



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
SEDE GUAYAQUIL

**CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**PROYECTO DE TITULACIÓN**

Previa la obtención del Título de:

**INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA**

“Análisis y Simulación Matemática de la Disrupción Eléctrica del Aceite como medio Dieléctrico de Interruptores de Media Tensión”

**AUTOR**

George Josué Villagómez Galarza

DIRECTOR: MSc. Juan Carlos Lata García

GUAYAQUIL

2018

# TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

---

Ing. Gary Ampuño  
DIRECTOR DE CARRERA  
INGENIERÍA ELÉCTRICA

---

Ing. Juan Carlos Lata  
DIRECTOR DE PROYECTO  
TITULACIÓN

---

VOCAL

---

VOCAL

## **CERTIFICADOS DE RESPONSABILIDAD Y AUDITORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, George Josué Villagómez Galarza autorizo a la **Universidad Politécnica Salesiana** la publicación total o parcial de este trabajo de titulación y su reproducción sin fines de lucro.

Además, declaro que los conceptos, análisis desarrollados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Guayaquil, Octubre del 2018

Firma: \_\_\_\_\_

Autor: George Josué Villagómez Galarza

Cédula: 0926607664

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

Yo, **GEORGE JOSUÉ VILLAGÓMEZ GALARZA**, con documento de identificación N° **0926607664**, 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 Y SIMULACIÓN MATEMÁTICA DE LA DISRUPCIÓN ELÉCTRICA DEL ACEITE COMO MEDIO DIELECTRICO DE INTERRUPTORES DE MEDIA TENSIÓN**” mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de **INGENIERO ELÉCTRICO**, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la universidad facultada para ejercer plenamente los derechos antes cedidos.

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

Guayaquil, Octubre del 2018

Firma: \_\_\_\_\_

Autor: George Josué Villagómez Galarza

Cédula: 0926607664

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

Yo, **JUAN CARLOS LATA GARCÍA**, director del proyecto de Titulación denominado “Análisis y Simulación Matemática de la Disrupción Eléctrica del Aceite como medio Dieléctrico de Interruptores de Media Tensión” realizado por el estudiante, George Josué Villagómez Galarza, certifico que ha sido orientado y revisado durante su desarrollo, por cuanto se aprueba la presentación del mismo ante las autoridades pertinentes.

Guayaquil, Octubre del 2018

Firma: \_\_\_\_\_

MSc. Juan Carlos Lata García

## **DEDICATORIA**

Dedico todo este ciclo de trabajo a Dios, bajo su manto pude abrirme camino a cada dificultad que me impuso la vida y jamás retroceder a las adversidades.

A mi familia, por estar conmigo dándome su apoyo y nunca dejándome de alentar para poder realizar todas mis expectativas propuestas, mi madre Reina y mi padre Gerardo por el amor incontenible que siempre me transmiten.

A mí querida novia Jacqueline, mis hermanos Gerardo y Daniel quienes han sido motivación cada día y también a mis amigos quienes siempre me mostraron su apoyo incondicional.

A mi hermosa abuela Catuja, sin ella todo este trabajo y proceso universitario no hubiera sido posible.

George Josué Villagómez Galarza

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar y como más importante a Dios, por darme fuerzas e impartirme sus bendiciones en todo el proceso y trayecto de mi carrera universitaria.

A mi familia, por el apoyo incondicional en cada suceso de mi vida, los cuales siempre han estado presente en los buenos y malos momentos. Gracias a ellos esta meta se hizo realidad.

También es importante reconocer todo el esfuerzo realizado por los docentes de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil, los cuales con su amplia experiencia y conocimiento fueron de apoyo para la culminación de este trabajo.

## RESUMEN

La razón principal por la cual se realizó todo este proceso es para facilitar la comprensión e influenciar las bases necesarias para brindar y generar soluciones a problemas que existen en mecanismos de media tensión.

Por lo consiguiente, se realizaron prácticas en el laboratorio de Alta tensión perteneciente a la Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil, las cuales consistían en obtener valores de voltajes de ruptura utilizando aceite como medio dieléctrico en un interruptor para capacitores en 13,8 kV con el cual se realizó el cierre y apertura de sus contactos.

Mediante la herramienta matemática MATLAB se pudo comparar valores obtenidos en la parte experimental y gracias a este software se visualizaron gráficas en donde se pudo observar las curvas que contenían los puntos de voltajes de ruptura.

El análisis y simulación matemática sirvió de apoyo para respaldar los datos obtenidos en las prácticas efectuadas y así notar un equilibrio entre la parte experimental y lo simulado, con lo cual se despejarían dudas que se generen durante el proceso educativo y de enseñanza. De este modo los estudiantes tendrían la opción de generar conclusiones más efectivas del trabajo.

**Palabras claves:** Ruptura, Aceite, Interruptor, Curvas, Análisis.



## ABSTRACT

The principal reason by which all this process was realized is to facilitate the comprehension and to influence the necessary bases to provide and to generate solutions to problems that exist in mechanisms of half a tension.

For the consequent, the practices realized in Alta's laboratory tension belonging to the Technical University Salesiana Sede Guayaquil, which were consisting of obtaining values of voltages of break using oil as a dielectric medium in a capacitor switch to 13.8 kV in which the closing and opening of contacts.

By mathematical tool MATLAB could compare values obtained in the experimental part and thanks to this software visualized graphs where curves was observed containing points breakdown voltages.

Analysis and mathematical simulation was used as support the data obtained in practice and notice a balance between experimental and simulated, with which would clear up themselves doubts which generated during the educational process and teaching. Thus the students would have the option to generate more effective conclusions of the work.

**Keywords:** Breaking, Oil, Switch, Curves, Analysis.

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN .....	ii
CERTIFICADOS DE RESPONSABILIDAD Y AUDITORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	iii
CERTIFICADO DE SESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UPS .....	iv
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN SUSCRITO POR EL TUTOR.....	v
DEDICATORIA .....	vi
AGRADECIMIENTO .....	vii
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT.....	ix
ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	x
INDICE DE FIGURAS.....	xiv
INDICE DE TABLAS .....	xx
INDICE DE ECUACIONES .....	xxii
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1 .....	2
1.1 Planteamiento del problema. ....	2
1.2 Importancia y Alcances .....	2
1.3 Delimitación. ....	3
1.4 Objetivos. ....	3
1.4.1 Objetivo General.....	3
1.4.2 Objetivos Específicos. ....	3
1.5 Marco Metodológico. ....	4
1.5.1 Hipótesis. ....	4

CAPÍTULO 2 .....	5
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 Laboratorio de alta tensión. ....	5
2.1.1 Normativas y Reglas.....	5
2.1.2 Sala de ensayo.....	6
2.1.3 Seguridad en el equipo.....	6
2.1.4 Puesta a Tierra. ....	7
2.1.5 Equipos de Variación y transformación.....	7
2.1.6 Equipos de control y medición. ....	9
2.1.7 Elementos del manual de entrenamiento TERCO. ....	11
2.2 Aparatos de corte de alta tensión.....	14
2.3 Características de los disyuntores.....	15
2.4 Disyuntores en baño de aceite. ....	24
2.5 MODELO DE MAYR.....	26
2.6 CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN TRANSFORMADOR. ....	28
2.7 APROXIMACIÓN DE LA CURVA DE SATURACIÓN POR EL MÉTODO DE ARCOTANGENTE. ....	29
CAPITULO 3 .....	31
3. MATERIALES Y MÉTODOS .....	31
3.1 PRUEBAS EXPERIMENTALES.....	31
3.1.1 Pruebas al Interruptor de 13,8 kV con el Megger FLUKE 1550B: .....	33
3.2 EQUIPOS UTILIZADOS EN PRUEBAS .....	40
3.3 SIMULACIÓN. ....	44
3.3.1 SIMULINK.....	44
3.3.2 GUI .....	45
CAPITULO 4 .....	47

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	47
4.1 PRUEBAS EN CIRCUITO RL CON INTERRUPTOR DE POTENCIA.....	47
4.2 PRUEBAS DEL TRANSFORMADOR A VACÍO CON INTERRUPTOR DE POTENCIA. ....	50
4.3 PRUEBAS EN CIRCUITO RLC CON INTERRUPTOR DE POTENCIA. ...	53
4.4 COMPARACIÓN DE GRÁFICAS CORRESPONDIENTES A LAS PRUEBAS EN CIRCUITO RL CON INTERRUPTOR DE POTENCIA.....	56
4.4.1 TENSIÓN AL MOMENTO DE APERTURA DEL INTERRUPTOR DE POTENCIA.....	56
4.4.2 CORRIENTE AL MOMENTO DE APERTURA DEL INTERRUPTOR DE POTENCIA .....	57
4.5 COMPARACIÓN DE GRÁFICAS CORRESPONDIENTES A LAS PRUEBAS DEL TRANSFORMADOR A VACÍO CON INTERRUPTOR DE POTENCIA. ....	58
4.5.1 CORRIENTE DE VACÍO EN EL TRANSFORMADOR .....	58
4.5.2 CORRIENTE INRUSH EN EL TRANSFORMADOR (CIERRE DEL INTERRUPTOR) .....	59
4.5.3 TENSIÓN EN EL CIERRE DEL INTERRUPTOR DE POTENCIA .....	60
4.6 COMPARACIÓN DE GRÁFICAS CORRESPONDIENTES A LAS PRUEBAS EN CIRCUITO RLC CON INTERRUPTOR DE POTENCIA.....	61
4.6.1 TENSIÓN AL MOMENTO DE APERTURA DEL INTERRUPTOR DE POTENCIA.....	61
4.6.2 CORRIENTE AL MOMENTO DE APERTURA DEL INTERRUPTOR DE POTENCIA .....	62
4.7 REALIZACIÓN DE LAS INTERFACES .....	63
4.7.1 PRESENTACIÓN .....	63
4.7.2 PARÁMETROS.....	63
4.7.3 MUESTRA DE GRÁFICAS .....	66

CONCLUSIONES. ....	69
RECOMENDACIONES. ....	70
ANEXOS. ....	71
VALORES DE PORCENTAJES DE ERROR ENTRE GRÁFICAS	
PROPUESTAS .....	71
➤ CIRCUITO RL CON INTERRUPTOR DE POTENCIA.....	71
• TENSIÓN AL MOMENTO DE APERTURA DEL INTERRUPTOR DE POTENCIA.....	71
• CORRIENTE AL MOMENTO DE APERTURA DEL INTERRUPTOR DE POTENCIA .....	72
➤ CIRCUITO DEL TRANSFORMADOR A VACÍO CON INTERRUPTOR DE POTENCIA.....	73
• CORRIENTE DE VACÍO EN EL TRANSFORMADOR.....	73
• CORRIENTE INRUSH EN EL TRANSFORMADOR (CIERRE DEL INTERRUPTOR) .....	74
• TENSIÓN EN EL CIERRE DEL INTERRUPTOR DE POTENCIA .....	75
➤ CIRCUITO RLC CON INTERRUPTOR DE POTENCIA.....	76
• TENSIÓN AL MOMENTO DE APERTURA DEL INTERRUPTOR DE POTENCIA.....	76
• CORRIENTE AL MOMENTO DE APERTURA DEL INTERRUPTOR DE POTENCIA .....	77
BIBLIOGRAFÍA. ....	78

## INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: SALA DE ENSAYO [1] .....	6
FIGURA 2: SEGURIDAD EN EL EQUIPO [1] .....	6
FIGURA 3: TRANSFORMADOR DE PRUEBAS [1] .....	8
FIGURA 4: MESA DE CONTROL [1] .....	9
FIGURA 5: VOLTÍMETRO PICO [1] .....	9
FIGURA 6: VOLTÍMETRO [1] .....	10
FIGURA 7: VOLTÍMETRO DE IMPULSO [1] .....	10
FIGURA 8: CAPACITOR DE MEDICIÓN .....	11
FIGURA 9: BARRA DE CONEXIÓN DE ALUMINIO .....	11
FIGURA 10: COPA DE CONEXIÓN DE ALUMINIO .....	12
FIGURA 11: PEDESTAL DE PISO .....	12
FIGURA 12: TUBO ESPACIADOR .....	13
FIGURA 13: INTERRUPTOR DE PUESTA A TIERRA .....	13
FIGURA 14: EVOLUCIÓN DE LA RIGIDEZ DIELECTRICA DEL MEDIO EN QUE SE PRODUCE EL ARCO, DURANTE UNA MANIOBRA DE RUPTURA. [2] .....	18
FIGURA 15: CASO 1. CARGAS INDUCTIVAS [2] .....	19
FIGURA 16: CASO 2. CARGAS OHMICAS E INDUCTIVAS [2] .....	19
FIGURA 17: CASO 3. CARGAS CAPACITIVAS [2] .....	19
FIGURA 18: CASO 4. CORTOCIRCUIO EN LAS PROXIMIDADES DEL DISYUNTOR [2] .....	20
FIGURA 19: CASO 5. CORTOCIRRCUITO EN LA LÍNEA DE TRANSPORTE O EN EL SECUNDARIO DEL TRANSFORMADOR. [2] .....	20
FIGURA 20: CASO 6. OPOSICIÓN DE FASES [2] .....	20
FIGURA 21: CORTE DE LA CORRIENTE MAGNETIZANTE DE UN TRANSFORMADOR EN VACÍO, POR UN MODERNO DISYUNTOR DE PEQUEÑO VOLUMEN DE ACEITE CON DISPOSITIVOS DE INSERCIÓN DE RESISTENCIAS: A-ORDEN DE CORTE, B-SEPARACIÓN DE LOS CONTACTOS. [2] .....	22
FIGURA 22: CORTE DE UNA CORRIENTE DE CARGA CAPACITIVA, ADMITIENDO QUE SE PRODUCEN REENCEBAMIENTO EN EL DISYUNTOR DURANTE EL CURSO DEL PROCESO DE RUPTURA. [2]	23

FIGURA 23: REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL PROCESO DE RUPTURA EN UN DISYUNTOR EN BAÑO DE ACEITE: 1.- ZONA DE VAPORIZACIÓN, 2.- VAPOR SATURADO, 3.- HIDRÓGENO, 4.- VAPORES RECALENTADOS. [2].....	24
FIGURA 24: REPRESENTACIÓN MUY SIMPLIFICADA DE UN DISYUNTOR EN BAÑO DE ACEITE. [2].....	26
FIGURA 25: MODELO DE UN TRANSFORMADOR REAL [6].....	28
FIGURA 26: MODELO APROXIMADO DE UN TRANSFORMADOR REFERIDO AL PRIMARIO [6].....	28
FIGURA 27: SECCIONES DE LA CURVA DE MAGNETIZACIÓN [8].....	29
FIGURA 28: CARACTERÍSTICA DE SATURACIÓN REAL Y APROXIMADA POR ARCOTANGENTE [8] .....	30
FIGURA 29: ESTRUCTURA DEL FLUKE 1550B MEGOHMMETER .....	31
FIGURA 30: FLUKE 1550B MEGOHMMETER .....	32
FIGURA 31: ESTRUCTURA DEL INTERRUPTOR DE MEDIA TENSIÓN.....	32
FIGURA 32: PRUEBAS AL SWITCH DE 13,8 KV CON EL MEGGER FLUKE 1550B (CONTACTO-CONTACTO) .....	33
FIGURA 33: DATO DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO DEL INTERRUPTOR DE MEDIA TENSIÓN (CONTACTO-CONTACTO) .....	33
FIGURA 34: DATO DE VOLTAJE DE PRUEBA NOMINAL DEL INTERRUPTOR DE MEDIA TENSIÓN (CONTACTO-CONTACTO) .....	34
FIGURA 35: DATO DE VOLTAJE INYECTADO AL INTERRUPTOR DE MEDIA TENSIÓN (CONTACTO-CONTACTO).....	34
FIGURA 36: DATO DE CAPACITANCIA DEL INTERRUPTOR DE MEDIA TENSIÓN (CONTACTO-CONTACTO).....	34
FIGURA 37: DATO DE INDICE DE ABSORCIÓN DIELÉCTRICA DEL INTERRUPTOR DE MEDIA TENSIÓN (CONTACTO-CONTACTO).....	35
FIGURA 38: DATO DE CORRIENTE DE FUGA DEL INTERRUPTOR DE MEDIA TENSIÓN (CONTACTO-CONTACTO).....	35
FIGURA 39: PRUEBAS AL SWITCH DE 13,8 KV CON EL MEGGER FLUKE 1550B (CONTACTO-TANQUE / SWITCH ABIERTO).....	36
FIGURA 40: DATO DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO DEL INTERRUPTOR DE MEDIA TENSIÓN (CONTACTO-TANQUE / SWITCH ABIERTO).....	36

FIGURA 41: DATO DE VOLTAJE DE PRUEBA NOMINAL DEL INTERRUPTOR DE MEDIA TENSIÓN (CONTACTO- TANQUE / SWITCH ABIERTO).....	36
FIGURA 42: DATO DE VOLTAJE INYECTADO AL INTERRUPTOR DE MEDIA TENSIÓN (CONTACTO- TANQUE / SWITCH ABIERTO) .....	37
FIGURA 43: DATO DE CAPACITANCIA DEL INTERRUPTOR DE MEDIA TENSIÓN (CONTACTO- TANQUE / SWITCH ABIERTO) .....	37
FIGURA 44: DATO DE CORRIENTE DE FUGA DEL INTERRUPTOR DE MEDIA TENSIÓN (CONTACTO- TANQUE / SWITCH ABIERTO) .....	37
FIGURA 45: PRUEBAS AL SWITCH DE 13,8 KV CON EL MEGGER FLUKE 1550B (CONTACTO-TANQUE / SWITCH CERRADO) .....	38
FIGURA 46: DATO DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO DEL INTERRUPTOR DE MEDIA TENSIÓN (CONTACTO-TANQUE / SWITCH CERRADO) .....	38
FIGURA 47: DATO DE VOLTAJE DE PRUEBA NOMINAL DEL INTERRUPTOR DE MEDIA TENSIÓN (CONTACTO- TANQUE / SWITCH CERRADO) ....	38
FIGURA 48: DATO DE VOLTAJE INYECTADO AL INTERRUPTOR DE MEDIA TENSIÓN (CONTACTO- TANQUE / SWITCH CERRADO).....	39
FIGURA 49: DATO DE CAPACITANCIA DEL INTERRUPTOR DE MEDIA TENSIÓN (CONTACTO- TANQUE / SWITCH CERRADO).....	39
FIGURA 50: DATO DE ÍNDICE DE ABSORCIÓN DEL INTERRUPTOR DE MEDIA TENSIÓN (CONTACTO- TANQUE / SWITCH CERRADO) .....	39
FIGURA 51: DATO DE CORRIENTE DE FUGA DEL INTERRUPTOR DE MEDIA TENSIÓN (CONTACTO- TANQUE / SWITCH ABIERTO) .....	40
FIGURA 52: ESTRUCTURA DEL ANALIZADOR DE REDES FLUKE 435 SERIES II .....	41
FIGURA 53: FLUKE 435 SERIES II POWER QUALITY AND ENERGY ANALYZER.....	41
FIGURA 54: TRANSFORMADOR 50KVA – 7960V/240V .....	42
FIGURA 55: BOBINA 3KVA – 220V – 10A .....	43
FIGURA 56: CAPACITOR 8.66UF .....	43
FIGURA 57: VENTANA DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN MATLAB.....	44
FIGURA 58: AMBIENTE VIRTUAL SIMULINK .....	45
FIGURA 59: VENTANA DE INTERFAZ GRÁFICA .....	46
FIGURA 60: CIRCUITO RL CON INTERRUPTOR DE POTENCIA.....	47



FIGURA 61: SENTIDO DE LA CORRIENTE EN UN CIRCUITO RL CON INTERRUPTOR DE POTENCIA.....	48
FIGURA 62: TRANSFORMADOR A VACÍO CON INTERRUPTOR DE POTENCIA.....	50
FIGURA 63: CIRCUITO CON TRANSFORMADOR REFERIDO AL PRIMARIO .....	50
FIGURA 64: SENTIDO DE LAS CORRIENTES PERTENECIENTES AL NÚCLEO DEL TRANSFORMADOR .....	51
FIGURA 65: CIRCUITO RLC CON INTERRUPTOR DE POTENCIA.....	53
FIGURA 66: SENTIDO DE LA CORRIENTE EN UN CIRCUITO RLC CON INTERRUPTOR DE POTENCIA.....	54
FIGURA 67: MONTAJE DEL CIRCUITO RL CON INTERRUPTOR DE POTENCIA.....	56
FIGURA 68: GRÁFICA EXPERIMENTAL DE LA TENSIÓN DE APERTURA DEL INTERRUPTOR DE PÒTENCIA EN UN CIRCUITO RL.....	56
FIGURA 69: GRÁFICA SIMULADA DE LA TENSIÓN DE APERTURA DEL INTERRUPTOR DE PÒTENCIA EN UN CIRCUITO RL.....	56
FIGURA 70: GRÁFICA EXPERIMENTAL DE LA CORRIENTE AL MOMENTO DE APERTURA DEL INTERRUPTOR DE PÒTENCIA EN UN CIRCUITO RL .....	57
FIGURA 71: GRÁFICA SIMULADA DE LA CORRIENTE AL MOMENTO DE APERTURA DEL INTERRUPTOR DE PÒTENCIA EN UN CIRCUITO RL	57
FIGURA 72: MONTAJE DEL CIRCUITO CON TRANSFORADOR A VACÍO CON INTERRUPTOR DE POTENCIA.....	58
FIGURA 73: GRÁFICA EXPERIMENTAL DE LA CORRIENTE DE VACÍO EN EL TRANSFORMADOR.....	58
FIGURA 74: GRÁFICA SIMULADA DE LA CORRIENTE DE VACÍO EN EL TRANSFORMADOR.....	58
FIGURA 75: GRÁFICA EXPERIMENTAL DE LA CORRIENTE INRUSH EN EL TRANSFORMADOR.....	59
FIGURA 76: GRÁFICA SIMULADA DE LA CORRIENTE INRUSH EN EL TRANSFORMADOR.....	59

FIGURA 77: GRÁFICA EXPERIMENTAL DE LA TENSIÓN EN EL CIERRE DEL INTERRUPTOR DE POTENCIA EN EL CIRCUITO CON TRANSFORMADOR.....	60
FIGURA 78: GRÁFICA SIMULADA DE LA TENSIÓN EN EL CIERRE DEL INTERRUPTOR DE POTENCIA EN EL CIRCUITO CON TRANSFORMADOR.....	60
FIGURA 79: MONTAJE DEL CIRCUITO RLC CON INTERRUPTOR DE POTENCIA.....	61
FIGURA 80: GRÁFICA EXPERIMENTAL DE LA TENSIÓN AL MOMENTO DE APERTURA DEL INTERRUPTOR DE POTENCIA EN CIRCUITO RLC....	61
FIGURA 81: GRÁFICA SIMULADA DE LA TENSIÓN AL MOMENTO DE APERTURA DEL INTERRUPTOR DE POTENCIA EN CIRCUITO RLC....	61
FIGURA 82: GRÁFICA EXPERIMENTAL DE LA CORRIENTE AL MOMENTO DE APERTURA DEL INTERRUPTOR DE POTENCIA EN CIRCUITO RLC .....	62
FIGURA 83: GRÁFICA SIMULADA DE LA CORRIENTE AL MOMENTO DE APERTURA DEL INTERRUPTOR DE POTENCIA EN CIRCUITO RLC....	62
FIGURA 84: INTERFAZ DE PRESENTACIÓN .....	63
FIGURA 85: SELECCIÓN DE CIRCUITO .....	64
FIGURA 86: INGRESO DE DATOS PARA CIRCUITO RL .....	64
FIGURA 87: INGRESO DE DATOS PARA CIRCUITO CON TRANSFORMADOR .....	65
FIGURA 88: INGRESO DE DATOS PARA CIRCUITO RLC .....	65
FIGURA 89: VENTANA PARA MOSTRAR GRÁFICAS.....	66
FIGURA 90: GRÁFICAS SIMULADAS CORRESPONDIENTES AL CIRCUITO RL .....	67
FIGURA 91: GRAFICAS CORRESPONDIENTES AL CIRCUITO CON TRANSFORMADOR CASO 1 .....	67
FIGURA 92: GRAFICAS CORRESPONDIENTES AL CIRCUITO CON TRANSFORMADOR CASO 2 .....	68
FIGURA 93: GRÁFICAS SIMULADAS CORRESPONDIENTES AL CIRCUITO RLC.....	68
FIGURA 94 GRÁFICAS DE PORCENTAJES EN TENSIÓN DE CIRCUITO RL 71	

FIGURA 95 GRÁFICA DE PORCENTAJE EN CORRIENTE DE CIRCUITO RL .....	72
FIGURA 96 GRÁFICA DE PORCENTAJE EN CORRIENTE A VACÍO EN CIRCUITO CON TRANSFORMADOR .....	73
FIGURA 97 GRÁFICA DE PORCENTAJE EN CORRIENTE A VACÍO EN CIRCUITO CON TRANSFORMADOR .....	74
FIGURA 98 GRÁFICA DE PORCENTAJE EN CORRIENTE A VACÍO EN CIRCUITO CON TRANSFORMADOR .....	75
FIGURA 99 GRÁFICAS DE PORCENTAJES EN TENSIÓN DE CIRCUITO RLC .....	76
FIGURA 100 GRÁFICA DE PORCENTAJE EN CORRIENTE DE CIRCUITO RLC .....	77

## INDICE DE TABLAS

TABLA 1: DATOS TÉCNICOS DEL TRANSFORMADOR (MÓDULO TERCO HV 9000) [1] .....	8
TABLA 2: DATOS TÉCNICOS DE LA MESA DE CONTROL (MÓDULO TERCO HV 9000) [1].....	9
TABLA 3: DATOS TÉCNICOS DEL VOLTÍMETRO PICO (MÓDULO TERCO HV 9000) [1] .....	10
TABLA 4: DATOS TÉCNICOS DEL VOLTÍMETRO DC (MÓDULO TERCO HV 9000) [1] .....	10
TABLA 5: DATOS TÉCNICOS DEL VOLTÍMETRO DE IMPULSO (MÓDULO TERCO HV 9000) [1].....	11
TABLA 6: DATOS TÉCNICOS DEL CAPACITOR DE MEDICIÓN (MÓDULO TERCO HV 9000) [1].....	11
TABLA 7: DATOS TÉCNICOS DE LA BARRA DE CONEXIÓN (MÓDULO TERCO HV 9000) [1].....	12
TABLA 8: DATOS TÉCNICOS DE COPA DE CONEXIÓN (MÓDULO TERCO HV 9000) [1] .....	12
TABLA 9: DATOS TÉCNICOS DE PEDESTAL DE PISO (MÓDULO TERCO HV 9000) [1] .....	13
TABLA 10: DATOS TÉCNICOS DEL TUBO ESPACIADOR (MÓDULO TERCO HV 9000) [1].....	13
TABLA 11: DATOS TÉCNICOS DEL INTERRUPTOR DE PUESTA A TIERRA (MÓDULO TERCO HV 9000) [1].....	14
TABLA 12: DATOS TÉCNICOS DEL INTERRUPTOR DE PUESTA A TIERRA (ESTACIONES) [2].....	21
TABLA 13: CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL INTERRUPTOR DE MEDIA TENSIÓN [9].....	32
TABLA 14: RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS CON EL MEGGER AL INTERRUPTOR DE MEDIA TENSIÓN.....	40
TABLA 15: CARACTERÍSTICAS DE MEDICIÓN DEL ANALIZADOR DE REDES.....	41
TABLA 16 PORCENTAJES DE ERROR EN TENSIÓN EN CIRCUITO RL.....	71

TABLA 17 PORCENTAJES DE ERROR EN CORRIENTE EN CIRCUITO RL ..	72
TABLA 18 PORCENTAJES DE ERROR EN CORRIENTE A VACÍO EN CIRCUITO CON TRANSFORMADOR .....	73
TABLA 19 PORCENTAJES DE ERROR EN CORRIENTE INRUSH EN CIRCUITO CON TRANSFORMADOR .....	74
TABLA 20 PORCENTAJES DE ERROR EN TENSIÓN EN CIRCUITO CON TRANSFORMADOR.....	75
TABLA 21 PORCENTAJES DE ERROR EN TENSIÓN EN CIRCUITO RLC.....	76
TABLA 22 PORCENTAJES DE ERROR EN CORRIENTE EN CIRCUITO RLC	77

## INDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 1: CAÍDA DE TENSIÓN PARA ARCOS ESTABLES .....	16
ECUACIÓN 2: ENERGÍA ABSORBIDA POR EL ARCO DURANTE LA RUPTURA.....	17
ECUACIÓN 3: PLANTEAMIENTO DE LA ECUACIÓN DEL MODELO DE MAYR .....	27
ECUACIÓN 4: ECUACIÓN DEFINIDA DEL MODELO DE MAYR.....	27
ECUACIÓN 5: MODELO DE MAYR EN ESTADO ESTABLE (INTERRUPTOR CERRADO).....	27
ECUACIÓN 6: MÉTODO DEL ARCOTANGENTE.....	29
ECUACIÓN 7: IMPEDANCIA INDUCTIVA.....	43
ECUACIÓN 8: REACTANCIA INDUCTIVA A PARTIR DE LA IMPEDANCIA.....	43
ECUACIÓN 9: REACTANCIA INDUCTIVA .....	43
ECUACIÓN 10: VOLTAJE EN EL RESISTOR .....	47
ECUACIÓN 11: VOLTAJE EN EL INDUCTOR.....	47
ECUACIÓN 12: LEY DE VOLTAJE DE KIRCHHOFF EN CIRCUITO RL.....	48
ECUACIÓN 13: LEY DE VOLTAJE DE KIRCHHOFF EN CIRCUITO RL EN MODO ESTABLE.....	48
ECUACIÓN 14: SUMATORIA DE VOLTAJES EN CIRCUITO RL EN FUNCIÓN DE LA CORRIENTE DEL INTERRUPTOR DE POTENCIA.....	48
ECUACIÓN 15: TENSIÓN EN EL INTERRUPTOR DE POTENCIA EN UN CIRCUITO RL .....	49
ECUACIÓN 16: CONDUCTANCIA EN EL INTERRUPTOR DE POTENCIA BASADO EN UN CIRCUITO RL.....	49
ECUACIÓN 17: VOLTAJE EN EL INDUCTOR.....	51
ECUACIÓN 18: VOLTAJE QUE EXISTE EN EL INDUCTOR UBICADO EN EL NÚCLEO DEL TRANSFORMADOR.....	51
ECUACIÓN 19: CORRIENTE MAGNETIZANTE EN EL NÚCLEO DEL TRANSFORMADOR.....	52
ECUACIÓN 20: CORRIENTE A VACÍO EN EL TRANSFORMADOR.....	52
ECUACIÓN 21: TENSIÓN EN EL INTERRUPTOR DE POTENCIA EN EL CIRCUITO CON TRANSFORMADOR A VACÍO.....	52
ECUACIÓN 22: VOLTAJE EN EL CAPACITOR .....	53

ECUACIÓN 23: LEY DE VOLTAJE DE KIRCHHOFF EN CIRCUITO RLC .....	53
ECUACIÓN 24: LEY DE VOLTAJE DE KIRCHHOFF EN CIRCUITO RL EN MODO ESTABLE.....	54
ECUACIÓN 25: CORRIENTE EN CIRCUITO RLC EN SERIE .....	54
ECUACIÓN 26: CORRIENTE EN CIRCUITO RLC APLICANDO MODELO DE MAYR .....	55
ECUACIÓN 27: TENSIÓN EN EL INTERRUPTOR DE POTENCIA EN UN CIRCUITO RL .....	55
ECUACIÓN 28: CONDUCTANCIA EN EL INTERRUPTOR DE POTENCIA BASADO EN UN CIRCUITO RLC .....	55

## INTRODUCCIÓN

Para poder entender el funcionamiento de un interruptor de potencia que utiliza como medio dieléctrico el aceite, primero debemos tener en claro lo que significa un arco eléctrico.

