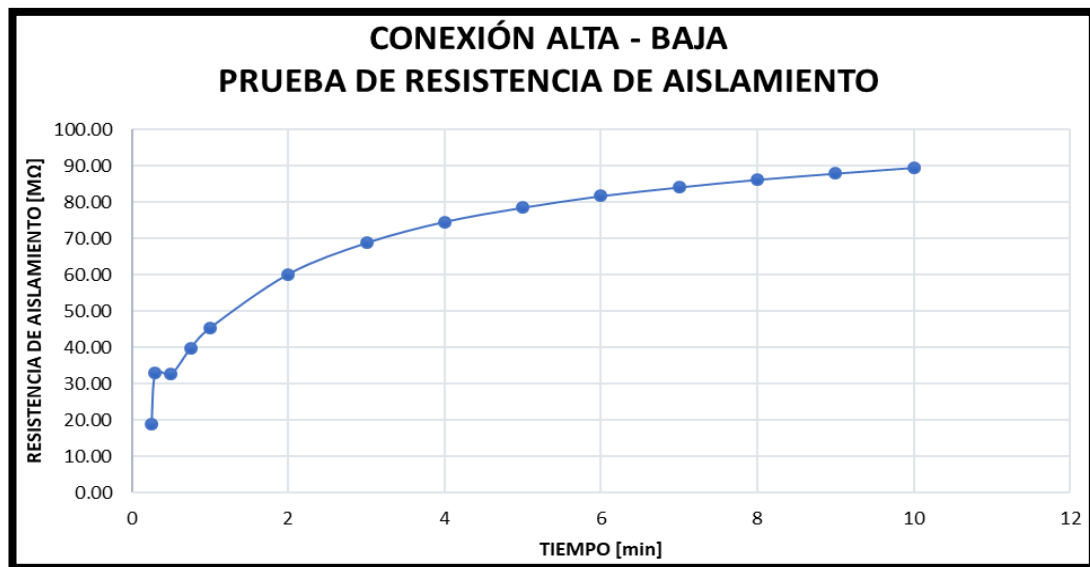


FIGURA 108: CURVA DE POLARIZACIÓN DE LA CONEXIÓN ALTA TENSIÓN - BAJA TENSIÓN.

Finalizando el análisis de las gráficas, las curvas presentadas anteriormente son estables en todos los casos indicando que la máquina es ideal para seguir en operación por tiempo prolongado.

En la tabla 47 se tiene el índice de polarización en un rango de 1.68 a 1.97 lo que significa que es cuestionable de acuerdo a la tabla 4 mientras que la absorción dieléctrica está en rango de 1.22 a 1.39 considerado como aceptable de acuerdo a la

tabla 4. Según la norma IEC60085 “Aislamiento eléctrico. Evaluación y designación térmica” los valores están dentro de lo establecido, por lo tanto, la humedad presente en el aislamiento es baja.

TABLA 47: VALORES TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES DEL ÍNDICE DE POLARIZACIÓN DE LAS TRES CONFIGURACIONES EN LA PRUEBA DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO.

		TEÓRICO	EXPERIMENTAL	ERROR
ALTA – BAJA MÁS TIERRA	ÍNDICE DE POLARIZACIÓN	1.87	1.8720538721	0.1098%
	ABSORCIÓN DIELÉCTRICA	1.33	1.3258928571	0.3088%
BAJA – ALTA MÁS TIERRA	ÍNDICE DE POLARIZACIÓN	1.68	1.6760475297	0.2353%
	ABSORCIÓN DIELÉCTRICA	1.22	1.2318952234	0.9750%
ALTA - BAJA	ÍNDICE DE POLARIZACIÓN	1.97	1.9713656388	0.0693%
	ABSORCIÓN DIELÉCTRICA	1.39	1.3799392097	0.7238%

4.2.4. Prueba de Voltaje aplicado

Con una temperatura de 20°C se llevó a cabo la prueba de voltaje aplicado con el conjunto de entrenamiento modular HV 9000 High Voltage, los valores de voltaje y corrientes están detallados en Anexos.

Se visualiza el voltaje de alta tensión de 0 a 34 KV aplicado al transformador, que sube en un lapso de 40 segundos, se mantiene constante por un minuto y desciende lentamente en 20 segundos. Ver Figura 109.

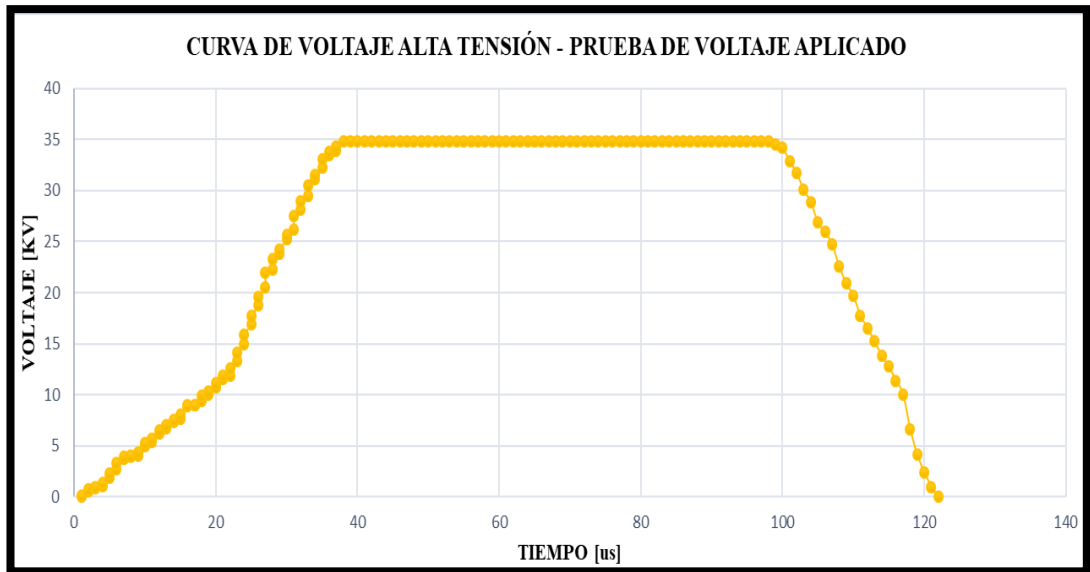


FIGURA 109: CURVA DE VOLTAJE EN ALTA TENSION DE LA PRUEBA DE VOLTAJE APLICADO.

En el intervalo comprendido de 40 hasta 100 segundos se refleja una corriente totalmente estable sin picos ni bajas bruscas asegurando que la máquina está en excelente estado para soportar esfuerzos elevados, además que la clase y tipo de material utilizado para el aislamiento interno es adecuado en todos los aspectos porque soporta un voltaje 2,5 veces mayor al nominal. Cabe recalcar que durante el ensayo no se produjo ningún flameo en los puntos de conexión, ni ruidos o burbujas dentro del tanque. Ver Figura 110.

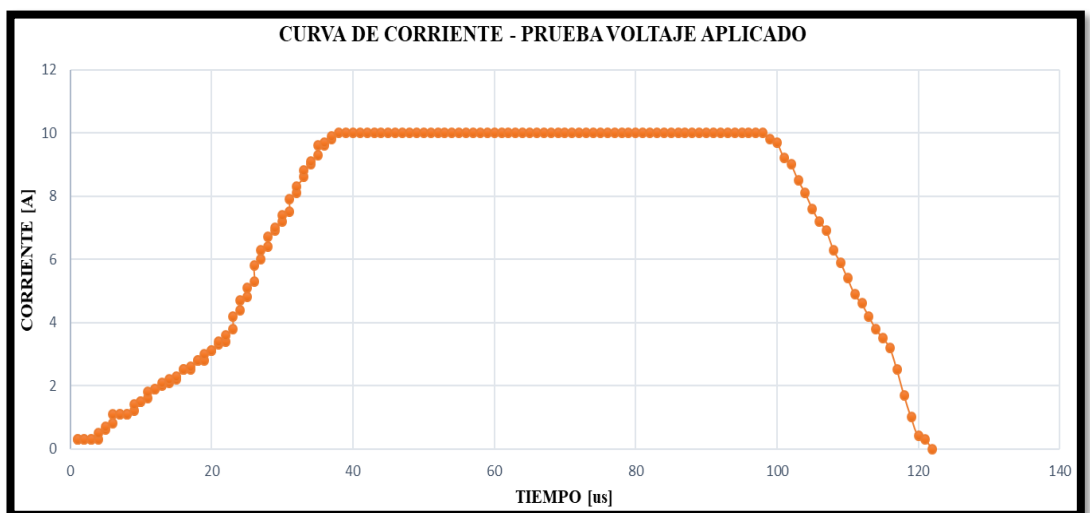


FIGURA 110: CORRIENTE EN BAJA TENSION DEL TRANSFORMADOR DURANTE LA PRUEBA DE VOLTAJE APLICADO.

Terminado todos los procedimientos de los ensayos dieléctricos, se constata que el transformador no presenta ningún tipo de fallas y su diseño dieléctrico ha sido planteado satisfactoriamente para que soporte los transitorios de rápida frecuencia.

CONCLUSIONES

El trabajo desarrollado es sumamente importante porque permitió analizar matemáticamente los parámetros eléctricos y diseño dieléctrico del devanado monofásico de un transformador de distribución de 3 y 15 kVA en base a las propiedades eléctricas del material aislante y su construcción geométrica interna, además de conocer el comportamiento de los devanados cuando se someten a transitorios de rápida frecuencia.

El desarrollo del modelo se realizó en el dominio de la frecuencia porque se consideran las pérdidas de efecto proximidad, efecto piel y pérdidas dieléctricas incluidas en los parámetros de impedancia y admitancia que no son apreciables cuando se realiza el análisis directamente en el dominio del tiempo.

El modelo de los parámetros distribuidos de la línea de transmisión multiconductora reduce efectivamente el orden de las matrices para que los tiempos de cómputo sean menores y predice correctamente la respuesta transitoria interna a lo largo del devanado de un transformador monofásico de distribución con los devanados tipo capas.

Los elementos capacitivos, resistivos e inductivos influyen claramente en la forma de onda de la respuesta transitoria de los voltajes en las capas según el pulso de frecuencia rápida aplicado.

Los ensayos dieléctricos efectuados al transformador monofásico de distribución 15 kVA determinan que es capaz de soportar las sobretensiones originadas por las descargas atmosféricas y operaciones de maniobra que se presenten durante su funcionamiento, además de la distribución uniforme del potencial a lo largo del devanado de alta tensión.

Al finalizar el proyecto se ha cumplido:

- Obtener los datos de los aislamientos eléctricos del bobinado primario y secundario del transformador de distribución monofásico de 3 kVA.

En el Anexo C se plantea el diseño del transformador de distribución monofásico de 3 kVA que incluye el cálculo de número de espiras, cálculo de conductores y diseño dieléctrico (cálculo del aislamiento) para los devanados de alta y baja tensión; además

del uso de esta información para el cálculo de los parámetros eléctricos del transformador expuesto en el Capítulo 3 sección 3.

- Plantear las ecuaciones diferenciales que rigen dichos aislamientos eléctricos.

En el Capítulo 3 sección 2 se expone el desarrollo amplio que parten de las ecuaciones diferenciales parciales de segundo orden mejor conocidas como las ecuaciones del telegrafista que conllevan al desarrollo del modelo de la línea de transmisión multiconductora en una red de dos puertos.

- Desarrollar la interfaz gráfica e ingreso de ecuaciones con la herramienta informática-matemática MATLAB®.

En el Capítulo 3 sección 5 se describe el entorno de MATLAB® que permite el desarrollo de la interfaz gráfica, siendo fácil de manejar para el usuario ya que por medio de botones denominados “Calcular” y “Graficar” se presentan las matrices de los parámetros eléctricos del transformador y las gráficas que contienen el comportamiento de los voltajes de cada capa cuando se aplica una señal pulso de frecuencia rápida.

- Comparar los resultados obtenidos en MATLAB® con los resultados de las demostraciones prácticas a realizar en el Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Politécnica Salesiana Edificio de Ingenierías.

En la sección 4 del Capítulo 3 se despliega una validación del análisis matemático presentado en este proyecto con los datos del transformador de distribución y los resultados obtenidos por [15].

En la sección 1.1 del Capítulo 4 se analizan los resultados simulados de la respuesta transitoria de los voltajes de las capas del devanado de alta y baja tensión del transformador de distribución de 3 kVA y su comportamiento frente a frecuencias de 833 KHZ a 2 MHZ que están dentro del rango de los transitorios de frecuencia rápida.

En la sección 1.2 del Capítulo 4 se exponen los resultados simulados de la respuesta transitoria de los voltajes de las capas del devanado de alta tensión del transformador de distribución 15 kVA perteneciente al Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil al aplicarse la señal impulso tipo rayo.

En la sección 2 del Capítulo 4 se muestran los resultados de los ensayos dieléctricos, la forma de onda del impulso tipo rayo y la gráfica experimental con la respuesta transitoria de todo el devanado de alta tensión aplicado al transformador monofásico

de distribución 15 kVA para conocer si el dieléctrico es capaz de soportar los transitorios aplicando los procedimientos técnicos planteados por las normas nacionales (NTE INEN) e internacionales (IEEE) referente a pruebas de rutina que se ejecutan en los transformadores.

