UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Tesis previa a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO

"DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE DOS CONDENSADORES DE 25000pF Y UNA RESISTENCIA DE MEDICION DE 300MΩ, TENSIÓN DE 150kV, PARA EL LABORATORIO DE ALTA TENSION DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, SEDE CUENCA."

AUTORES:

Andrés Fernando Arias Arias
Jefferson Fermín Gutama Valladares

DIRECTOR:

Ing. Flavio Quizhpi P.

Cuenca, Enero del 2015

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

El contenido de esta tesis es de exclusiva responsabilidad de los autores, autorizándose la utilización de la misma, sólo con fines académicos.

A través de la presente declaración cedemos los derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo a la Universidad Politécnica Salesiana, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

Cuenca, Enero del 2015

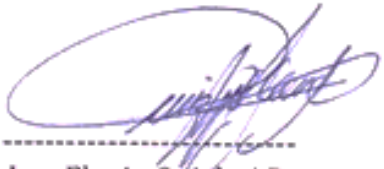
ANDRÉS FERNANDO ARIAS A

JEFFERSON FERMIN GUTAMA V.

Ingeniero FLAVIO QUIZHPI P. Director de Tesis.

CERTIFICA: Que la tesis con el título "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE DOS CONDENSADORES DE 25000pF Y UNA RESISTENCIA DE MEDICION DE 300MΩ, TENSIÓN DE 150kV, PARA EL LABORATORIO DE ALTA TENSION DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA.", ha sido desarrollada por los estudiantes Andrés Fernando Arias Arias y Jefferson Fermín Gutama Valladares, ha sido revisada y asesorada de acuerdo a los requerimientos establecidos en la propuesta inicial y al cronograma definido, por lo que después de reunir los requisitos estipulados en los Documentos Generales e Instructivos de Graduación de la Universidad, autorizo su presentación para los fines legales consiguientes.

Cuenca, Enero del 2015.



Ing. Flavio Quizhpi P.

DEDICATORIA

Primeramente a Dios por darme la vida, el entendimiento, la inteligencia y la fortaleza necesaria para seguir adelante a pesar de las adversidades que se presentan en el camino.

A mis queridos padres Alejandro Arias y Ana Lucia Arias por apoyarme en todo momento, tanto en la parte económica como moral y especialmente espiritual, a mis hermanos David, Diana y Juan Arias por su amistad y compañerismo, a mis tíos y tías, primos y primas en general por la paciencia y la comprensión, a mis queridas abuelitas Ana Guartatanga y Rosa Larriva por la gracia y la oportunidad de tenerles a mi lado, a mis abuelitos Luis Arias y Bernardo Arias a pesar de ya no estar en este mundo me enseñaron el valor y el sentido de la vida y el amor sincero a la familia.

Andrés Fernando Arias Arias

DEDICATORIA.

A José Vicente y María Dorinda, todo lo que he llegado a ser, es gracias a ustedes.

Jefferson Fermín Gutama Valladares

AGRADECIMIENTOS

Al Ing Flavio Qhizhpi. Director del Proyecto de Tesis quien supo brindarnos su confianza, paciencia y tiempo, en la realización de este trabajo.

Al Ing. Pablo Robles, por sus consejos y sugerencias, las cuales permitieron realizar las pruebas de calidad para los elementos construidos del proyecto.

Al personal del laboratorio quienes nos colaboraron muy amablemente.

Al Ing. Diego Carrión y al Ing. Santiago Alvaro por su amable y oportuna colaboración en la realización de las pruebas de factor de disipación (tangente delta) en el laboratorio de Alta Tensión de la U.P.S sede Quito Campus Kennedy Norte.

A todos nuestros amigos y compañeros, que de una u otra forma ayudaron a la realización de este proyecto.

Un agradecimiento especial al Ing. Jorge Padilla por habernos colaborado en el desarrollo de este trabajo.