Recordemos que la materia está constituida por átomos, y estos a su vez están constituidos por electrones, neutrones y protones. En condiciones normales la carga neta de un átomo se encuentra en perfecto balance, sin embargo, existen fenómenos que pueden dar lugar a un proceso en el cual se desprenden uno o más electrones del átomo, dando lugar a la producción de partículas eléctricamente cargadas.

El arco eléctrico se presenta en un interruptor de potencia cuando se inicia la separación de los contactos de un interruptor y existen portadores de cargas libres en el medio aislante, usualmente electrones.

Básicamente se busca ver las cualidades que tiene el medio dieléctrico, en este caso el aceite, para verificar que tan eficaz ejerce su función como aislante en un interruptor en media tensión.

En el capítulo uno describiremos los problemas y soluciones que existen en el campo eléctrico, la delimitación del trabajo realizado, objetivos generales y específicos, etc.

En el capítulo dos encontramos la parte del marco teórico en donde se profundiza sobre los elementos utilizados en las prácticas donde se detallan características esenciales y necesarias de los mismos, sobre los interruptores de potencia y el aceite como medio dieléctrico.

En el capítulo tres se ubica los materiales y equipos necesarios e influyentes para la realización de las pruebas detallando sus características y datos más importantes, los cuales son necesarios para ir formulando las ecuaciones que necesitamos para el proceso analítico y de simulado.

El capítulo cuatro trata del proceso de análisis matemáticos y la simulación con la herramienta MATLAB, verificando las gráficas tanto en la parte experimental como en lo simulado.

Todo este proceso fue ejecutado en el laboratorio de alta tensión perteneciente a la Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil, haciendo uso de los elementos y dispositivos del laboratorio e incluyendo equipos que se usan en los Sistemas Eléctricos de Potencia, por ejemplo: interruptor de potencia en 13,8kV que usa aceite como medio dieléctrico, transformadores, inductores y capacitores.

Cabe destacar que este proceso fue realizado con voltajes de baja tensión porque se necesitaba medir valores de corrientes, los cuales tenían que ser registrados con un analizador de redes, y por ende dicho analizador no tenía capacidad para soportar voltajes de gran amplitud.



# CAPÍTULO 1

## 1.1 Planteamiento del problema.

Los interruptores de potencia tienen la función de proteger contra cortocircuitos o sobrecargas a los Sistemas Eléctricos de Potencia pero también sirven para dar seguridad a las personas que se encargan de dar mantenimiento preventivo y correctivo a las líneas de transmisión.

Se plantea demostrar mediante análisis, el efecto del aceite donde es considerado como medio dieléctrico en los interruptores de potencia demostrando el comportamiento de los mismos durante el cierre y apertura en los circuitos.

Estas demostraciones de dichos análisis se ejecutarán en el laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Politécnica Salesiana, por lo cual nos ayudaremos con la herramienta matemática conocida como MATLAB para la resolución de ecuaciones que demuestren estas acciones.

En el interior del laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Politécnica Sede Guayaquil se encuentran elementos y equipos que la universidad adquirió para ayudar a los estudiantes a expandir y reforzar sus conocimientos, poniendo en práctica lo aprendido en las aulas. Estos elementos y equipos deben de ser usados teniendo en cuenta las debidas protecciones, además del adecuado mantenimiento de los mismos.

La respectiva ejecución de las prácticas será de gran y vital importancia para verificar los resultados obtenidos teóricamente, seguido por gráficas que demuestren los valores y datos resultantes.

## 1.2 Importancia y Alcances

Este proyecto de trabajo de titulación tendrá como principales beneficiarios a los estudiantes de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana en Guayaquil, lo cual será de gran ayuda al momento de realizar las prácticas en el laboratorio de Alta Tensión ya que se podrá complementar los datos obtenidos de manera práctica con los datos del software MATLAB.

En el ámbito laboral existen varios inconvenientes en la parte de baja, media y alta tensión, mediante las debidas prácticas el estudiante llega a comprender de una manera más real y aproximada lo que en verdad sucede en el exterior, y con justa razón será de más provecho para las personas que ya se encuentran laborando y requieren conocer más del tema y de dichos inconvenientes.

### **1.3 Delimitación.**

La realización de este proyecto se llevó a cabo en los laboratorios de Alta Tensión de la Universidad Politécnica Salesiana usando todas las herramientas y materiales disponibles los cuales nos ayudaron durante el proceso experimental, así la recopilación de datos fue un punto determinante para realizar el análisis matemático. Se procedió a realizar el trabajo usando como elemento necesario un interruptor en aceite aislante que opera a 13,8 kV y que es comúnmente utilizado en los sistemas de potencia.

Cabe destacar que este proceso fue realizado con voltajes de baja tensión porque se necesitaba medir valores de corrientes, los cuales tenían que ser registrados con un analizador de redes, y por ende dicho analizador y otros elementos no tenían capacidad para soportar voltajes de gran amplitud.

### **1.4 Objetivos.**

#### **1.4.1 Objetivo General.**

Realizar el análisis y simulación matemática en el software MATLAB de la disrupción eléctrica del aceite como un medio dieléctrico de interruptores de media tensión para capacitores analizando el comportamiento de dicho interruptor al momento de cierre y apertura del mismo en los circuitos a ejecutar.

#### **1.4.2 Objetivos Específicos.**

- Plantear el circuito a utilizar en los escenarios donde se van a proceder a realizar las aperturas y cierres del interruptor.
- Verificar las características de los interruptores de potencia en aceite utilizados en sistemas de potencia.
- Plantear las ecuaciones que respalden el comportamiento del interruptor de potencia en la ruptura dieléctrica del aceite.
- Obtener el análisis matemático mediante la herramienta MATLAB.
- Comparar los resultados del software vs los resultados de las prácticas experimentales.

## **1.5 Marco Metodológico.**

### **1.5.1 Hipótesis.**

Se debe entender que durante las rupturas, el aceite ayuda a enfriar y extinguir el arco eléctrico donde provee el aislamiento de las partes vivas con respecto a tierra.

También el aceite dieléctrico brinda soluciones de aislamiento entre los contactos después de que arco se haya extinguido.

El interruptor de potencia como sabemos es un componente que permite el paso de corriente, el cual tiene como función la apertura o cierre en un circuito mediante de forma manual o por parte de control, por ejemplo pueden ser comandados por Relés para la protección de las fallas que ocurren en un sistema de potencia.

El proceso práctico se llevó a cabo en el laboratorio de Alta Tensión de la Universidad, en donde cada uno de los elementos fueron manipulados y controlados con la precisión que se requiere para la obtención de datos, lo cual nos facilitó el entendimiento de acontecimientos en los sistemas eléctricos de potencia.

Mediante la herramienta matemática Matlab se realizó la comparación de los datos y gráficas obtenidas en la parte experimental vs la parte teórica.

## CAPÍTULO 2

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Laboratorio de alta tensión.

##### 2.1.1 Normativas y Reglas.

###### **Normas de seguridad para experimentos en Alta Tensión.**

Los experimentos con altas tensiones podrían llegar a ser particularmente peligrosos para los participantes de las prácticas. Para dar una idea de las medidas de seguridad necesarias, se detalla lo siguiente:

###### **Regla fundamental:**

Antes de entrar en un área de configuración de alta tensión, todo el mundo debe convencerse a sí mismos mediante la observación personal que todos los conductores que pueden suponer un alto potencial se encuentran en la zona de contacto que está conectada a tierra, y que todas las conexiones principales están interrumpidas.

###### **Reglas generales:**

- Prohibido fumar.
- Prohibido ingerir alimentos o bebidas dentro del laboratorio.
- No dejar objetos personales en las superficies de trabajo.
- No llevar pulseras, colgantes, mangas anchas ni prendas sueltas que puedan engancharse en montajes o equipos.
- Los que no trabajan deben poner sus manos en los bolsillos.
- Al trabajar en la jaula de Faraday se deben tomar los elementos uno a la vez.
- Debe existir un encargado que será el primero en entrar y el último en salir de la jaula.
- El encargado es responsable de descargar el equipo usando la pértiga.
- Una vez energizado el sistema todos deben conservar la distancia de seguridad.
- No se debe de abrir la puerta de la jaula bajo ninguna circunstancia.
- No olvidar las 5 reglas de oro para el trabajo eléctrico.
  - ❖ Desconectar.
  - ❖ Prevenir cualquier posible realimentación.

- ❖ Verificar la ausencia de tensión.
- ❖ Poner a tierra y en cortocircuito.
- ❖ Proteger frente a elementos de tensión y señalizar la zona.

### 2.1.2 Sala de ensayo.

Para el funcionamiento y operación del módulo “Terco HV 9000” se necesita de una sala especial y esta se construyó de acuerdo con las pautas que se detallan a continuación y con un alto estándar de seguridad que deben ser seguidos. Se recomienda una superficie de 4 x 5 m, con una altura de 2.5 a 3m. Si se van a manejar tensiones superiores a 1000 V deben seguirse medidas de seguridad. La esgrima o barra de descarga y la puesta a tierra son detalles muy importantes de protección [1].



FIGURA 1: SALA DE ENSAYO [1]

### 2.1.3 Seguridad en el equipo.

El área de ensayo o de trabajo está cerrada por una valla metálica de al menos 1.8 m de altura y el ancho de los cuadros de la maya de no superior a los 50 mm. La puerta de entrada a la sala de ensayo como medida de seguridad tienen contactos, estas se bloquean cuando la puerta está cerrada todos estos contactos están en serie con la funcionalidad de operación del módulo [1].



FIGURA 2: SEGURIDAD EN EL EQUIPO [1]

### **2.1.4 Puesta a Tierra.**

La puesta a tierra es un mecanismo de seguridad que forma parte de las instalaciones eléctricas y que consiste en conducir eventuales desvíos de la corriente hacia la tierra, impidiendo que el usuario entre en contacto con la electricidad.

Esto quiere decir que cierto sector de las instalaciones está unido, a través de un conductor, a la tierra para que, en caso de una derivación imprevista de la corriente o de una falla de los aislamientos, las personas no se electrocuten al entrar en contacto con los dispositivos conectados a dicha instalación [1].

Primordialmente son dos los objetivos de la realización de una puesta a tierra en las instalaciones eléctricas:

- Proveer un camino de descarga a tierra de corrientes producidas por efecto de la operación normal o en falla de un sistema eléctrico, sin exceder los límites permisibles por los equipos afectados por la falla.
- Asegurar la integridad física de cualquier persona que pueda encontrarse en las inmediaciones de la estación al momento de producirse una falla, mediante la limitación de las tensiones de contacto y paso. Estos objetivos se logran controlando la interacción del sistema de puesta a tierra, específicamente diseñado para controlar la elevación de potencial en caso de falla, y los circuitos accidentalmente puestos a tierra por defectos propios de la instalación eléctrica.

### **2.1.5 Equipos de Variación y transformación.**

#### **Transformador de pruebas (HV9105).**

El transformador de prueba con acoplamiento de arrollamiento es para la conexión en cascada para producir AC, DC y el impulso tensiones.

El transformador consta de tres arrollamientos con aislante y la carcasa superior y electrodos blindados de aluminio libre de la corona inferior.

El cilindro de aislamiento está hecho de resina epoxi con refuerzo de fibra de vidrio y recubierto de un barniz contra de seguimiento.

El devanado primario de excitación es un devanado doble: 2x220V para la conexión aproximada de 220V (conexión en paralelo) o 220 + 220 para la conexión de 440V (conexión en serie) la conexión en serie requerirá 50% de la corriente de conexión en paralelo. El tercer arrollamiento conocido como "acoplador de bobinado" está previsto para más conexiones en cascada de los transformadores. La bobina al vacío va impregnado y aislado con aceite del transformador de alto grado de calidad [1].



FIGURA 3: TRANSFORMADOR DE PRUEBAS [1]

### Características del transformador.

TABLA 1: DATOS TÉCNICOS DEL TRANSFORMADOR (MÓDULO TERCO HV 9000) [1]

<b>Relación de transformación</b>	2x220V/100kV/220V
<b>Relación de corriente</b>	2x11,4A/50mA/15,2A Continuo
<b>Salida</b>	5kVA, 10kVA para 60 min, salida en AC
<b>Impedancia del voltaje</b>	4% Aproximadamente
<b>Frecuencia</b>	50Hz o 60Hz
<b>Nivel de descarga parcial</b>	a 100 kV $\leq$ 3pC
<b>Dimensiones:</b>	
<b>Altura</b>	770 mm
<b>Diámetro</b>	550 mm
<b>Peso</b>	215 Kg

### Mesa de Control (HV9103).

La mesa de control se utiliza para controlar y operar equipos de alto voltaje AC / DC / Impulso de prueba. El escritorio contiene operativo y la señal de los elementos para el circuito de control del equipo de prueba para la alerta y seguridad. La mesa de control se hace a la casa de los instrumentos de medición (pico, impulso y CC voltímetros) y también el dispositivo de disparo.

El HV 9103 está fabricado de acero y se levanta sobre cuatro ruedas. La imagen de la mesa de control, HV 9103, incluye instrumentos de medida HV 9150, 9151 y HV HV 9152 así como la intervención de los dispositivos HV 9131 [1].



FIGURA 4: MESA DE CONTROL [1]

Características de la mesa de control.

TABLA 2: DATOS TÉCNICOS DE LA MESA DE CONTROL (MÓDULO TERCO HV 9000) [1]

<b>Voltaje de alimentación</b>	220 - 230 V 50/60 Hz Monofásico 25 A
<b>Regulación del transformador</b>	5 kVA impulsado por un motor que es accionado por una tensión nominal continua de 24 VDC.
<b>Regulación de Voltaje</b>	0-220 Vac
<b>Salida</b>	5 kVA Continuo y a 10 kVA (Tiempo corto de servicio de 2 min)
<b>Dimensiones</b>	1220 x 105 x 800mm (alto, ancho, largo).
<b>Peso</b>	275 Kg

### 2.1.6 Equipos de control y medición.

#### **Voltímetro Pico (Pantalla digital) (HV9150).**

Medición de la tensión alterna AC pico para la conexión al condensador de medición, el capacitor de gas comprimido o el condensador de acoplamiento.



FIGURA 5: VOLTÍMETRO PICO [1]



### Características del Voltímetro pico.

TABLA 3: DATOS TÉCNICOS DEL VOLTÍMETRO PICO (MÓDULO TERCO HV 9000) [1]

<b>Voltaje de alimentación</b>	220V 50Hz
<b>Rango de medición</b>	100 - 1000 $\hat{U}$ / $\sqrt{2}$ kV
<b>Dimensiones</b>	142 x 173 x 245 mm (W x H x D)
<b>Peso</b>	3.4 Kg

### Voltímetro DC (Pantalla Digital) (HV9151).

Medición de la tensión de CC para la conexión a la resistencia de medición.



FIGURA 6: VOLTÍMETRO [1]

Características del Voltímetro DC.

TABLA 4: DATOS TÉCNICOS DEL VOLTÍMETRO DC (MÓDULO TERCO HV 9000) [1]

<b>Voltaje de alimentación</b>	220V 50Hz
<b>Rango de medición</b>	100 - 1000 kV
<b>Dimensiones</b>	142 x 173 x 245 mm (W x H x D)
<b>Peso</b>	3,4Kg

### Voltímetro de impulso (Pantalla digital) (HV9152)



FIGURA 7: VOLTÍMETRO DE IMPULSO [1]

## Características del Voltímetro de impulso.

TABLA 5: DATOS TÉCNICOS DEL VOLTÍMETRO DE IMPULSO (MÓDULO TERCO HV 9000) [1]

<b>Voltaje de alimentación</b>	220V 50Hz
<b>Rango de medición</b>	140kV/280kV/400kV
<b>Dimensiones</b>	142 x 173 x 245 mm (W x H x D)
<b>Peso</b>	3,0Kg

## Capacitor de medición. (HV9141)

Divisor capacitivo para la medición de voltajes de corriente alterna.



FIGURA 8: CAPACITOR DE MEDICIÓN

## Características del capacitor de medición.

TABLA 6: DATOS TÉCNICOS DEL CAPACITOR DE MEDICIÓN (MÓDULO TERCO HV 9000) [1]

<b>Voltaje AC</b>	100 kV
<b>Capacitancia</b>	100 pF
<b>Longitud</b>	665 mm
<b>Peso</b>	9 kg

### 2.1.7 Elementos del manual de entrenamiento TERCO.

## Barra de conexión de Aluminio. (HV9108)

Elemento conductivo de conexión.

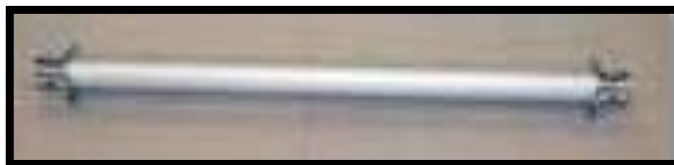


FIGURA 9: BARRA DE CONEXIÓN DE ALUMINIO

Características de la barra de conexión.

TABLA 7: DATOS TÉCNICOS DE LA BARRA DE CONEXIÓN (MÓDULO TERCO HV 9000) [1]

<b>Longitud</b>	665 mm
<b>Peso</b>	1Kg

### **Copa de conexión de Aluminio. (HV9109)**

Elemento conductor: Cuatro elementos se pueden insertar en la posición horizontal y dos en posición vertical.



FIGURA 10: COPA DE CONEXIÓN DE ALUMINIO

Características de la copa de conexión.

TABLA 8: DATOS TÉCNICOS DE COPA DE CONEXIÓN (MÓDULO TERCO HV 9000) [1]

<b>Dimensiones</b>	ø 150 x h 85 mm
<b>Peso</b>	2.2 Kg

### **Pedestal de Piso. (HV9110)**

Elemento conductor: Para el montaje de hasta cuatro barras de espacio horizontal y apoyar un componente vertical.



FIGURA 11: PEDESTAL DE PISO

## Características del pedestal de piso.

TABLA 9: DATOS TÉCNICOS DE PEDESTAL DE PISO (MÓDULO TERCO HV 9000) [1]

<b>Dimensiones</b>	200 x 200 x 80 mm
<b>Peso</b>	2 Kg

## Tubo espaciador. (HV9119)

Conexión mecánica y eléctrica en la planta baja cuando se inserta en pedestal de piso.



FIGURA 12: TUBO ESPACIADOR

## Características del tubo espaciador.

TABLA 10: DATOS TÉCNICOS DEL TUBO ESPACIADOR (MÓDULO TERCO HV 9000) [1]

<b>Longitud</b>	665 mm
<b>Peso</b>	1 Kg

## Interruptor de puesta a tierra. (HV9114)

Para la puesta a tierra de seguridad automática de los elementos de alta tensión.



FIGURA 13: INTERRUPTOR DE PUESTA A TIERRA

## Características del interruptor de puesta a tierra.

TABLA 11: DATOS TÉCNICOS DEL INTERRUPTOR DE PUESTA A TIERRA (MÓDULO TERCO HV 9000) [1]

<b>Voltaje de impulso</b>	140 kV
<b>Voltaje DC</b>	140 kV
<b>Voltaje de servicio</b>	24 V, 50/60 Hz
<b>Dimensiones</b>	230 x 115 x 160 mm
<b>Peso</b>	8Kg

## 2.2 Aparatos de corte de alta tensión.

Se designa con el nombre general de aparata eléctrica el conjunto de aparatos de maniobra, de regulación, de seguridad o de control y los accesorios de canalización utilizados en las instalaciones eléctricas [11].

La aparata eléctrica de alta tensión cubre el conjunto de aparatos alimentados en corriente alterna por tensiones superiores a los 1000 V.

Aunque con esta denominación se abarcan las resistencias y reóstatos, equipos de arranque, aparatos de medida y de protección, bobinas de reactancia, etc., cabe destacar que solo pondremos énfasis en lo que corresponde a los aparatos de conexión y desconexión, destinados a asegurar la continuidad o discontinuidad de los circuitos eléctricos de alta tensión. Estos aparatos se denominan en general, aparatos de corte [2].

### Clasificación de los aparatos de corte según su función.

- **Seccionadores:** Aparatos utilizados para abrir o cerrar un circuito cuando no está recorrido por una corriente, y previstos especialmente para aislar, de una red bajo tensión, una máquina, un aparato, un conjunto de aparatos o una sección de una línea, de manera que sea posible el tocarlos sin peligro, para los fines de conservación o de reparación.
- **Interruptores:** Aparatos destinados a interrumpir y a conectar circuitos en condiciones normales de carga.
- **Interruptores seccionadores:** Interruptores que en posición de apertura, responden además a las condiciones impuestas a los seccionadores.

- **Disyuntores:** Dispositivos destinados a interrumpir o establecer circuitos en condiciones normales de carga, así como en las condiciones anormales que se presentan en el caso de cortocircuitos. Pueden ser maniobrados a voluntad (a mano, o a distancia) o automáticamente mediante relés [2].

### **Características generales de la aparamenta.**

Las condiciones de funcionamiento de los aparatos están definidos por un cierto número de valores característicos.

Se llaman valores característicos de un aparato con relación a una cualidad determinada, los valores de las magnitudes que definen al aparato con relación a esta cualidad. La calidad de un aparato puede definirse por varias magnitudes. Por ejemplo la calidad de aparatos, con relación a la corriente que puede soportar indefinidamente sin calentamiento perjudicial [2].

### **Características nominales de los aparatos.**

Sería muy complicado el dar, para cada aparato los valores característicos en función de todos los demás; en general, es suficiente, no dar más que los valores característicos correspondientes a los empleos más corrientes. A estos valores característicos particulares se les denomina características nominales del aparato, porque son los que sirven para denominarlos, y están inscritas en las placas de características [2].

### **Las principales características de los aparatos son:**

- Las tensiones nominales de sus circuitos principales y eventualmente de sus circuitos auxiliares.
- Los servicios nominales de corriente y las corrientes nominales correspondientes de sus circuitos principales.
- Su poder o potencia de ruptura nominales.
- Su poder o capacidad de conexión nominales.
- Las sobreintensidades admisibles nominales que pueden soportar sus circuitos principales.

## **2.3 Características de los disyuntores.**

### **Generalidades sobre los arcos eléctricos.**

El estudio del fenómeno de interrupción de la corriente, constituye una interesante rama de la Electrotecnia. En este documento se limita a una breve consideración de las nociones esenciales ligadas al fenómeno de la interrupción de la corriente eléctrica, ya que la ruptura de los circuitos eléctricos se obtiene casi siempre por medio de un arco eléctrico [12].

Durante la ruptura de un aparato de corte por el que circula una corriente se comprueba la producción de una chispa o un arco entre las piezas en contacto.

Si la potencia cortada es pequeña se obtiene una chispa, es decir un destello o resplandor azulado extremadamente brillante que no daña a las piezas en contacto. Si la potencia alcanza cierta importancia se produce un arco, es decir una llama de un color netamente diferente del de la chispa; además, después de la ruptura, se observa que los contactos están desgastados en las zonas en que se originó el arco.

Según el Vocabulario Electrotécnico Internacional, se define el arco como el fenómeno de la descarga de un gas, caracterizado por una concentración de la columna positiva y una mancha catódica de gran efecto emisor fotoeléctrico y termiónico; además, la característica tensión-corriente es decreciente, es decir que la resistencia eléctrica del arco es negativa [2].

Se manifiesta como una columna gaseosa incandescente y está constituido por un flujo, de sección dada, compuesto de electrones e iones que provocan una temperatura muy elevada (del orden de los 5000°C). Dicho flujo constituye el núcleo del arco, y está rodeado por una envoltura cuya naturaleza, a causa de la elevada temperatura puede ser muy diferente a la del medio inicial en el cual se desarrolló el arco.

Para asegurar el movimiento de los electrones hace falta un campo eléctrico, Este campo eléctrico está constituido por dos partes, una de ellas localizada en la vecindad inmediata de los electrodos, y otra parte sensiblemente proporcional a la longitud del arco [13].

Por lo tanto, en un dominio muy limitado y para arcos estables se puede expresar la caída de tensión  $U$  en un arco de longitud  $l$ , o tensión de arco, por la fórmula:

$$U = \alpha + \beta l$$

Ecuación 1: Caída de tensión para arcos estables

$\alpha$  = Caídas de tensión anódico y catódica.

$\beta$  = Caída de tensión por unidad de longitud de la columna de arco.