RECOMENDACIONES

- Es importante definir claramente la construcción geométrica del transformador y la obtención de las medidas para desarrollar las matrices de parámetros eléctricos siendo esenciales en un análisis matemático preciso.
- Se invita a utilizar la transformada numérica de Laplace porque permite usar pasos de integración más largos, menor muestras de frecuencia y trabaja en función del número de muestras que se utilizan en el estudio, a diferencia de la transformada de Fourier que requiere gran cantidad de muestras de frecuencia y pasos de integración muy finos [44].
- Para este tipo de investigaciones es ideal contar con el auspicio y/o acuerdos interinstitucionales con las industrias nacionales que se dedican al diseño y construcción de los transformadores, ya que su experticia, infraestructura y los laboratorios equipados con los instrumentos de última tecnología son de gran ayuda para el estudio de estos fenómenos importantes además de ser el soporte económico de los investigadores para la realización de las múltiples pruebas a transformadores de distribución reales ya que se necesita una serie de experimentos para comparar las respuestas transitorias calculadas en las diferentes capas y como empresa asumen los costos de construcción de los prototipos y el uso de los equipos de medición. Con este tipo de trabajos mancomunados, el área de investigación y desarrollo de las grandes industrias obtienen beneficios al mejorar sus diseños mientras que los estudiantes se enriquecen con nuevos conocimientos.
- Los trabajos futuros que se sugieren es el análisis del modelo de la línea de transmisión multiconductora con parámetros distribuidos usando el método de los Elementos Finitos en el software Comsol Multiphysics® para el cálculo de los parámetros eléctricos (Anexo E) y la construcción de un transformador monofásico de distribución con derivaciones especiales en cada una de las capas del devanado de alta tensión para llevar a cabo varias pruebas experimentales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. Hassan Hosseini, M. Vakilian y G. Gharehpetian, «Comparison of transformer detailed models for fast and very fast transient studies,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, New York, 2008.
- [2] M. F. Diaz Zarate y M. Otorongo Cornejo, *Estudio de Factibilidad para la instalación de una fábrica de transformadores de distribución*, Quito: Universidad Central del Ecuador, 2016.
- [3] Y. Barrios Romero y J. Loor Mina, «Aplicación de un software para el cálculo, diseño y construcción de transformadores de potencia como tutorías de la asignatura Máquinas I,» Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil, 2011.
- [4] A. Sbravati, K. Rapp, P. Schmitt y C. Krause, «Transformer Insulation Structure for Dielectric Liquids with Higher Permittivity,» de *19th IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*, Manchester, United Kingdom, 2017.
- [5] V. Yanez, «Elaborar un manual de procedimientos para el diseño y construcción de transformadores,» Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2010.
- [6] IEEE Std C57.154. Norma internacional, «IEEE Standard for the Design, Testing, and Application of Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers Using High-Temperature Insulation Systems and Operating at Elevated Temperatures,» IEEE Power and Energy Society, New York, 2012.
- [7] I. Margalló, «Diagnóstico del consumo de vida de un transformador a través del análisis de compuestos furánicos,» Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, 2012.
- [8] Á. Hernández, «Diseño del sistema de aislamiento interno de un transformador reductor de servicios propios y auxiliares que operará a una tensión de 69KV/127KV a una capacidad de 50 KVA,» Instituto Politécnico Nacional - Unidad Profesional "Adolfo López Mateos", México, 2015.

- [9] W. Nájera Gutiérrez, «Análisis de esfuerzos dieléctricos en transformadores debido a excitaciones no sinusoidales,» Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, México, 2013.
- [10] D. Soto, «Técnicas Computacionales para el Diseño Dieléctrico de Transformadores de Potencia,» Instituto Politécnico Nacional, México, 2012.
- [11] S. Kulkarni y S. Khaparde, Transformer Engineering: Design, Technology, and Diagnostics, 2 ed., T. & F. Group, Ed., Boca Raton, Florida: CRC Press, 2013, pp. 299-336.
- [12] C. Dufour, J. Mahsereddjian y J. Bélanger, «A Combined State-Space Nodal Method for the Simulation of Power System Transients,» IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, 2011.
- [13] I. Džafić, R. A. Jabr y H. T. Neisius, «Transformer Modeling for Three-Phase Distribution Network Analysis,» IEEE Transactions on Power Systems vol. 30, 2015.
- [14] J. Martinez Velasco, Power System Transients Parameter Determination, 1 ed., T. a. F. Group, Ed., Boca Raton, Florida: CRC Press, 2010, p. 225.
- [15] M. Popov, L. van de Sluis, R. P. Paul Smeets y J. Lopez Roldan, «Analysis of Very Fast Transients in Layer-Type Transformer Windings,» IEEE Transactions on Power Delivery vol. 22, 2007.
- [16] J. C. Escamilla Sánchez, P. Gómez Zamorano y C. Tejada Martínez, «Single-Phase Transformer Modeling for Analyzing Transient Overvoltages Distribution and Transference,» IEEE Latin America Transactions vol. 7, 2009.
- [17] M. Hussain, N. Arbab y A. Khan, «High Frequency Modeling of Transformer using Black Box Frequency Response Analysis,» International Journal of Engineering Works Kambohwell Publisher Enterprises, 2017.
- [18] C. Álvarez Mariño, «Estudio de la respuesta en muy alta frecuencia en transformadores de potencia,» Universidad de Vigo. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Vigo, Vigo, 2014.
- [19] H. J. Pajón Ruiz, «Respuesta Transitoria de Transformadores Eléctricos en presencia de Variadores de Velocidad en Instalaciones Petroleras de Bombas Sumergibles,» Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2014.

- [20] IEC TR 61000-2-5:2017. Norma Internacional, «Electromagnetic compatibility (EMC)-Part 2-5: Environment - Description and classification of electromagnetic environments,» International Electrotechnical Commission IEC, Ginebra, 2017.
- [21] IEEE Std 1159-2009. Norma internacional, «IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality,» IEEE Power and Energy Society, New York, 2009.
- [22] M. Apráiz Casuso, «Método de detección en tiempo real de perturbaciones transitorias en redes de suministro eléctrico.,» Universidad de Cantabria: Departamento de Electrónica y Computadores, Santander, 2013.
- [23] NTE INEN 2111. Norma Ecuatoriana, «Transformadores de Distribución. Pruebas Eléctricas,» Norma Técnica Ecuatoriana, Quito, 2013.
- [24] NTE INEN 2127. Norma ecuatoriana, «Tranformadores. Niveles de aislamiento. Requisitos,» Norma Técnica Ecuatoriana, Quito, 2015.
- [25] T. Gönen, Electrical Power Transmission System Engineering: Analysis and Design, 3 ed., T. & F. Group, Ed., Sacramento: CRC Press, 2014, p. 1093.
- [26] IEEE Std 4. Norma internacional, «IEEE Standard for High-Voltage Testing,» IEEE Power and Energy Society, New York, 2013.
- [27] NTE INEN 2125. Norma Ecuatoriana., «Transformadores. Prueba del Dieléctrico,» Norma Técnica Ecuatoriana, Quito, 2013.
- [28] IEEE Std C57.12.90. Norma internacional, «IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers,» IEEE Power and Energy Society, New York, 2015.
- [29] IEEE Std 43-2013. Norma Internacional, «IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery,» IEEE Power and Energy Society, New York, 2013.
- [30] A. J. Lon NG, «Pruebas eléctricas de diagnóstico a los transformadore de potencia,» Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, 2012.
- [31] C. O. Zuñiga Guachichulca y D. A. Aquino Castro, «Diseño y construcción de un transformador monofásico de distribución 15KVA tipo tanque para el laboratorio de Alta Tensión de la UPS-GYE,» Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, 2018.

- [32] TERCO, «High Voltage Modular Training Set HV 9000,» 2009. [En línea]. Available: <http://www.terco.se/>. [Último acceso: 07 08 2018].
- [33] J. Castro y J. Jara, «Modelado matemático y construcción de dos elementos resistivos, para el análisis de sobretensiones debido a impulsos de tipo maniobra en alta tensión,» Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, 2016.
- [34] Megger Power on, «Manual de Usuario MIT515, MIT525, MIT1025 Y MIT1525. Comprobadores de resistencia de aislamiento de 5KV, 10KV y 15KV,» [En línea]. Available: <https://megger.com/>. [Último acceso: 07 08 2018].
- [35] Megger Power on, «PowerDB Software de administración de datos de prueba de aceptación y mantenimiento,» [En línea]. [Último acceso: 07 08 2018].
- [36] GW INSTRUK, «Digital Storage Oscilloscope,» Good Will Instrument Co., Ltd., Taiwan, 2014.
- [37] A. Aguirre y J. Villavicencio, «Diseño del manual de procedimientos de prácticas para el laboratorio de alta tensión de la Universidad Politécnica Salesiana,» Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, 2015.
- [38] P. Clayton, Analysis of Multiconductor Transmission Lines, 2 ed., Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2008, pp. 283-242.
- [39] G. Bilal, P. Gómez, J. Villanueva-Ramírez y M. Khalil Hussain, «Network Reduction for Frequency Domain Transient Analysis of Power Components,» IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT), 2017.
- [40] J. Heller, A. Boulmé, D. Alquier, S. Ngo, C. Compere y D. Certon, «Representation of CMUT-based Isolation Transformer by means of an Electrical Two-Port Network,» IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), 2016.
- [41] Z. Luna López, P. Gómez, P. Espino Cortés y R. Peña, «Modeling of Transformer Windings for Fast Transient Studies: Experimental Validation and Performance Comparison,» IEEE Transactions on Power Delivery , 2017.
- [42] S. Hassan Hosseini y P. Rezai Baravati, «New High Frequency Multi-conductor Transmission Line Detailed Model of Transformer Winding for PD Study,» IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017.

- [43] S. Liu, C. Fu, Y. Zang, S. Zhang, S. Li y Q. Huang, «Analyzing the Model of Transformer Windings under Very Fast Transient Overvoltage,» IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2018.
- [44] L. Castañón, J. Zuluaga y J. Naredo, «Numerical Laplace Inversion Methods for Electromagnetic Transient Simulations,» North American Power Symposium (NAPS), Denver, 2016.
- [45] G. J. Preciado Mite y J. A. Rodas Herrera, «Diseño para la construcción de los transformadores de distribución monofásicos tipo tanque.,» Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, 2015.
- [46] COMSOL Inc., «COMSOL Multiphysics and COMSOL Server version 5.3a,» COMSOL Inc., 2012. [En línea]. Available: www.comsol.com. [Último acceso: 20 03 2018].
- [47] G. Castaño, Aplicación del Método de los Elementos Finitos a la ecuación de Helmholtz, Portugal: Universidad Aberta, 2013.
- [48] Z. Fonseca, El método de los elementos finitos: una introducción, Venezuela: Fondo Editorial Biblioteca Universidad Rafael Urdaneta, 2011.
- [49] MathWorks, Inc, «MATLAB for Deep Learning,» 2018. [En línea]. Available: https://la.mathworks.com/help/matlab/creating_guis/guide-preferences.html?searchHighlight=guide&s_tid=doc_srchtittle. [Último acceso: 15 04 2018].

ANEXOS

ANEXO A. Descripción matemática de la entidad $\bar{\Phi}_{11}=\bar{\Phi}_{22}$

Las matrices Y de admitancia y Z de impedancia son simétricas y existen identidades que ayudan a reducir las expresiones de matrices grandes que resultan de la solución de ecuaciones de línea de transmisión multiconductora.

La identidad final de los parámetros de cadena se obtiene utilizando la inversa de la matriz de parámetros de cadena. Ver Ecuación A.1.

$$\begin{aligned}
 \bar{\Phi}(\mathcal{L}) * \bar{\Phi}(-\mathcal{L}) &= \bar{\Phi}[\mathcal{L} + (-\mathcal{L})] \\
 \bar{\Phi}(\mathcal{L}) * \bar{\Phi}(-\mathcal{L}) &= 0 \\
 \bar{\Phi}(\mathcal{L}) * \bar{\Phi}(-\mathcal{L}) &= 1_{2n} \\
 \bar{\Phi}(\mathcal{L}) * \bar{\Phi}^{-1}(\mathcal{L}) &= 1_{2n} \\
 \bar{\Phi}(\mathcal{L}) * \bar{\Phi}^{-1}(\mathcal{L}) &= \bar{\Phi}(\mathcal{L}) * \bar{\Phi}(-\mathcal{L}) \tag{A.1}
 \end{aligned}$$

Sustituyendo en forma matricial. Ver Ecuación A.2.

$$\begin{vmatrix} \bar{\Phi}_{11}(\mathcal{L}) & \bar{\Phi}_{12}(\mathcal{L}) \\ \bar{\Phi}_{21}(\mathcal{L}) & \bar{\Phi}_{22}(\mathcal{L}) \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} \bar{\Phi}_{11}(-\mathcal{L}) & \bar{\Phi}_{12}(-\mathcal{L}) \\ \bar{\Phi}_{21}(-\mathcal{L}) & \bar{\Phi}_{22}(-\mathcal{L}) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1_n & 0 \\ 0 & 1_n \end{vmatrix} \tag{A.2}$$

Multiplicando las matrices se obtiene las identidades de las submatrices de los parámetros de cadena.

$$\begin{aligned}
 \bar{\Phi}_{11}(\mathcal{L}) * \bar{\Phi}_{11}(-\mathcal{L}) + \bar{\Phi}_{12}(\mathcal{L}) * \bar{\Phi}_{21}(-\mathcal{L}) &= 1_n \\
 \bar{\Phi}_{11}(\mathcal{L}) * \bar{\Phi}_{12}(-\mathcal{L}) + \bar{\Phi}_{12}(\mathcal{L}) * \bar{\Phi}_{22}(-\mathcal{L}) &= 0 \\
 \bar{\Phi}_{21}(\mathcal{L}) * \bar{\Phi}_{11}(-\mathcal{L}) + \bar{\Phi}_{22}(\mathcal{L}) * \bar{\Phi}_{21}(-\mathcal{L}) &= 0 \\
 \bar{\Phi}_{21}(\mathcal{L}) * \bar{\Phi}_{12}(-\mathcal{L}) + \bar{\Phi}_{22}(\mathcal{L}) * \bar{\Phi}_{22}(-\mathcal{L}) &= 1_n
 \end{aligned}$$

Se sustituye las siguientes identidades en las ecuaciones anteriores.