Tabla de contenidos

DEDICATORIA I

DEDICATORIA. II

AGRADECIMIENTOS III

INTRODUCCIÓN. 1

CAPÍTULO I 3

1. CÁLCULO Y DISEÑO DE UN CONDENSADOR DE IMPULSO DE 25000pF PARA 150kV 3

1.1. Recursos disponibles. 3

1.1.1. Transformador de Pruebas. 4

1.1.2. Panel de Control. 4

1.1.3. Osciloscopio Digital. 6

1.1.4. Puesta a Tierra del Laboratorio. 7

1.1.5. Barras de Conexión y Barras Aislantes. 7

1.1.6. Corona de Conexión y Pedestal de Piso. 8

1.1.7. Diodos. 9

1.1.8. Condensadores. 9

1.1.9. Resistencias. 10

1.1.10. Soporte de Electrodos para Pruebas de Disrupción. 11

1.1.11. Barra de descarga a tierra. 13

1.1.12. Esferas de disrupción y separador de esferas. 14

1.1.13. Interruptor de puesta a tierra. 14

1.2. Proceso de diseño. 15

1.2.1. Factor de Corrección Ka 15

1.2.2. Cálculos de Voltaje. 17

1.3. Simulación del sistema de condensador de alta tensión. 18

1.3.1 Constantes de tiempo. 20

1.3.2 Simulación mediante la herramienta Simulink de Matlab. 21

CAPÍTULO II: 27

2. CÁLCULO Y DISEÑO DE UNA RESISTENCIA DE MEDICION DE 300MΩ PARA 150kV 27

2.1. Recursos disponibles. 27

2.2. Proceso de diseño 27

2.1.1. Resistencia Eléctrica. 27

2.1.2. Parámetros de diseño. 35

2.1.2.1. Factor de Corrección Ka 36

2.1.3. Cálculos de Voltaje. 36

2.1.4. Cálculos de Potencia. 36

2.1.4.1. Calculo de Disipación de Potencia en Corriente Alterna 36

2.1.4.2. Cálculo de Disipación de Potencia en Corriente Continua (Rectificación de Onda Completa) 36

2.3. Simulación del sistema de resistencia de medición en alta tensión. 37

2.3.1 Simulación del comportamiento de la resistencia de medición. 37

CAPITULO III 48

3. CONSTRUCCIÓN DE LOS ELEMENTOS. 48

3.1. Construcción de 2 condensadores de impulso 25000 pF y tensión nominal 150 KV 48

3.1.1. Elección de los condensadores MZC-CT8G-50KV-153M. 48

3.1.2. Hojas de datos. 53

3.1.3. Cuadro de procesos. 54

3.1.4. Proceso mecánico. 55

3.1.5. Cálculo del volumen de aceite aislante para cada capsula. 59

3.1.6. Proceso eléctrico. 59

3.1.7. Prueba de los condensadores MZC-CT8G-50KV-153M. 60

3.1.8. Prácticas del laboratorio de alta tensión con los condensadores de alta tensión diseñados y construidos. 61

3.2. Construcción de la resistencia de medición de 300MΩ. 65

3.2.1. Elección de las resistencias SGP78. 65

3.2.2. Hojas de Datos. 67

3.2.3. Cuadro de Procesos. 71

3.2.4. Proceso Mecánico. 71

3.2.5. Proceso Eléctrico. 75

3.2.6. Prácticas del laboratorio de alta tensión con la resistencia de medición diseñada y construida para el laboratorio. 75

3.3. Pruebas del factor de disipación (tangente delta) en dos condensadores de impulso de 25000pF y una resistencia de medición de 300MΩ 77

3.3.1. Prueba de Tangente Delta o Factor de Disipación en Cables y/o Resistencias. 78

3.3.2. Prueba de Tangente Delta o Factor de Disipación en Condensadores. 79

3.3.3. Factor de Disipación de aislamiento de aparatos típicos. 79

3.3.4. Resultados obtenidos, para condensador tipo. 80

3.3.5. Valores Medidos del Condensador 1 del Proyecto de Tesis. 82

3.3.6. Valores Medidos del Condensador 2 del Proyecto de Tesis. 83

3.3.7. Valores de factor de disipación a 20°C de los condensadores comparados. 85

3.3.8. Valores Medidos de la Resistencia Tipo. 86

3.3.9. Valores Medidos de la Resistencia del Proyecto de Tesis. 88

3.3.10. Valores de factor de disipación a 20°C de las resistencias comparados. 89

3.3.11. Análisis de resultados. 90

3.3.12. Balance económico. 92

CAPÍTULO IV. 94

4 ENSAYO DE LOS CONDENSADORES DE IMPULSO EN ALTA TENSIÓN 94

4.1 Normas. 94

4.1.1 Norma ASTM D-877-87 y D-1816 95

4.1.2 Norma ASTM D 149 98

4.1.3 Norma IEC 60384-1. 99

4.2 Protocolo de pruebas. 100

4.3 Doblador de tensión. 101

4.4 Ensayo del Nivel Básico de Aislamiento (BIL), aplicando doblador de tensión. 102

4.4.1 Ensayo Aisladores de carrete. 103

4.4.2 Ensayo Aisladores de suspensión. 104

CAPITULO V: 107

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 107

5.1 Conclusiones: 107

5.2 Recomendaciones: 110

5.3. Temas Futuros de estudio. 111

Referencias: 112

ANEXOS. 114

Índice de figuras.

Figura. 1.1 Componentes disponibles en el laboratorio. Imagen tomada de [1] 3
Figura. 1.2. Transformador de pruebas. Imagen tomada de [1] 4
Figura. 1.3. Panel de Control 5
Figura. 1.4. Zona de mando del panel de control. Imagen tomada de [1] 6
Figura. 1.5. Osciloscopio del laboratorio. 6
Figura. 1.6. Puesta a tierra y puntos de conexión. Imagen tomada de [1] 7
Figura. 1.7. Barras HV9108; Barras HV9119 y Barra HV9118. 8
Figura. 1.8. Barras Aislantes. 8
Figura. 1.9. HV9109 y HV9110. Imagen tomada de [1] 8
Figura. 1.10. Diodos del Laboratorio de Alta Tensión. 9
Figura. 1.11. Capacitores HV9141 y HV9120 del Laboratorio de Alta Tensión. 10
Figura. 1.12. Condensador HV9130 del Laboratorio de Alta Tensión. 10
Figura. 1.13. Capacitores del laboratorio de Alta Tensión 10
Figura. 1.14. Resistencias del laboratorio de alta tensión. 11
Figura. 1.15. Soporte de electrodos para pruebas de disrupción. 11
Figura. 1.16. Electrodos tipo plato existentes en el laboratorio de Alta Tensión. 12
Figura. 1.17. Electrodos tipo esfera existentes en el laboratorio de Alta Tensión. 12
Figura. 1.18. Electrodos tipo punta existentes en el laboratorio de Alta Tensión 13
Figura. 1.19. Electrodos cilíndricos existentes en el laboratorio de Alta Tensión. 13
Figura. 1.20. Barra de descarga a tierra del Laboratorio de Alta Tensión 13
Figura. 1.21. HV 9125 y separador de esferas HV9126. Imagen tomada de [1] 14
Figura. 1.22. Interruptor de puesta a tierra del Laboratorio de Alta Tensión, imagen tomada de [1] 14
Figura. 1.23. Medición de voltaje alterno en el secundario del transformador del Laboratorio de Alta Tensión. Imagen tomada de [1]. 17
Figura. 1.24. Modelo de circuito equivalente para un condensador, imagen tomada de [2] 19
Figura. 1.25 Circuito a ser simulado. 21
Figura. 1.26 Ecuación del circuito implementado en Simulink. 22
Figura. 1.27 Simulación de la respuesta para condensador base. 23