Los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  para contactos de una naturaleza determinada, para condiciones de medio y de presión idénticas y para temperaturas dadas, son independientes de la corriente en el arco, es decir que un arco no puede considerarse como una resistencia, sino más bien como un conductor cuya sección se ajusta automáticamente a la corriente que debe atravesarlo, de tal manera que una diferencia de potencial fija basta para asegurar el paso de cualquier corriente [14].

La potencia desarrollada en un arco es igual, en cada instante al producto de la corriente en el arco por la tensión de arco; por lo cual no debe ser confundido con la potencia del circuito que se corta, que está expresada por el producto de la corriente por la tensión que se restablece en los bornes del circuito después de la ruptura [2].

La energía absorbida por el arco durante la ruptura vale:

$$W = \int_0^T U I dt$$

Ecuación 2: Energía absorbida por el arco durante la ruptura

U = tensión de arco

I = corriente

T = tiempo de duración del arco

Esta energía se disipa por convección, por radiación y por conducción caloríficas, así como también por descomposición del medio ambiente, tal es el caso de los interruptores en baño de aceite.

De la cantidad de calor que se produce en el arco la ruptura dependen los esfuerzos a principales, a que quedan sometidas muchos aparatos de ruptura. Si la energía desarrollada por el arco no es eliminada, la temperatura del medio ambiente aumentará y si se trata de un medio de capacidad fija crecerá igualmente la presión en él, lo que puede producir fenómenos de descomposición del medio ambiente, con formación de gases, que pueden llegar a provocar la explosión de la cámara de ruptura [2].

### **Extinción de los arcos en corriente alterna.**

Existen dos procedimientos para obtener la extinción de los arcos en corriente alterna. El primero consiste en aumentar la tensión de los bornes del arco, hasta que este sea suficiente para equilibrar las fuerzas electromotrices del circuito: para ello, se puede alargar el arco o bien aumentar los valores de  $\alpha$  y de  $\beta$ . Este primer procedimiento solamente en los disyuntores con soplado magnético.

Para comprender mejor el segundo procedimiento de extinción de un arco de corriente alterna, recordemos que esta corriente pasa por un valor nulo en cada semiperiodo. Si el disyuntor fuera capaz de separar sus contactos en el momento preciso del paso de la corriente por este valor nulo y hacerlo con la velocidad suficiente para que, a causa de la separación entre dichos contactos, la tensión de restablecimiento no pudiera encobar nuevamente el arco, el circuito quedaría interrumpido, sin calentamiento en los contactos de ruptura. En las condiciones actuales tal hipótesis no es posible alcanzarla. El tiempo admisible de ruptura para redes de 50 Hz debería ser del orden de la diezmilésima de segundo y los disyuntores usuales no cortan la corriente si no después de algunos semiperiodos, es decir en un tiempo de varias centésimas de segundo. Lo que se hace es soplar el arco, alargándolo, hasta que la longitud de éste es tan grande que la tensión de restablecimiento resulta insuficiente para alimentarlo [15].

Por lo tanto, y excepto en el caso de las corrientes muy débiles o tensiones reducidísimas, la ruptura tiene lugar siempre a través de un arco.

### **Condiciones de extinción de arco.**

Cuando la corriente se ha anulado, los electrones deben cesar de circular, ya que el arco está compuesto de electrones libres en movimiento. Pero estos electrones



permanecen todavía un cierto tiempo como electrones libres, es decir que el medio permanece conductor durante el tiempo correspondiente. Del mismo modo, en corriente alterna cuando la corriente disminuye, hay un cierto retardo entre la sección del flujo de los electrones en movimiento y la sección del medio todavía ionizado.

Resulta de esto que las características dinámicas del arco, es decir cuando la corriente varía, no son las mismas que sus características estáticas y que los efectos de inercia señalados mantienen una cierta conductibilidad del medio del arco después de la supresión de la corriente. Esta noción de retardo a la desionización del medio del arco tiene una gran importancia en la teoría de la extinción de los arcos en corriente alterna [2].

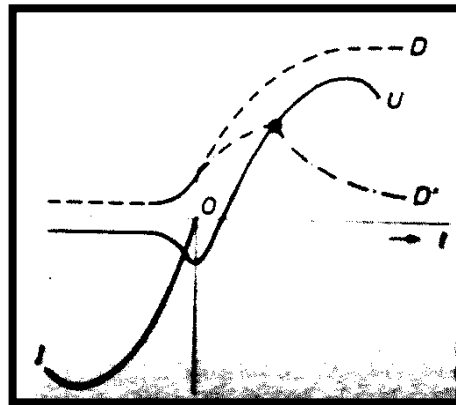


FIGURA 14: EVOLUCIÓN DE LA RIGIDEZ DIELECTRICA DEL MEDIO EN QUE SE PRODUCE EL ARCO, DURANTE UNA MANIOBRA DE RUPTURA. [2]

Por lo tanto, después del paso por cero de la corriente, el trayecto del arco tarda un cierto tiempo para pasar del estado conductor, en el cual está mantenido por el paso de la corriente, al estado aislante. La U de la (figura 14) representa la tensión aplicada entre los contactos antes del paso de la corriente I por cero, es igual a la tensión de arco y toma luego un valor fijado por la fuerza electromotriz del circuito según una ley variable que depende de las características del circuito [16].

La curva D representa la rigidez dieléctrica del medio del arco en función del tiempo. En tanto subsista el arco no es otra que la inversa de la tensión del arco; depende luego del estado de ionización del medio que separa los contactos y puede alcanzar, en el límite, un valor correspondiente a la tensión de cebado entre los contactos después de una desionización completa.

Si en cada instante, la rigidez dieléctrica D del medio atravesado por el arco es superior a la tensión de restablecimiento U, la ruptura es definitiva. Si, por el contrario, la rigidez dieléctrica restablece siguiendo la curva D' y corta la curva en X, hay reencendido del arco; será necesario esperar al nuevo paso de la corriente por cero para realizar una nueva tentativa de ruptura.

Por lo tanto, de manera general, podemos decir que el problema del corte de los arcos consiste en disponer los medios propios para asegurar la desionización del trayecto del arco, a una velocidad y a un nivel que permita hacer frente, en cada instante, a la tensión de restablecimiento propia del circuito [2].

### Fenómenos eléctricos de acoplamiento.

La apertura o el cierre de un aparato de corte en un sistema eléctrico de transporte o de distribución esta siempre acompañado por una modificación del estado eléctrico del

sistema. Sin embargo esta modificación de estado no es instantánea, si no que comprende una fase transitoria durante la que se producen, en los circuitos afectados por la maniobra de acoplamiento, una serie de fenómenos transitorios, cuyo conjunto provoca el paso de un estado a otro. Los fenómenos que se desarrollan en esta fase intermedia tienen una gran importancia para la técnica de los aparatos de corte y se designan, de una manera general, como fenómenos eléctricos de acoplamiento.

En la tabla expresada a continuación se muestran los principales casos de acoplamiento. Estos casos se han agrupado por una parte, según el desfase entre la corriente y la tensión y, por otra parte, según el orden de magnitud de la corriente que debe conectarse o desconectarse [17].

En el dominio de las corrientes de carga el caso 1 (figura 15) se refiere a la desconexión de una carga inductiva. Se trata de corrientes comprendidas entre algunos amperios y algunos centenares de amperios; por ejemplo, corrientes magnetizantes de transformadores en vacío o cargados por reactivas [2].

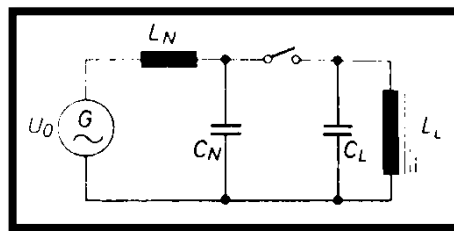


FIGURA 15: CASO 1. CARGAS INDUCTIVAS [2]

El caso 2 (figura 16) concierne al corte de un circuito de carga simultáneamente óhmico e inductivo. Este caso es el caso más frecuente entre las maniobras de acoplamiento en las redes de alimentación de energía eléctrica. La corriente, puede alcanzar cualquier valor hasta la corriente nominal del aparato de corte. También se trata del más sencillo de todos los casos, ya que no plantea exigencias, particulares al aparato de corte y no existe el riesgo de que se produzcan sobre tensiones peligrosas [2].

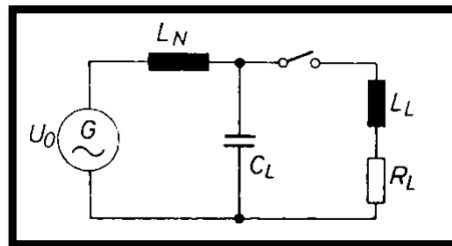


FIGURA 16: CASO 2. CARGAS OHMICAS E INDUCTIVAS [2]

El caso 3 (figura 17) es el de corte de un circuito capacitivo. La carga capacitiva  $C_L$  es, por ejemplo la de una línea o la de un cable en vacío, la de una batería de condensadores, etc...

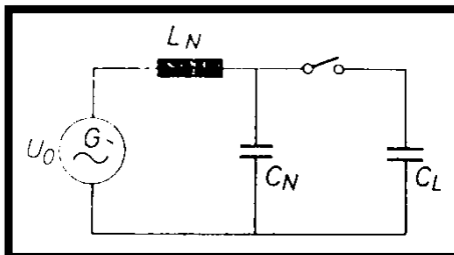


FIGURA 17: CASO 3. CARGAS CAPACITIVAS [2]

Los demás casos, tal como se expresa en la tabla, se refieren las corrientes de cortocircuitos que, en los sistemas eléctricos, son siempre inductivas. El caso 4 (figura 18) es el cortocircuito clásico encontrándose el punto de defecto en las proximidades del aparato de corte.

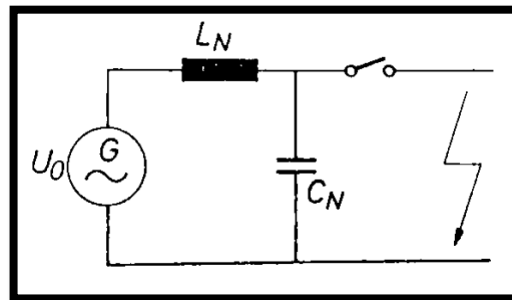


FIGURA 18: CASO 4. CORTOCIRCUITO EN LAS PROXIMIDADES DEL DISYUNTOR [2]

Por el contrario, en el caso 5 (figura 19) se trata del defecto kilométrico, es decir de un cortocircuito que se produce a algunos centenares de metros o algunos kilómetros del aparato de corte;  $L_L$  es la reactancia y  $C_L$  es la capacidad transversal de la longitud de línea desconectada. Además, este caso es análogo a la desconexión por el aparato de corte del primario de un transformador por causa de un defecto producido por un cortocircuito en el secundario de este mismo transformador [18].

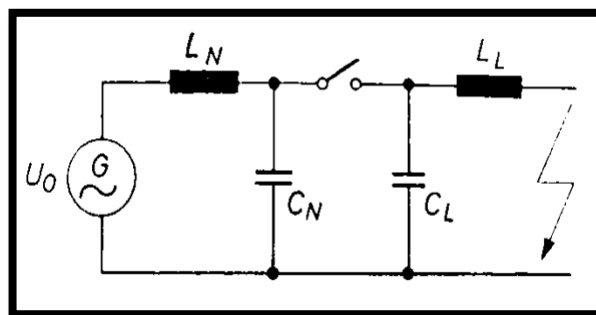


FIGURA 19: CASO 5. CORTOCIRCUITO EN LA LÍNEA DE TRANSPORTE O EN EL SECUNDARIO DEL TRANSFORMADOR. [2]

El caso 6 (figura 20) se refiere a la oposición de fases, como puede ocurrir, por ejemplo, en un falso acoplamiento en paralelo o en el acoplamiento de dos redes que no están en fase. En estos casos resultan conexiones y desconexiones en cortocircuito, con una tensión superior a la de servicio.

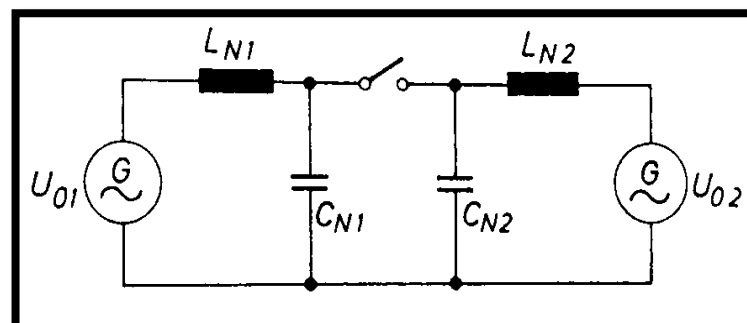


FIGURA 20: CASO 6. OPOSICIÓN DE FASES [2]

TABLA 12: DATOS TÉCNICOS DEL INTERRUPTOR DE PUESTA A TIERRA (ESTACIONES) [2]

	<b>Corriente inductiva <math>\cos \varphi &lt; + 0,3</math></b>	<b>Corriente inductiva y óhmica <math>+1,0 &lt; \cos \varphi &lt; + 0,3</math></b>	<b>Corriente capacitiva <math>\cos \varphi &lt; -</math> <b>0,3</b></b>
<b>Conexión y desconexión de corrientes de carga</b>	1.- Cargas inductivas. Transformadores en vacío Bobinas de reactancia	2.- Cargas óhmicas e inductivas	3.- Cargas capacitivas. Líneas y cables en vacío. Baterías de condensadores.
<b>Conexión y desconexión de corrientes de cortocircuito</b>	4.- Cortocircuito en las proximidades del disyuntor. 5.- Cortocircuito en la línea de transporte o en el secundario del transformador. 6.- Oposición de fases. 7.- Defectos a Tierra. 8.- Defecto evolutivo.		

### **Corte de corrientes de carga inductivas.**

El corte de corrientes de carga inductiva (caso 1) puede conducir a sobretensiones de acoplamiento, sobre todo en el dominio de las corrientes débiles (menos de 100 A). Estas sobretensiones (figura 21), están provocadas por el corte de la corriente de valor  $i_a$ , antes de su paso natural por cero. La energía magnética presente en la reactancia  $L_L$  en el momento de corte, no puede cederse a la red de alimentación. Entonces fluye la capacidad  $C_L$  paralela a la inductancia  $L_L$  y provoca una sobretensión  $U_{Lmax}$  bajo la forma de una oscilación armónica amortiguada [19].

Además, la sobretensión provocada por la carga, produce una elevación de tensión  $u_s$  en los bornes del disyuntor. Según la variación de tensión y el tipo de construcción del disyuntor, puede resultar reencendidos en la distancia de corte. En este caso, una parte de la energía de la reactancia se debilita por estos reencendidos sucesivos, de forma que se reduce el mayor valor de cresta de la tensión, obteniéndose un diagrama en dientes de sierra. Sobre todo este fenómeno puede observarse en los disyuntores con un solo punto de corte, para tensiones nominales de 72 a 170 kV. Con los modernos tipos de disyuntores de ruptura múltiple, el restablecimiento de la rigidez dieléctrica

de la distancia de corte es casi siempre tan rápida, que no se produce ningún reencendido. La figura 21 muestra un corte de la corriente magnetizante de un transformador por medio de un disyuntor moderno de pequeño volumen de aceite, con dispositivo de inserción de resistencias. En el instante  $t_{x1}$ , la corriente se corta al valor  $i_a$ . La sobretensión  $U_{Lmax}$  que aparece en el transformador es netamente visible sobre el oscilograma. Aunque la corriente haya sido cortada cerca de su valor de cresta, no se produce reencebamiento en el disyuntor, y el factor de sobretensión  $K_L$  solamente alcanza el valor de 1,6 [2].

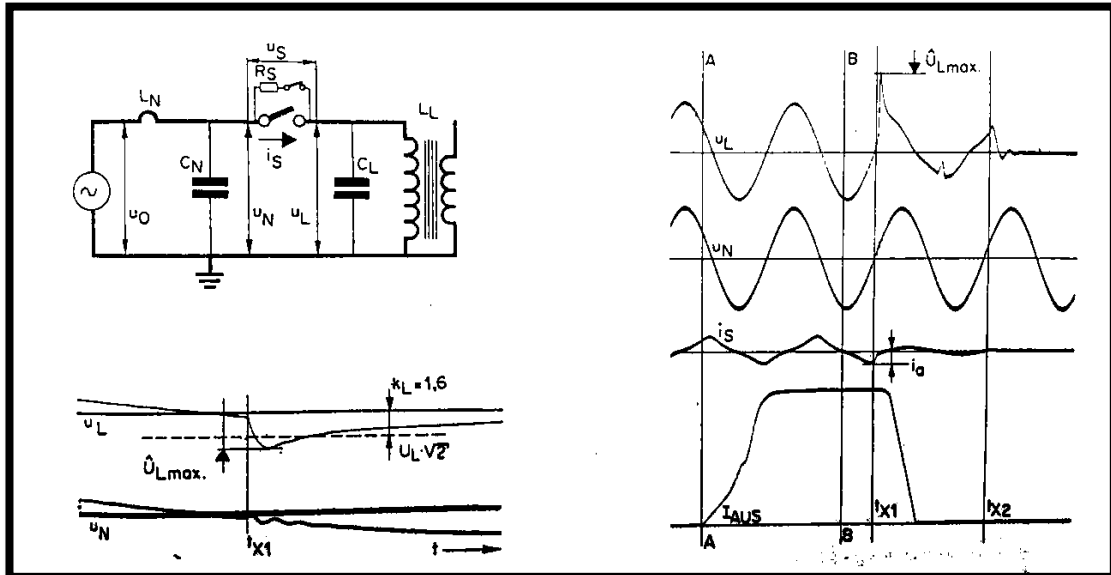


FIGURA 21: CORTE DE LA CORRIENTE MAGNETIZANTE DE UN TRANSFORMADOR EN VACÍO, POR UN MODERNO DISYUNTOR DE PEQUEÑO VOLUMEN DE ACEITE CON DISPOSITIVOS DE INSERCIÓN DE RESISTENCIAS: A-ORDEN DE CORTE, B-SEPARACIÓN DE LOS CONTACTOS. [2]

### Corte de corrientes de carga capacitivas.

También pueden producirse sobretensiones en caso de corte de corrientes de carga, capacitivas (caso 3). Los fenómenos eléctricos de este acoplamiento están representados en la figura 22. El corte de la corriente de carga  $i_s$  se produce en su paso natural por cero, es decir, en el instante  $t_o$ . De esta forma, se separan eléctricamente la red de alimentación y la carga capacitiva. Del lado de la red, la tensión  $u_n$  continúa variando a la frecuencia de servicio y, si la carga capacitiva provoca una elevación de tensión, vuelve a tomar el valor inicial de la tensión lado red, después de algunas oscilaciones [20].

Como la carga no puede fluir a la red de alimentación, la tensión  $u_L$  del lado de la carga, permanece constante en  $C_L$ , aparte la conducción por la resistencia de aislamiento o de cargas en paralelo de elevada impedancia, tal como transformadores de tensión y transformadores de potencia en vacío. En los bornes 1-2 del disyuntor, la diferencia entre la tensión lado red y la tensión lado carga bajo la forma de una curva senoidal decaída asimétricamente y elevándose tangencialmente a partir de cero. El valor más elevado, que es el doble del valor de cresta de la tensión de carga, se alcanza en un semiperiodo. Mientras que el crecimiento lento de la tensión favorece una

extinción del arco en el disyuntor sobre muy cortas distancias el valor máximo de la tensión que se alcanza puede provocar una fuerte sollicitación dieléctrica de la distancia de corte.

Por lo tanto, como se representa en la figura 22, en los instantes  $t_{x1}$  y  $t_{x2}$  pueden producirse reencebamientos en la distancia de corte, sobre todo en los disyuntores con un solo punto de corte para tensiones de servicio de más de 100 kV. Estos reencebamientos provocan por medio de oscilaciones, una transferencia de la carga capacitiva  $C_L$  a la inductancia  $L_N$  lado red [2].

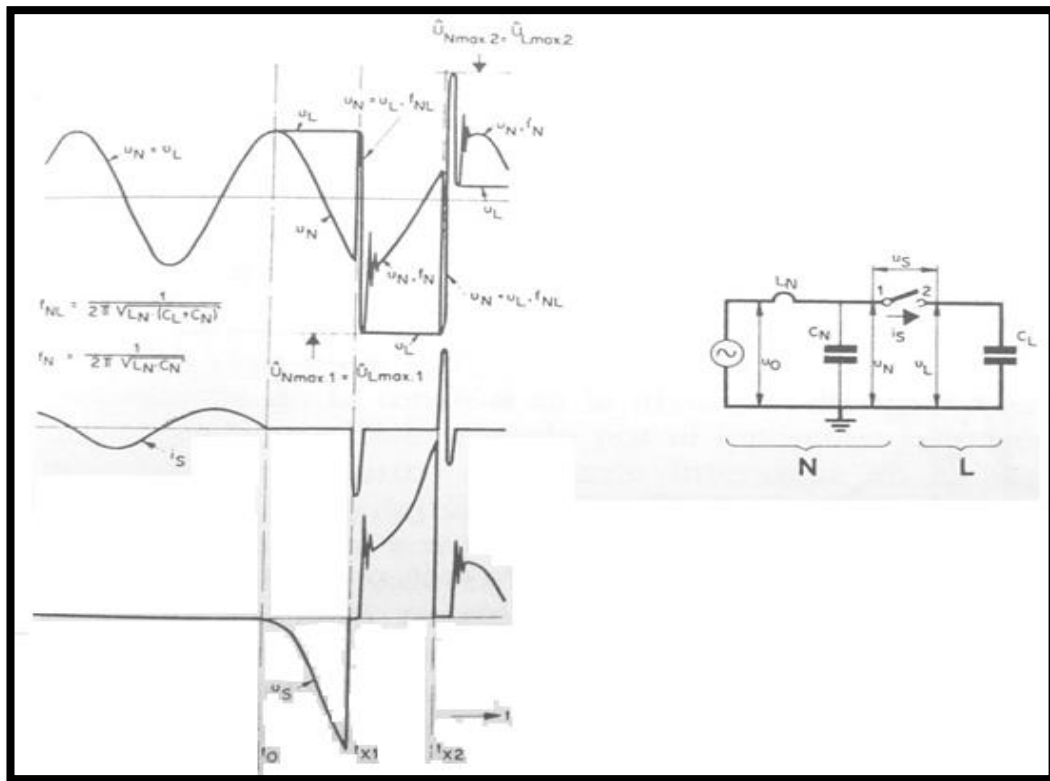


FIGURA 22: CORTE DE UNA CORRIENTE DE CARGA CAPACITIVA, ADMITIENDO QUE SE PRODUCEN REENCEBAMIENTO EN EL DISYUNTOR DURANTE EL CURSO DEL PROCESO DE RUPTURA. [2]

## 2.4 Disyuntores en baño de aceite.

### Extinción del arco de corriente alterna en el seno del aceite.

La inmersión de los contactos de ruptura de un disyuntor en el aceite o en otro líquido, no evita la formación del arco durante la separación de los contactos pero, en cambio, se consigue que la energía absorbida para la vaporización y descomposición del aceite, pueda utilizarse para enfriar energícamente la columna del arco y los propios contactos.

Para una misma separación entre los contactos, la tensión necesaria para que se reestablezca el arco es mucho mayor en el aceite que en el aire. Por lo tanto, la tensión de extinción y, sobre todo, la tensión de reencendido al formarse el arco en el seno del aceite son varias veces superiores a las tensiones correspondientes en el aire y, como consecuencia, los disyuntores en baño de aceite resultan particularmente adecuados para la interrupción de circuitos de corriente alterna de alta tensión. Durante muchos años éste ha sido el único tipo de disyuntor empleado para este servicio, a base de una, dos o más rupturas por polo.

El campo eléctrico originado por la tensión de restablecimiento, impulsa los iones positivos hacia el contacto que actúa como cátodo, mientras que los electrones y los iones negativos, rechazados por el cátodo, se dirigen al ánodo. Los choques producidos por el movimiento de estas partículas producen nuevos iones, con lo que se aumenta la ionización de la columna que rodea el arco; a esta ionización contribuye también la emisión termoiónica de los contactos que, frecuentemente, llegan a la temperatura de incandescencia por causa de la energía del arco en el momento de la ruptura [2].

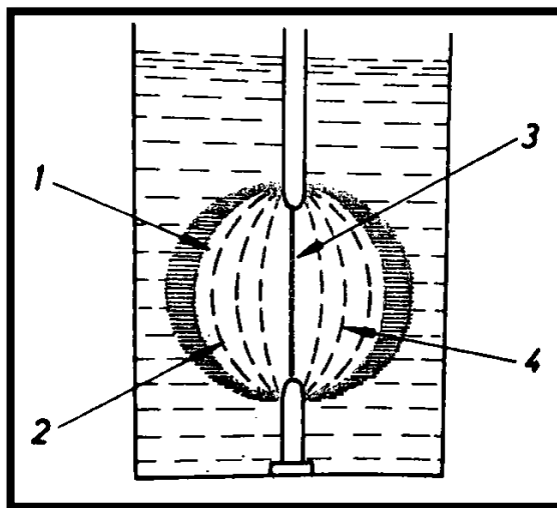


FIGURA 23: REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL PROCESO DE RUPTURA EN UN DISYUNTOR EN BAÑO DE ACEITE: 1.- ZONA DE VAPORIZACIÓN, 2.- VAPOR SATURADO, 3.- HIDRÓGENO, 4.- VAPORES RECALENTADOS. [2]

El proceso de desionización del arco es debido, sobre todo, a la presencia del hidrógeno, cuya acción desionizante es unas 7.5 veces superior a la del aire. Este proceso depende también de la intensidad de la corriente que se ha de cortar.

La figura 24 muestra el proceso de ruptura del arco en el seno del aceite, cuando la corriente retrasa casi  $90^\circ$  respecto de la tensión, es decir, en las circunstancias más desfavorables, pues en el instante en que el arco se extingue por pasar la corriente por cero, la tensión que reaparece entre los contactos, tiene un valor máximo.

Sea  $I$  la curva característica de la corriente que atraviesa el interruptor y supongamos que la separación de los contactos se produce en el instante  $t_o$ ; entre estos contactos se cebará un arco y, entre los bornes del disyuntor, tendremos una tensión  $U_a$ , valor que se mantiene sensiblemente constante durante la alternancia de la corriente. Al final de la alternancia, cuando la corriente se anula, la tensión del arco aumenta. Durante la alternancia, la introducción de la pequeña caída de tensión  $U_a$  en el arco, no aumenta sensiblemente que continuará siendo senoidal, si ya lo era anteriormente. Cuando la corriente pasa por el valor cero, se extingue el arco, pero, como se ha indicado anteriormente, subsiste entre los contactos la columna de gases fuertemente ionizados. En este momento se produce una rápida desionización y enfriamiento del canal del arco, fenómenos motivados principalmente por dos causas:

1. La descomposición de los vapores de aceite que penetran en el canal del arco, y la vaporización del aceite que rodea la bolsa de gases, cuyos valores de descomposición e interno de vaporización son sustraídos al canal del arco.
2. Elevado valor de la conductividad térmica del hidrógeno.

En el momento en que la corriente se anula, la tensión entre los contactos del disyuntor que era muy reducida (caída de tensión en el arco  $U_a$ ), debe pasar al valor de la tensión de la red la cual alcanza su valor máximo, ya que hemos supuesto la circunstancia más desfavorable, o sea, un circuito fuertemente inductivo. Si la velocidad de regeneración  $U_p$  es mayor que la velocidad de aumento de la tensión de restablecimiento  $V_e$ , no se perforará la barrera aislante y el arco volverá a cebarse. Pero si la tensión de restablecimiento aumenta con mayor velocidad que la rigidez dieléctrica del medio o, lo que es lo mismo, que la tensión de reencendido, se cebará nuevamente un arco que saltará entre los contactos del disyuntor hasta el nuevo paso de la corriente por el valor cero, repitiéndose el mismo fenómeno hasta que la separación entre contactos sea suficiente para que la tensión de reencendido permanezca superior a la tensión de restablecimiento. Esta separación o longitud crítica de ruptura depende, en cada disyuntor, de la tensión del circuito, de la intensidad de la corriente y, esencialmente, de las velocidades de aumento de las tensiones de restablecimiento y de reencendido. Cuando se extingue definitivamente el arco, a causa de la capacidad  $C$  existente entre los bornes del disyuntor no toma inmediatamente el valor de la tensión existente en ese instante, sino que tiende progresivamente a este valor, hasta rebasarlo, pasa por un máximo y, después de unas cuantas oscilaciones amortiguadas, a la frecuencia propia de la red, alcanza definitivamente el valor correspondiente a la tensión de la red [2].