$$\begin{aligned}
 \bar{\Phi}_{11}(-\mathcal{L}) &= \bar{\Phi}_{11}(\mathcal{L}) \\
 \bar{\Phi}_{12}(-\mathcal{L}) &= -\bar{\Phi}_{12}(\mathcal{L})
 \end{aligned}$$

$$\bar{\phi}_{21}(-\mathcal{L}) = -\bar{\phi}_{21}(\mathcal{L})$$

$$\bar{\phi}_{22}(-\mathcal{L}) = \bar{\phi}_{22}(\mathcal{L})$$

Teniendo

$$\bar{\phi}_{12}(\mathcal{L}) * \bar{\phi}_{22}(\mathcal{L}) * \bar{\phi}_{21}^{-1}(\mathcal{L}) * \bar{\phi}_{11}(\mathcal{L}) - \bar{\phi}_{12}(\mathcal{L}) * \bar{\phi}_{21}(\mathcal{L}) = 1_n$$

$$\bar{\phi}_{21}(\mathcal{L}) * \bar{\phi}_{11}(\mathcal{L}) * \bar{\phi}_{21}^{-1}(\mathcal{L}) * \bar{\phi}_{22}(\mathcal{L}) - \bar{\phi}_{21}(\mathcal{L}) * \bar{\phi}_{12}(\mathcal{L}) = 1_n$$

$$\bar{\phi}_{21}(\mathcal{L}) * \bar{\phi}_{11}(\mathcal{L}) * \bar{\phi}_{21}^{-1}(\mathcal{L}) = \bar{\phi}_{22}(\mathcal{L})$$

$$\bar{\phi}_{12}(\mathcal{L}) * \bar{\phi}_{22}(\mathcal{L}) * \bar{\phi}_{12}^{-1}(\mathcal{L}) = \bar{\phi}_{11}(\mathcal{L})$$

Despejando

$$\overbrace{\bar{\phi}_{12}(\mathcal{L}) * \bar{\phi}_{22}(\mathcal{L}) * \bar{\phi}_{21}^{-1}(\mathcal{L}) * \bar{\phi}_{11}(\mathcal{L})}^{\bar{\phi}_{11}(\mathcal{L})} = \bar{\phi}_{12}(\mathcal{L}) * \bar{\phi}_{21}(\mathcal{L}) + 1$$

$$\overbrace{\bar{\phi}_{21}(\mathcal{L}) * \bar{\phi}_{11}(\mathcal{L}) * \bar{\phi}_{21}^{-1}(\mathcal{L}) * \bar{\phi}_{22}(\mathcal{L})}^{\bar{\phi}_{22}(\mathcal{L})} = \bar{\phi}_{21}(\mathcal{L}) * \bar{\phi}_{12}(\mathcal{L}) + 1$$

Concluyendo con las operaciones se tiene la igualdad. Ver Ecuación A.3.

$$\bar{\phi}_{11}(\mathcal{L}) = \bar{\phi}_{12}(\mathcal{L}) * \bar{\phi}_{21}(\mathcal{L}) + 1$$

$$\bar{\phi}_{22}(\mathcal{L}) = \bar{\phi}_{21}(\mathcal{L}) * \bar{\phi}_{12}(\mathcal{L}) + 1$$

$$\bar{\phi}_{11}(\mathcal{L}) = \bar{\phi}_{22}(\mathcal{L}) \tag{A.3}$$

ANEXO B. Descripción matemática de la impedancia característica

$\overline{\overline{Z}}_c$

De las ecuaciones diferenciales de segundo orden desacopladas. Ver Ecuación B.1 y B.2.

$$\frac{d^2 \overline{\overline{V}}(z)}{dz^2} = \overline{\overline{Z}}(s) * \overline{\overline{Y}}(s) * \overline{\overline{V}}(z) \quad (\text{B.1})$$

$$\frac{d^2 \overline{\overline{I}}(z)}{dz^2} = \overline{\overline{Y}}(s) * \overline{\overline{Z}}(s) * \overline{\overline{I}}(z) \quad (\text{B.2})$$

Dado el caso de que $\overline{\overline{Z}} * \overline{\overline{Y}} \neq \overline{\overline{Y}} * \overline{\overline{Z}}$, es necesario desacoplar las matrices con una transformación de similitud usando un cambio de variables para orientarlas a n ecuaciones separadas capaces de describir n líneas aisladas de dos conductores. Para implementar el método se transforma a cantidades modales de voltaje y corriente [38]. Ver Ecuación B.3 y B.4.

$$\overline{\overline{V}}(z) = \overline{\overline{T}}_V * \overline{\overline{V}}_m(z) \quad (\text{B.3})$$

$$\overline{\overline{I}}(z) = \overline{\overline{T}}_I * \overline{\overline{I}}_m(z) \quad (\text{B.4})$$

Las matrices $\overline{\overline{T}}_V$ y $\overline{\overline{T}}_I$ son de $n \times n$ dimensiones y definen el cambio de variables entre las tensiones y corrientes de fase real y las tensiones y corrientes de modo. Sustituyendo en las ecuaciones de la línea de transmisión multiconductora. Ver Ecuación B.5 y B.6.

$$\frac{d^2 \overline{\overline{V}}_m(z)}{dz^2} = \overline{\overline{T}}_V^{-1} * \overline{\overline{Z}} * \overline{\overline{Y}} * \overline{\overline{T}}_V * \overline{\overline{V}}_m(z)$$

$$\frac{d^2 \overline{\overline{V}}_m(z)}{dz^2} = \overline{\overline{\gamma}}^2 * \overline{\overline{V}}_m(z) \quad (\text{B.5})$$

$$\frac{d^2 \overline{\overline{I}}_m(z)}{dz^2} = \overline{\overline{T}}_I^{-1} * \overline{\overline{Y}} * \overline{\overline{Z}} * \overline{\overline{T}}_I * \overline{\overline{I}}_m(z)$$

$$\frac{d^2 \overline{\overline{I}}_m(z)}{dz^2} = \overline{\overline{\gamma}}^2 * \overline{\overline{I}}_m(z) \quad (\text{B.6})$$

$\overline{\overline{T}}_V$ y $\overline{\overline{T}}_I$ diagonalizan simultáneamente $\overline{\overline{Z}} * \overline{\overline{Y}}$ y $\overline{\overline{Y}} * \overline{\overline{Z}}$ donde se obtiene la matriz gamma. Ver Ecuación B.7.

$$\overline{\gamma^2} = \begin{vmatrix} \overline{\gamma 1^2} & 0 & 0 \\ 0 & \overline{\gamma 2^2} & 0 \\ 0 & 0 & \overline{\gamma 3^2} \end{vmatrix} \quad (\text{B.7})$$

La ecuación B.5 y B.6 ya están desacopladas. Ver Ecuación B.8 y B.9.

$$\overline{\overline{V}}_m(z) = e^{-\overline{\gamma}z} * \overline{\overline{V}}_m^+ + e^{\overline{\gamma}z} * \overline{\overline{V}}_m^- \quad (\text{B.8})$$

$$\overline{\overline{I}}_m(z) = e^{-\overline{\gamma}z} * \overline{\overline{I}}_m^+ - e^{\overline{\gamma}z} * \overline{\overline{I}}_m^- \quad (\text{B.9})$$

Donde $e^{\pm\overline{\gamma}z}$ es una matriz diagonal de $n \times n$. Ver Ecuación B.10.

$$e^{\pm\overline{\gamma}z} = \begin{vmatrix} e^{\pm\overline{\gamma}1z} & 0 & 0 \\ 0 & e^{\pm\overline{\gamma}2z} & 0 \\ 0 & 0 & e^{\pm\overline{\gamma}3z} \end{vmatrix} \quad (\text{B.10})$$

Y la matriz $\overline{\overline{V}}_m^\pm$ e $\overline{\overline{I}}_m^\pm$ son de $n \times 1$

$$\overline{\overline{V}}_m^\pm = \begin{vmatrix} \overline{V}_{m1}^\pm \\ \overline{V}_{m2}^\pm \\ \overline{V}_{m3}^\pm \\ \vdots \\ \overline{V}_{mn}^\pm \end{vmatrix}$$

$$\overline{\overline{I}}_m^\pm = \begin{vmatrix} \overline{I}_{m1}^\pm \\ \overline{I}_{m2}^\pm \\ \overline{I}_{m3}^\pm \\ \vdots \\ \overline{I}_{mn}^\pm \end{vmatrix}$$

La transformación de voltajes y corrientes de línea da:

$$\overline{\overline{V}}_m(z) = \overline{\overline{T}}_v * (e^{-\overline{\gamma}z} * \overline{\overline{V}}_m^+ + e^{\overline{\gamma}z} * \overline{\overline{V}}_m^-)$$

$$\overline{\overline{I}}_m(z) = \overline{\overline{T}}_i * (e^{-\overline{\gamma}z} * \overline{\overline{I}}_m^+ - e^{\overline{\gamma}z} * \overline{\overline{I}}_m^-)$$

La matriz de impedancia característica ayuda a reducir el número de constantes indeterminadas.

$$\frac{d\overline{\overline{I}}(z)}{dz} = -\overline{\overline{Y}} * \overline{\overline{V}}(z)$$

Reemplazando la ecuación $\overline{\overline{I}}(z) = \overline{\overline{T}}_1 * (e^{-\overline{\overline{\gamma}}z} * \overline{\overline{I}}_m^+ - e^{\overline{\overline{\gamma}}z} * \overline{\overline{I}}_m^-)$ en $\frac{d\overline{\overline{I}}(z)}{dz} = -\overline{\overline{Y}} * \overline{\overline{V}}(z)$

$$\overline{\overline{V}}(z) = -\overline{\overline{Y}}^{-1} * \frac{d\overline{\overline{I}}(z)}{dz}$$

$$\overline{\overline{V}}(z) = \overline{\overline{Y}}^{-1} * \overline{\overline{T}}_1 * \overline{\overline{\gamma}} * (e^{-\overline{\overline{\gamma}}z} * \overline{\overline{I}}_m^+ + e^{\overline{\overline{\gamma}}z} * \overline{\overline{I}}_m^-)$$

$$\overline{\overline{V}}(z) = \underbrace{\overline{\overline{Y}}^{-1} * \overline{\overline{T}}_1 * \overline{\overline{\gamma}} * \overline{\overline{T}}_1^{-1}}_{\overline{\overline{Z}}_c} * (e^{-\overline{\overline{\gamma}}z} * \overline{\overline{I}}_m^+ + e^{\overline{\overline{\gamma}}z} * \overline{\overline{I}}_m^-)$$

Definiendo los términos queda

$$\overline{\overline{Z}}_c = \overline{\overline{Y}}^{-1} * \overline{\overline{T}}_1 * \overline{\overline{\gamma}} * \overline{\overline{T}}_1^{-1}$$

Por lo tanto, la admitancia característica es:

$$\overline{\overline{Y}}_c = \frac{1}{\overline{\overline{Z}}_c}$$

ANEXO C. Diseño de la parte activa de un transformador de distribución monofásico 3 kVA

Se presenta el diseño teórico de un transformador de distribución monofásico de 3 kVA que utiliza un núcleo tipo acorazado arrollado (el núcleo formado por dos arcadas, rodea los devanados y se compone de varias laminaciones) mientras que las disposiciones de las bobinas son de tipo concéntrico, es decir, el devanado de baja tensión se distribuye a lo largo de la columna del núcleo siendo separado del mismo por medio de tubos aislantes. El diseño queda a criterio de los expertos [45] ya que los fabricantes escogen bobinados de costos mínimos que satisfagan la resistencia eléctrica, resistencia mecánica y enfriamiento adecuados durante la operación.

TABLA C. 1: DATOS PARA EL DISEÑO TEÓRICO DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN MONOFÁSICO DE 3 KVA.

CAPACIDAD	3 KVA	
VOLTAJE	A.T.	$\frac{13800}{\sqrt{3}} = 7967 \text{ V}$
	B.T.	120-240 V
CLASE AISLAMIENTO	A.T. 15 KV B.T. 1.2 KV	
FRECUENCIA	60 Hz	
IMPEDANCIA DE CORTOCIRCUITO Z	3%	
DENSIDAD DE CORRIENTE δ (TRANSFORMADOR EN ACEITE)	$3 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$	
DENSIDAD DE FLUJO MAGNÉTICO β	16 000 Gauss	
FACTOR DE APILAMIENTO f_e	0.95	

**Corriente nominal del primario*

$$I_p = \frac{S \text{ (kVA)}}{V_p \text{ (kV)}} \quad (\text{C.1})$$

$$I_p = \frac{3}{\frac{13.8}{\sqrt{3}}} = 0.376532 \text{ A}$$

**Corriente nominal del secundario*

$$I_s = \frac{S \text{ (kVA)}}{V_p \text{ (kV)}} \quad (\text{C.2})$$

$$I_s = \frac{3}{0.24} = 12.5 \text{ A}$$

***Determinación de espiras**

$$V_t = 1.1 * \sqrt{\frac{S_{1\phi}}{\left(\frac{Z}{5}\right)^{0.5}}} \quad (\text{C.3})$$

$$V_t = 1.1 * \sqrt{\frac{3}{\left(\frac{3}{5}\right)^{0.5}}} = 2.16478863 \text{ V}$$

$$N_2 = \frac{V_s}{V_t} = \frac{240 \text{ V}}{2.16478863 \text{ V}} = 110.8653269 \text{ espiras}$$

Espiras del secundario = 111 espiras

$$N_1 = \frac{V_p}{V_t} = \frac{\frac{13800}{\sqrt{3}} \text{ V}}{2.16478863 \text{ V}} = 3680.467264 \text{ espiras}$$

Espiras del primario = 3681 espiras

***Calibre del conductor (Acond)**

$$\text{Acond primario} = \frac{I_p}{\delta} \quad (\text{C.4})$$

$$\text{Acond primario} = \frac{0.376532784 \text{ A}}{3 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}} = 0.125510928 \text{ mm}^2$$