Figura. 1.28 Captura de osciloscopio de la respuesta para condensador base. 23
Figura. 1.29 Simulación de la respuesta para condensador del laboratorio. 24
Figura. 1.30 Captura de osciloscopio de la respuesta para condensador del laboratorio. 24
Figura. 1.31 Simulación de la respuesta para condensador del proyecto. 25
Figura. 1.32 Captura de osciloscopio de la respuesta para condensador del proyecto. 25
Figura. 2.1. Circuito con resistencia. Imagen tomada de [4] 29
Figura. 2.2. Diagrama Fasorial. 30
Figura. 2.3. Circuito con resistencia en corriente continua. 37
Figura. 2.4. Simulación de circuito con resistencia en C.C. a 10.07kV 38
Figura. 2.5. Voltaje en c.c. medido en la resistencia. 39
Figura. 2.6. Corriente continua medida en la resistencia. 39
Figura. 2.7. Simulación de circuito con resistencia en C.C. a 35.28kV 40
Figura. 2.8. Voltaje en c.c. medido en la resistencia. 40
Figura. 2.9. Corriente continua medida en la resistencia. 41
Figura. 2.10. Simulación de circuito con resistencia en C.C. a 60.03kV 41
Figura. 2.11. Voltaje en c.c. medido en la resistencia. 42
Figura. 2.12. Corriente continua medida en la resistencia. 42
Figura. 2.13. Simulación de circuito con resistencia en C.C. a 85.47kV 43
Figura. 2.14. Voltaje en c.c. medido en la resistencia. 43
Figura. 2.15. Corriente continua medida en la resistencia. 44
Figura. 2.16. Simulación de circuito con resistencia en C.C. a 110.12kV 44
Figura. 2.17. Voltaje en c.c. medido en la resistencia. 45
Figura. 2.18. Corriente continua medida en la resistencia. 45
Figura. 2.19. Simulación de circuito con resistencia en C.C. a 130.66kV 46
Figura. 2.20 Voltaje en c.c. medido en la resistencia. 46
Figura. 2.21. Corriente continua medida en la resistencia. 47
Figura. 3.1 Circuito del condensador de alta tensión. 52
Figura. 3.2 Diagrama eléctrico condensador de alta tensión. 53
Figura. 3.3. Capacitor MZC-CT8G-50KV-153P 53

Figura. 3.4 Cuadro de procesos eléctricos y mecánicos para construir condensador de alta tensión. 55
Figura. 3.5 Disposición interna de los condensadores base. 56
Figura. 3.6. Cuerpo del condensador de alta tensión. 56
Figura. 3.7. Punta 57
Figura. 3.8. Tapa para condensador de alta tensión. 58
Figura. 3.9. Terminal del circuito. 58
Figura. 3.10. Condensador de alta tensión. 58
Figura. 3.11. Llenado de los condensadores de alta tensión 60
Figura. 3.12. Condensador base sumergido en aceite aislante 61
Figura. 3.13.Rectificación de media onda. Imagen obtenida del manual de prácticas del laboratorio de alta tensión, U.P.S Cuenca. 62
Figura. 3.14 Rectificador de media onda en Simulink. 62
Figura. 3.15. Formas de onda obtenidas en la simulación. 63
Figura. 3.16. Circuito para medición de factor de rizado. Imagen obtenida del manual de prácticas del laboratorio de alta tensión, U.P.S Cuenca. 64
Figura. 3.17. Resistencias conectadas en serie 67
Figura. 3.18. Resistencias SGP de METOXFILM especial. 68
Figura. 3.19. Temperatura máxima de operación. 68
Figura. 3.20. Coeficiente de tensión de la resistencia SGP78 69
Figura. 3.21. Dimensiones de la resistencia SGP78. 70
Figura. 3.22. Cuadro de procesos eléctricos y mecánicos. 71
Figura. 3.23. Cuerpo de la resistencia de alta tensión. 72
Figura. 3.24. Punta para la resistencia de alta tensión. 73
Figura. 3.25. Tapa de la resistencia de alta tensión. 73
Figura. 3.26.Terminal del circuito. 74
Figura. 3.27. Terminal hacia la tapa de la resistencia de alta tensión. 74
Figura. 3.28. Ensamblado total de la resistencia de medición. 74
Figura. 3.29. Curvas contrastadas entre la resistencia del Proyecto y la del Laboratorio. 76
Figura. 3.30. Esquema estándar para pruebas de FD. 78
Figura. 3.31. Esquema de pruebas FD, para cables o resistencias. 79