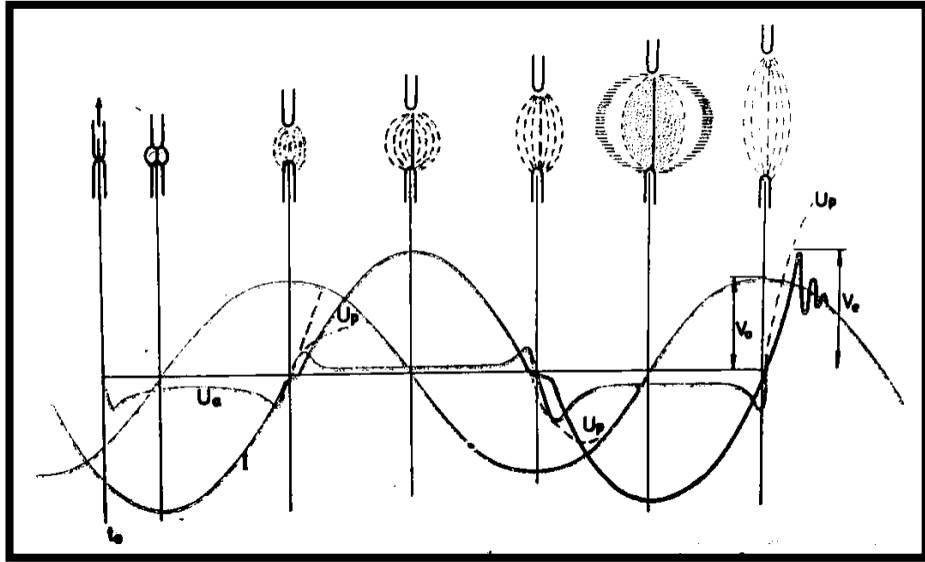


FIGURA 24: REPRESENTACIÓN MUY SIMPLIFICADA DE UN DISYUNTOR EN BAÑO DE ACEITE. [2]

## 2.5 MODELO DE MAYR.

En 1943, Otto Mayr presenta su famoso modelo para simular el arco eléctrico. Muchas mejoras de ese modelo se han ejecutado, aparte se puede encontrar una gran cantidad de documentos que usan este modelo para simular el arco eléctrico como falla de arco. El propósito del modelo de Mayr es caracterizar el comportamiento de la resistencia de arco independientemente de la forma del arco y del entorno (electrodos o material de contacto, temperatura, presión, etc...)

La ecuación de arco de **Mayr proporciona un resultado cualitativo suficiente pero es difícil encajar con datos experimentales reales** [3].

Podemos encontrar artículos centrados exclusivamente en este problema en particular porque el modelo de Mayr adolece de aproximaciones que introducen diferencias entre los resultados de la simulación y los resultados experimentales [3].

Tratar de encontrar un físico y modelo confiable de un arco al considerar solo la corriente y el voltaje es casi imposible, debido a la cantidad de omisión variables (presión, temperatura, longitud del arco, geometrías del electrodo, desgaste y oxidación de contactos, moléculas de gas, viento, orientación del arco, campo eléctrico, campo magnético ...) [3].

Los modelos de arco se desarrollan originalmente para mejorar la comprensión del proceso de interrupción actual en alta tensión en los interruptores de potencia y para poder diseñar las cámaras de interrupción [4].

El arco se comporta como una resistencia no lineal. Por lo tanto, ambos voltajes de arco y la corriente de arco cruzan el valor cero al mismo tiempo. Si el arco se enfría lo suficiente, en el momento en que la corriente pasa a cero, el interruptor puede interrumpir la corriente porque la entrada de energía eléctrica en el canal del arco es cero [4].

Durante la interrupción actual, la resistencia aumenta de prácticamente cero a casi infinito en microsegundos. Inmediatamente después de la corriente de interrupción, el voltaje transitorio de recuperación se acumula en los contactos del disyuntor. Como la mezcla de gas caliente en la cámara de interrupción no cambia a un completo estado de aislamiento instantáneo, la resistencia del arco es finita y todavía puede fluir una corriente muy pequeña, la cual conocida como corriente de post arco [4].

El modelo de Mayr, considerado como uno de los modelos básicos del arco eléctrico, plantea que la transferencia de calor al medio se realiza en toda la periferia del arco, de sección transversal constante, por conducción y que la conductividad varía exponencialmente con la energía almacenada [5].

El modelo de Mayr es un intento para definir la resistencia de arco, usando el voltaje de arco y corriente solamente. También describe la resistencia de arco como una variante de tiempo introduciendo la constante de tiempo de arco [3].

La conductancia,  $g_{arc} = \frac{1}{R_{arc}}$  acordando con Mayr está dado por:

$$\frac{d \ln g}{dt} = \frac{u(2)}{\tau} \left( \frac{gu^2}{P} - 1 \right)$$

Ecuación 3: Planteamiento de la Ecuación del modelo de Mayr

$$i = gu$$

Se reemplaza  $u(2)$  con la unidad, dependiendo el estado abierto del interruptor o al momento de la apertura cuando realiza el arco, entonces acomodando nuestra ecuación tenemos que:

$$\frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\tau} \left( \frac{gu^2}{P} - 1 \right)$$

Ecuación 4: Ecuación definida del modelo de Mayr

g: Conductancia de arco.

u: Voltaje de arco.

i: Corriente de arco.

$\tau$ : Constante de tiempo de arco.

P: Potencia de enfriamiento disipada por el arco.

Cuando los contactos están cerrados, la ecuación diferencial está dado por:

$$\frac{d \ln g}{dt} = 0$$

Ecuación 5: Modelo de Mayr en estado estable (interruptor cerrado)

## 2.6 CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN TRANSFORMADOR.

El análisis de un transformado real puede realizarse mediante un circuito equivalente que modela los diversos efectos inmersos en esta máquina.

Puede modelarse la corriente de magnetización  $i_m$  con una reactancia  $X_m$  puesto que la corriente atrasa al voltaje 90 grados. La corriente de pérdida  $i_{h+e}$  debida a los efectos de histéresis y corrientes parásitas puede modelarse con una resistencia  $R_c$  debido a que ella se encuentra en fase con el voltaje aplicado [6].

Con esto se simulan las pérdidas existentes en el núcleo del transformador, las que dependen del tipo de material ferromagnético con las que fueron construidas las chapas del mismo.

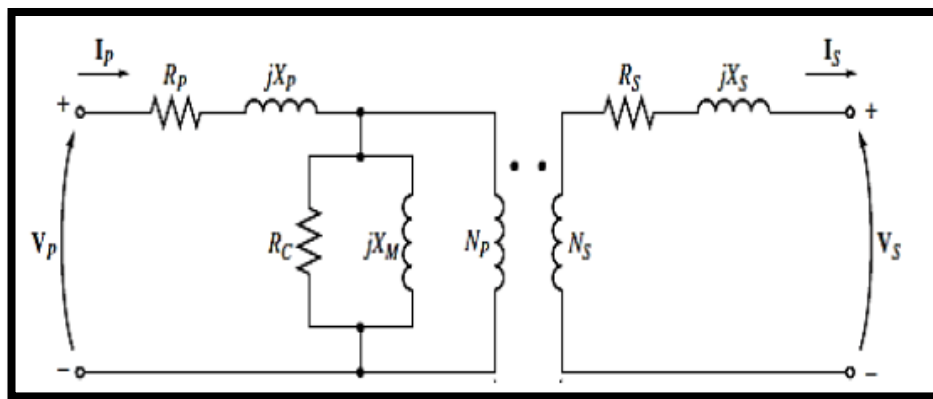


FIGURA 25: MODELO DE UN TRANSFORMADOR REAL [6]

El modelo de un transformador real visto anteriormente se ha modificado para poder simplificar sus cálculos, esto no causa severos problemas, se ha movido el ramal de excitación hacia la entrada del circuito, debido a que ocasiona una corriente pequeña comparada con la corriente de carga, y una caída de tensión despreciable en  $R_p$  y  $X_p$ . se han dejado las impedancias de los devanados primarios y secundarios en serie, tal como se muestra a continuación [6]:

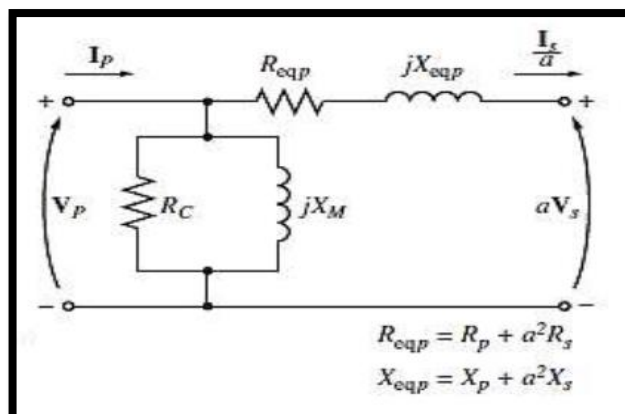


FIGURA 26: MODELO APROXIMADO DE UN TRANSFORMADOR REFERIDO AL PRIMARIO [6]

## 2.7 APROXIMACIÓN DE LA CURVA DE SATURACIÓN POR EL MÉTODO DE ARCOTANGENTE.

La saturación es una característica que presentan los materiales ferromagnéticos, el cual es usado como núcleo en los transformadores. Como se muestra en la figura, una curva de saturación presenta una gráfica de densidad de campo magnético B frente a intensidad de campo H, pero la metodología busca una relación entre V – B y entre I – H. La curva de saturación está compuesta por tres etapas: La región lineal (por debajo de 1.5T), punto de inflexión o rodilla (desde 1.5T a 1.8T) y región de saturación (por encima de 1.8T) [7] [8].

Mediante este método es posible modelar la corriente magnetizante que produce la inductancia presente en el núcleo del transformador, la misma que no es de forma senoidal debido a la no linealidad del material ferromagnético y del efecto de histéresis.

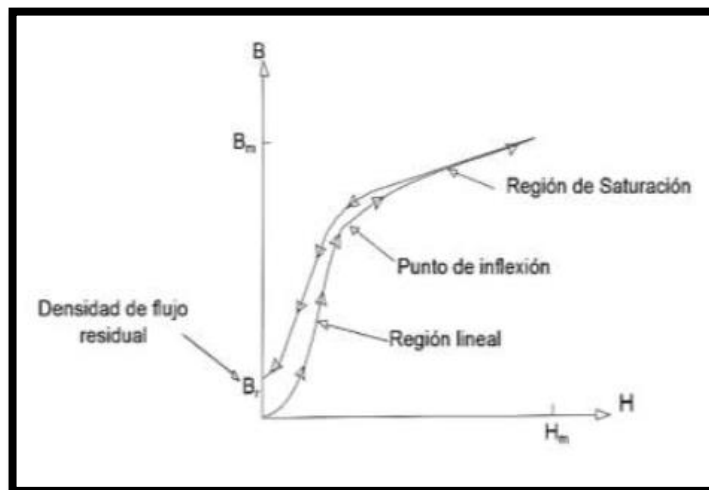


FIGURA 27: SECCIONES DE LA CURVA DE MAGNETIZACIÓN [8]

El método de arcotangente fue propuesto por Carlos Pérez Rojas, es de fácil uso, se necesitan pocos parámetros para obtener la curva. Como se muestra en la imagen se grafica  $\lambda - i$  donde se puede aproximar la característica de saturación o magnetización de un material usando la función arcotangente [8].

$$\lambda_m(im) = \lambda_n \tan^{-1}(m im) + \Delta \lambda im$$

Ecuación 6: Método del Arcotangente

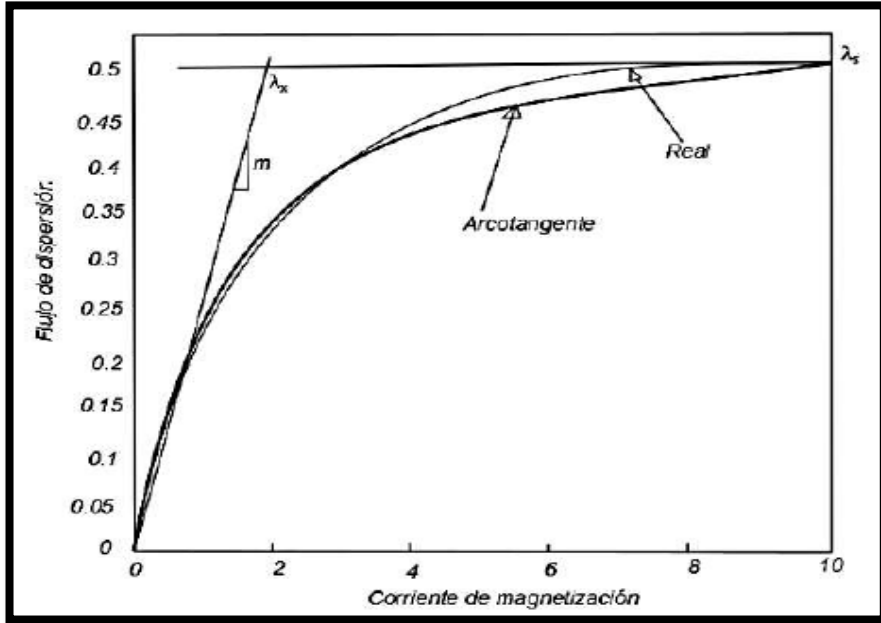


FIGURA 28: CARACTERÍSTICA DE SATURACIÓN REAL Y APROXIMADA POR ARCOTANGENTE [8]

## CAPITULO 3

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 PRUEBAS EXPERIMENTALES.

Se realizaron las respectivas pruebas experimentales en el laboratorio de Alta Tensión perteneciente a la Universidad Politécnica Salesiana, empleando un interruptor de potencia en media tensión, un transformador monofásico de 50VA 7960V/240V, Analizador de redes, Bobina, Capacitor, Variador de voltaje.

Se detalla todos los equipos y materiales utilizados en este proceso, cabe resaltar que el Interruptor de potencia es el más importante debido a que los análisis están referidos en mayor parte a este equipo.

#### **Megger.**

El equipo que se usó para hacerle las pruebas al Interruptor fue el FLUKE 1550B MEGOHMMETER.

El megóhmetro Fluke 1550 MegOhmMeter, es un comprobador de aislamiento de alta tensión que prueba para la comprobación de circuitos en general, incluidos conmutadores, motores y cables.

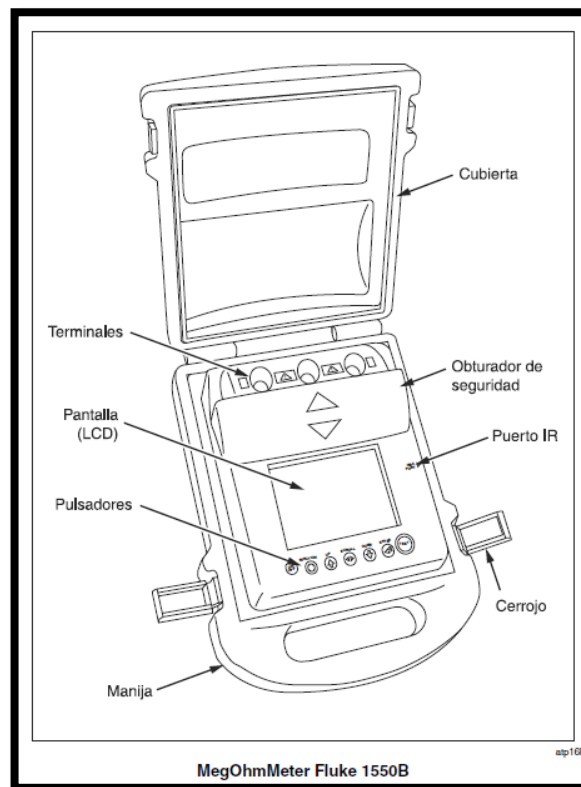


FIGURA 29: ESTRUCTURA DEL FLUKE 1550B MEGOHMMETER



FIGURA 30: FLUKE 1550B MEGOHMMETER

### Interruptor de media tensión.

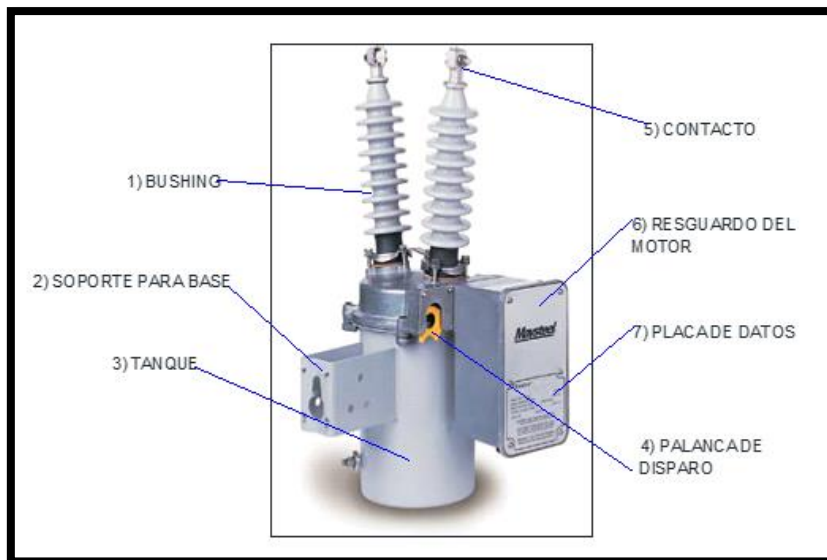


FIGURA 31: ESTRUCTURA DEL INTERRUPTOR DE MEDIA TENSIÓN

### Características del Interruptor.

TABLA 13: CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL INTERRUPTOR DE MEDIA TENSIÓN [9]

ESPECIFICACIONES	
Tensión máxima nominal, kV RMS	15
Clase de voltaje nominal, kV RMS	14.4
Voltaje de resistencia al impulso, kV BIL	95/125
Corriente de conmutación capacitiva, A	200
Tensión de funcionamiento nominal, VAC 50/60 Hz	240
Rango de tensión de funcionamiento, VAC 50/60 Hz	210-250
Peso con aceite, libras	37
Volumen de aceite, galones	1.5

### 3.1.1 Pruebas al Interruptor de 13,8 kV con el Megger FLUKE 1550B:

Las pruebas fueron realizadas con un tiempo límite de 1 minuto.

#### ❖ Contacto - Contacto:



FIGURA 32: PRUEBAS AL SWITCH DE 13,8 KV CON EL MEGGER FLUKE 1550B (CONTACTO-CONTACTO)

Se procedió a poner los puntales del Megger entre los contactos para las respectivas pruebas, los datos obtenidos se muestran en las Fig 33-38:

#### ✓ Resistencia de aislamiento. (51,0 GΩ)



FIGURA 33: DATO DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO DEL INTERRUPTOR DE MEDIA TENSIÓN (CONTACTO-CONTACTO)



✓ Prueba de voltaje nominal. (5000 V)

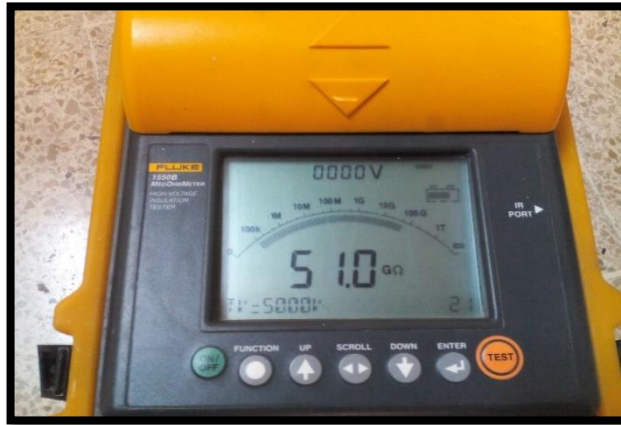


FIGURA 34: DATO DE VOLTAJE DE PRUEBA NOMINAL DEL INTERRUPTOR DE MEDIA TENSIÓN (CONTACTO-CONTACTO)

✓ Voltaje inyectado. (5119 V)

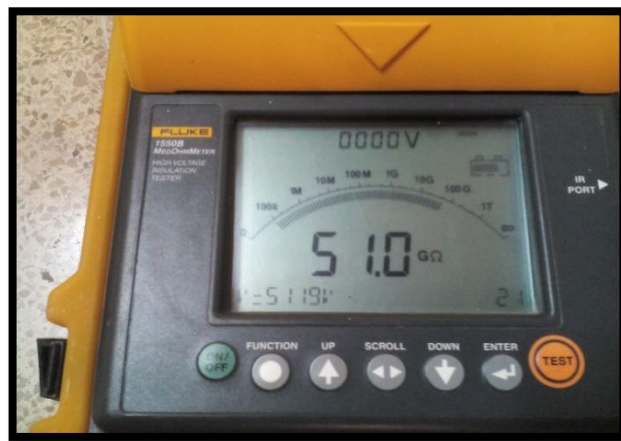


FIGURA 35: DATO DE VOLTAJE INYECTADO AL INTERRUPTOR DE MEDIA TENSIÓN (CONTACTO-CONTACTO)

✓ Capacitancia. (00,00 uF)

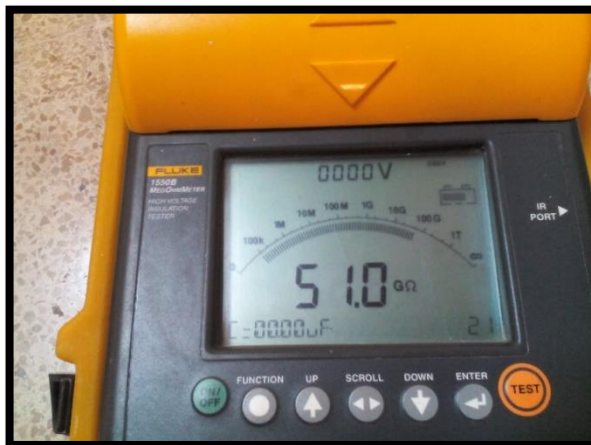


FIGURA 36: DATO DE CAPACITANCIA DEL INTERRUPTOR DE MEDIA TENSIÓN (CONTACTO-CONTACTO)

- ✓ Índice de absorción dieléctrica (DAR). (1,10)



FIGURA 37: DATO DE INDICE DE ABSORCIÓN DIELECTRICA DEL INTERRUPTOR DE MEDIA TENSION (CONTACTO-CONTACTO)

- ✓ Corriente de fuga (100nA).

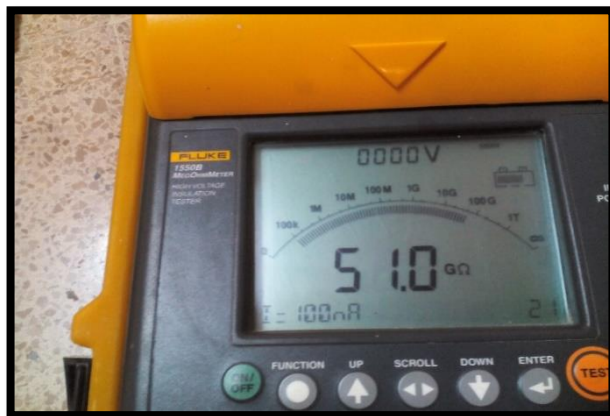


FIGURA 38: DATO DE CORRIENTE DE FUGA DEL INTERRUPTOR DE MEDIA TENSION (CONTACTO-CONTACTO)

❖ **Contacto – Tanque (Switch abierto):**



FIGURA 39: PRUEBAS AL SWITCH DE 13,8 KV CON EL MEGGER FLUKE 1550B (CONTACTO-TANQUE / SWITCH ABIERTO)

Se procedió a poner los puntales del Megger entre uno de los contactos y el tanque del switch para las respectivas pruebas, los datos obtenidos se muestran en las Fig 40-44.

✓ Resistencia de aislamiento. (5,76 MΩ)



FIGURA 40: DATO DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO DEL INTERRUPTOR DE MEDIA TENSIÓN (CONTACTO-TANQUE / SWITCH ABIERTO)

✓ Prueba de voltaje nominal. (5000 V)



FIGURA 41: DATO DE VOLTAJE DE PRUEBA NOMINAL DEL INTERRUPTOR DE MEDIA TENSIÓN (CONTACTO- TANQUE / SWITCH ABIERTO)

✓ Voltaje inyectado. (1 V)



FIGURA 42: DATO DE VOLTAJE INYECTADO AL INTERRUPTOR DE MEDIA TENSIÓN (CONTACTO- TANQUE / SWITCH ABIERTO)

✓ Capacitancia. (03,34 uF)



FIGURA 43: DATO DE CAPACITANCIA DEL INTERRUPTOR DE MEDIA TENSIÓN (CONTACTO- TANQUE / SWITCH ABIERTO)

✓ Corriente de fuga. (174nA)

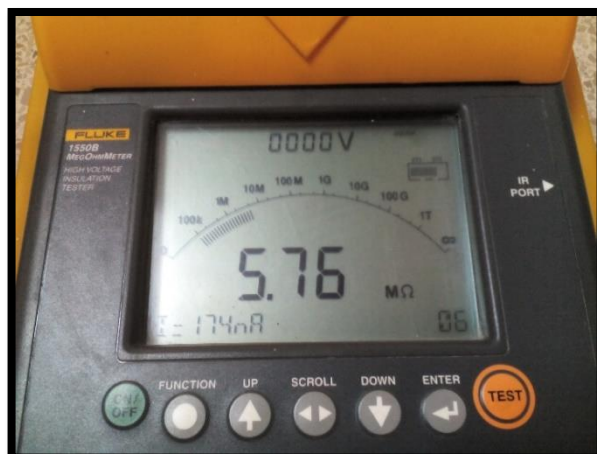


FIGURA 44: DATO DE CORRIENTE DE FUGA DEL INTERRUPTOR DE MEDIA TENSIÓN (CONTACTO- TANQUE / SWITCH ABIERTO)

❖ **Contacto – Tanque (Switch cerrado):**

Se procedió a poner los puntales del Megger entre uno de los contactos y el tanque del switch para las respectivas pruebas, los datos obtenidos se muestran en las Fig 45-51.