Calibre conductor primario = 26 AWG conductor circular de cobre

DIAMETRO ALAMBRE	
DESNUDO	0.405 mm
CUBIERTO	0.457 mm
RESISTENCIA A 20°C	134 Ω/kg
PESO	1.188 kg/Km
LONGITUD	845 m/kg

$$\text{Acond secundario} = \frac{I_s}{\delta} \quad (\text{C.5})$$

$$\text{Acond secundario} = \frac{12.5 \text{ A}}{3 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}} = 4.166666667 \text{ mm}^2$$

Calibre conductor secundario = 11 AWG conductor circular de cobre

DIAMETRO ALAMBRE	
DESNUDO	2.305 mm
CUBIERTO	2.395 mm
RESISTENCIA A 20°C	4.14 Ω/kg
PESO	37.46 kg/Km
LONGITUD	26.68 m/kg

**Sección transversal del núcleo (A)*

$$A = \frac{V_p \times 10^8}{4.44 * f * N_p * \beta} \quad (\text{C.6})$$

$$A = \frac{\left(\frac{13800}{\sqrt{3}}\right) \times 10^8}{4.44 * 60 * 3681 * 16000} = 50.78067138 \text{ cm}^2$$

$$\text{Area neta (A}_n\text{)} = \text{Area fisica (A}_f\text{)} * \text{factor apilamiento (f}_e\text{)} \quad (\text{C.7})$$

$$A_f = \frac{A_n}{f_e} = \frac{50.78067138}{0.95} = 53.45333829 \text{ cm}^2$$

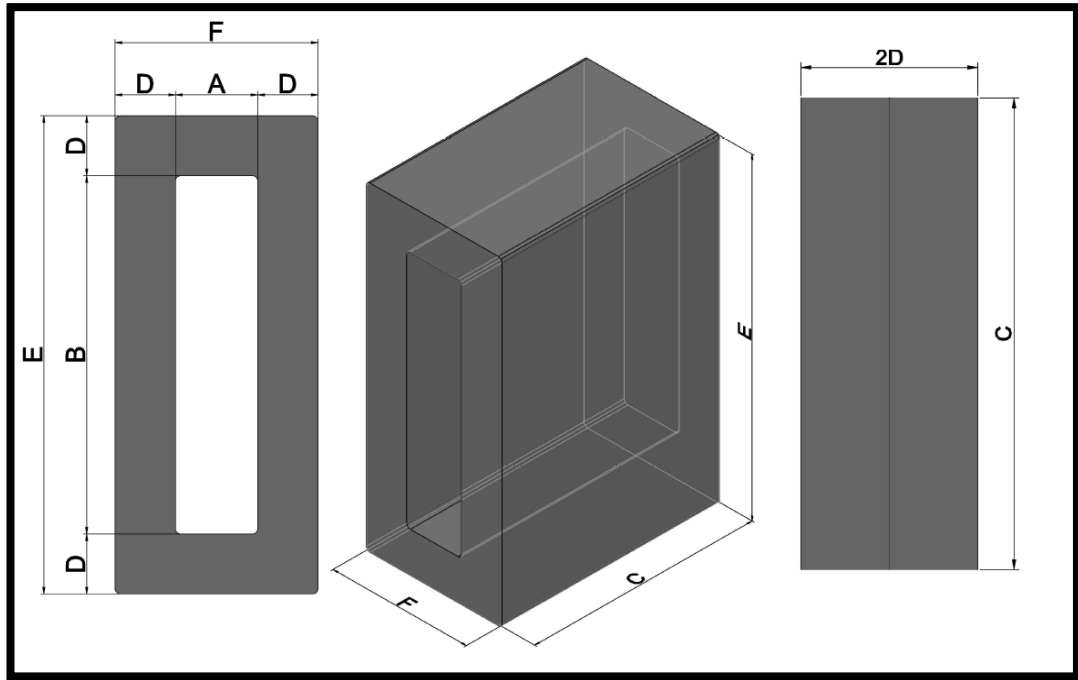


FIGURA C. 1: REPRESENTACIÓN DEL NÚCLEO Y SUS DIMENSIONES.

$$C = 12 \text{ cm}$$

C es el ancho de lámina, D es el espesor de lámina de la arcada, B es el alto de la ventana, A es el ancho de la ventana.

***Espesor**

$$2D = \frac{Af}{C} \quad (C.8)$$

$$2D = \frac{53.45333829}{12} = 4.454444 \text{ cm} = 44.54444 \text{ mm}$$

***Laminaciones**

$$\text{laminaciones} = \frac{2D}{0.28} \quad (C.9)$$

$$\text{laminaciones} = \frac{44.54444 \text{ mm}}{0.28 \frac{\text{mm}}{\text{lámina}}} = 159.0873163 \text{ (159 láminas)}$$

$$B = 2D * 3$$

$$B = 44.54444 * 3 = 133.6333 \text{ mm} = 13.36333 \text{ cm}$$

***Altura efectiva del devanado secundario (hs)**

Clase de aislamiento=1.2KV

Aislamiento collar=6.5mm=0.65cm

Impulso (NBI)=30KV

Aislamiento yugo=1.5mm=0.15cm

Potencial aplicado=10KV

Aislamiento bobina-tanque=15mm=1.5cm

$$hs = B - 2(da + rc) \quad (C.10)$$

Donde:

hs= altura eficiente del devanado secundario

B=altura ventana del núcleo

da=distancia del aislamiento (collar + yugo)

rc= radio de curvatura = 0.317 cm

$$hs = 13.36333 \text{ cm} - 2(0.65 + 0.15 + 0.317) \text{ cm}$$

$$hs = 11.12933 + (11.12933) * 5\%$$

$$hs = 11.68580 \text{ cm} = 116.8580 \text{ mm}$$

***Espiras por capa devanado secundario**

$$\text{Esp. x capa sec.} = \frac{hs}{D_{\text{cond}}} \quad (C.11)$$

$$\text{Esp. x capa sec.} = \frac{116.8580 \text{ mm}}{2.395 \text{ mm}} = 48.79248978 = 48 \text{ espiras}$$

***Número de capas devanado secundario**

$$\text{Número capas sec.} = \frac{\text{Total de espiras}}{\text{Espiras por capa}} \quad (C.12)$$

$$\text{Número capas sec.} = \frac{111 \text{ espiras}}{48 \text{ espiras}} = 2.3125 = 3 \text{ capas}$$

***Altura efectiva del devanado primario (h_p)**

Clase de aislamiento=15KV	Ducto de aceite=3mm=0.3cm
Impulso (NBI)=95KV	Aislamiento collar=13mm=1.3cm
Potencial aplicado=34KV	Aislamiento entre fases=6mm=0.6cm
	Aislamiento bobina-tanque=28mm=2.8cm

$$h_p = B - 2(da + rc) \quad (C.13)$$

Donde:

h_p = altura eficiente del devanado primario

B =altura ventana del núcleo

da =distancia del aislamiento (collar)

rc = radio de curvatura = 0.317 cm

$$h_p = 13.36333 \text{ cm} - 2(1.3 + 0.317)\text{cm}$$

$$h_p = 10.12933 + (10.12933) * 5\%$$

$$h_p = 10.6358 \text{ cm} = 106.358 \text{ mm}$$

***Espiras por capa devanado primario**

$$\text{Esp. x capa prim.} = \frac{h_p}{D_{\text{cond}}} \quad (C.14)$$

$$\text{Esp. x capa prim.} = \frac{106.358 \text{ mm}}{0.457 \text{ mm}} = 232.73088 = 233 \text{ espiras}$$

***Número de capas devanado primario**

$$\text{Número capas prim.} = \frac{\text{Total de espiras}}{\text{Espiras por capa}} \quad (C.15)$$

$$\text{Número capas prim.} = \frac{3681 \text{ espiras}}{233 \text{ espiras}} = 15.79828 = 16 \text{ capas}$$

***Aislamiento entre vueltas (V_v)**

$$V_v = \frac{V_{\text{nominal}}}{N_p} * F_s \quad (C.16)$$

Prueba de voltaje inducido

$$V_v = \frac{\frac{13800}{\sqrt{3}}}{3681 \text{ espiras}} * 1.5 = 3.246713 \frac{V}{\text{vuelta}}$$

$$V_v = \frac{V_{\text{impulso}}}{N_p} * F_s \quad (\text{C.17})$$

Prueba de impulso

$$V_v = \frac{95000}{3681} * 1.5 = 38.712306 \frac{V}{\text{vuelta}}$$

**Aislamiento entre capas (Vc)*

$$V_c = \frac{2V * V_{pc}}{N_p} * F_s \quad (\text{C.18})$$

$$V_c = \frac{2 \left(\frac{13800}{\sqrt{3}} \right) * 233}{3681} * 1.8$$

$$V_c = 1815.561913 \frac{V}{\text{capa}} = 1.8155 \frac{kV}{\text{capa}}$$

$$V_c = \frac{2V * V_{pc}}{N_p} * F_s \quad (\text{C.19})$$

$$V_c = \frac{2(95000) * 233}{3681} * 1.8$$

$$V_c = 21647.92176 \frac{V}{\text{capa}} = 21.6479 \frac{kV}{\text{capa}}$$

***Espesor total de la bobina**

TABLA C. 2: ESPESOR DE LA BOBINA DE 3KVA.

TIPO DE AISLAMIENTO	MEDIDAS DEL AISLAMIENTO
Aislamiento entre núcleo-bobina Tubo devanado (1 capa de cartón pressboard 1.5mm + 4 capas de papel diamantado 0.15mm)	2.100 mm (g)
Bobina de baja tensión Conductor circular de cobre 11 AWG (3 capas de conductor 2.395 mm)	7.185 mm
Aislamiento entre capas de baja tensión 3 capas de papel diamantado 0.15mm + cinta de filamento 1mm	1.450 mm
Bobina de baja tensión + Aislamiento entre capas de baja tensión	8.635 mm (h)
Aislamiento entre bobinas AT y BT 10 capas de papel diamantado 0.15mm + ductos de cartón pressboard 3mm + 10 capas de papel diamantado 0.15mm	6.000 mm (i)
Bobina de alta tensión Conductor circular de cobre 26 AWG (16 capas de conductor 0.457mm)	7.312 mm
Aislamiento entre capas de alta tensión 15 capas de papel diamantado 0.15mm + cinta de filamento 1mm	3.250 mm
Bobina de alta tensión + Aislamiento entre capas de alta tensión	10.562 mm (j)
Aislamiento tanque-bobina 6 capas de papel diamantado 0.15mm	0.900 mm
TOTAL ESPESOR BOBINA	28.197 mm

***Cálculo de la longitud de la vuelta media del devanado secundario**

$$Lvms = 2(C + 2D) + \pi(2 * g + h) \quad (C.20)$$

$$Lvms = 2(12 + 4.454444) + \pi[(2(0.21) + 0.8635)]$$

$$Lvms = 36.941122 \text{ cm}$$

***Longitud requerida devanado secundario**

$$Lcbs = Ns * Lvms \quad (C.21)$$

$$Lcbs = 111 * 36.855358 = 4100.464561 \text{ cm}$$

$$Lcbs = 0.04100464561 \text{ km}$$

***Peso del conductor del devanado secundario**

$$\text{Peso} = 0.04100464561 \text{ km} * \frac{37.46 \text{ Kg}}{\text{km}} = 1.536034 \text{ kg}$$

***Cálculo de la longitud de la vuelta media del devanado primario**

$$Lvmp = 2(C + 2D) + \pi[2 * (g + h + i) + j] \quad (C.22)$$

$$Lvmp = 2(12 + 4.454444) + \pi[2(0.21 + 0.8635 + 0.6) + 1.0562]$$

$$Lvmp = 46.74194877 \text{ cm}$$

***Longitud requerida devanado primario**

$$Lcbs = Np * Lvmp \quad (C.23)$$

$$Lcbs = 3681 * 46.74194877 = 172057.1134 \text{ cm}$$

$$Lcbs = 1.720571 \text{ km}$$

***Peso del conductor del devanado primario**

$$\text{Peso} = 1.720571134 \text{ km} * \frac{1.188 \text{ Kg}}{\text{km}} = 2.044038 \text{ kg}$$

***Ancho de ventana del núcleo**

$$A = \text{espesor bobina} + \text{aislamiento núcleo} - \text{bobina} \quad (\text{C.24})$$

$$A = 28.197 + 2.1 = 30.297 \text{ mm} = 3.0297 \text{ cm}$$

***Valor F de la arcada**

$$F = 2D + A \quad (\text{C.25})$$

$$F = 4.454444 + 3.0297 \text{ cm} = 7.48414 \text{ cm}$$

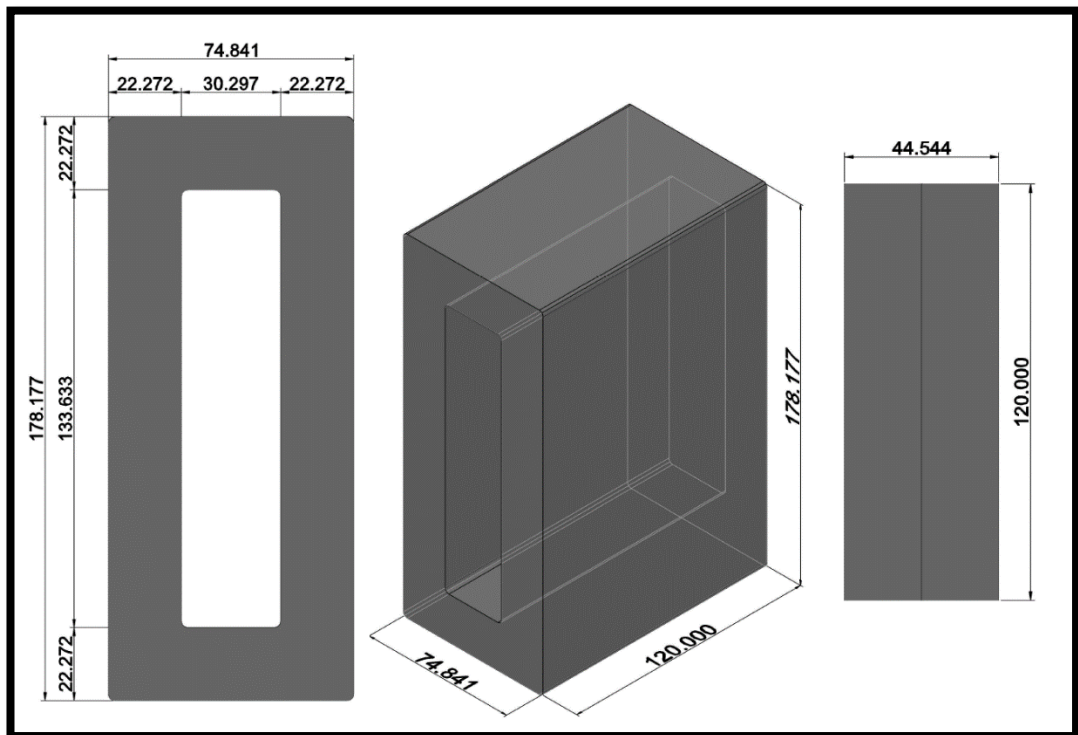


FIGURA C. 2: DIMENSIONES DEL NÚCLEO DE UN TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN DE 3 KVA EN MILÍMETROS.