Figura. 3.32. Ajuste de curva y extrapolación para capacitor tipo. 82
Figura. 3.33. Ajuste de curva y extrapolación para capacitor 1 del proyecto. 83
Figura. 3.34. Ajuste de curva para capacitor 2 del proyecto. 85
Figura. 3.35. Comparación entre capacitores, extrapolados. 86
Figura. 3.36. Ajuste de curva para resistencia tipo. 87
Figura. 3.37. Ajuste de curva para la resistencia del proyecto. 89
Figura. 3.38. Comparación entre resistencias, extrapolado a 150 KV. 90
Figura. 4.1. Circuito doblador de tensión. Imagen tomada de [20] 102
Figura. 4.2. Modelo Simulink para circuito doblador. 103
Figura. 4.3. Aislador tipo carrete, ANSI 53-3. 103
Figura. 4.4. Simulación de prueba al aislador ANSI 53.3. 104
Figura. 4.5. Aislador de suspensión ANSI 52-1. 105
Figura. 4.6. Simulación de prueba al aislador ANSI 52-1. 106

Índice de tablas.

Tabla 1.1. Especificaciones del transformador. 4
Tabla 1.2. Descripción del panel de control. 4
Tabla 1.3. Descripción del mando del panel de control. 5
Tabla 1.4. Características del osciloscopio del laboratorio. 6
Tabla 1.5. Características de las barras de conexión. 7
Tabla 1.6.Características de las barras de conexión. 8
Tabla 1.7. Características de la corona y pedestal de conexión. 8
Tabla 1.8. Características de los Diodos del Laboratorio de Alta Tensión. 9
Tabla 1.9. Condensadores disponibles en el Laboratorio de Alta Tensión. 9
Tabla 1.10. Resistencias del laboratorio 10
Tabla 1.11. Características del soporte de electrodos para pruebas de disrupción. 11
Tabla 1.12. Descripción de los electrodos para realización de pruebas. 12
Tabla 1.13. Características de la barra del Laboratorio de Alta Tensión. 13
Tabla 1.14. Características de los condensadores a ser diseñados y construidos, como tesis para el Laboratorio de Alta Tensión. 15
Tabla 1.15. Factores de corrección por altura, ANSI C37.20.2 16
Tabla 1.16. Valores de τ medidos y calculados para capacitores 20
Tabla 2.1. Características de Tipos de Resistencias. 33
Tabla 2.2. Parámetros de la resistencia. 36
Tabla 2.3. Características técnicas de la resistencia SGP78. 37
Tabla 2.4. Resistencia calculada de acuerdo a los valores de voltaje y corriente medidos.. 39
Tabla 2.5. Resistencia calculada de acuerdo a los valores de voltaje y corriente medidos. 41
Tabla 2.6. Resistencia calculada de acuerdo a los valores de voltaje y corriente medidos.. 42
Tabla 2.7. Resistencia calculada de acuerdo a los valores de voltaje y corriente medidos. 44
Tabla 2.8. Resistencia calculada de acuerdo a los valores de voltaje y corriente medidos. 45

Tabla 2.9. Resistencia calculada de acuerdo a los valores de voltaje y corriente medidos. 47
Tabla 3.1. Características principales de las 3 clases de condensadores cerámicos. 50
Tabla 3.2. Dimensiones físicas MZC-CT8G-50KV-153P 54
Tabla 3.3. Información técnica del capacitor MZC-CTG8G-50KV-153P 54
Tabla 3.4 Comparación capacitor 1 del laboratorio vs capacitor 1 del proyecto. 63
Tabla 3.5 Comparación capacitor 2 del laboratorio vs capacitor 2 del proyecto. 64
Tabla 3.6 Rizado para el circuito de media onda. 65
Tabla 3.7. Dimensiones de resistencias para alta tensión. 70
Tabla 3.8.Características técnicas del grilón. 75
Tabla 3.9. Valores Medidos de voltajes y corrientes en la resistencia del laboratorio. 76
Tabla 3.10. Valores Medidos de voltajes y corrientes en la resistencia del proyecto. .. 76
Tabla 3.11. Máximo FD, según coeficiente de temperatura de la cerámica. 77
Tabla 3.12. Factor de disipación de equipos típicos. 80
Tabla 3.13. Información del Elemento de Prueba Condensador Tipo. 81
Tabla 3.14. Datos y valores medidos del condensador tipo. 81
Tabla 3.15. Información del Elemento de Prueba Condensador 1. 82
Tabla 3.16. Datos y valores medidos del condensador 1. 83
Tabla 3.17. Información del Elemento de Prueba Condensador 2. 84
Tabla 3.18. Datos y valores medidos del condensador 2. 84
Tabla 3.19. Comparación de valores de factor de disipación a 20°C de los condensadores. 85
Tabla 3.20. Información del Elemento de Prueba Resistencia Tipo. 86
Tabla 3.21. Datos y valores medidos de la resistencia tipo. 87
Tabla 3.22. Información del Elemento de Prueba Resistencia del Proyecto de Tesis... 88
Tabla 3.23. Datos y valores medidos de la resistencia del proyecto de tesis. 89
Tabla 3.24. Comparación de valores de factor de disipación a 20°C de las resistencias. 90
Tabla 3.25. Plan de inversión del proyecto de tesis. 93
Tabla 4.1. Normativa más utilizada. 95
Tabla 4.2. Normativa ecuatoriana. 95
Tabla 4.3 Resumen para normativa de test para rigidez dieléctrica. 97

Tabla 4.4 Normas para test de rigidez dieléctrica. 99
Tabla 4.5 Valores de flameo ANSI 53.3. 104
Tabla 4.6. Valores medidos para el aislador ANSI 53.3. 104
Tabla 4.7.Valores de flameo ANSI 52.1 106
Tabla 4.8. Valores medidos para aislador ANSI 52-1. 106

INTRODUCCIÓN.