FIGURA 45: PRUEBAS AL SWITCH DE 13,8 KV CON EL MEGGER FLUKE 1550B (CONTACTO-TANQUE / SWITCH CERRADO)

✓ Resistencia de aislamiento. (9,69 GΩ)



FIGURA 46: DATO DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO DEL INTERRUPTOR DE MEDIA TENSIÓN (CONTACTO-TANQUE / SWITCH CERRADO)

✓ Prueba de voltaje nominal. (5000 V)

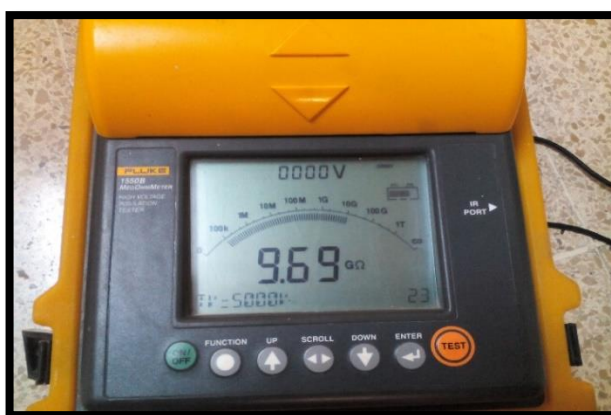


FIGURA 47: DATO DE VOLTAJE DE PRUEBA NOMINAL DEL INTERRUPTOR DE MEDIA TENSIÓN (CONTACTO- TANQUE / SWITCH CERRADO)

✓ Voltaje inyectado. (5119 V)



FIGURA 48: DATO DE VOLTAJE INYECTADO AL INTERRUPTOR DE MEDIA TENSIÓN (CONTACTO- TANQUE / SWITCH CERRADO)

✓ Capacitancia. (00,00 uF)



FIGURA 49: DATO DE CAPACITANCIA DEL INTERRUPTOR DE MEDIA TENSIÓN (CONTACTO- TANQUE / SWITCH CERRADO)

✓ Índice de absorción dieléctrica (DAR) (1.16)

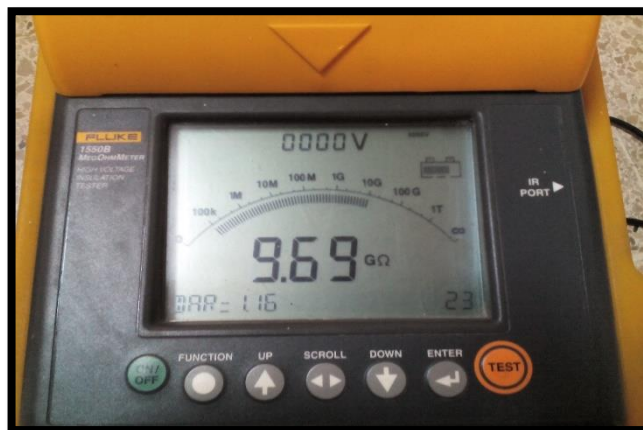


FIGURA 50: DATO DE ÍNDICE DE ABSORCIÓN DEL INTERRUPTOR DE MEDIA TENSIÓN (CONTACTO- TANQUE / SWITCH CERRADO)

✓ Corriente de fuga. (528nA)

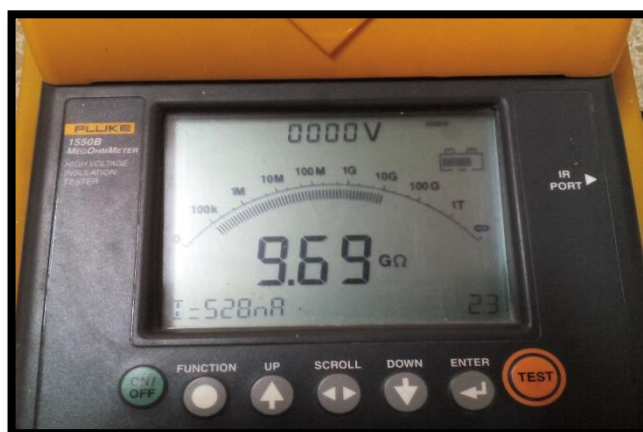


FIGURA 51: DATO DE CORRIENTE DE FUGA DEL INTERRUPTOR DE MEDIA TENSIÓN (CONTACTO- TANQUE / SWITCH ABIERTO)

## Resultados de las pruebas con el Megger.

TABLA 14: RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS CON EL MEGGER AL INTERRUPTOR DE MEDIA TENSIÓN

PRUEBAS	Resultados		
	Contacto-Contacto	Contacto - Tanque (Switch Abierto)	Contacto - Tanque (Switch Cerrado)
Resistencia Aislamiento	51.0 Gohm	5.76 Mohm	9.69 Gohm
Voltaje Nominal	5000 v	5000 v	5000 v
Voltaje Inyectado	5119 v	1 v	5119 v
Capacitancia	0 uF	3.34uF	0 uF
Índice de absorción dieléctrica (DAR)	1.1	0	1.16
Corriente de fuga	100 nA	174 nA	528 nA

## 3.2 EQUIPOS UTILIZADOS EN PRUEBAS

### Analizador de Redes.

El analizador ofrece un conjunto potente y completo de medidas para comprobar sistemas de distribución eléctrica. Algunos proporcionan una impresión general del rendimiento del sistema de alimentación eléctrica. Otros se utilizan para investigar detalles específicos.

El equipo de medida que se usó para realizar todas pruebas es el Fluke 435 SERIES II POWER QUALITY AND ENERGY ANALYZER. El Fluke 435-II cuenta con características adicionales tales como parpadeo, transitorios, onda de potencia, transmisión de señales, evento de onda, evento de rms y precisión de la entrada de tensión del 0,1%.

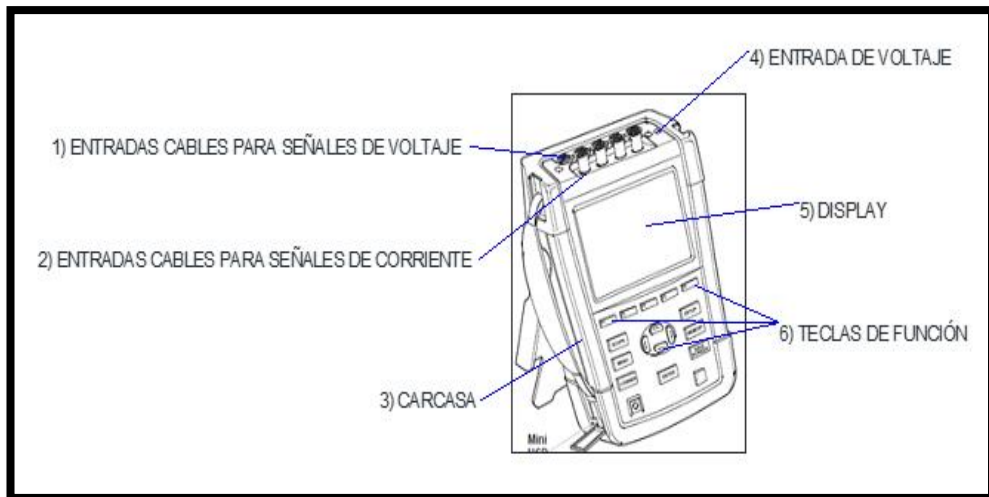


FIGURA 52: ESTRUCTURA DEL ANALIZADOR DE REDES FLUKE 435 SERIES II

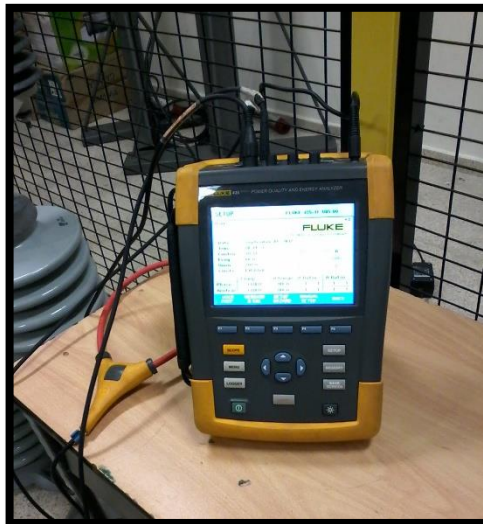


FIGURA 53: FLUKE 435 SERIES II POWER QUALITY AND ENERGY ANALYZER

Características de los modos de medición del analizador de Redes.

TABLA 15: CARACTERÍSTICAS DE MEDICIÓN DEL ANALIZADOR DE REDES

<b>MODOS DE MEDIDA</b>	
Osciloscopio	4 formas de onda de tensión, 4 formas de onda de corriente, Vrms, Vfund. Arms, A fund, tensión en el cursor, amperios en el cursor, ángulos de fase.
Volt./Amp./Hz.	Vrms fase a fase, Vrms fase a neutro, pico de tensión, factor de cresta de tensión, Arms, pico de amperios, factor de cresta de amperios, Hz
Fluctuaciones	Vrms <sup>1/2</sup> , Arms <sup>1/2</sup> , Pinst con niveles de umbral programables para detección de eventos
Armónicos CC, 1 ... 50	Voltios de armónicos, THD, amperios de armónicos, amperios de factor K, vatios de armónicos, vatios de THD, vatios de factor K, voltios de interarmónicos, amperios de interarmónicos, Vrms, Arms
Potencia y energía	Vrms, Arms, Wfull, Wfund., VAfull, VAfund., VA armónicos, VA desequilibrio, var, PF, DPF, CosQ, factor de eficiencia, kWh directos, kWh inversos



### **Transformador.**

El transformador con que se realizaron las pruebas fue de 50 kVA 7960V/240V, el cual se encuentra ubicado en el laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil. La práctica en la que este equipo fue de suma importancia fue la que se muestran las corrientes a vacío, en donde se aprecian corrientes con valores elevados en el lado de baja, ya que estamos hablando del rango de los 200A por las características de dicho transformador pero solo estos valores fueron registrados gracias al analizador de Redes en donde se ven los valores picos mediante las gráficas.



FIGURA 54: TRANSFORMADOR 50KVA – 7960V/240V

### **Bobina.**

La bobina que se usó en las prácticas posee los valores de potencia de 3kVA, un voltaje de 220 V y la corriente de 10A. Este equipo se usó en las prácticas de los circuitos RL Y RLC, ya que como es de conocimiento esta bobina posee parte resistiva e inductiva, cuyos valores se muestran a continuación.

✓  $R = 10.1 \text{ ohm}$  (valor medido con el multímetro).

Para calcular el valor del inductor realizamos lo siguiente:

$$Z = \frac{V}{A} = \frac{220}{10} = 22 \Omega$$

Conociendo el valor de impedancia y resistencia entonces despejamos la Reactancia Inductiva de la ecuación de la impedancia inductiva.

$$Z = \sqrt{R^2 + XL^2}$$

Ecuación 7: Impedancia inductiva

$$XL = \sqrt{Z^2 - R^2}$$

Ecuación 8: Reactancia inductiva a partir de la impedancia

Resolviendo:

$$XL = \sqrt{(22)^2 - (10.1)^2}$$

$$XL = 19.544\Omega$$

Con el valor de la reactancia inductiva, XL, mediante la ecuación general de dicha reactancia obtenemos el valor del inductor despejándolo.

$$XL = \omega L$$

Ecuación 9: Reactancia inductiva

$$L = \frac{XL}{\omega} = \frac{19.544}{(2\pi 60)} = 51.84 \text{ mH}$$



FIGURA 55: BOBINA 3KVA – 220V – 10A

- El capacitor que se utilizó en la práctica de un circuito RLC posee un voltaje nominal de 7960 V, el cual es usado en los sistemas de media tensión, y registra una capacitancia de 8.66uF según los datos de placa.



FIGURA 56: CAPACITOR 8.66uF

### 3.3 SIMULACIÓN.

MATLAB es un programa de gran aceptación en ingeniería destinado a realizar cálculos técnicos científicos y de propósito general. En él se integran operaciones de cálculo, visualización y programación, donde la interacción con el usuario emplea una notación matemática clásica [10].

MATLAB posee variedad de aplicaciones por ejemplo: el cálculo matemáticos de matrices, manipulación y figuración de gran cantidad de datos y varias funciones, también cuenta con desarrollo de algoritmos, realiza interfaces gráficas de usuario (GUI), posee un entorno de programación visual (Simulink) y sin descartar la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivo hardware.

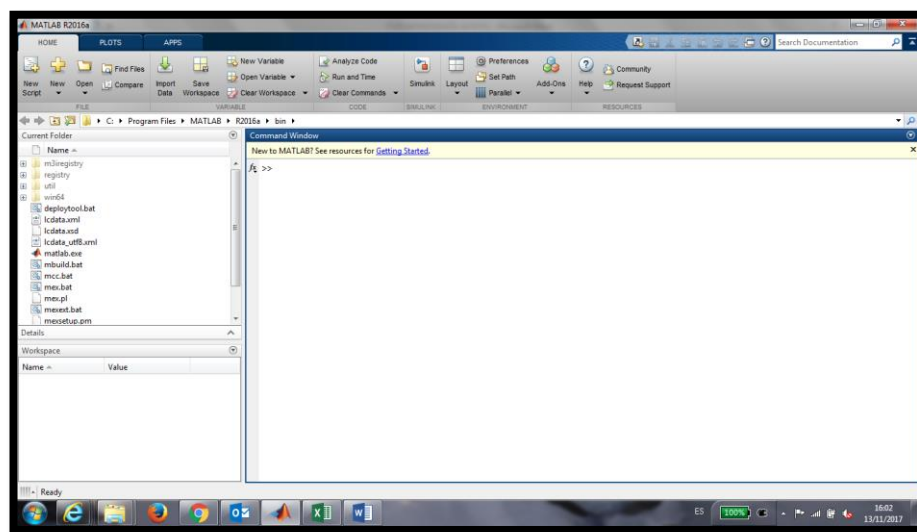


FIGURA 57: VENTANA DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN MATLAB

#### 3.3.1 SIMULINK.

Es un entorno de programación visual, que funciona sobre el entorno de programación Matlab. Es una herramienta de simulación de modelos o sistemas, con cierto grado de abstracción de los fenómenos físicos involucrados en los mismos. Se hace hincapié en el análisis de sucesos, a través de la realización de sistemas. Se puede crear, modelar y hacer el mantenimiento de un diagrama de bloques del sistema que se desee, utilizando un amplio conjunto de bloques predefinidos [10].

Simulink cuenta con herramientas para el modelaje jerárquico, la gestión de datos y la personalización de subsistemas, por lo que resulta fácil crear representaciones concisas y precisas independientemente de la complejidad del sistema con el que se trabaja.

El software incluye una amplia biblioteca de funciones que se usan habitualmente en el modelaje de un sistema. Estas incluyen:

- Bloques dinámicos continuos y discretos, como el de integración y el de retardo de la unidad.
- Bloques de algoritmos, como el de sema, producto, división, etc.

- Pueden personalizarse los bloques integrados o crear nuevos bloques directamente en Simulink e introducirlos en las bibliotecas propias.
- Definición y control de señales y parámetros.

Simulink permite definir y controlar los atributos de las señales y parámetros asociados con el modelo. Las señales son cantidades que varían según el tiempo, representadas por los bloques de conexión de líneas. Los parámetros son coeficientes que ayudan a definir la dinámica y el comportamiento del sistema. Después de crear el modelo con dicho software, se puede simular su comportamiento y comparar los resultados con lo experimental.

También pueden diseñarse pantallas personalizadas con las herramientas de visualización y desarrollo de GUI de Matlab.

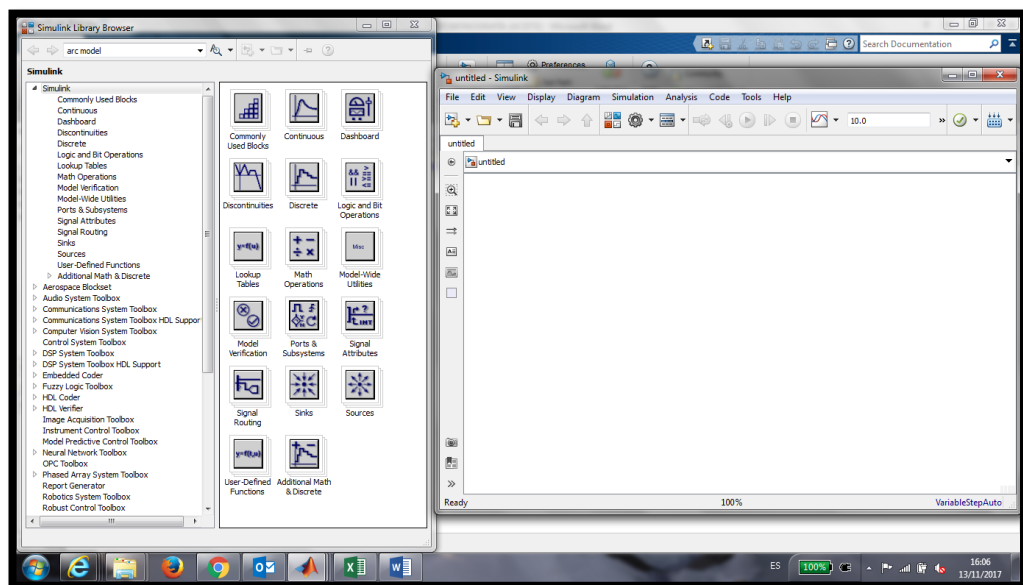


FIGURA 58: AMBIENTE VIRTUAL SIMULINK

### 3.3.2 GUI

GUI (Graphical User Interface), es un entorno de trabajo para la programación visual que proporciona Matlab para elaborar y ejecutar programas que necesiten ingreso continuo de datos. Es una herramienta de trabajo que se extiende en el soporte de Matlab, planificada para crear interfaces gráficas para el fácil y rápido uso del operador, dando respaldo al diseño y presentación de los elementos de control de la interfaz, disminuyendo el esfuerzo al nivel de seleccionar, y personalizar propiedades.

En el diseño de una GUI es muy importante el editor de propiedades (property editor). Sus componentes se encuentran disponibles en cualquier momento que se esté trabajando con los controles de Matlab. El editor de propiedades se puede concebir como una herramienta de trazado y asistente de codificación (revisión de nombres y

valores de propiedades). Cuando se fusionan el panel de control, el editor de menú y la herramienta de alineación, da como resultado el control de los gráficos en Matlab.

El concepto básico de la operación del software con una GUI es cuando se relaciona con un elemento de control. El programa registra el valor de esa acción elegida y realiza los comandos prescritos en el código. Los menús de interfaz con el usuario, los botones, los menús desplegables, los controladores deslizantes y el texto editable, son elementos que controlan las operaciones del software. Al realizarse la ejecución de las instrucciones, el control vuelve al GUI para que puedan realizarse la acción requerida por el usuario. El ciclo se repite hasta el momento que se cierra la GUI [10].

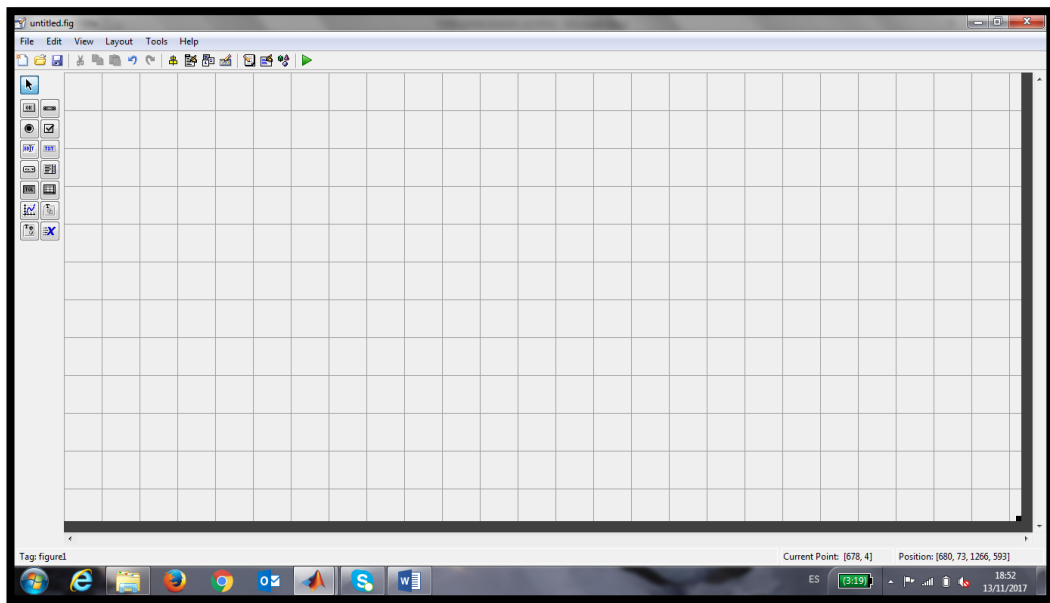


FIGURA 59: VENTANA DE INTERFAZ GRÁFICA

## CAPITULO 4

### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 4.1 PRUEBAS EN CIRCUITO RL CON INTERRUPTOR DE POTENCIA.

Analizando este tipo de circuito RL (resistivo-inductivo) y el comportamiento del interruptor de potencia, se considera que el interruptor va a estar representado por la ecuación 4, la cual corresponde al modelo de arco de Mayr. En esta ecuación tendremos que la corriente en el interruptor estará definida por:  $i = gu$

Realizando el circuito equivalente en el programa Sim Power System (Matlab) tenemos lo siguiente:

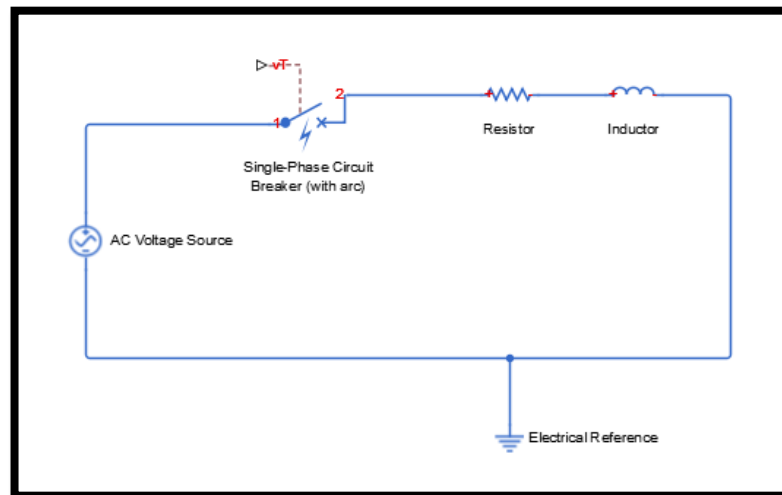


FIGURA 60: CIRCUITO RL CON INTERRUPTOR DE POTENCIA

Las ecuaciones que definen algunos de nuestros componentes:

- Voltaje en el resistor, que corresponde a la ley de ohm:

$$V_R = IR$$

Ecuación 10: Voltaje en el resistor

- Voltaje en el inductor:

$$V_L = L \frac{di}{dt}$$

Ecuación 11: Voltaje en el inductor

Resolviendo este circuito es necesario que el interruptor de potencia debe estar previamente cerrado para que pueda existir el flujo de corriente, es decir, se trabajó con interruptor en modo de estable. Aplicando la ley de Kirchoff se tiene lo siguiente:

$$-VF + VR + VL = 0$$

Ecuación 12: Ley de voltaje de Kirchoff en circuito RL

$$VF = VR + VL$$

$$VF = Ri + L \frac{di}{dt}$$

Ecuación 13: Ley de voltaje de Kirchoff en circuito RL en modo estable

Se reemplaza la corriente en el interruptor en la corriente que pasa por el circuito, porque que como se observa es un circuito serie y por ende son las mismas.

$$VF = Rgu + L \frac{dgu}{dt}$$

Ecuación 14: Sumatoria de voltajes en circuito RL en función de la corriente del interruptor de potencia

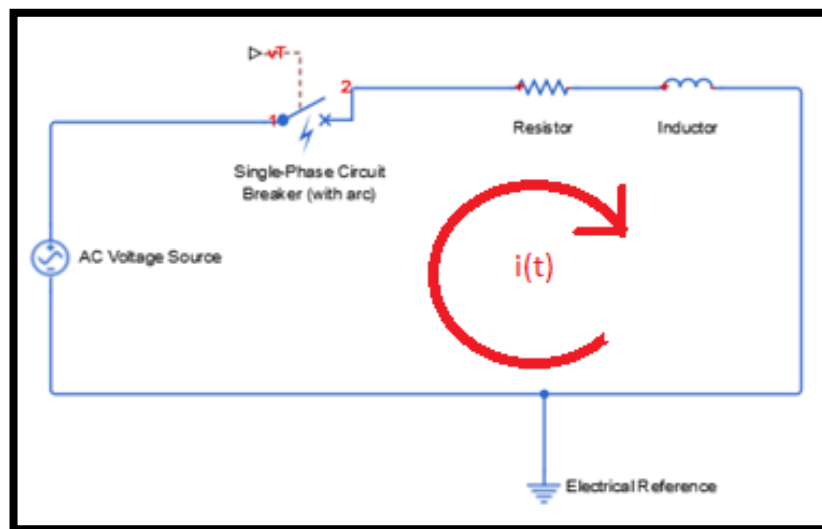


FIGURA 61: SENTIDO DE LA CORRIENTE EN UN CIRCUITO RL CON INTERRUPTOR DE POTENCIA

Resolviendo la ecuación tenemos:

$$VF - Rgu = L \frac{dgu}{dt} \quad (1)$$

$$\int (VF - Rgu) dt = \int \left( L \frac{dgu}{dt} \right) dt \quad (2)$$

$$\int \left( \frac{VF \operatorname{sen} wt - Rg(t)u(t)}{Lg(t)} \right) dt = u(t)$$

Ecuación 15: Tensión en el interruptor de potencia en un circuito RL

Si la corriente del interruptor es la misma que circula a través de nuestro circuito, entonces encontrado el voltaje se procedió a despejar la conductancia de la ecuación 4 del modelo de Mayr que define al interruptor.

Resolviendo la ecuación del interruptor tendremos que:

$$\int \frac{d \ln g}{dt} = \int \frac{1}{\tau} \left( \frac{gu^2}{P} - 1 \right) \quad (3)$$

$$\ln g(t) = \int \frac{1}{\tau} \left( \frac{g(t)u^2(t)}{P} - 1 \right) \quad (4)$$

Se debe despejar solo la conductancia, pero nos damos cuenta que interviene el logaritmo natural y para eliminarlo simplemente aplicamos en ambos lados de la ecuación la exponencial.

Entonces:

$$e^{\ln g(t)} = e^{\int \frac{1}{\tau} \left( \frac{g(t)u^2(t)}{P} - 1 \right)} \quad (5)$$

$$g(t) = e^{\int \frac{1}{\tau} \left( \frac{g(t)u^2(t)}{P} - 1 \right)}$$

Ecuación 16: Conductancia en el interruptor de potencia basado en un circuito RL



## 4.2 PRUEBAS DEL TRANSFORMADOR A VACÍO CON INTERRUPTOR DE POTENCIA.

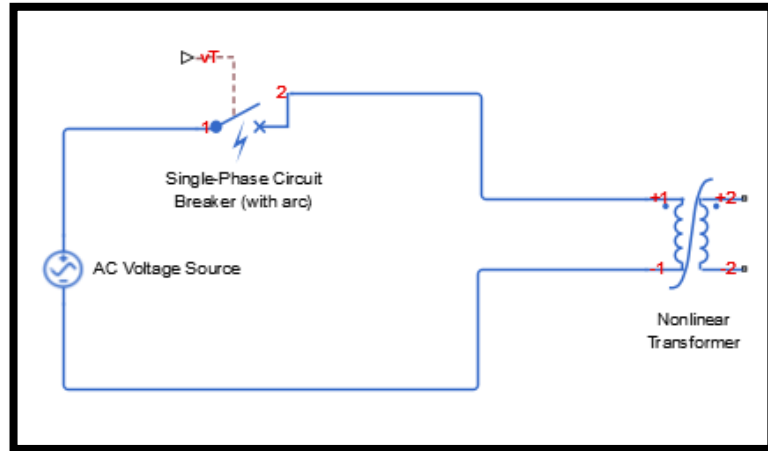


FIGURA 62: TRANSFORMADOR A VACÍO CON INTERRUPTOR DE POTENCIA

Como se explica en la parte teórica y como se muestra en el circuito, no se considera el ramal de excitación en el lado primario porque las corrientes que se originan son pequeñas en comparación al lado donde va la carga. Si se observa a detalle tampoco se utilizó el ramal del lado del secundario porque el análisis fue a vacío, entonces se requiere la corriente a vacío del transformador.

Se trabajó solo con el núcleo y para mayor facilidad, se usó el (método del arcotangente) definido por la ecuación 6, porque que es uno de los más usados y de fácil entendimiento.