ANEXO D. Descripción de la construcción artesanal de un transformador de distribución monofásico de 3 kVA

Al iniciar el trabajo se elabora un molde o formaleta que simula la ventana del núcleo y sobre éste se asientan los materiales aislantes y conductores, este molde puede ser de madera o aluminio y fácil de montar a la máquina devanadora.

Sobre el molde de madera va el tubo de devanado o casquillo que es el soporte de toda la bobina y los aislamientos (compuesto por cartón presspan dieléctrico de 1.5mm), sobre este casquillo empieza el aislamiento de núcleo – baja tensión conformado por cuatro capas de papel diamantado de 0.15mm. Ver Figura D.1.



FIGURA D. 1: TUBO DE DEVANADO O CASQUILLO EN MOLDE DE MADERA.

Para la forma de la bobina se usa el modelo por capas o tipo sánduche en el cual los devanados se arrollan en distintas capas y de manera continua, siendo el de baja tensión el más cercano al núcleo y el de alta tensión el más cercano al tanque, teniendo entre ambos una distancia de aislamiento suficiente para que no se cortocircuiten. Ver Figura D.2.



FIGURA D. 2: AISLAMIENTO ENTRE DEVANADOS DE ALTA Y BAJA TENSIÓN Y AISLAMIENTO ENTRE CAPAS.

El devanado de baja tensión está compuesto de un conductor de cobre circular calibre 11 AWG, se coloca encima de una capa de papel y se lo fija a ella con cintas de filamento; el número total de espiras es 111 dividiéndose en dos capas de 48 espiras cada una y la tercera capa con 15 espiras, todo esto acorde con la altura efectiva del devanado. Cada espira estará lo más junta posible a la otra sin desniveles ni exceder o disminuir el número asignado por cada capa ya que esto causa variación de potencial en los bornes, el extremo final del conductor se lo fija con cinta de filamento y los terminales que sobresalen se protegen con espaguetis de papel crepe y cintas de filamento. Ver Figura D.3.

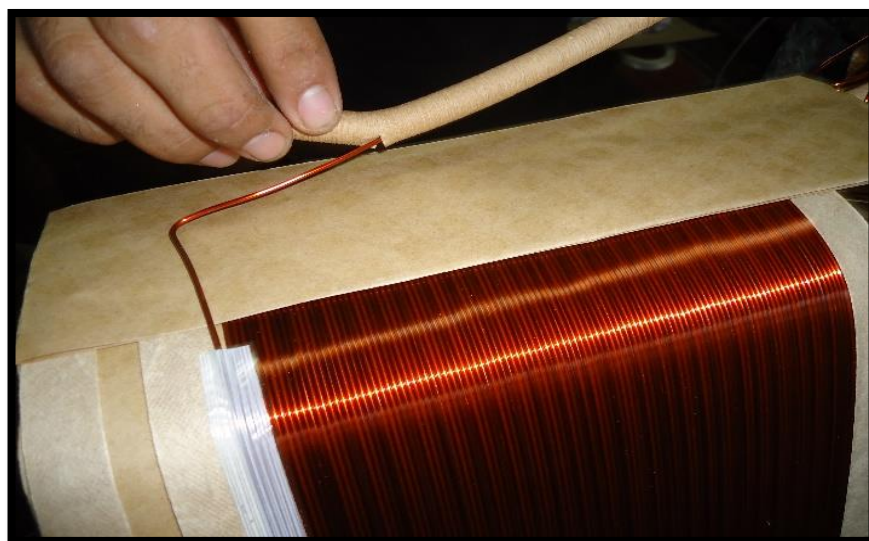


FIGURA D. 3: COLOCACIÓN DEL AISLAMIENTO EN EL TERMINAL DEL DEVANADO DE BAJA TENSIÓN.

Entre cada capa se coloca una lámina de papel de 0.15mm de espesor considerada como el aislamiento entre capas además del barniz esmaltado del conductor que viene de fábrica siendo considerado como el aislamiento entre espiras.

Finalizado el bobinado del secundario se procede con el aislamiento entre devanados de alta y baja tensión de 6mm, comprendido de 3mm de papel diamantado y ductos de cartón presspan dieléctrico de 3mm; lo anterior queda repartido en 10 vueltas de papel diamantado de 0.15mm y se colocan los ductos de cartón presspan con separación de dos centímetros uno de otro ya que por estos espacios circula el aceite mineral, acto seguido se colocan 10 vueltas más de papel y se sella con cinta de filamento. Ver Figura D.4.

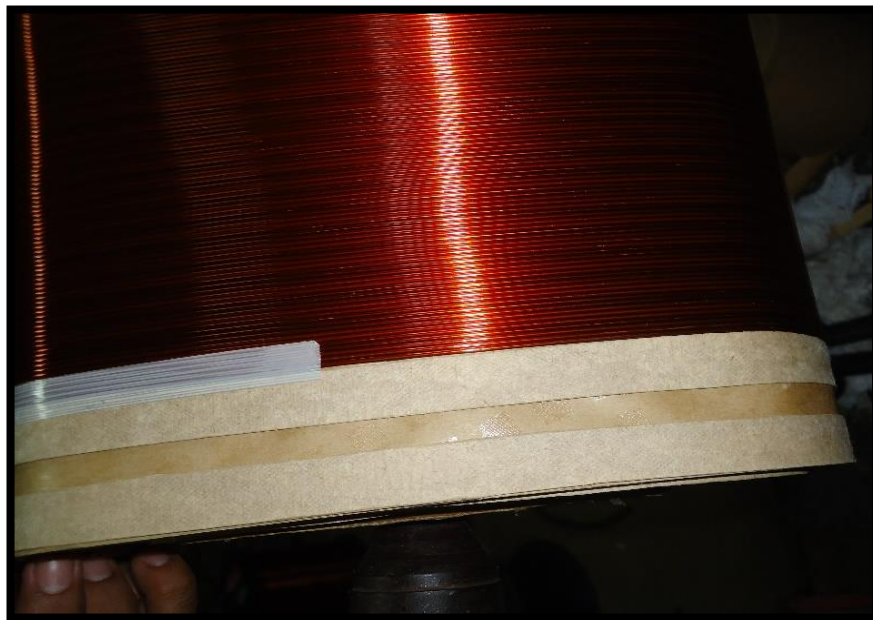


FIGURA D. 4: FIJACIÓN DEL PAPEL DIAMANTADO CON CINTA DE FILAMENTO Y VISTA DEL COLLARÍN DE LA BOBINA.

El devanado de alta tensión está compuesto de un conductor de cobre circular calibre 26 AWG, el número total de espiras es 3681 divididos en 15 capas de 233 espiras cada una y la última capa con 186 espiras, todo esto acorde con la altura efectiva del devanado; el extremo final del conductor se lo fija con cinta de filamento y los terminales que sobresalen se protegen con espaguetis de papel crepé y cintas de filamento. Se tiene mucho cuidado al bobinar evitando que se monte el conductor sobre otro, entre cada capa se ubica papel de 0.15mm de espesor.

Cuando se está bobinando el devanado de alta tensión se saca una derivación al inicio y término de la segunda, quinta, décima y décima sexta capa, dichas derivaciones sirven para poder conectar el analizador eléctrico y el medidor de poder en ellas y de esta manera ver los valores de voltaje y la gráfica de respuesta al impulso. Ver Figura D.5.



FIGURA D. 5: TERMINALES DE LOS DEVANADOS DE ALTA Y BAJA TENSIÓN.

Finalmente, se colocan 6 capas de papel diamantado de 0.15mm sellando con cinta de filamento y una capa de cartón presspan dieléctrico, luego se somete a un proceso de secado durante 12 horas a 120°C en un horno con alimentación eléctrica para que la resina epóxica del papel diamantado se impregne en los conductores además de quitar las impurezas generadas por la manipulación y humedad presente en el ambiente. Ver Figura D.6 e D.7.



FIGURA D. 6: BOBINA TERMINADA PARA EL PROCESO DE SECADO.

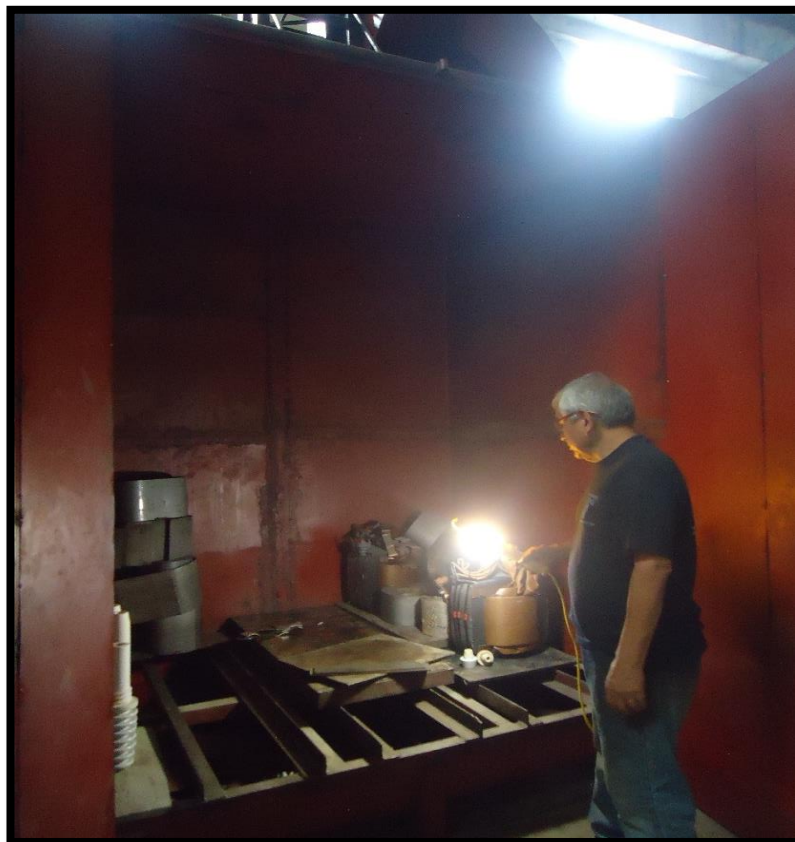


FIGURA D. 7: HORNO CON ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA PARA SECADO DEL PROTOTIPO.

ANEXO E. Comsol Multiphysics® y el método de los Elementos Finitos

Se presenta la resolución de un trabajo futuro por medio del método de elementos finitos usando un software de simulación que acorta los procesos numéricos de resolución de matrices.

COMSOL Multiphysics® es un software gráfico de análisis y resolución de sistemas no lineales con derivadas parciales mediante el método de elementos finitos [46] teniendo varias aplicaciones de ingeniería en el que se observan fenómenos multifísicos; su entorno es bastante amigable con el usuario ya que maneja todos sus componentes por medio de librerías en la cual es necesario conocer bien las dimensiones y materiales del objeto de estudio. Una de sus ventajas principales es el enlace con otros softwares de alto desempeño utilizados en ingenierías como AUTOCAD®, MATLAB®, EXCEL®, entre los más importantes. Ver Figura E.1.

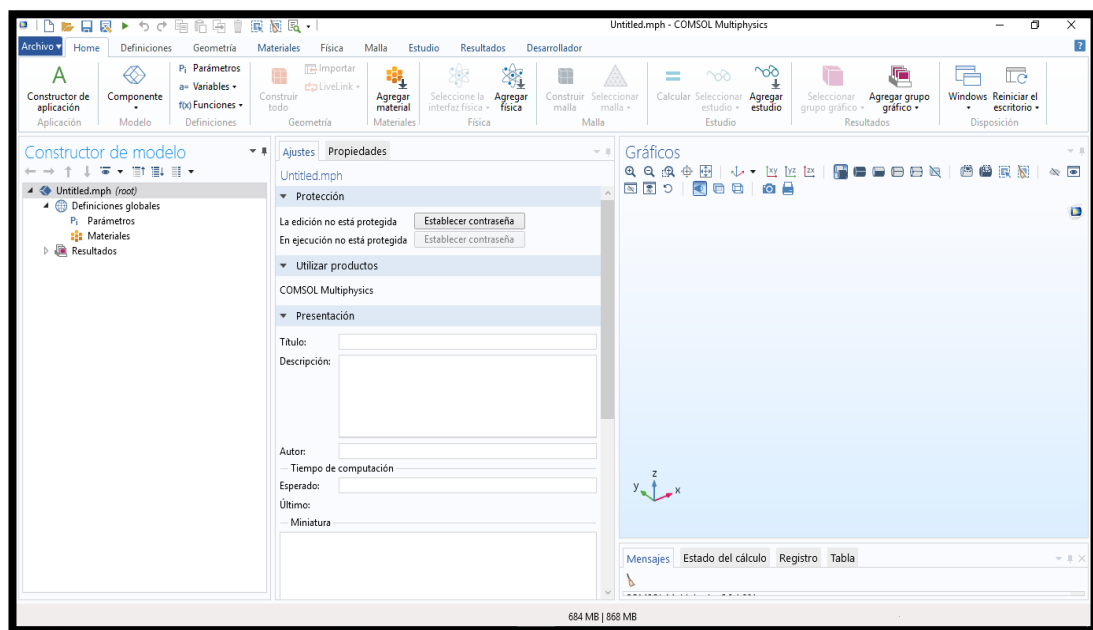


FIGURA E. 1: INTERFAZ GRÁFICA DE COMSOL MULTIPHYSICS®

Para resolver problemas divide el proceso en tres fases:

La fase de pre procesamiento consiste en obtener los datos del problema como las variables dependientes e independientes, simetría axial, eje de coordenadas, posiciones relativas y absolutas, propiedades del material (conductividad, permeabilidad,

permitividad, densidad, etc.) y las condiciones de frontera que definen la solución completa del sistema.