El proyecto desarrollado trata sobre el diseño y construcción de dos condensadores de impulso y una resistencia de medición, para una tensión de 150 KV en corriente continua, las altas tensiones de corriente alterna, corriente continua e impulso, son necesarias para aplicaciones, tales como aceleradores de partículas, componentes de redes de transmisión, pruebas que simulan sobretensiones originadas por descargas atmosféricas, conmutaciones por maniobras, etc.

La Universidad Politécnica Salesiana, sede Cuenca, cuenta con un laboratorio de alta tensión, en el cual, las prácticas desarrolladas consolidan la comprensión de los diferentes fenómenos eléctricos presentes en la naturaleza, sin embargo es necesario incrementar el número de elementos disponibles que posibiliten el montaje de un número mayor de circuitos.

Se parte de las características técnicas de los elementos existentes en el laboratorio (condensadores de impulso y resistencia de medición), que serán cubiertas por los elementos a ser construidos y puestos en operación, considerando el medio donde funcionaran, para un mismo nivel de tensión, el sistema de aislamiento de una locación sobre los 1000 msnm es más robusto que para una locación a nivel del mar.

Con estas pautas se eligen y adquieren los componentes base, ya sea en el mercado nacional o extranjero, luego siguiendo la teoría de circuitos y alta tensión, son dispuestos en conexiones serie y/o paralelo, de tal forma que se cumplan las especificaciones.

Los circuitos realizados, para su protección son introducidos en contenedores cilíndricos (capsulas) aislantes, éstas capsulas se llenan con aceite aislante (para el caso de los condensadores de impulso) o no se llenan (para el caso de la resistencia de medición), de acuerdo a la configuración interna de los componentes base, previniendo disrupciones o descargas eléctricas internas y garantizando una adecuada refrigeración.

Los elementos construidos se prueban integrándolos en los circuitos disponibles en el manual de prácticas del laboratorio de alta tensión, registrando su respuesta a una señal de tipo escalón (condensadores) y aplicando una prueba de factor de disipación (tangente delta), los resultados obtenidos son contrastados con:

- Los valores obtenidos en las simulaciones realizadas en la herramienta informática de Matlab a través de su componente Simulink.
- Los valores admitidos por la norma IEC 60384-8/-21/-9/-22, para el caso de las 2 capsulas de condensador de impulso.
- Los valores de factor de disipación, obtenidos frecuentemente por dispositivos de medición.

Las similitudes entre los valores simulados y los valores medidos al terminar las distintas pruebas de los elementos diseñados y construidos, permiten concluir que los elementos funcionan de acuerdo a lo esperado.

La inversión realizada, es menor en comparación a una adquisición a un proveedor externo, dado que son elementos de laboratorio, su manipulación debe ser realizada con mucho cuidado, evitando movimientos bruscos o golpes fuertes, de tal forma que las estructuras internas en las que se hallan los componentes base, no sufran resquebrajamientos o roturas que inutilizarían al elemento accidentado.

CAPÍTULO I

1. CÁLCULO Y DISEÑO DE UN CONDENSADOR DE IMPULSO DE 25000pF PARA 150kV

A lo largo de este capítulo, se exponen los criterios y requerimientos necesarios para desarrollar el diseño y cálculo de dos condensadores de impulso, aplicables al laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Politécnica Salesiana (UPS), sede Cuenca.

De una manera breve, serán presentados y descritos los diferentes elementos disponibles en el laboratorio, con los cuales se posibilita la realización de diferentes circuitos y pruebas, se incluyen varias simulaciones realizadas con el paquete informático Matlab R2014a, específicamente con la herramienta Simulink, la cual servirá para corroborar el adecuado funcionamiento de un condensador de impulso.

A continuación se presentan los componentes disponibles en el laboratorio, con los cuales se realizan las diferentes pruebas.

1.1.Recursos disponibles.

La Universidad Politécnica Salesiana, sede Cuenca, cuenta con un Laboratorio de Alta Tensión, tal equipamiento es de marca TERCO, sus componentes y características se presentan a continuación.

Figura. 1.1 Componentes disponibles en el laboratorio. Imagen tomada de [1]

1.1.1. Transformador de Pruebas.

Las especificaciones técnicas del transformador del laboratorio, se muestran en la Tabla 1.1 y una fotografía del mismo en la Figura. 1.2

TRANSFORMADOR DE PRUEBAS								
Modelo	**Serie**	**Potencia**	**Frec.**	**Impedancia de Voltaje**	**Conexión**	**Conexión primarios**	**Conexión secundario**	**VRMS Secundario**
HV9105	T-10380	5 KVA, continuos. 10 KVA, durante 1 hora.	60 Hz	5%	220V	Ua con Ub y Va con Vb	U con V	100kV
					440V	Ub con Va		

Tabla 1.1. Especificaciones del transformador.