Las constantes  $\lambda n$ ,  $m$  y  $\Delta\lambda$  son fueron obtenidas de una curva de saturación conocida, mas podemos despreciar el último término debido que no tiene efecto significativo, es decir  $\Delta\lambda = 0$ .

$$\lambda m (im) = \lambda n \tan^{-1}(m * im) \quad (6)$$

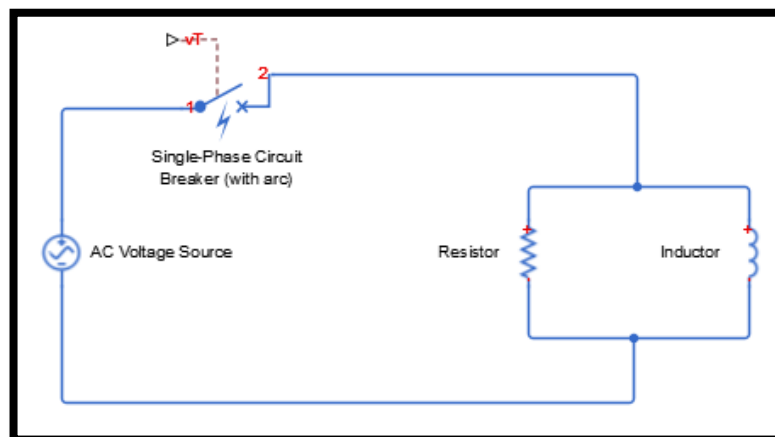


FIGURA 63: CIRCUITO CON TRANSFORMADOR REFERIDO AL PRIMARIO

Iniciando con el respectivo análisis tenemos:

$$IT = I_o \quad (7)$$

$$IT = I_h + I_m \quad (8)$$

$$IT = \frac{VF}{Rh} + I_m \quad (9)$$

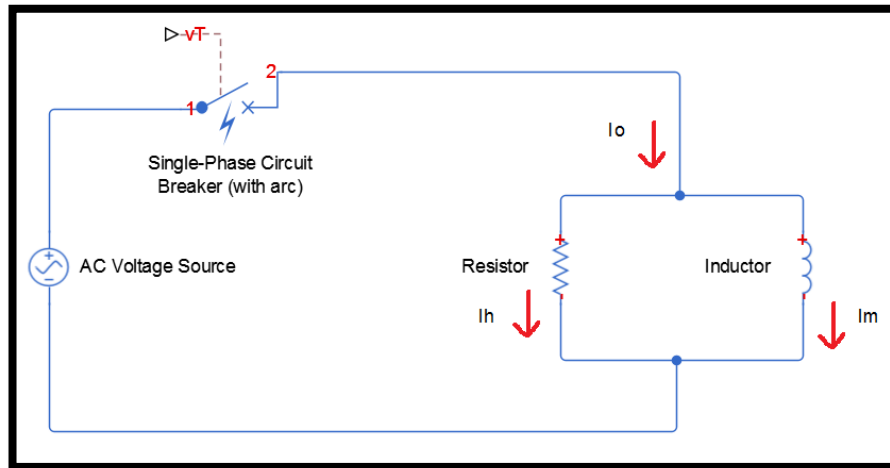


FIGURA 64: SENTIDO DE LAS CORRIENTES PERTENECIENTES AL NÚCLEO DEL TRANSFORMADOR

El voltaje en un inductor está representado por la siguiente ecuación.

$$V = L \frac{di}{dt}$$

Ecuación 17: Voltaje en el inductor

La cual adecuándola a las necesidades del circuito queda de la siguiente manera:

$$VF = Lm \frac{dI_m}{dt}$$

Ecuación 18: Voltaje que existe en el inductor ubicado en el núcleo del transformador

Esta ecuación corresponde al voltaje que existe en el inductor ubicado en el núcleo del transformador de nuestro circuito.

Entrando a la curva de saturación  $\lambda m (im) = \lambda n \tan^{-1}(m * im)$  se tiene que  $\lambda = iL$  por ende, derivando  $\lambda$  respecto a la corriente  $i$  obtenemos el valor de la inductancia. El valor de  $\lambda = \lambda n$ .

$$Lm = \frac{d\lambda m}{dI_m} = \frac{\lambda m}{1 + m^2 I_m^2} \quad (10)$$

Se reemplaza la inductancia de magnetización en la ecuación 18.

$$VF = \frac{\lambda m}{1 + m^2 I_m^2} \frac{dI_m}{dt} \quad (11)$$

Se realiza la resolución para despejar la corriente magnetizante:

$$\frac{dI_m}{dt} = \frac{VF(1 + m^2 I_m^2)}{\lambda m} \quad (12)$$

$$\int \frac{dI_m}{dt} dt = \int \left( \frac{VF(1 + m^2 I_m^2)}{\lambda m} \right) dt \quad (13)$$

$$I_m = \int \left( \frac{VF(1 + m^2 I_m^2)}{\lambda m} \right) dt$$

Ecuación 19: Corriente magnetizante en el núcleo del transformador

Donde  $I_o = I_m + I_h$ , entonces:

$$I_o = \int \left( \frac{VF(1 + m^2 I_m^2)}{\lambda m} \right) dt + \frac{VF}{Rh}$$

Ecuación 20: Corriente a vacío en el transformador

$i = gu = I_o$ , cuando se encontró la corriente a vacío, también se pudo hallar la ecuación que representa al voltaje del interruptor en el proceso de cierre y que trabaja en modo estable para que exista el flujo de corriente, en este caso, la corriente de vacío del transformador.

Como se mencionó en el modelo de Mayr la corriente del interruptor está dada por  $i = gu$ , entonces si en este circuito el interruptor y transformador están conectados en serie, poseen la misma corriente.

$$gu = \int \left( \frac{VF(1 + m^2 I_m^2)}{\lambda m} \right) dt + \frac{VF}{Rh}$$

$$u = \frac{\int \left( \frac{VF(1 + m^2 I_m^2)}{\lambda m} \right) dt + \frac{VF}{Rh}}{g}$$

Ecuación 21: Tensión en el interruptor de potencia en el circuito con transformador a vacío

### 4.3 PRUEBAS EN CIRCUITO RLC CON INTERRUPTOR DE POTENCIA.

Para analizar el circuito RLC (resistivo-inductivo-capacitivo) y el comportamiento del interruptor de potencia, en esta prueba se incluye también la ecuación que define al interruptor de potencia, la cual pertenece a la ecuación 4. Así como la ecuación del interruptor, también está la de corriente  $i = gu$ , estas dos ecuaciones corresponden al modelo de Mayr.

Se diseñó el circuito equivalente en el programa Sim Power System (Matlab) el cual es el siguiente:

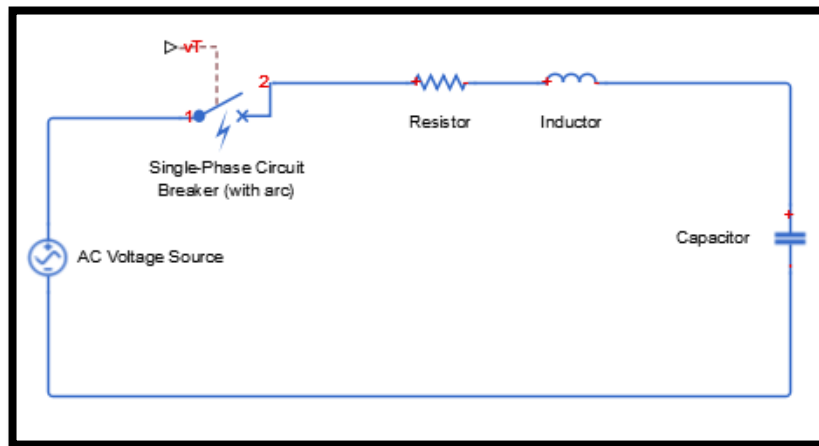


FIGURA 65: CIRCUITO RLC CON INTERRUPTOR DE POTENCIA

Para el análisis del circuito RLC, la ecuación que define al voltaje en un capacitor es la siguiente:

$$VC = \frac{1}{C} \int idt$$

Ecuación 22: Voltaje en el capacitor

Se inició con la resolución para este circuito, conociendo que el interruptor de potencia debe estar previamente cerrado tal cual como en cada uno de los circuitos analizados, para que pueda existir el flujo de corriente, es decir, se trabajará con interruptor en modo estable. Aplicando la ley de Kirchhoff tenemos:

$$-VF + VR + VL + VC = 0$$

Ecuación 23: Ley de voltaje de Kirchhoff en circuito RLC

$$VF = VR + VL + VC \quad (14)$$

$$VF = Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt$$

Ecuación 24: Ley de voltaje de Kirchoff en circuito RL en modo estable

Despejando la corriente se obtiene:

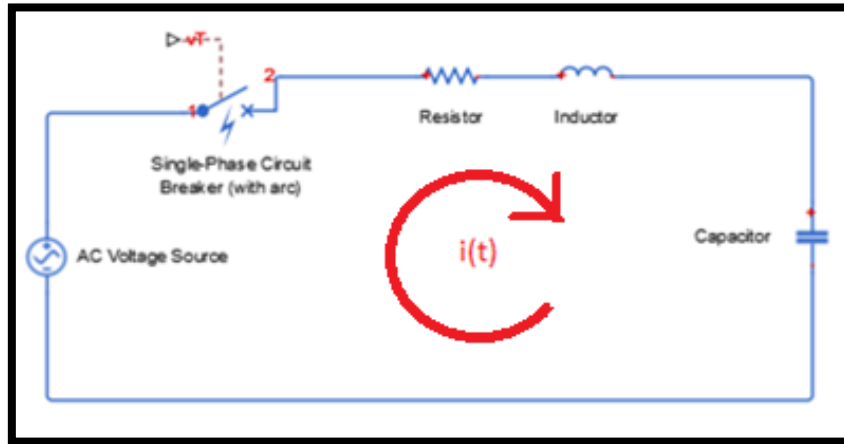


FIGURA 66: SENTIDO DE LA CORRIENTE EN UN CIRCUITO RLC CON INTERRUPTOR DE POTENCIA

$$VF - Ri - \frac{1}{C} \int idt = L \frac{di}{dt} \quad (15)$$

$$\int \left( VF - Ri - \frac{1}{C} \int idt \right) dt = \int \left( L \frac{di}{dt} \right) dt \quad (16)$$

$$\int \left( VF - Ri - \frac{1}{C} \int idt \right) dt = Li(t) \quad (17)$$

$$\int \left( \frac{VF \text{ sen } wt - RI(t) - \frac{1}{C} \int I(t)}{L} \right) dt = i(t)$$

Ecuación 25: Corriente en circuito RLC en serie

La corriente según el modelo de Mayr es  $i = gu$ , entonces reemplazando tenemos:

$$\int \left( \frac{VF \operatorname{sen} wt - Rg(t)u(t) - \frac{1}{C} \int g(t)u(t)}{L} \right) = u(t)g(t)$$

Ecuación 26: Corriente en circuito RLC aplicando modelo de Mayr

Despejando  $u(t)$ , voltaje de ruptura, tenemos:

$$\int \left( \frac{VF \operatorname{sen} wt - Rg(t)u(t) - \frac{1}{C} \int g(t)u(t)}{Lg(t)} \right) = u(t)$$

Ecuación 27: Tensión en el interruptor de potencia en un circuito RL

En el circuito ya despejado el valor de  $u$ , se despejó el valor de  $g$  para completar que  $i = gu$ .

Resolviendo la ecuación 4 del interruptor tendremos que:

$$\int \frac{d \ln g}{dt} = \int \frac{1}{\tau} \left( \frac{gu^2}{P} - 1 \right) \quad (18)$$

$$\ln g(t) = \int \frac{1}{\tau} \left( \frac{g(t)u^2(t)}{P} - 1 \right) \quad (19)$$

Como se mencionó anteriormente nuestro propósito es despejar solo la conductancia, pero nos damos cuenta que interviene el logaritmo natural y para eliminarlo simplemente aplicamos en ambos lados de la ecuación la exponencial.

Entonces tenemos:

$$e^{\ln g(t)} = e^{\int \frac{1}{\tau} \left( \frac{g(t)u^2(t)}{P} - 1 \right)} \quad (20)$$

$$g(t) = e^{\int \frac{1}{\tau} \left( \frac{g(t)u^2(t)}{P} - 1 \right)}$$

Ecuación 28: Conductancia en el interruptor de potencia basado en un circuito RL

#### 4.4 COMPARACIÓN DE GRÁFICAS CORRESPONDIENTES A LAS PRUEBAS EN CIRCUITO RL CON INTERRUPTOR DE POTENCIA.



FIGURA 67: MONTAJE DEL CIRCUITO RL CON INTERRUPTOR DE POTENCIA

##### 4.4.1 TENSIÓN AL MOMENTO DE APERTURA DEL INTERRUPTOR DE POTENCIA

➤ GRÁFICA EXPERIMENTAL:

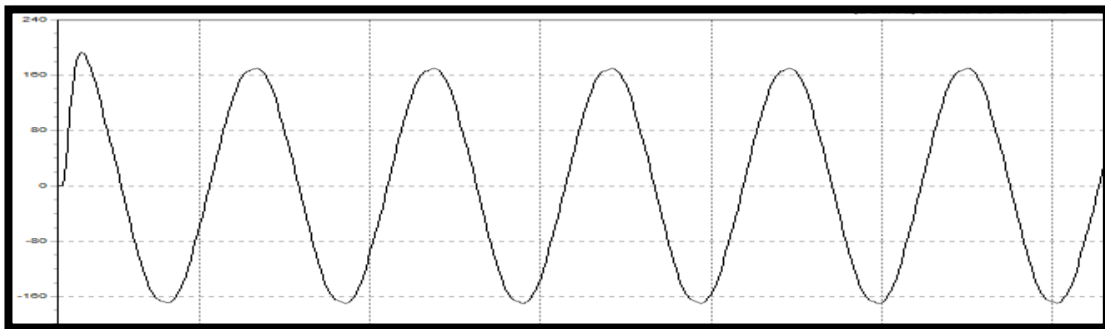


FIGURA 68: GRÁFICA EXPERIMENTAL DE LA TENSIÓN DE APERTURA DEL INTERRUPTOR DE PÒTENCIA EN UN CIRCUITO RL

En la figura 68 se representa la señal de voltaje que se obtuvo experimentalmente en el momento justo de la apertura del interruptor de potencia en el circuito RL.

➤ GRÁFICA SIMULADA:

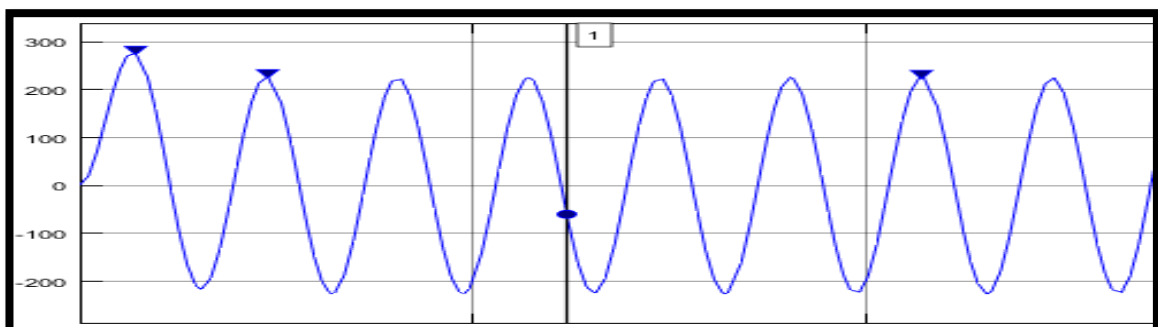


FIGURA 69: GRÁFICA SIMULADA DE LA TENSIÓN DE APERTURA DEL INTERRUPTOR DE PÒTENCIA EN UN CIRCUITO RL

En la figura 69 se representa la señal de voltaje que se obtuvo en la simulación en el momento justo de la apertura del interruptor de potencia en el circuito RL.

#### 4.4.2 CORRIENTE AL MOMENTO DE APERTURA DEL INTERRUPTOR DE POTENCIA

➤ GRÁFICA EXPERIMENTAL:

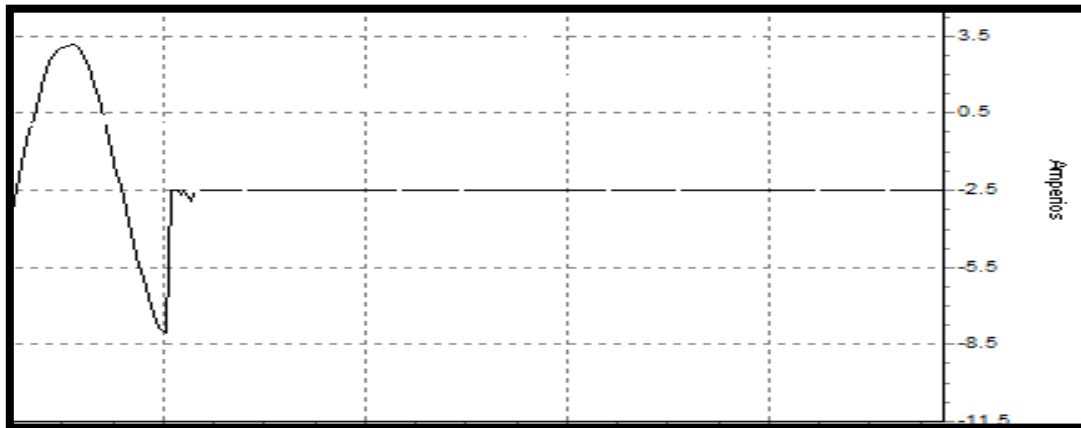


FIGURA 70: GRÁFICA EXPERIMENTAL DE LA CORRIENTE AL MOMENTO DE APERTURA DEL INTERRUPTOR DE PÔTENCIA EN UN CIRCUITO RL

En la figura 70 se representa la señal de corriente que se obtuvo experimentalmente en el momento justo de la apertura del interruptor de potencia en el circuito RL.

➤ GRÁFICA SIMULADA:

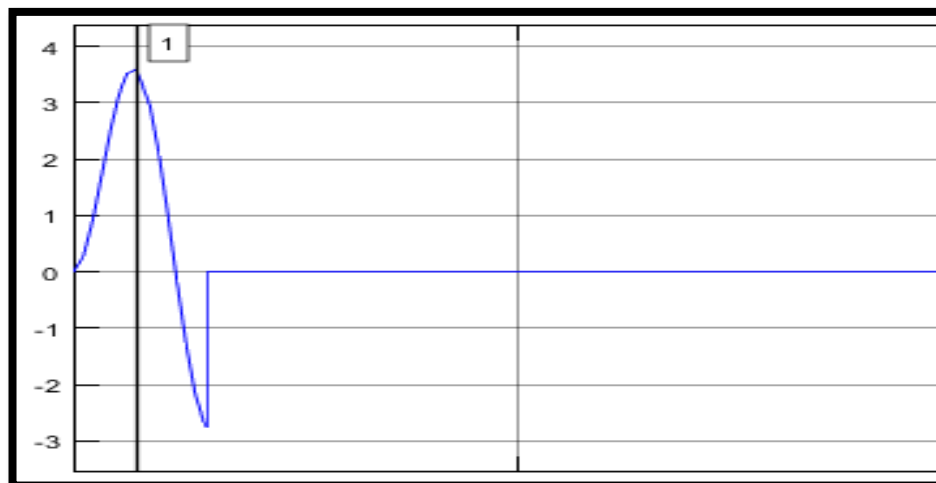


FIGURA 71: GRÁFICA SIMULADA DE LA CORRIENTE AL MOMENTO DE APERTURA DEL INTERRUPTOR DE PÔTENCIA EN UN CIRCUITO RL

En la figura 71 se representa la señal de corriente que se obtuvo en la simulación en el momento justo de la apertura del interruptor de potencia en el circuito RL.



## 4.5 COMPARACIÓN DE GRÁFICAS CORRESPONDIENTES A LAS PRUEBAS DEL TRANSFORMADOR A VACÍO CON INTERRUPTOR DE POTENCIA.



FIGURA 72: MONTAJE DEL CIRCUITO CON TRANSFORMADOR A VACÍO CON INTERRUPTOR DE POTENCIA

### 4.5.1 CORRIENTE DE VACÍO EN EL TRANSFORMADOR

➤ GRÁFICA EXPERIMENTAL:



FIGURA 73: GRÁFICA EXPERIMENTAL DE LA CORRIENTE DE VACÍO EN EL TRANSFORMADOR

En la figura 73 se representa la señal de corriente a vacío que se obtuvo experimentalmente en la simulación cuando del interruptor de potencia estaba en modo operando en el circuito con transformador.

➤ GRÁFICA SIMULADA:

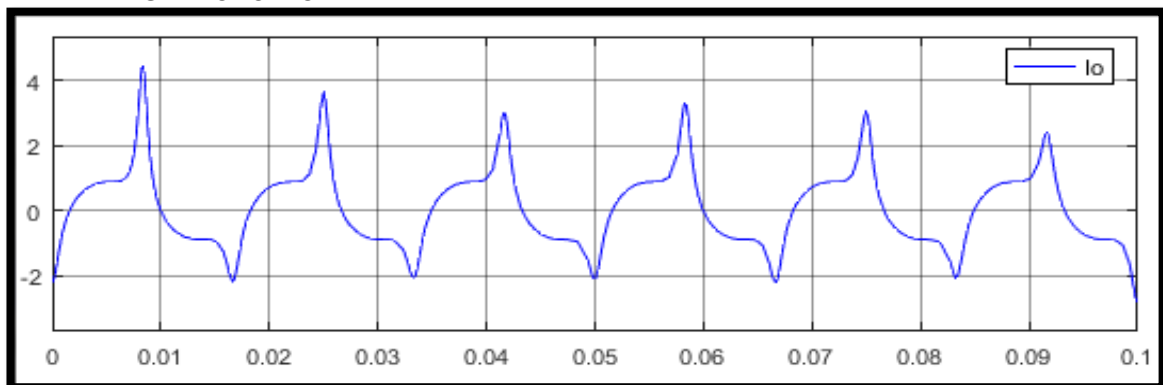


FIGURA 74: GRÁFICA SIMULADA DE LA CORRIENTE DE VACÍO EN EL TRANSFORMADOR

En la figura 74 se representa la señal de corriente a vacío, que se obtuvo experimentalmente en la simulación cuando del interruptor de potencia estaba en modo operando en el circuito con transformador.

## 4.5.2 CORRIENTE INRUSH EN EL TRANSFORMADOR (CIERRE DEL INTERRUPTOR)

➤ GRÁFICA EXPERIMENTAL:

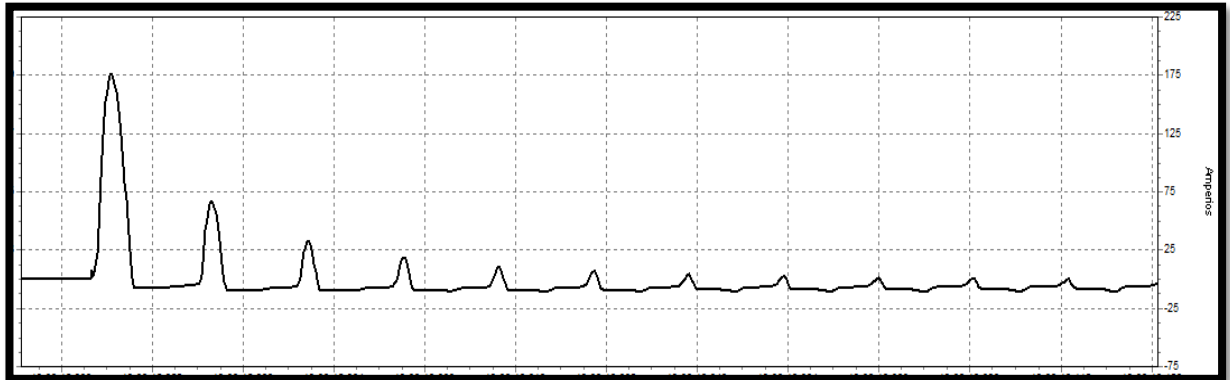


FIGURA 75: GRÁFICA EXPERIMENTAL DE LA CORRIENTE INRUSH EN EL TRANSFORMADOR

En la figura 75 se representa la señal de corriente Inrush (corriente pico), que se obtuvo experimentalmente cuando se produjo el cierre del interruptor de potencia en el circuito con transformador.

➤ GRÁFICA SIMULADA:

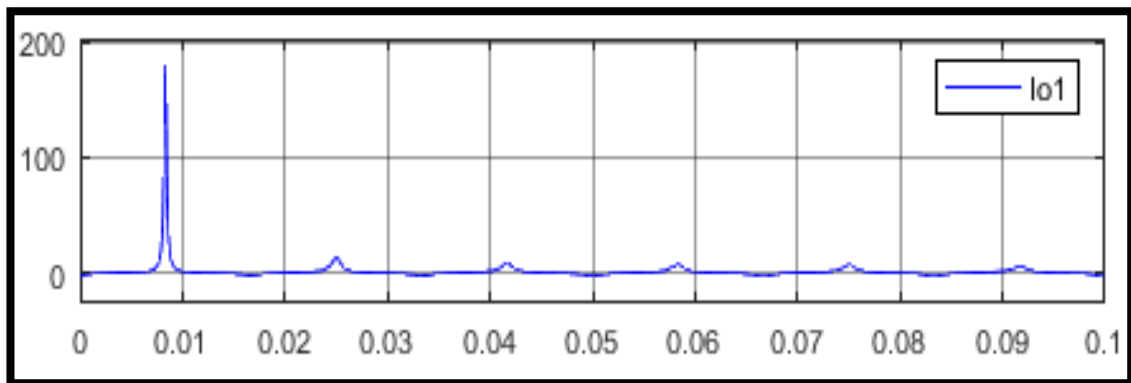


FIGURA 76: GRÁFICA SIMULADA DE LA CORRIENTE INRUSH EN EL TRANSFORMADOR

En la figura 76 se representa la señal de corriente Inrush (corriente pico), que se obtuvo en la simulación cuando se produjo el cierre del interruptor de potencia en el circuito con transformador.

### 4.5.3 TENSIÓN EN EL CIERRE DEL INTERRUPTOR DE POTENCIA

➤ GRÁFICA EXPERIMENTAL:

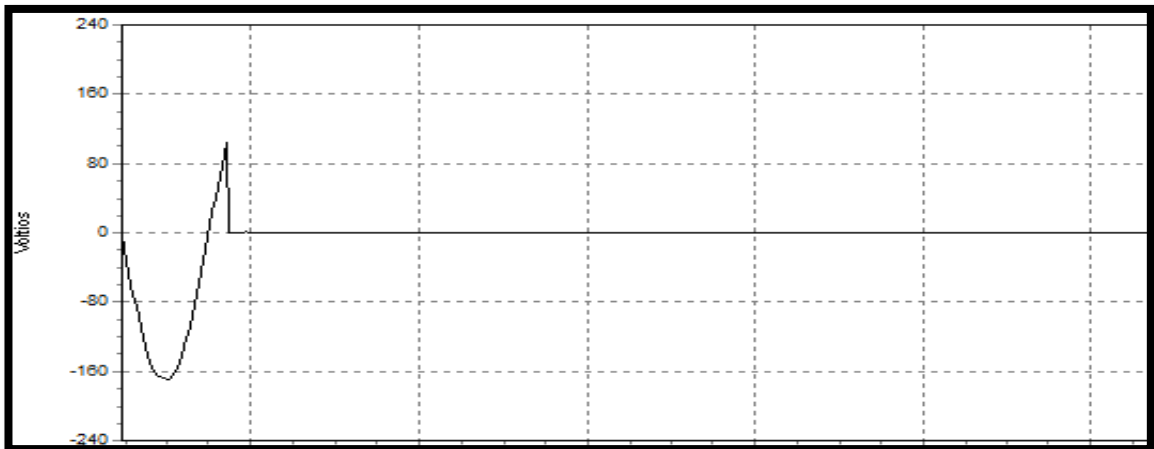


FIGURA 77: GRÁFICA EXPERIMENTAL DE LA TENSIÓN EN EL CIERRE DEL INTERRUPTOR DE POTENCIA EN EL CIRCUITO CON TRANSFORMADOR

En la figura 77 se representa la señal de voltaje, que se obtuvo experimentalmente cuando se produjo el cierre del interruptor de potencia en el circuito con transformador.