La fase de procesamiento es el procedimiento interno y automático del software en el cual utiliza toda la información ingresada anteriormente, resolviendo las ecuaciones algebraicas por medio de métodos numéricos obteniendo las principales variables de fenómeno que se estudia.

La fase de post procesamiento entrega en tablas o gráficas los valores obtenidos además de reportes instantáneos ideales para exportar a otros programas. Ver Figura E.2.

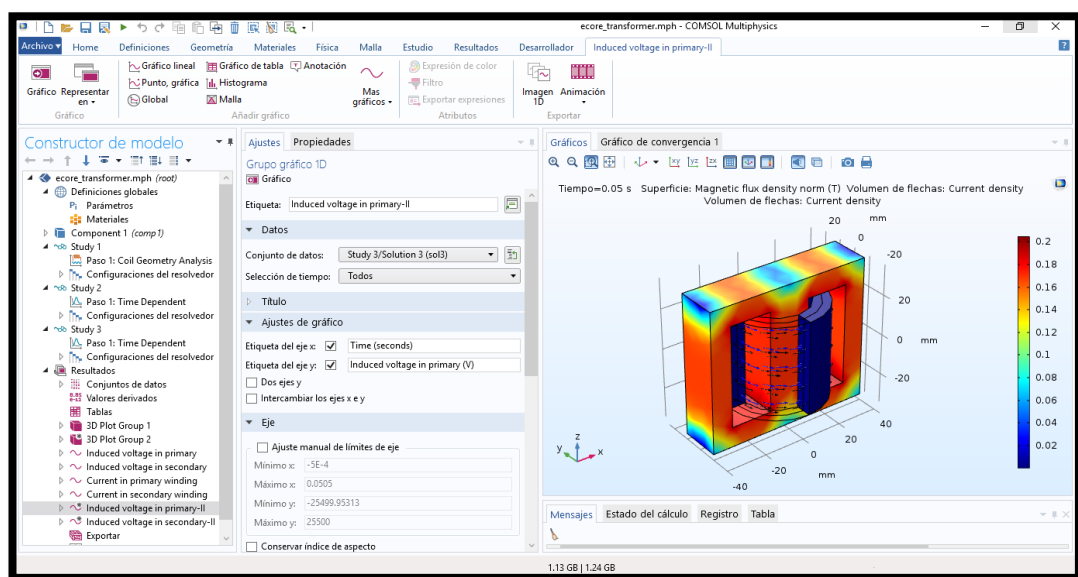


FIGURA E. 2: ANÁLISIS DE GEOMETRÍA Y TIEMPO DE UN NÚCLEO EN COMSOL MULTIPHYSICS®

El método de los elementos finitos es considerado un método numérico de alta precisión para la resolución de ecuaciones diferenciales con derivadas parciales en condiciones de contorno. Se basa en la reformulación del problema en estado variacional para pasar a un espacio de dimensiones finitas discretas, partiendo el elemento en muchos segmentos de figuras geométricas adecuadas hasta formar un mallado (prismas, tetraedros, triángulos y otras más de dos y tres dimensiones), buscando la solución mediante funciones dependientes de parámetros finitos formando familias de funciones generales que se aproximen y reduzcan los cálculos para alcanzar la solución. [47]

Es uno de los procesos más utilizados por la capacidad de modelar elementos irregulares que manejen condiciones de frontera y problemas no lineales de forma sencilla empleando una técnica robusta. La metodología empleada comprende cuatro puntos esenciales basados en la reformulación, división, discretización, deducción y resolución de ecuaciones.

Indistintamente del problema presentado, el análisis básico se conforma de los siguientes pasos: definición y discretización del dominio, identificación de variables de estado, formulación del problema, establecer sistemas de referencia, elaboración de las funciones aproximadas, determinación de las ecuaciones, transformación de coordenadas, ensamblaje de las ecuaciones, introducción de las condiciones de contorno, solución de ecuaciones e interpretación de resultados.

El dominio puede ser limitado o no, depende fundamentalmente de la forma geométrica y física en el que se requiere eje de coordenadas para describir los nodos que definen las líneas, superficies o volumen de los elementos, el hecho de discretizar es para introducir las aproximaciones y generar pequeños elementos que abarquen toda la figura geométrica siempre que no se refine demasiado para no exceder el número de ecuaciones; las variables de estado se relacionan entre si y representan la expresión matemática de la ley física que rige el problema con sus condiciones de contorno; al formular el problema se engloba un conjunto de ecuaciones diferenciales con las condiciones de contorno estableciendo un sistema de referencia local adicional para facilitar las operaciones de integración; las funciones de aproximación se componen del sistema de referencia adicional y de las variables de estado para elaborar funciones algebraicas que deben ser de orden superior y decidir si aplica la aproximación física o geométrica; la determinación de las ecuaciones a nivel de cada elemento se establece sobre cada uno e involucra la llamada matriz de rigidez con su respectivo sistema de referencia local; la transformación de coordenadas lleva la matriz de rigidez al sistema de referencia global del sistema; en el ensamblaje de las ecuaciones de los elementos se crea la matriz global del sistema con las ecuaciones que gobiernan los nodos de las interfaces además de introducir las condiciones de contorno para no añadir nuevos algoritmos; finalmente la solución del sistema de ecuaciones es por métodos directos (método de Gauss) o métodos iterativos (método de Gauss-Seidel o Jacobi) cuyos resultados son interpretados y usados para el cálculo de otras cantidades físicas. [10] Para la evaluación de las ecuaciones algebraicas por el método de elementos finitos se usan distintas aproximaciones entre ellos el método: directo, variacional y residual. El

método directo es de reducida aplicación por la complejidad en problemas bidimensionales y tridimensionales, la interpretación de parámetros mediante principios físicos usados en cálculo estructural e industria aeronáutica. El método variacional trabaja con un ente llamado funcional que se obtiene de la expresión de energía o de un problema de contorno, su desventaja es que no todos los problemas poseen un funcional y en muchos casos la dificultad de hallarlo restringe su uso. El método de residuos pesados o residual es el más general de las tres técnicas y se asocia con el valor del contorno del problema dado reescribiendo la ecuación diferencial que gobierna el problema, la solución exacta no se conoce y se emplea una función de peso W y residuo R manejado ampliamente el método de Galerkin. [48]

ANEXO F. La Transformada numérica de Laplace.

Se utiliza esta técnica porque la mayoría de los parámetros eléctricos dependen de la frecuencia, la geometría de las máquinas es muy compleja (transformadores de potencia, líneas de transmisión, cables subterráneos) y permite modelar ecuaciones diferenciales dependientes de la frecuencia, por ello es necesario el uso de técnicas de frecuencia como la Transformada numérica de Laplace ya que facilita el paso al dominio del tiempo sin alterar los resultados [44].

Se muestra la transformada de Laplace de una función en el tiempo $f(t)$ y la transformada inversa. Ver Ecuación F.1 y F.2.

$$F(c + jw) = \int_0^{\infty} [f(t)e^{-ct}] * e^{-jw t} dt \quad (\text{F.1})$$

$$f(t) = \frac{e^{ct}}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [F(c + jw)e^{jw t}] dw \quad (\text{F.2})$$

Donde $s = c + jw$ es la variable de Laplace y w es la frecuencia angular, c se conoce como factor de amortiguación constante y se utiliza para reducir errores en la implementación numérica.

Si este factor de amortiguamiento es igual a cero, lo que se obtiene es la transformada de Fourier y la transformada de Fourier. Ver Ecuación F.3 y F.4.

$$F(jw) = \int_0^{\infty} [f(t)] * e^{-jw t} dt \quad (\text{F.3})$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [F(jw)e^{jw t}] dw \quad (\text{F.4})$$

Al aplicar la transformada inversa de Laplace para el paso al dominio del tiempo se presentan errores por el truncamiento del rango de integración que producen oscilaciones y se disminuyen con el uso de ventanas de datos. Ver Ecuación F.5.

$$Vcap(t) = \frac{e^{ct}}{\pi} \text{Real} \left[\int_0^{\Omega} Vcap(c + jw)e^{jw t} \delta(w) \right] \quad (\text{F.5})$$

Donde $\delta(w) = (1 + \cos(\pi w/\Omega))/2$ es la ventana de datos de Hanning [10].

Para aplicar esta técnica se obtiene la solución en el dominio de la frecuencia (voltaje de las capas) en un rango de frecuencias que para este caso se manejan las frecuencias de los transitorios rápidos que van desde 500 KHz a 5 MHz, una vez analizada esta

parte se escoge un tiempo $T = 2\pi/\Delta\omega$ que es la duración de la simulación, N es el número de muestras, el paso del tiempo $\Delta t = T/N$, el paso de la frecuencia $\Delta\omega$ y los límites de la integral $[0, \Omega]$.

ANEXO G. GUIDE de MATLAB.

GUIDE es un ambiente visual de programación para la ejecución de programas sin preocuparse por la codificación de comandos y sólo requiere el ingreso de datos continuamente, viene incluido en el software matemático MATLAB® y se parece a los lenguajes de programación de Visual Basic o C++. Ver Figura G.1.

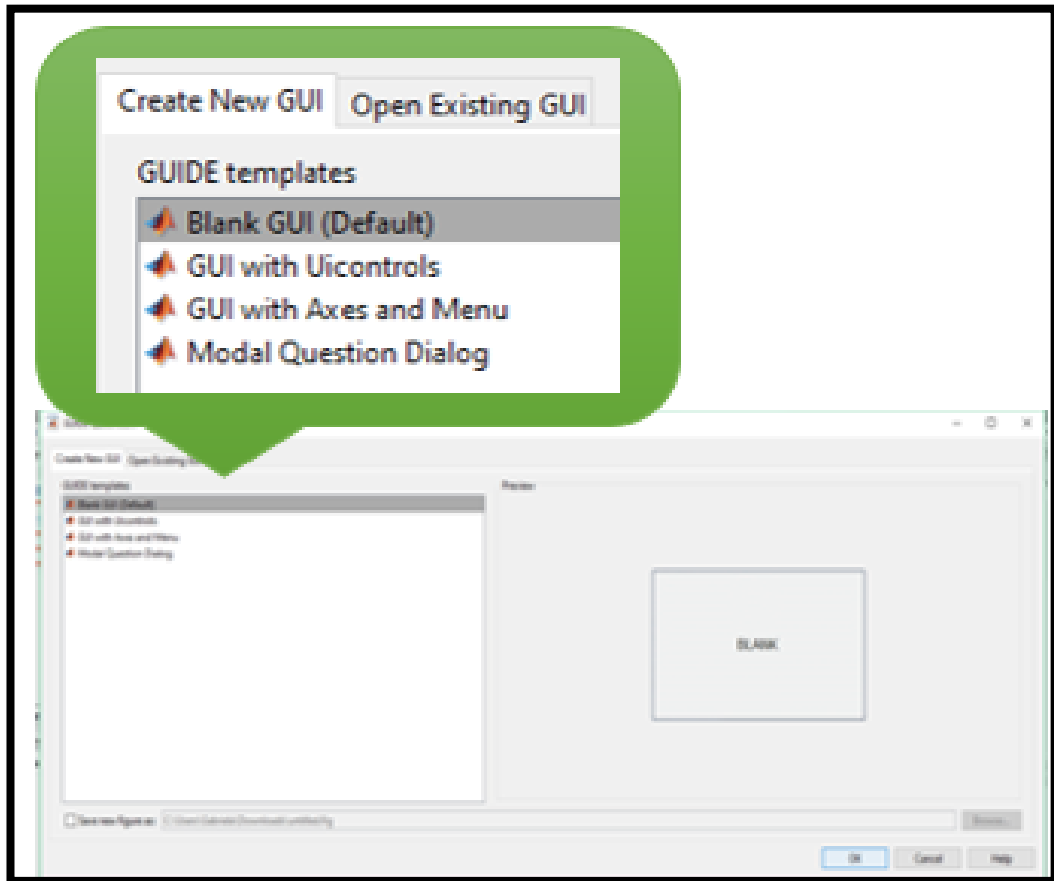


FIGURA G. 1: INICIO DE LA APLICACIÓN GUIDE QUICK START [49].

Al iniciar un proyecto se presentan varias elecciones de apertura, entre ellas:

- BLANK GUI(default) es la interfaz en blanco para diseñar totalmente el programa a gusto del usuario. Ver Figura G.2.