Figura. 1.2. Transformador de pruebas. Imagen tomada de [1]

1.1.2. Panel de Control.

En la Tabla 1.2, se detallan los instrumentos de medida y control del panel, en la Figura. 1.3 una foto del mismo.

PANEL DE CONTROL		
Modelo	**Elementos**	**Descripción**
HV9103	HV9150	Medición de voltaje alterno (pico)
	HV9151	Medición de voltaje continuo
	HV9152	Medición de voltaje de impulso
	Voltaje	Medición de voltaje en el primario
	Corriente	Medición de corriente en el primario.
	Conectores	Conexión para el osciloscopio y tierra

Tabla 1.2. Descripción del panel de control.

Figura. 1.3. Panel de Control

Continuando con la descripción del panel de control, en la Tabla 1.3, se detalla la zona de mando y en la Figura. 1.4, se tiene una foto de la misma.

MANDO DEL PANEL DE CONTROL	
Color	**Descripción**
Rojo 1	Pulsante de emergencia.
Verde 1	Interruptor de inicio.
Plata	Llave que habilita el panel de control.
Negro 1	Interruptor de bocina.
Amarillo	Pulsante de accionamiento del devanado secundario del transformador para un valor de tensión predefinido.
Azul 1	Perilla de activación del motor de HV9133.
Azul 2	Perilla de activación del motor de HV9126.
Verde 2	Pulsante de activación del primario del transformador.
Verde 3	Pulsante de activación del secundario del transformador.
Rojo 2	Luz piloto para el secundario del transformador.
Rojo 3	Pulsante de paro para el primario del transformador.
Rojo 4	Pulsante de paro para el secundario del transformador.
Verde 4	Luz piloto, para cualquier elemento colocado a tierra.
Negro 2	Pulsante que deshabilita las luces del panel de control.
Rojo 5	Pulsante de precisión, para incremento/reducción de voltaje.
Rojo 6	Pulsante para incremento/reducción de voltaje.

Tabla 1.3. Descripción del mando del panel de control.

Figura. 1.4. Zona de mando del panel de control. Imagen tomada de [1]

1.1.3. Osciloscopio Digital.

La Tabla 1.4 detalla las especificaciones técnicas del osciloscopio existente en el laboratorio, la Figura. 1.5 muestra una fotografía del mismo.

CARACTERÍSTICAS DEL OSCILOSCOPIO	
Modelo	GDS-1102a
Ancho de banda	100 MHz
Frecuencia de muestreo	1 GSa/s Tiempo real
	25 GSa/s Tiempo equivalente
Capacidad de memoria	2 Megas
Escala vertical	2mV-10V
Escala horizontal	1ns-50s
Medidas automáticas	27
Funciones Matemáticas	+, -, x, FFT, FFTrms
Visualización	5.6'' TFT LCD
Interfaz	USB, tarjeta SD.
Soporte multi-idioma, para operación del menú y ayuda.	

Tabla 1.4. Características del osciloscopio del laboratorio.

Figura. 1.5. Osciloscopio del laboratorio.

1.1.4. Puesta a Tierra del Laboratorio.

El laboratorio de alta tensión de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Cuenca, cuenta con una conexión a tierra, a través de un mallado independiente, cuyo valor es de 0.6Ω.

En base a la Figura. 1.6, la cual presenta los puntos de conexión, de izquierda hacia derecha.

Figura. 1.6. Puesta a tierra y puntos de conexión. Imagen tomada de [1]

El primer punto de conexión con el conductor de protección normalizador por código de colores (verde con amarillo), está destinado para el elemento HV9133, el punto central se destina para la puesta a tierra del transformador y el piso donde se colocan los componentes, finalmente, el punto de conexión restante se destina para la jaula de protección, la cual brinda la distancia de seguridad.

1.1.5. Barras de Conexión y Barras Aislantes.

Las barras de conexión con las que se cuenta en el laboratorio, tienen las características mostradas en la Tabla 1.5, una fotografía de las mismas se muestra en la Figura. 1.7.

BARRAS DE CONEXIÓN				
Modelo	**Longitud**	**Diámetro**	**# Unidades**	**Aplicación**
HV9108	67 cm	3.3 cm	6	Conexión superior de elementos
HV 9119	67 cm	3.3 cm	5	Conexión inferior de elementos
HV 9118	58 cm	3.3 cm	1	Conexión inferior para HV9133

Tabla 1.5. Características de las barras de conexión.

Figura. 1.7. Barras HV9108; Barras HV9119 y Barra HV9118.

En la Tabla 1.6, contiene las especificaciones de las barras aislantes disponibles en el laboratorio y en la Figura. 1.8, una fotografía de las mismas.

BARRAS AISLANTES			
Modelo	**Longitud**	**# Unidades**	**Aplicación**
HV9124	67 cm	2	Aislamiento

Tabla 1.6.Características de las barras de conexión.

Figura. 1.8. Barras Aislantes.

1.1.6. Corona de Conexión y Pedestal de Piso.

La Tabla 1.7 muestra las características tanto de las coronas de conexión como de los pedestales de piso y en la Figura. 1.9 una fotografía de los elementos citados.