➤ GRÁFICA SIMULADA:

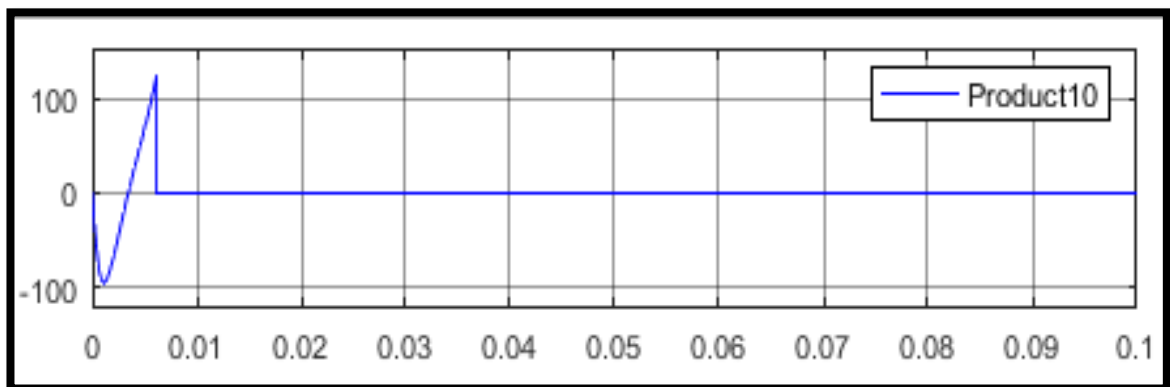


FIGURA 78: GRÁFICA SIMULADA DE LA TENSIÓN EN EL CIERRE DEL INTERRUPTOR DE POTENCIA EN EL CIRCUITO CON TRANSFORMADOR

En la figura 78 se representa la señal de voltaje, que se obtuvo en la simulación cuando se produjo el cierre del interruptor de potencia en el circuito con transformador.

## 4.6 COMPARACIÓN DE GRÁFICAS CORRESPONDIENTES A LAS PRUEBAS EN CIRCUITO RLC CON INTERRUPTOR DE POTENCIA.



FIGURA 79: MONTAJE DEL CIRCUITO RLC CON INTERRUPTOR DE POTENCIA

### 4.6.1 TENSION AL MOMENTO DE APERTURA DEL INTERRUPTOR DE POTENCIA DE POTENCIA

➤ GRÁFICA EXPERIMENTAL:

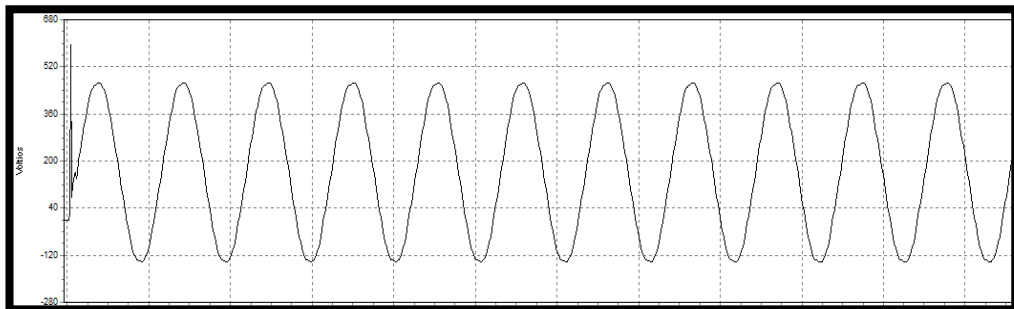


FIGURA 80: GRÁFICA EXPERIMENTAL DE LA TENSION AL MOMENTO DE APERTURA DEL INTERRUPTOR DE POTENCIA EN CIRCUITO RLC

En la figura 80 se representa la señal de voltaje que muestra un pico inicial, y se obtuvo experimentalmente en el momento justo de la apertura del interruptor de potencia en el circuito RLC.

➤ GRÁFICA SIMULADA:

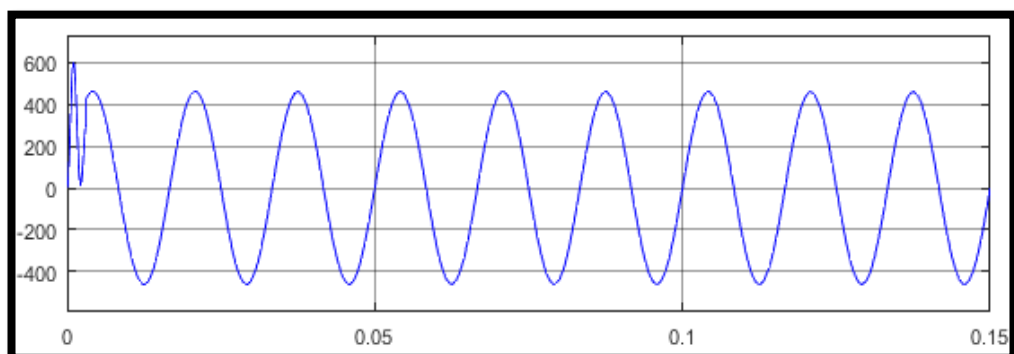


FIGURA 81: GRÁFICA SIMULADA DE LA TENSION AL MOMENTO DE APERTURA DEL INTERRUPTOR DE POTENCIA EN CIRCUITO RLC

En la figura 81 se representa la señal de voltaje que muestra un pico inicial, y se obtuvo en la simulación en la apertura del interruptor de potencia en el circuito RLC.

## 4.6.2 CORRIENTE AL MOMENTO DE APERTURA DEL INTERRUPTOR DE POTENCIA

➤ GRÁFICA EXPERIMENTAL:

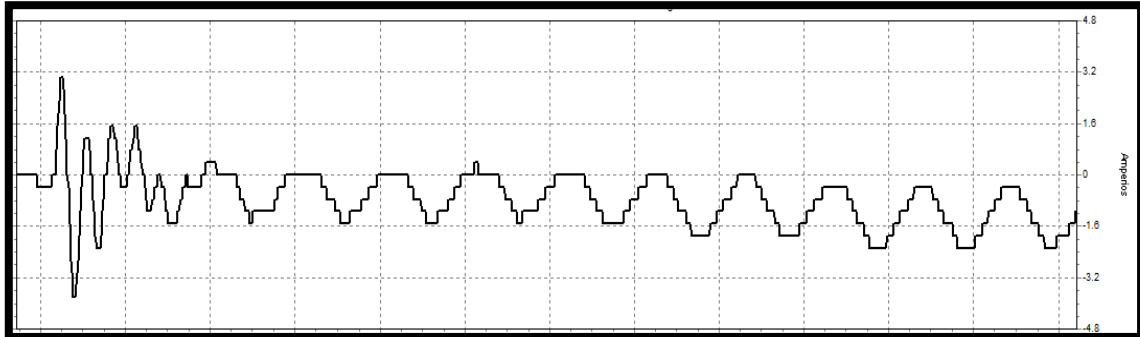


FIGURA 82: GRÁFICA EXPERIMENTAL DE LA CORRIENTE AL MOMENTO DE APERTURA DEL INTERRUPTOR DE POTENCIA EN CIRCUITO RLC

En la figura 82 se representa la señal de corriente que varía con el tiempo, la cual se obtuvo experimentalmente en el momento justo de la apertura del interruptor de potencia en el circuito RLC.

➤ GRÁFICA SIMULADA:

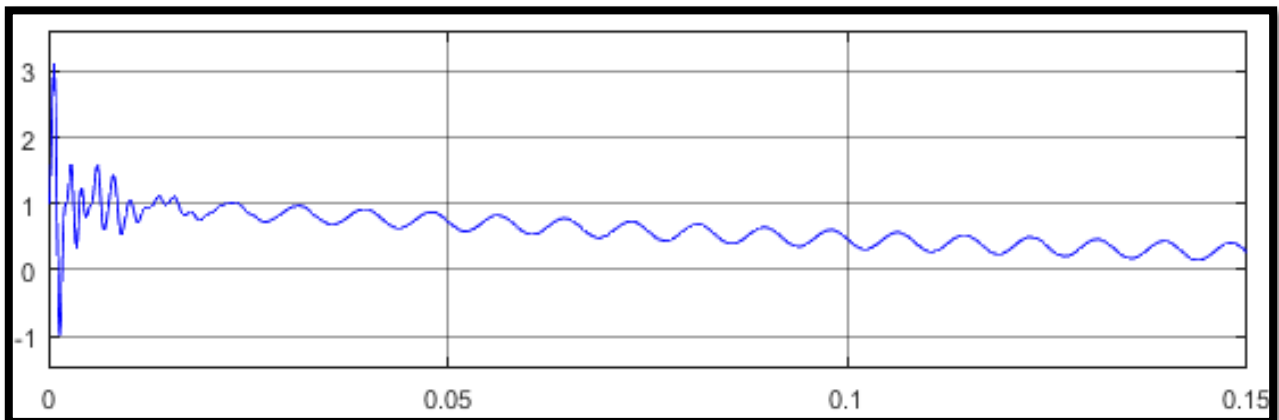


FIGURA 83: GRÁFICA SIMULADA DE LA CORRIENTE AL MOMENTO DE APERTURA DEL INTERRUPTOR DE POTENCIA EN CIRCUITO RLC

En la figura 82 se representa la señal de corriente que varía con el tiempo, la cual se obtuvo en la simulación en el momento justo de la apertura del interruptor de potencia en el circuito RLC.

## 4.7 REALIZACIÓN DE LAS INTERFACES

El programa el cual realiza la simulación acerca del análisis matemático, cuenta con una variedad de interfaces las cuales se ejecutaran a partir del trabajo realizado en el ambiente de Simulink, según los parámetros de ingreso y el tipo de análisis que se quiere representar.

### 4.7.1 PRESENTACIÓN

La primera interfaz que aparece al momento de la ejecución del programa pertenece a la presentación (figura 84), la cual mostrará datos informativos acerca del trabajo de titulación. Esta interfaz aparte de datos muestra dos “Push Button” en donde el primero sirve para ingresar a una nueva interfaz y digitar valores, en cambio el segundo sirve para salir de dicha interfaz.

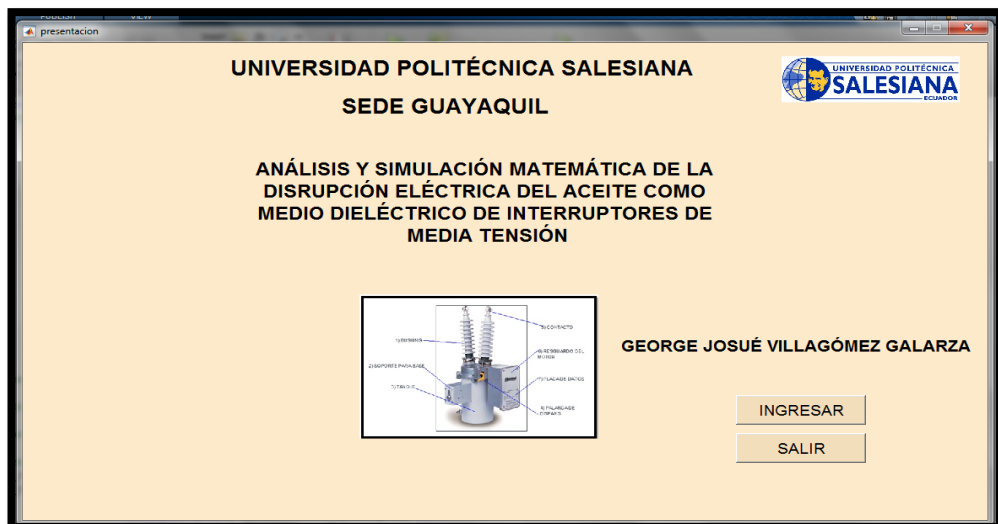


FIGURA 84: INTERFAZ DE PRESENTACIÓN

### 4.7.2 PARÁMETROS

Una vez después de haber pasado por la primera interfaz, se encuentra en la sección de elegir el circuito a simular en el cual debemos ingresar los valores correspondientes a cada circuito. Existen “Edit text” para el ingreso de los datos, por ejemplo: voltajes, valor de resistencia, valor de inductor, valor de capacitancia, potencia, frecuencia, etc. Cabe destacar que también serán ingresados los valores de  $\lambda$  y  $m$  según la ecuación 6, correspondientes a la curva de saturación y estos solo aparecen en el circuito en donde se usó el transformador.

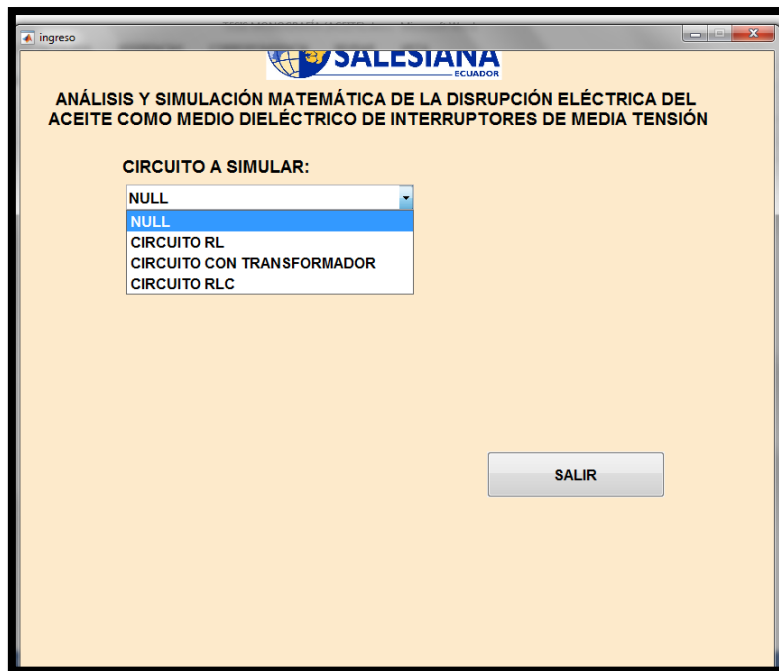


FIGURA 85: SELECCIÓN DE CIRCUITO

Al escoger la primera opción de simular el circuito RL, se desplegará una lista para ingresar valores necesarios para poder simular, dichos parámetros se muestran en la figura 86.

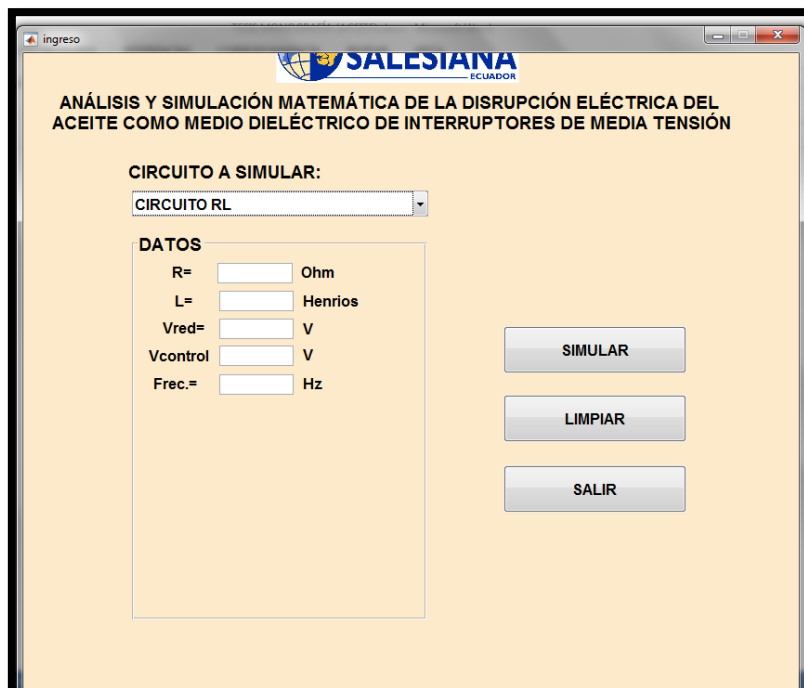


FIGURA 86: INGRESO DE DATOS PARA CIRCUITO RL

En la segunda opción de simular el circuito con transformador, se desplegará una lista para ingresar valores necesarios para poder simular, dichos parámetros se muestran en la figura 87.

ingreso

**SALESIANA**  
ECUADOR

ANÁLISIS Y SIMULACIÓN MATEMÁTICA DE LA DISRUPCIÓN ELÉCTRICA DEL ACEITE COMO MEDIO DIELECTRICO DE INTERRUPTORES DE MEDIA TENSIÓN

CIRCUITO A SIMULAR:  
CIRCUITO CON TRANSFORMADOR

DATOS

Vprim=  V

Vsec=  V

S.Trans  VA

Vred=  V

Vcontrol=  V

Frec.=  Hz

PRUEBA DE CIRCUITO ABIERTO

PCA=

VCA=

ICA=

m=

landa=

SIMULAR

LIMPIAR

SALIR

FIGURA 87: INGRESO DE DATOS PARA CIRCUITO CON TRANSFORMADOR

Para una tercera elección se tiene el circuito RLC, se abrirá una ventana donde se ingresa los parámetros para poder simular, los cuales se muestran en la figura 88.

ingreso

**SALESIANA**  
ECUADOR

ANÁLISIS Y SIMULACIÓN MATEMÁTICA DE LA DISRUPCIÓN ELÉCTRICA DEL ACEITE COMO MEDIO DIELECTRICO DE INTERRUPTORES DE MEDIA TENSIÓN

CIRCUITO A SIMULAR:  
CIRCUITO RLC

DATOS

R=  Ohm

L=  Henrios

C=  Faradios

Vred=  V

Vcontrol=  V

Frec.=  Hz

SIMULAR

LIMPIAR

SALIR

FIGURA 88: INGRESO DE DATOS PARA CIRCUITO RLC



Después de haber ingresado todos los valores que se nos soliciten en los circuitos, daremos clic al “Push button” Simular y se procederá a revisar las respectivas gráficas que se obtuvieron en base a las distintas prácticas experimentales efectuadas en el laboratorio de alta tensión, las cuales fueron simuladas aproximándose a lo real tal como se muestran en la parte de comparación de gráficas de dicho trabajo de titulación.

Existe también un “Push button” Limpiar, que borra valores mal digitados y se quieren corregir, el “Push Button” Salir sirve para salir de la interfaz.

### 4.7.3 MUESTRA DE GRÁFICAS

Después de haber ingresado los datos y haber aplastado el “Push button” Simular, nos aparece otra interfaz con dos “Push button”.

El primero es el botón graficar que al presionarlo obviamente te muestra la respectivas gráficas del circuito elegido con anterioridad. El segundo botón es salir que como se conoce al presionarlo nos expulsa de la interfaz.

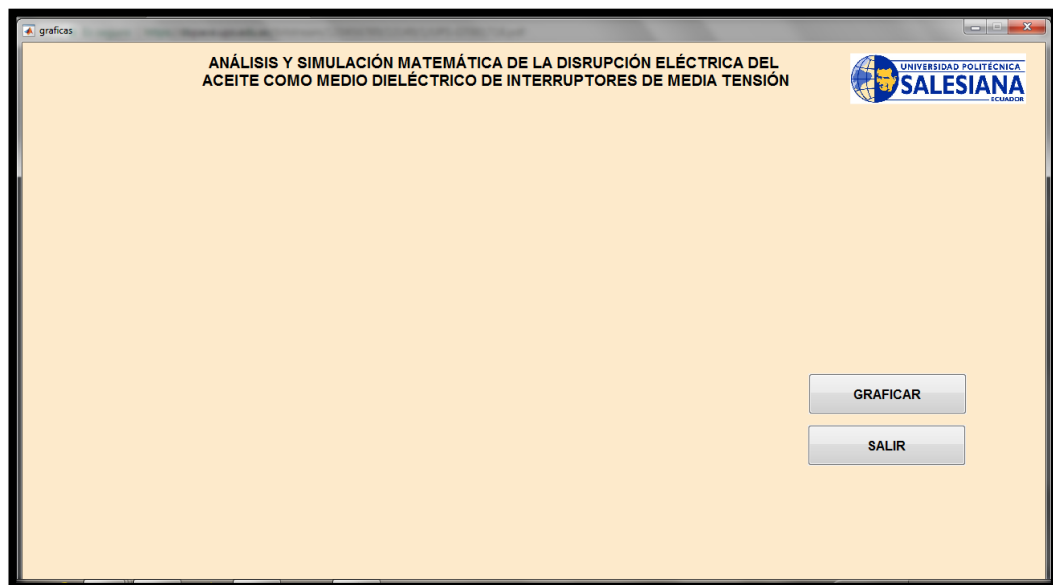


FIGURA 89: VENTANA PARA MOSTRAR GRÁFICAS

Una vez presionado el botón graficar, en la interfaz se muestran las gráficas del circuito elegido, en este caso la figura 90 pertenece al circuito RL. Se aprecian la señal de voltaje de entrada, el voltaje de apertura y la corriente de apertura.

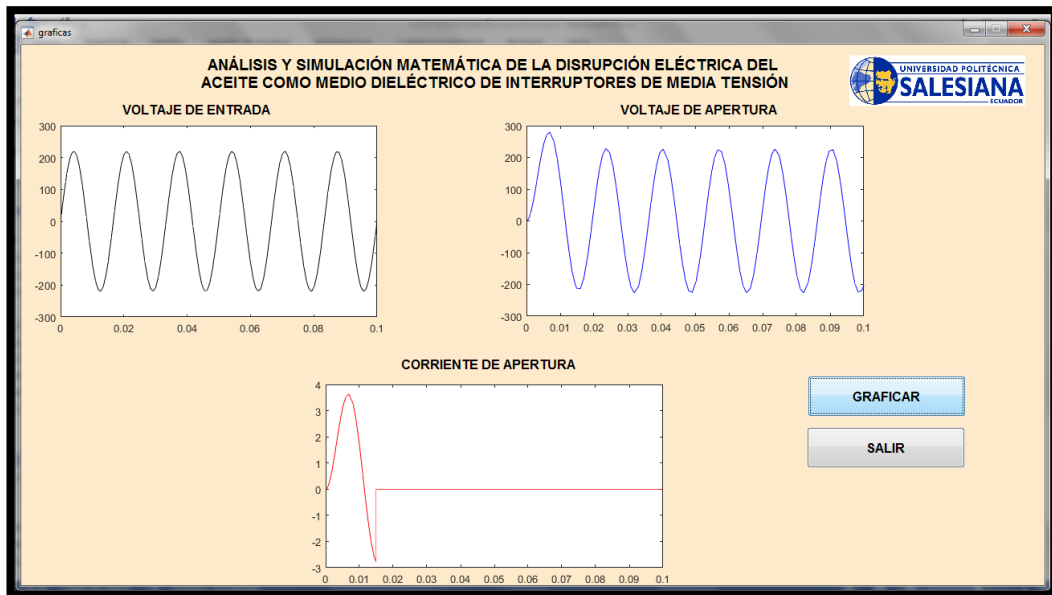


FIGURA 90: GRÁFICAS SIMULADAS CORRESPONDIENTES AL CIRCUITO RL

En el caso de la gráfica 91 pertenece al circuito con transformador, donde se puede seleccionar la señal de corriente a visualizar. En este caso la señal pertenece a la “CORRIENTE DE VACÍO”.

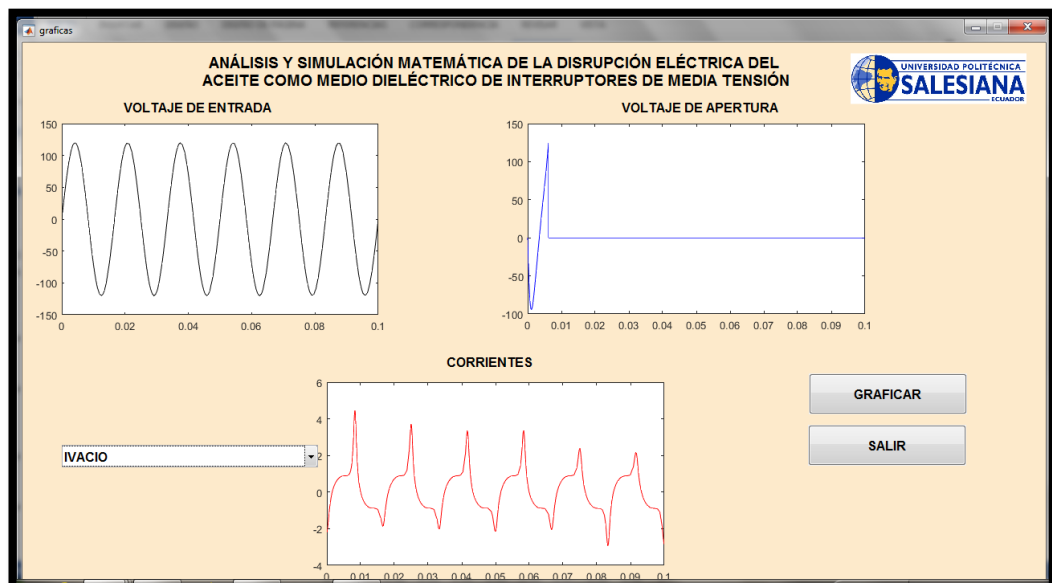


FIGURA 91: GRÁFICAS CORRESPONDIENTES AL CIRCUITO CON TRANSFORMADOR CASO 1

En la figura 92 se muestran las gráficas del mismo circuito con transformador pero esta vez con la “CORRIENTE INRUSH”.

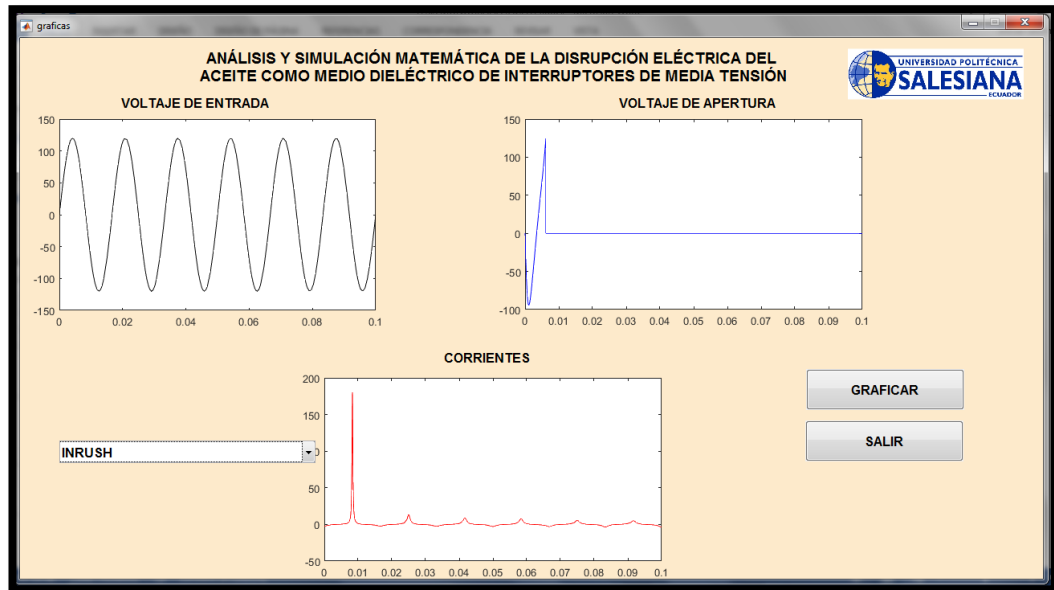


FIGURA 92: GRAFICAS CORRESPONDIENTES AL CIRCUITO CON TRANSFORMADOR CASO 2

En este caso las gráficas de la figura 93 pertenecen al circuito RLC. Se aprecian la señal de voltaje de entrada, el voltaje de apertura y la corriente de apertura.

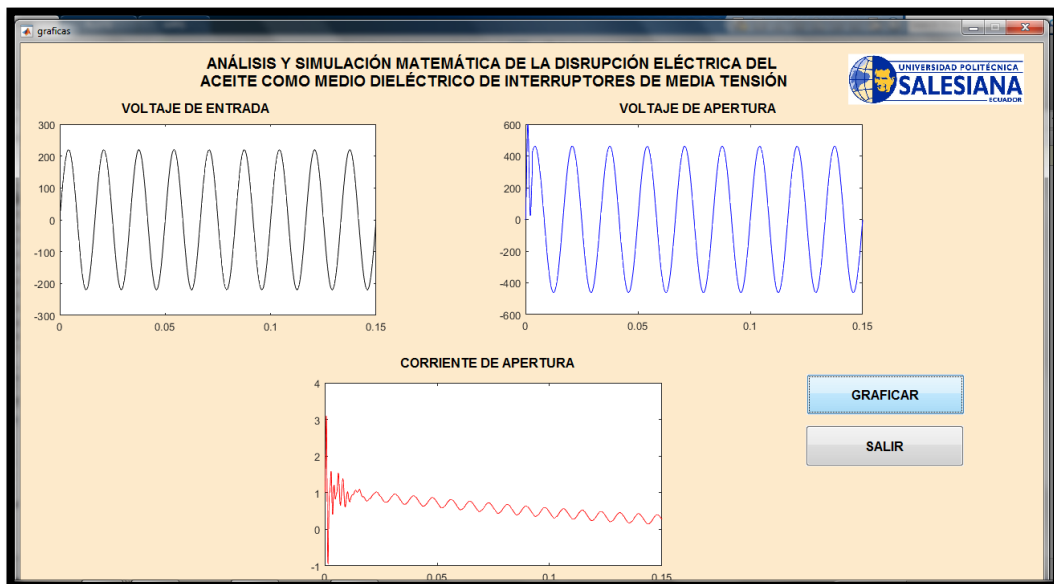


FIGURA 93: GRÁFICAS SIMULADAS CORRESPONDIENTES AL CIRCUITO RLC

## CONCLUSIONES.

El presente trabajo tuvo como objetivo demostrar el comportamiento de un interruptor de potencia en media tensión, en el cual internamente contenía aceite dieléctrico. El arco eléctrico es un fenómeno en el cual es complejo explicarlo, ya que cuando este fenómeno ocurre lo hace en cuestión de segundos, es más en escalas de tiempos inferiores a milisegundos.