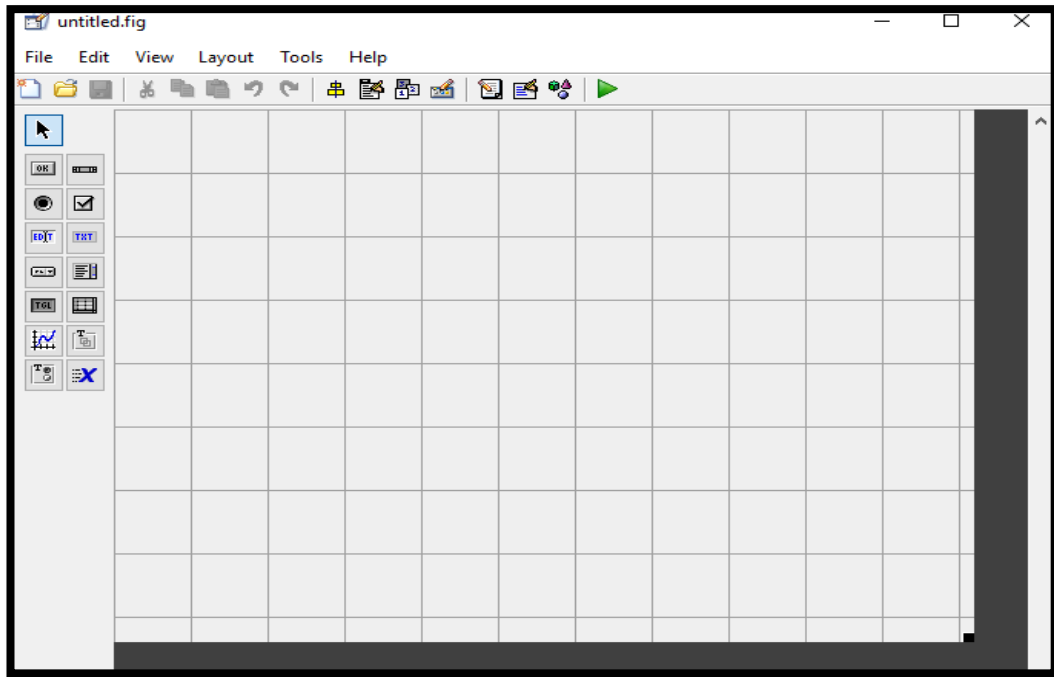


FIGURA G. 2: BLANK GUI (DEFAULT) [49].

- GUI with Uicontrols es un ejemplo presentado por el programa sobre la resolución de la ecuación de masa que permite ingresar los datos de densidad y volumen tanto en sistema internacional como en sistema inglés. Ver Figura G.3.

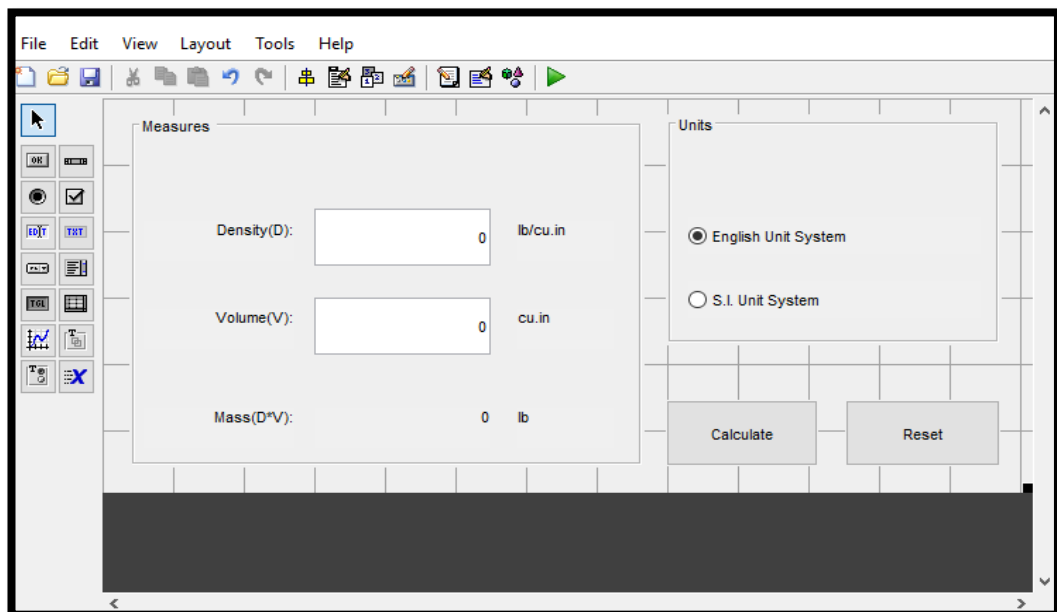


FIGURA G. 3: GUI CON UICONTROLS [49].

- GUI with Axes and Menu es un ejemplo que permite cargar una gráfica y desplegar un menú con la opción de abrir, imprimir y cerrar. Ver Figura G.4.

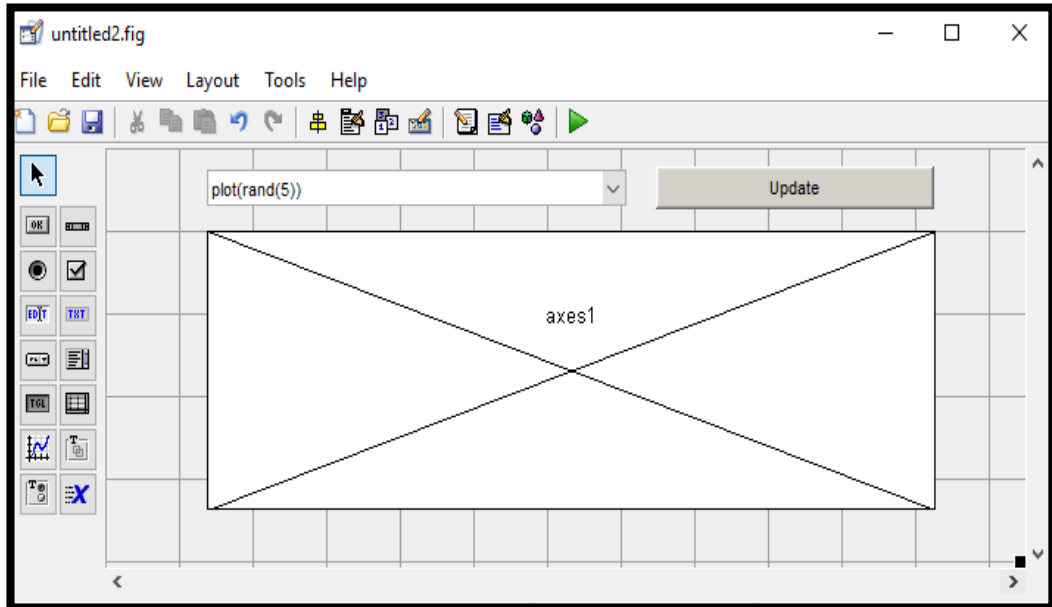


FIGURA G. 4: GUI CON AXES Y MENU [49].

- Modal Question Dialog es un cuadro que presenta una pregunta y dos opciones de respuesta en forma de botones Si o No. Ver Figura G.5.

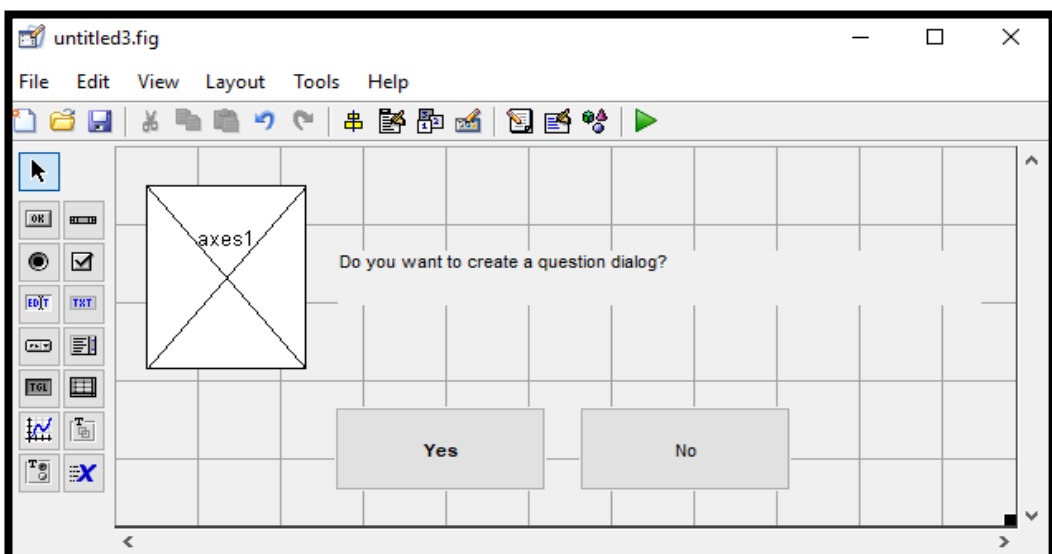

















FIGURA G. 5: ENTORNO DEL MODAL QUESTION DIALOG [49].

El entorno a usar es el Blank Gui el cual permite configurar a gusto del usuario los botones, gráficas y ejes que se necesitan para el desarrollo del proyecto. A continuación se realiza una descripción de los botones que intervienen en este ambiente.

En la tabla G.1 se publican los componentes generales del entorno gráfico:

TABLA G. 1:COMPONENTES DEL ENTORNO GRÁFICO DE DISEÑO [49].

	Select: permite escoger cualquier elemento del área de dibujo.
	Push button: llama un evento de forma inmediata.
	Slider: incorpora un rango de valores.
	Radio button: expone una opción a seleccionarse.
	Check box: revela el estado de una opción.
	Edit text: permite editar un texto.
	Static text: muestra el comando String dentro de una caja.
	Pop-up menu: revela una lista de opciones.
	List box: entrega una lista deslizable.
	Toggle button: presenta el estado de encendido y apagado.
	Table: crea una tabla para ingreso de datos.
	Axes: permite el ingreso de figuras.
	Panel: agrupa los botones en un lado.

	Button group: permite escoger solo una opción.
	ActiveX control: presenta una lista de controles del sistema en MATLAB®.

A continuación, se presenta un modelo del código utilizado para el desarrollo del análisis matemático.

```

clc
clear all
close all
%PROCEDIMIENTO PARA CALCULAR LOS PARÁMETROS DE CADENA Y11 e Y12
C=xlsread('MATRIZ_CLYZ_AT_15KVA.xlsx','CAPACITANCIA');%MATRIZ CAPACITANCIA
L=xlsread('MATRIZ_CLYZ_AT_15KVA.xlsx','INDUCTANCIA');%MATRIZ INDUCTANCIA
Z_real=xlsread('MATRIZ_CLYZ_AT_15KVA.xlsx','IMPEDANCIA_REAL');%MATRIZ
IMPEDANCIA (PARTE REAL)
Z_imag=xlsread('MATRIZ_CLYZ_AT_15KVA.xlsx','IMPEDANCIA_IMAG');%MATRIZ
IMPEDANCIA (PARTE IMAGINARIA)
Y_real=xlsread('MATRIZ_CLYZ_AT_15KVA.xlsx','ADMITANCIA_REAL');%MATRIZ
ADMITANCIA (PARTE REAL)
Y_imag=xlsread('MATRIZ_CLYZ_AT_15KVA.xlsx','ADMITANCIA_IMAG');%MATRIZ
ADMITANCIA (PARTE IMAGINARIA)
Z=sym('Z',15);
Y=sym('Y',15);
Z=Z_real+1i*Z_imag;
Y=Y_real+1i*Y_imag;
%MULTIPLICACIÓN MATRIZ DE IMPEDANCIA * ADMITANCIA (Z*Y)
ZY=Z*Y;
%MULTIPLICACIÓN MATRIZ DE ADMITANCIA * IMPEDANCIA (Y*Z)
YZ=Y*Z;
%CALCULAR LOS EIGENVALORES DE ZY DENOMINADA MATRIZ A
[A]=eig(ZY);
%CALCULAR LOS EIGENVALORES DE YZ DENOMINADA MATRIZ B
[B]=eig(YZ);
%MATRIZ TV
TV1=null(ZY-A(1)*eye(15));
TV2=null(ZY-A(2)*eye(15));
TV3=null(ZY-A(3)*eye(15));
TV4=null(ZY-A(4)*eye(15));
TV5=null(ZY-A(5)*eye(15));

```

```

TV6=null(ZY-A(6)*eye(15));
TV7=null(ZY-A(7)*eye(15));
TV8=null(ZY-A(8)*eye(15));
TV9=null(ZY-A(9)*eye(15));
TV10=null(ZY-A(10)*eye(15));
TV11=null(ZY-A(11)*eye(15));
TV12=null(ZY-A(12)*eye(15));
TV13=null(ZY-A(13)*eye(15));
TV14=null(ZY-A(14)*eye(15));
TV15=null(ZY-A(15)*eye(15));
TV=[TV1 TV2 TV3 TV4 TV5 TV6 TV7 TV8 TV9 TV10 TV11 TV12 TV13 TV14 TV15];
%MATRIZ TI
TI1=null(YZ-B(1)*eye(15));
TI2=null(YZ-B(2)*eye(15));
TI3=null(YZ-B(3)*eye(15));
TI4=null(YZ-B(4)*eye(15));
TI5=null(YZ-B(5)*eye(15));
TI6=null(YZ-B(6)*eye(15));
TI7=null(YZ-B(7)*eye(15));
TI8=null(YZ-B(8)*eye(15));
TI9=null(YZ-B(9)*eye(15));
TI10=null(YZ-B(10)*eye(15));
TI11=null(YZ-B(11)*eye(15));
TI12=null(YZ-B(12)*eye(15));
TI13=null(YZ-B(13)*eye(15));
TI14=null(YZ-B(14)*eye(15));
TI15=null(YZ-B(15)*eye(15));
TI=[TI1 TI2 TI3 TI4 TI5 TI6 TI7 TI8 TI9 TI10 TI11 TI12 TI14 TI15 TI13];
%MATRIZ GAMMA (AL CUADRADO) CALCULADA CON MATRIZ TV
GAMMATV=sym('GAMMATV',15);
MGAMMA2_TI=TI^(-1)*Y*Z*TI;
%MATRIZ GAMMA (AL CUADRADO) CALCULADA CON MATRIZ TI
GAMMATI=sym('GAMMATI',15);
MGAMMA2_TV=TV^(-1)*Z*Y*TV;
%SE SACA LA RAÍZ CUADRADA DE LA MATRIZ PARA UTILIZARLA EN ZC E YC
for i=1:15
    for j=1:15
        if(i==j)
            GAMMATV(i,j)=sqrt(MGAMMA2_TV(i,j));
            GAMMATI(i,j)=sqrt(MGAMMA2_TI(i,j));