CORONA DE CONEXIÓN Y PEDESTAL DE PISO		
Modelo	**# Unidades**	**Descripción**
HV9109	11	Corona de conexión superior para circuitos
HV9110	5	Pedestal para conexión de los elementos en el piso

Tabla 1.7. Características de la corona y pedestal de conexión.

Figura. 1.9. HV9109 y HV9110. Imagen tomada de [1]

1.1.7. Diodos.

En la Tabla 1.8, se detallan las especificaciones técnicas de los diodos del laboratorio de alta tensión y en la Figura. 1.10 una fotografía.

DIODOS DEL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN					
Modelo	**Voltaje**	**Corriente**	**Resistencia de polarización directa**	**Resistencia de polarización inversa**	**# Unidades**
HV9111	140kV	20mA	100kΩ	1TΩ	2

Tabla 1.8. Características de los Diodos del Laboratorio de Alta Tensión.

Figura. 1.10. Diodos del Laboratorio de Alta Tensión.

1.1.8. Condensadores.

En la Tabla 1.9 , se detallan las especificaciones técnicas de los condensadores del laboratorio y en la Figura. 1.11, Figura. 1.12, y Figura. 1.13 una fotografía de los elementos disponibles.

CONDENSADORES DEL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN				
Modelo	**Tensión**	**Capacitancia**	**# Unidades**	**Descripción**
HV9141	100kV	100pF	1	Medición de tensión alterna y continua, por partidor capacitivo
HV9120	140kV	1200pF	1	
HV9130	150kV	474.01nF/ Serie V10393	2	Complemento del partidor capacitivo
		482.79nF/ Serie V 12442		
HV9112	140kV	25000pF	2	Condensador de impulso

Tabla 1.9. Condensadores disponibles en el Laboratorio de Alta Tensión.

Figura. 1.11. Capacitores HV9141 y HV9120 del Laboratorio de Alta Tensión.

Figura. 1.12. Condensador HV9130 del Laboratorio de Alta Tensión.

Figura. 1.13. Capacitores del laboratorio de Alta Tensión.

1.1.9. Resistencias.

Las características técnicas de las resistencias del laboratorio de alta tensión se pueden observar en la Tabla 1.10 al igual que una fotografía de las mismas en la Figura. 1.14.

RESISTENCIAS DEL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN			
Modelo	**Tensión**	**Valor Óhmico**	**# Unidades**
HV9113	140kV	280MΩ	1
HV9121	140kV	10MΩ	2
HV9122	140kV	350Ω	1
HV9123	140kV	2400Ω	1

Tabla 1.10. Resistencias del laboratorio

Figura. 1.14. Resistencias del laboratorio de alta tensión.

1.1.10. Soporte de Electrodos para Pruebas de Disrupción.

Las características técnicas del soporte de electrodos para pruebas de disrupción se presentan en la Tabla 1.11 al igual que en la Figura. 1.15 se puede ver una fotografía del mismo.

SOPORTE DE ELECTRODOS PARA PRUEBAS DE DISRUPCIÓN						
Modelo	**Serie**	**Tensión**	**Aplicación**	**Mando**	**Seguridad**	**Indicador Analógico**
HV9133	F-10044	100kV	Pruebas de disrupción de materiales dieléctricos o aire	Manija manual o panel de control	Conexión a Tierra	0 – 85 mm

Tabla 1.11. Características del soporte de electrodos para pruebas de disrupción.

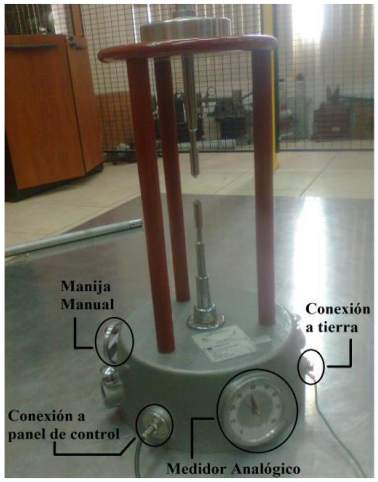


Figura. 1.15. Soporte de electrodos para pruebas de disrupción.

Los electrodos disponibles en el laboratorio de alta tensión para realizar las diferentes pruebas de ruptura dieléctrica empleando el soporte de electrodos se muestra en la Tabla 1.12, mientras que en la Figura. 1.16, Figura. 1.17, Figura. 1.18, Figura. 1.19, se puede ver una fotografía de los mismos.

ELECTRODOS PARA PRUEBAS					
Tipo	**Diámetro**	**Alto**	**Largo**	**# Elementos**	**Extras**
Plato	16.5cm	4cm	----------	2	----------
	5cm	2cm	----------	2	----------
Esfera	10cm	----------	----------	3	----------
	5cm	----------	----------	4	----------
	2cm	----------	----------	2	Extensión de 13cm
Punta	----------	----------	5cm	2	----------
Cilíndricos	1.5cm	----------	5cm	4	----------

Tabla 1.12. Descripción de los electrodos para realización de pruebas.

Electrodos de 16.5cm de diámetro.	Electrodos de 5cm de diámetro.

Figura. 1.16. Electrodos tipo plato existentes en el laboratorio de Alta Tensión.