Se diseñaron tres circuitos en Sim Power System para las respectivas pruebas los cuales constan en el capítulo de Análisis de resultados. El primer circuito es un RL, el segundo es con un transformador y el tercero es RLC; todos los diseños contemplaban el interruptor de potencia.

El interruptor de potencia fue clave ya que al momento de apertura se generaban las señales pico de voltaje. En el caso del circuito con el transformador fue diferente porque se trabajó con las corrientes a vacío e inrush del transformador y estas se originaron al momento del cierre de nuestro interruptor. Las ecuaciones que describen el comportamiento del interruptor en apertura y cierre se detallan en la parte de análisis de resultados.

Se plantearon las debidas ecuaciones que respaldaban el comportamiento del interruptor de potencia en la ruptura dieléctrica del aceite y que de manera más eficiente se asemeje a la realidad. Las ecuaciones que describen al interruptor en apertura y cierre se detallan en la parte de análisis de resultados.

Mediante el programa Matlab, se simuló las señales de voltajes y corrientes con sus respectivos picos similares a las curvas obtenidas con el equipo Fluke 435 SERIES II (Analizador de redes).

El modelo utilizado para la presente tesis es Mayr, sin embargo en varios artículos el modelo de Mayr adolece de aproximaciones entre la parte simulada y la parte experimental. Se compararon los resultados del software vs los resultados de las prácticas experimentales aproximándose lo más posible a la vida real.

## RECOMENDACIONES.

Los datos a ingresar para la parametrización del software en el caso del circuito del transformador deben ser los correctos, es decir se deben ejecutar cuidadosamente la prueba de circuito abierto y las respectivas prueba de saturación del núcleo para obtener los valores de  $\lambda$  y  $m$ . Estos valores se generan dependiendo del transformador con el cual se está realizando las prácticas ya que son factores que se encuentran en el mismo.

Para poder visualizar y obtener los valores picos, valores más altos, tanto de voltajes y corrientes; se debe utilizar un equipo de medición especial el cual tenga la capacidad de mostrar las señales de las ondas y sus respectivas amplitudes. Por ese motivo se usó el analizador de redes Fluke que pertenece a la Universidad Salesiana, el cual es capaz de grabar las señales de ondas en tiempos y valores pequeños.

Usar el programa Matlab fue fundamental para poder simular todas las gráficas lo más semejante a la realidad. Cabe destacar que los ambientes virtuales de Simulink y Sim power system, pertenecientes a matlab, fueron de mucha utilidad por el diseño de los circuitos eléctricos que se ejecutaron en la parte experimental.

Para futuros trabajos no solo es posible usar el modelo de Mayr porque también existen otros modelos como: el de Cassie o la combinación de ambos, los cuales se pueden aplicar a los circuitos trabajados e incluso utilizar elementos adicionales como la resistencia de amortiguamiento. Los resultados de las pruebas y sus respectivas simulaciones serían de gran aporte para realizar una comparación entre los diferentes modelos.

## ANEXOS.

### VALORES DE PORCENTAJES DE ERROR ENTRE GRÁFICAS PROPUESTAS

➤ **CIRCUITO RL CON INTERRUPTOR DE POTENCIA.**

- **TENSIÓN AL MOMENTO DE APERTURA DEL INTERRUPTOR DE POTENCIA**

TABLA 16 PORCENTAJES DE ERROR EN TENSIÓN EN CIRCUITO RL

Tiempo (ms)	Magnitud Voltaje experimental (V)	Magnitud Voltaje Simulada (V)	Promedio
0	0.0011	0.001	9%
10	134.4	118.7	12%
20	33.6	28.72	15%
30	-136.6	-157.3	15%
40	223	220	1%
50	-167.40	-194.3	16%
60	108.7	105.3	3%
70	38.4	32.6	15%
80	-131.4	-163.1	24%
90	224	221.5	1%
100	-185.4	-202	9%
		Total	11%

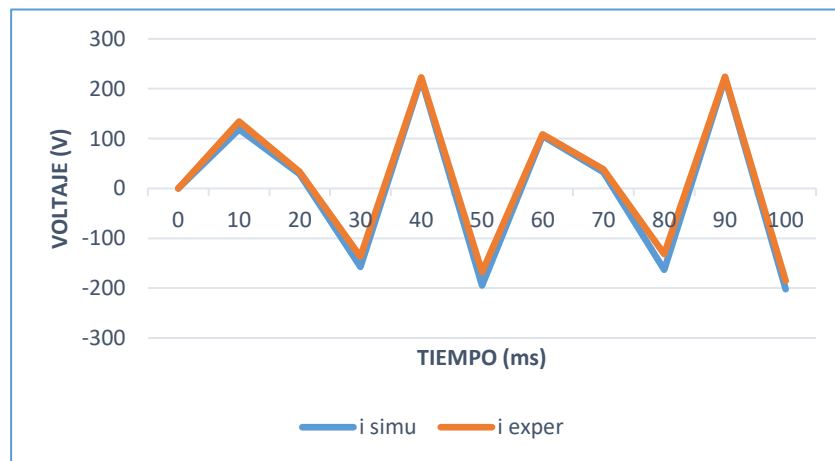


FIGURA 94 GRÁFICAS DE PORCENTAJES EN TENSIÓN DE CIRCUITO RL

En la figura 94 podemos apreciar las señales con los valores de error que se obtuvieron experimentalmente y simulado con respecto al voltaje en un circuito RL. Cabe destacar que los porcentajes son altos debido a que el arco es una falla y los tiempos están en escalas muy pequeñas.

- **CORRIENTE AL MOMENTO DE APERTURA DEL INTERRUPTOR DE POTENCIA**

TABLA 17 PORCENTAJES DE ERROR EN CORRIENTE EN CIRCUITO RL

Tiempo (ms)	Magnitud Corriente experimental (A)	Magnitud Corriente Simulada (A)	Promedio
0	0.0011	0.001	9%
2	0.89	0.7582	15%
4	3.1	2.41	22%
6	3.98	3.52	12%
8	3.7	3.29	11%
10	2.1	1.67	20%
12	-0.21	-0.2763	32%
14	-2.1	-2.23	6%
16	0.0011	0.001	9%
18	0.0011	0.001	9%
20	0.0011	0.001	9%
		Total	14%

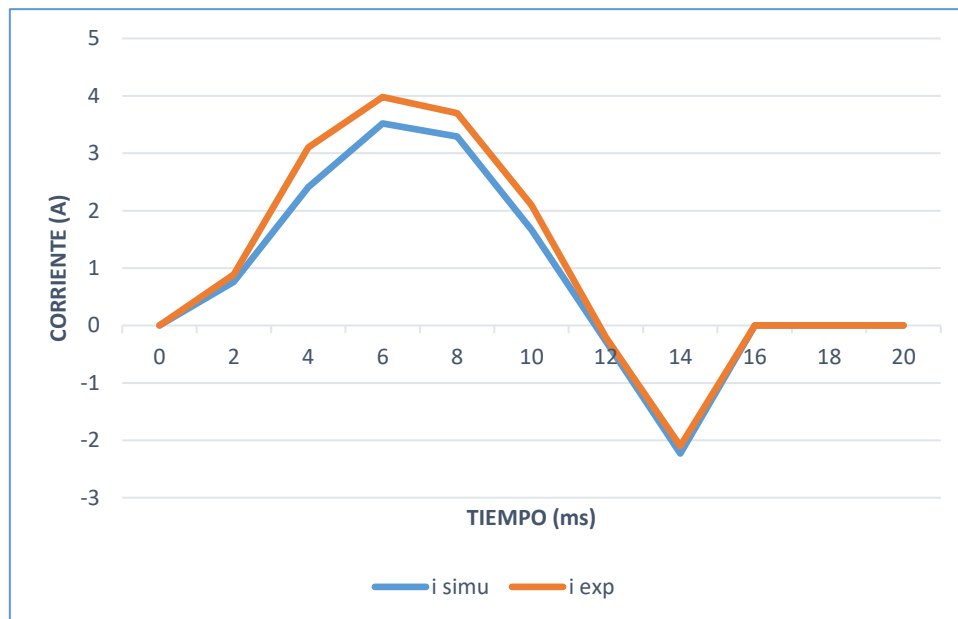


FIGURA 95 GRÁFICA DE PORCENTAJE EN CORRIENTE DE CIRCUITO RL

En la figura 95 podemos apreciar las señales con los valores de error que se obtuvieron experimentalmente y simulado con respecto a la corriente en un circuito RL. Cabe destacar que los porcentajes son altos debido a que el arco es una falla y los tiempos están en escalas muy pequeñas.

➤ **CIRCUITO DEL TRANSFORMADOR A VACÍO CON INTERRUPTOR DE POTENCIA.**

• **CORRIENTE DE VACÍO EN EL TRANSFORMADOR**

TABLA 18 PORCENTAJES DE ERROR EN CORRIENTE A VACÍO EN CIRCUITO CON TRANSFORMADOR

Tiempo (ms)	Magnitud Corriente experimental (A)	Magnitud Corriente Simulada (A)	Promedio
0	-1.94	-2.2	13%
10	-0.181	-0.1272	30%
20	0.581	0.7373	27%
30	-0.763	-0.8799	15%
40	1.4	1.018	27%
50	-2.50	-2.093	16%
60	-0.055	-0.04007	27%
70	-0.381	-0.6867	80%
80	-1.144	-0.8821	23%
90	1.32	1.025	22%
100	-3.57	-2.85	20%
		Total	27%

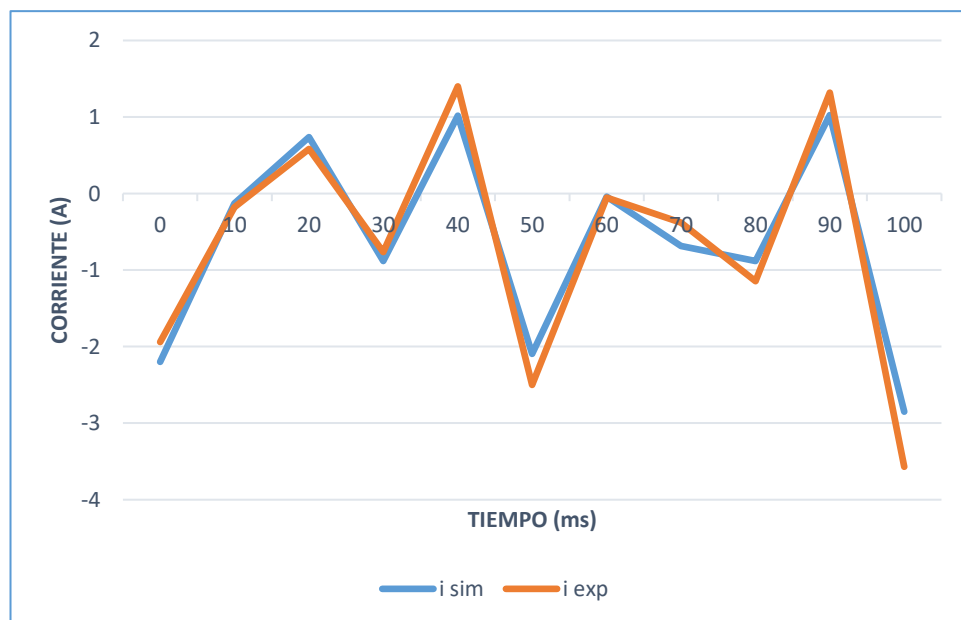


FIGURA 96 GRÁFICA DE PORCENTAJE EN CORRIENTE A VACÍO EN CIRCUITO CON TRANSFORMADOR

En la figura 96 se aprecia las señales con los valores de error que se obtuvieron experimentalmente y simulado con respecto a la corriente a vacío en el circuito con el transformador. Las escalas de tiempo son muy pequeñas que provocan un error más visible entre gráficas.



- **CORRIENTE INRUSH EN EL TRANSFORMADOR (CIERRE DEL INTERRUPTOR)**

TABLA 19 PORCENTAJES DE ERROR EN CORRIENTE INRUSH EN CIRCUITO CON TRANSFORMADOR

Tiempo (ms)	Magnitud Corriente experimental (A)	Magnitud Corriente Simulada (A)	Promedio
0	-2.9	-2.2	24%
10	0.776	0.9941	28%
20	-0.044	-0.06396	45%
30	-0.45	-0.3256	28%
40	1.23	1.648	34%
50	-2.30	-2.851	24%
60	1.67	1.189	29%
70	0.066	0.08475	28%
80	-0.29	-0.3244	12%
90	1.432	1.025	28%
100	-2.1	-2.85	36%
		Total	29%

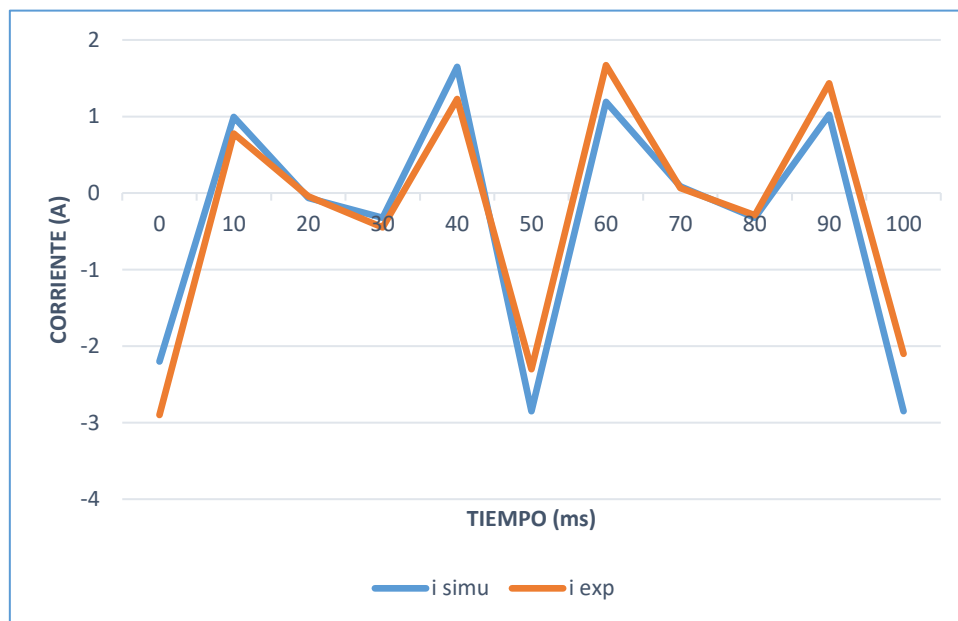


FIGURA 97 GRÁFICA DE PORCENTAJE EN CORRIENTE A VACÍO EN CIRCUITO CON TRANSFORMADOR

En la figura 97 se aprecia las señales con los valores de error que se obtuvieron experimentalmente y simulado con respecto a la corriente Inrush (Corriente Pico) en el circuito con el transformador. Las escalas de tiempo son muy pequeñas que provocan un error más visible entre gráficas

- **TENSIÓN EN EL CIERRE DEL INTERRUPTOR DE POTENCIA**

TABLA 20 PORCENTAJES DE ERROR EN TENSIÓN EN CIRCUITO CON TRANSFORMADOR

Tiempo (ms)	Magnitud Voltaje experimental (V)	Magnitud Voltaje Simulada (V)	Promedio
0	0.0011	0.001	9%
1	-91.67	-93.84	2%
2	-61.4	-69.49	13%
3	-18.4	-19.39	5%
4	32.1	29.16	9%
5	68.70	65.94	4%
6	111.4	110.3	1%
7	0.0011	0.001	9%
8	0.0011	0.001	9%
9	0.0011	0.001	9%
10	0.0011	0.001	9%
Total			7%

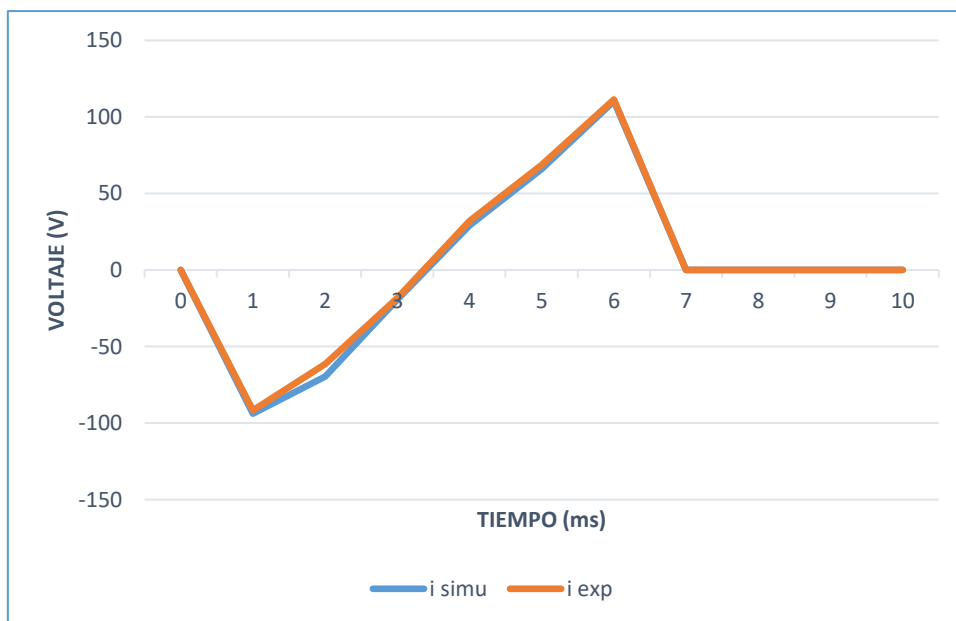


FIGURA 98 GRÁFICA DE PORCENTAJE EN CORRIENTE A VACÍO EN CIRCUITO CON TRANSFORMADOR

En la figura 98 se aprecia las señales con los valores de error que se obtuvieron experimentalmente y simulado con respecto al voltaje en el circuito con el transformador. El interruptor se encontraba en modo operando y las escalas de tiempo son muy pequeñas que provocan un error más visible entre gráficas

## ➤ CIRCUITO RLC CON INTERRUPTOR DE POTENCIA.

- TENSIÓN AL MOMENTO DE APERTURA DEL INTERRUPTOR DE POTENCIA

TABLA 21 PORCENTAJES DE ERROR EN TENSIÓN EN CIRCUITO RLC

Tiempo (ms)	Magnitud Voltaje experimental (V)	Magnitud Voltaje Simulada (V)	Promedio
0	0.0011	0.001	9%
0.5	451	439.7	3%
1	-281.4	-298.5	6%
1.5	-285.5	-313.9	10%
2	439	422.4	4%
2.5	41.80	33.42	20%
3	-417.9	-455.2	9%
3.5	268.6	240.3	11%
4	329.6	310.9	6%
4.5	-402.6	-425.1	6%
5	53.5	45.87	14%
		Total	9%

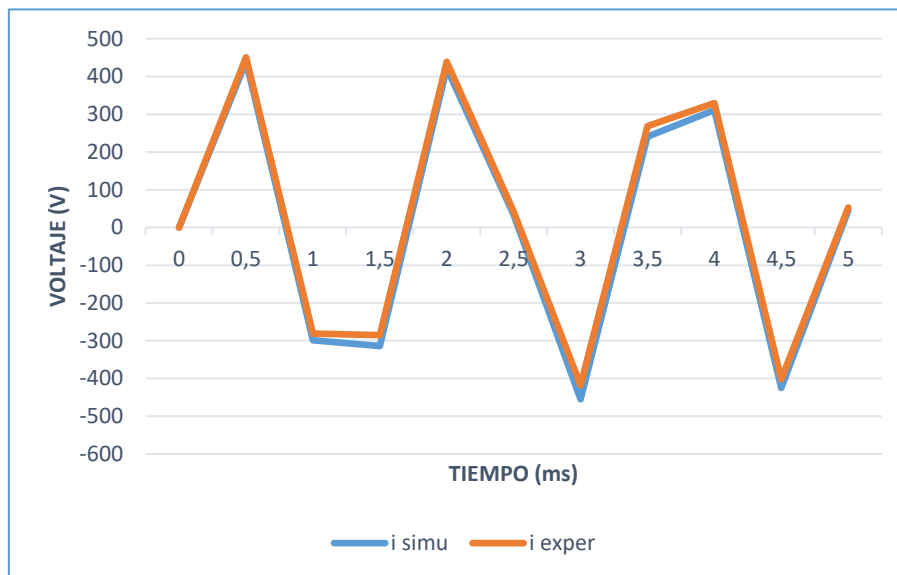


FIGURA 99 GRÁFICAS DE PORCENTAJES EN TENSIÓN DE CIRCUITO RLC

En la figura 99 podemos apreciar las señales con los valores de error que se obtuvieron experimentalmente y simulado con respecto al voltaje en un circuito RLC. Cabe destacar que los porcentajes son altos debido a que el arco es una falla y los tiempos están en escalas muy pequeñas.

- **CORRIENTE AL MOMENTO DE APERTURA DEL INTERRUPTOR DE POTENCIA**

TABLA 22 PORCENTAJES DE ERROR EN CORRIENTE EN CIRCUITO RLC

Tiempo (ms)	Magnitud Corriente experimental (A)	Magnitud Corriente Simulada (A)	Promedio
0	1.05	1	5%
0.5	0.97	0.902	7%
1	1.03	0.9912	4%
1.5	1.2	1.019	15%
2	0.88	0.8151	7%
2.5	0.90	0.8594	5%
3	0.93	0.9146	2%
3.5	0.82	0.7184	12%
4	0.938	0.9117	3%
4.5	0.72	0.6537	9%
5	0.77	0.7125	7%
		Total	7%

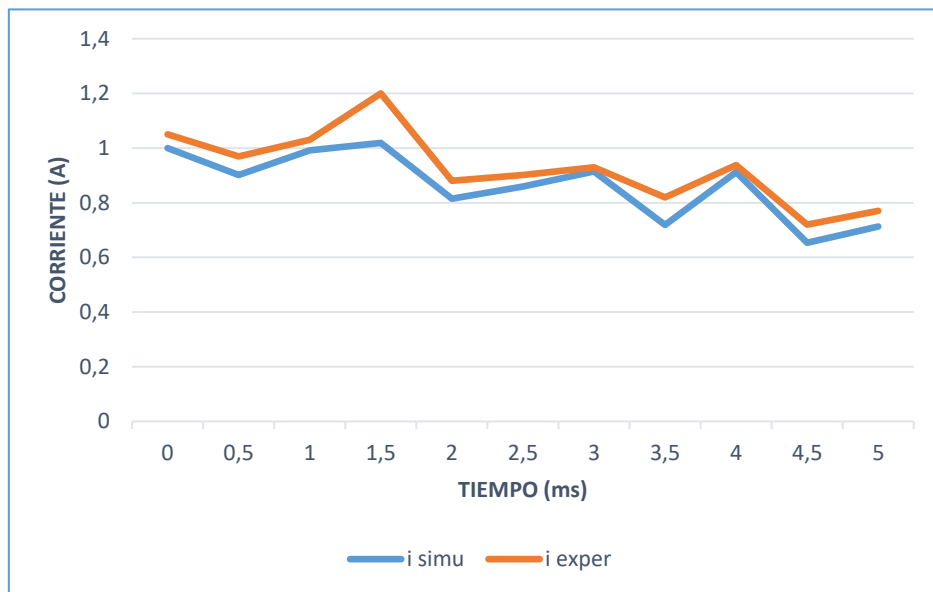


FIGURA 100 GRÁFICA DE PORCENTAJE EN CORRIENTE DE CIRCUITO RLC

En la figura 100 podemos apreciar las señales con los valores de error que se obtuvieron experimentalmente y simulado con respecto a la corriente en un circuito RLC. Cabe destacar que los porcentajes son altos debido a que el arco es una falla y los tiempos están en escalas muy pequeñas.

## BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Terco headoffice and factory, High Voltage Modular Training Set HV 9000, Stockholm, 2000.
- [2] J. Ramírez Vázquez, L. Beltrán Vidal, J. L. Borniquel Baqué y P. Dagá Gelabert, ESTACIONES DE TRANSFORMACION Y DISTRIBUCION. PROTECCION DE SISTEMAS ELECTRICOS, Barcelona (España): ENCICLOPEDIA CEAC DE ELECTRICIDAD, 1988.
- [3] M. B. J. Andrea, R. Landfried, Ph. Teste y S. Weber, P. Schweitzer, Model of an Electric Arc for Circuit Analysis, France, 2016.
- [4] P. Schavemaker y Lou van der Slouis, The Arc Model Blockset, Crete, Greece, 2002.
- [5] A. Iturregi, E. Torres y I. Zamora, Analysis of the Electric Arc in Low Voltage Circuit Breakers, Las Palmas de Gran Canaria (Spain), 2011.
- [6] S. J. Chapman, MAQUINAS ELECTRICAS, McGraw-Hill, 2000.
- [7] C. Rojas Perez, Fitting saturation and hysteresis via arctangent functions. IEEE Power Engineering Review, 2000.
- [8] J. Navarro Rodríguez, Metodología para la aproximación de la característica de saturación en transformadores de potencia del Sistema Eléctrico Nacional, Costa Rica, 2014.
- [9] TRINETICS, CSD SERIES OIL SWITCH MANUAL OR MOTOR OPERATED. trinetics.com, 2011.
- [10] M. <https://www.mathworks.com/discovery/matlab-gui.html?requestedDomain=www.mathworks.com>, Matlab Gui, 2017.
- [11] L. S. H. W. L. Yuan, Simulation of Fault Arc Using Conventional Arc Models, Journal of Energy and Power Engineering, 2013.
- [12] P. B. O. Z. M. B. J. Andrea, The electric arc as a circuit component, 41st Annual Conference of the Industrial Electronics Society, 2015.
- [13] M. A. a. C. Lüders, Numerical arc simulations for low voltage circuit breakers, Czech Republic: XVIIIth Symposium on Physics of switching arc, 2009.
- [14] J. Slepian, Extinction of an A-C. Arc, American Institute of Electrical Engineers , 1928.
- [15] M. Lindmayer, Complete simulation of moving arcs in low-voltage switchgear, Liverpool: XIV Int. Conf. on Gas Discharges and their Applications, 2002.

- [16] G. Z. P. P. D. Bizjak, Circuit-breaker model for digital simulation based on Mayr's and Cassie's differential arc equations, 2004.
- [17] C. WG, Applications of Black Box Modelling to Circuit Breakers, 1993.
- [18] C. Flurschein, Power circuit breaker theory and design, 1982: IEE, Peter Peregrinus Ltd, London.
- [19] A. P. V. Phaniraj, Modeling of Circuit Breakers in the Electromagnetic Transients Program, IEEE Trans. On Power Systems, 1988.
- [20] M. El-Hawary, Power Engineering Letters, IEEE Power Engineering Review, 2000.
- [21] G. W., Modelización de Interruptores eléctricos de potencia, España: Universidad de Cataluña, 2000.
- [22] A. Ebner, Transient transformer inrush currents due to closing time and residual flux measurement-deviations if controlled switching is used (eeug meeting 2007: European emtp-atp conference)–(applications in electrical machines and industry (1)), 2008.