```

```

else
    GAMMATV(i,j)=0;
    MGAMMA2_TV(i,j)=0;
    GAMMATI(i,j)=0;
    MGAMMA2_TI(i,j)=0;
end
end
end
GAMMATV=vpa(GAMMATV,'6');
GAMMATI=vpa(GAMMATI,'6');
%MATRIZ GAMMA A USAR EN EL PROCEDIMIENTO
GAMMA=GAMMATV;
%CALCULAR LA MATRIZ DE IMPEDANCIA CARACTERISTICA Zc
Zc=(Y^(-1))*TI*GAMMA*(TI^(-1));
%CALCULAR LA MATRIZ DE ADMITANCIA CARACTERISTICA Yc
Yc=eye(15)/Zc;
Zc=vpa(Zc,'10');
Yc=vpa(Yc,'10');
Zc=double(Zc);
Yc=double(Yc);
LONGITUD=1600*eye(15);
% Y11=Y22=Yc*coth(GAMMA*L) y Matriz_cotangentehiperbólica
Matriz_cotangenteh=eye(15)/tanh(GAMMA*LONGITUD);
Y11=Yc*Matriz_cotangenteh;
Y22=Y11;
% Y12=Y21=-Yc*csch(GAMMA*L) y Matriz_cosecantehiperbólica
Matriz_cosecanteh=eye(15)/sinh(GAMMA*LONGITUD);
Y12=-Yc*Matriz_cosecanteh;
Y21=Y12;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
syms Vs1 Vs2 Vs3 Vs4 Vs5 Vs6 Vs7 Vs8 Vs9 Vs10 Vs11 Vs12 Vs13 Vs14 Vs15 Vr1 Vr2 Vr3 Vr4
Vr5 Vr6 Vr7 Vr8 Vr9 Vr10 Vr11 Vr12 Vr13 Vr14 Vr15 Is1 Is2 Is3 Is4 Is5 Is6 Is7 Is8 Is9 Is10 Is11 Is12
Is13 Is14 Is15 Ir1 Ir2 Ir3 Ir4 Ir5 Ir6 Ir7 Ir8 Ir9 Ir10 Ir11 Ir12 Ir13 Ir14 Ir15;
Vsr=[Vs1; Vs2; Vs3; Vs4; Vs5; Vs6; Vs7; Vs8; Vs9; Vs10; Vs11; Vs12; Vs13; Vs14; Vs15; Vr1; Vr2;
Vr3; Vr4; Vr5; Vr6; Vr7; Vr8; Vr9; Vr10; Vr11; Vr12; Vr13; Vr14; Vr15];
Isr=[Is1; Is2; Is3; Is4; Is5; Is6; Is7; Is8; Is9; Is10; Is11; Is12; Is13; Is14; Is15; Ir1; Ir2; Ir3; Ir4; Ir5; Ir6;
Ir7; Ir8; Ir9; Ir10; Ir11; Ir12; Ir13; Ir14; Ir15];
MATRIZ_V=[Vs1; Vs2; Vs3; Vs4; Vs5; Vs6; Vs7; Vs8; Vs9; Vs10; Vs11; Vs12; Vs13; Vs14; Vs15;
Vs2; Vs3; Vs4; Vs5; Vs6; Vs7; Vs8; Vs9; Vs10; Vs11; Vs12; Vs13; Vs14; Vs15; Vr15];
%MATRIZ DE PRÁMETROS DE CADENA

```

```

MATRIZ_Y=[Y11 Y12; Y21 Y22];
MATRIZ_Y=vpa(MATRIZ_Y,'10');
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%ESTA ES LA
MATRIZ DE 17*17, DENOMINADA F
MATRIZ_I=MATRIZ_Y*MATRIZ_V;
I=sym('I',[16,1]);
I(1)=MATRIZ_I(1);
I(16)=MATRIZ_I(30);
for i=1:14
    I(i+1)=MATRIZ_I(i+1)+MATRIZ_I(i+15);
end
%LA MATRIZ F ES LA REDUCCIÓN DE LA MATRIZ
F=sym('F',16);
for i=1:16
    %vector AYUDA PARA SACAR LOS COEFICIENTES
    vector=children(I(i));
    F(i,1)=subs(vector(2),Vs1,1);
    F(i,2)=subs(vector(3),Vs2,1);
    F(i,3)=subs(vector(4),Vs3,1);
    F(i,4)=subs(vector(5),Vs4,1);
    F(i,5)=subs(vector(6),Vs5,1);
    F(i,6)=subs(vector(7),Vs6,1);
    F(i,7)=subs(vector(8),Vs7,1);
    F(i,8)=subs(vector(9),Vs8,1);
    F(i,9)=subs(vector(10),Vs9,1);
    F(i,10)=subs(vector(11),Vs10,1);
    F(i,11)=subs(vector(12),Vs11,1);
    F(i,12)=subs(vector(13),Vs12,1);
    F(i,13)=subs(vector(14),Vs13,1);
    F(i,14)=subs(vector(15),Vs14,1);
    F(i,15)=subs(vector(16),Vs15,1);
    F(i,16)=subs(vector(1),Vr15,1);
end
F=double(F);
%MATRIZ DE LAS VARIABLES A CALCULAR
%MI (1x1)
MI=Is1;
%V2 (15x1)
V2=[Vs2;Vs3;Vs4;Vs5;Vs6;Vs7;Vs8;Vs9;Vs10;Vs11;Vs12;Vs13;Vs14;Vs15;Vr15];
%MATRIZ DE LA VARIABLE CONOCIDA Vs1 (1x1)

```

```

V1=Vs1;
%DESCOMPOSICION DE LA MATRIZ F EN F1, F2, F3 y F4
%MATRIZ F1(1x1)=F11, elemento de la matriz F
F1=F(1,1);
%MATRIZ F2(1x15)
F2=sym('F2',[1,15]);
for i=1:15
    F2(1,i)=F(1,i+1);
end
F2=double(F2);
%MATRIZ F3 (15x1)
F3=sym('F3',[15,1]);
for i=1:15
    F3(i)=F(i+1,1);
end
F3=double(F3);
%MATRIZ F4 (15x15)
F4=sym('F4',15);
for i=1:15
    for j=1:15
        F4(i,j)=F(i+1,j+1);
    end
end
F4=double(F4);
MATRIZ_A=[1 -F2;zeros(15,1) -F4];
MATRIZ_A_INVERSA=eye(16)/MATRIZ_A;
%MATRIZ_B
MATRIZ_B=[F1 zeros(1,15);F3 zeros(15)];
FF=MATRIZ_A_INVERSA*MATRIZ_B;
%MATRIZ INCOGNITA (16x1)
V_1=[V1;zeros(15,1)];
%MATRIZ_FINAL=MATRIZ INCOGNITA=FF*V_1
MATRIZ_FINAL=FF*V_1;
MATRIZ_FINAL=vpa(MATRIZ_FINAL,'10');
%MATRIZ H EN FORMA RECTANGULAR
H=sym('H',[16,1]);
for i=1:16
    H(i)=FF(i,1);
end
H=vpa(H,'10');

```

```

H=double(H);
%MATRIZ H EN FORMA POLAR MODULO Y ANGULO EN GRADOS
[THETA,MODULO]=cart2pol(real(H),imag(H));
POLAR_H=sym('POLAR_H',[16,2]);
for i=1:16
    POLAR_H(i,1)=MODULO(i);
    POLAR_H(i,2)=(180/pi)*THETA(i);
end
POLAR_H=vpa(POLAR_H,'6');
Is1=MATRIZ_FINAL(1);
Vs2=MATRIZ_FINAL(2);
Vs3=MATRIZ_FINAL(3);
Vs4=MATRIZ_FINAL(4);
Vs5=MATRIZ_FINAL(5);
Vs6=MATRIZ_FINAL(6);
Vs7=MATRIZ_FINAL(7);
Vs8=MATRIZ_FINAL(8);
Vs9=MATRIZ_FINAL(9);
Vs10=MATRIZ_FINAL(10);
Vs11=MATRIZ_FINAL(11);
Vs12=MATRIZ_FINAL(12);
Vs13=MATRIZ_FINAL(13);
Vs14=MATRIZ_FINAL(14);
Vs15=MATRIZ_FINAL(15);
Vr15=MATRIZ_FINAL(16);
%ELEMENTOS (b+iw)
H2=H(2); %capa 1 espira 200
H3=H(3);%capa 2 espira 400
H4=H(4);%capa 3 espira 600
H5=H(5);%capa 4 espira 800
H6=H(6);%capa 5 espira 1000
H7=H(7);%capa 6 espira 1200
H8=H(8);%capa 7 espira 1400
H9=H(9);%capa 8 espira 1600
H10=H(10);%capa 9 espira 1800
H11=H(11);%capa 10 espira 2000
H12=H(12);%capa 11 espira 2200
H13=H(13);%capa 12 espira 2400
H14=H(14);%capa 13 espira 2600
H15=H(15);%capa 14 espira 2800

```

```

H16=H(16);%capa 15 espira 3000
%GRAFICA DE LA FUNCION ESCALON EN EL TIEMPO.
t=0.2*linspace(0,50,52);
y=50*[zeros(1,1),ones(1,51)];
figure('Name','PULSO ESCALÓN EN EL DOMINIO DEL TIEMPO')
plot(t,y,'r')
title('SEÑAL DEL GENERADOR DE PULSO: ESCALON');
xlabel('TIEMPO [us]');
ylabel('TENSIÓN [V]');
axis([0 3 0 70]);
grid on
tfy=laplace(sym(y));
VCAP2=abs(complex(H2))*tfy;
VCAP3=abs(complex(H3))*tfy;
VCAP4=abs(complex(H4))*tfy;
VCAP5=abs(complex(H5))*tfy;
VCAP6=abs(complex(H6))*tfy;
VCAP7=abs(complex(H7))*tfy;
VCAP8=abs(complex(H8))*tfy;
VCAP9=abs(complex(H9))*tfy;
VCAP10=abs(complex(H10))*tfy;
VCAP11=abs(complex(H11))*tfy;
VCAP12=abs(complex(H12))*tfy;
VCAP13=abs(complex(H13))*tfy;
VCAP14=abs(complex(H14))*tfy;
VCAP15=abs(complex(H15))*tfy;
VCAP16=abs(complex(H16))*tfy;
%-----
den2=[5.5 13.059355 90]; %SACADO DE H Y REAJUSTADO A LA ESCALA
den3=[5.5 13.0453 90.020707]; %SACADO DE H Y REAJUSTADO A LA ESCALA
figure('Name','VOLTAJE DE LA CAPA 2 y 3 SIMULADA DEL TRANSFORMADOR 15KVA');
plot(t,y,'r');%IMPRIME ESCALON
hold on
step(107*tf(35,den2)); %VOLTAJE CAPA 2
step(92*tf(35,den3)); %VOLTAJE CAPA 3
title('RESPUESTA TRANSITORIA DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN 15KVA');
xlabel('TIEMPO [us]');%TITULO DE EJE X
ylabel('TENSIÓN [V]');%TITULO DE EJE Y
legend('SEÑAL GENERADOR DE PULSO','VOLTAJE CAPA 2: 200 ESPIRAS','VOLTAJE CAPA
3: 400 ESPIRAS');

```



```

axis([0 3 0 70]);%DELIMITA LA VENTANA
grid on
%-----
% VOLTAJES TRANSITORIOS DE TODAS LAS CAPAS
den4=[5.1 13.0628 90.0329856]; % REAJUSTADO A LA ESCALA
den6=[4.7 13.9302 90.07024117]; % REAJUSTADO A LA ESCALA
den8=[4.4 13.04914 90.01482893]; % REAJUSTADO A LA ESCALA
den10=[3.9 13.16669 90.00680388]; % REAJUSTADO A LA ESCALA
den12=[3.6 13.2319 90.01129608]; % REAJUSTADO A LA ESCALA
den14=[3.3 13.5957 90.07345002]; % REAJUSTADO A LA ESCALA
figure('Name','VOLTAJE DE LA CAPA 2 A 14 SIMULADA DEL TRANSFORMADOR 15KVA');
step(107*tf(35,den2)); % VOLTAJE CAPA 2
hold on
step(84*tf(35,den4)); % VOLTAJE CAPA 4
step(70*tf(35,den6)); % VOLTAJE CAPA 6
step(58*tf(35,den8)); % VOLTAJE CAPA 8
step(44*tf(35,den10)); % VOLTAJE CAPA 10
step(29*tf(35,den12)); % VOLTAJE CAPA 12
step(18*tf(35,den14)); % VOLTAJE CAPA 14
title('RESPUESTA TRANSITORIA DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN 15KVA CAPA 2 A
14');
xlabel('TIEMPO [us]');% TITULO DE EJE X
ylabel('TENSIÓN [V]');% TITULO DE EJE Y
legend('VOLTAJE CAPA 2: 200 ESPIRAS','VOLTAJE CAPA 4: 600 ESPIRAS','VOLTAJE CAPA 6:
1000 ESPIRAS', 'VOLTAJE CAPA 8: 1400 ESPIRAS','VOLTAJE CAPA 10: 1800
ESPIRAS','VOLTAJE CAPA 12: 2200 ESPIRAS','VOLTAJE CAPA 14: 2600 ESPIRAS');
axis([0 4 0 70]);%DELIMITA LA VENTANA
grid on

```

ANEXO H. Fotografías de la prueba en el Laboratorio de Alta tensión