Electrodos de 9.5cm de diámetro.	Electrodos de 5cm de diámetro.	Electrodos de 1.8cm de diámetro.

Figura. 1.17. Electrodos tipo esfera existentes en el laboratorio de Alta Tensión.

Electrodos de 5cm de largo.

Figura. 1.18. Electrodos tipo punta existentes en el laboratorio de Alta Tensión.

Electrodos de 5cm de largo y 1.3cm de diámetro.

Figura. 1.19. Electrodos cilíndricos existentes en el laboratorio de Alta Tensión.

1.1.11. Barra de descarga a tierra.

Las características de la barra de descarga a tierra se muestran en la Tabla 1.13 como también en la Figura. 1.20 se puede ver una fotografía de la misma.

BARRA DE DESCARGA A TIERRA			
Modelo	Resistencia	Longitud	Distancia de seguridad
HV9107	100Ω desde la punta	250cm	82cm
	≈ 0Ω desde el gancho		

Tabla 1.13. Características de la barra del Laboratorio de Alta Tensión.

Figura. 1.20. Barra de descarga a tierra del Laboratorio de Alta Tensión.

1.1.12. Esferas de disrupción y separador de esferas.

El modelo de las esferas de disrupción y el separador de esferas son, HV9125 y HV9126, respectivamente, estos elementos permiten realizar las pruebas de disrupción a través de un impulso generado. El separador se conecta al HV9125 del panel de control para ser comandado. En la Figura. 1.21, se muestra una fotografía de los mismos.

Figura. 1.21. HV 9125 y separador de esferas HV9126. Imagen tomada de [1]

1.1.13. Interruptor de puesta a tierra.

El modelo del interruptor de puesta a tierra es el HV9114, este hace contacto con el electrodo HV9138, su fotografía es la Figura. 1.22 , sirve para aterrar los elementos que estén conectados al mismo, una vez que se des energice el circuito a través del panel de control.

Figura. 1.22. Interruptor de puesta a tierra del Laboratorio de Alta Tensión, imagen tomada de [1]

1.2.Proceso de diseño.

El diseño y cálculo, para los condensadores de impulso, toman como base las características técnicas de los elementos existentes en el Laboratorio de Alta Tensión, las cuales se detallan en las siguientes secciones.

Las características de los condensadores a ser diseñados y construidos se detallan en Tabla 1.14.

Características de los condensadores de impulso a ser construidos.	
DC y voltajes de impulso.	150 KV.
Capacitancia	25 nF (25000 pF)

Tabla 1.14. Características de los condensadores a ser diseñados y construidos, como tesis para el Laboratorio de Alta Tensión.

1.2.1. Factor de Corrección (K_a)

La protección de elementos que trabajan con altas tensiones dependen del lugar en donde se desarrolle su operación habitual, dependiendo de la altura, las cualidades dieléctricas son afectadas y por ende los rangos eléctricos de funcionamiento, debido a la reducción de la densidad del aire (presión atmosférica).

Las condiciones normales de operación se han definido por los estándares constructivos IEC y ANSI, considerando variables y rangos de temperatura del medio ambiente, altitud de operación, humedad y radiación solar, según la norma IEC 60071-2

$$K_a = e^{m\left(\frac{H}{8150}\right)}$$

Ecuación 1.1 Factor de corrección por altitud.

Donde:

H = es la altura sobre el nivel del mar (en metros).

m = 1 constante para tensiones de impulso tipo rayo.

En promedio Cuenca se encuentra a 2450 msnm, con lo cual el valor de K_a es:

$$K_a = e^{1\left(\frac{2450}{8150}\right)} = 1.35$$

Si ahora se considera el estándar ANSI C37.20.2-1986, los factores de corrección se muestran en Tabla 1.15.

Altitud (m)	Altitud (ft)	ACF for dielectric withstand voltage	ACF for continuous current
1000	3300	1.00	1.00
1200	4000	0.98	1.00
1500	5000	0.95	0.99
1800	6000	0.92	0.99
2000	6600	0.91	0.99
2100	7000	0.89	0.98
2400	8000	0.86	0.97
2700	9000	0.83	0.97
3000	10000	0.80	0.96
3600	12000	0.75	0.95
4000	13000	0.72	0.94
4300	14000	0.70	0.94
4900	16000	0.65	0.925
5500	18000	0.61	0.91
6000	20000	0.56	0.90

Tabla 1.15. Factores de corrección por altura, ANSI C37.20.2

De la Tabla 1.15, para una altitud de 2400 m, el factor de corrección es de 0.86; obtenido por la norma IEC, será usado para determinar el valor de tensión que deberán soportar los elementos construidos.

El valor de factor de corrección obtenido por el estándar ANSI, será usado para dimensionar los componentes internos de las capsulas.

1.2.2. Cálculos de Voltaje.

Para el desarrollo de los cálculos se consideró que, todo el valor de tensión disponible en el secundario del transformador, estaría disponible luego de los elementos semiconductores, a los que se los considerará como dispositivos ideales.

Como dato técnico del manual del laboratorio de alta tensión de la U.P.S sede Cuenca, se tuvo un voltaje $V_{RMS} = 100kV$, como medida de protección se realizó un sobredimensionamiento de la tensión considerando para ello el voltaje pico (V_P) en el desarrollo de los cálculos.

$$V_P = V_{RMS} * \sqrt{2}$$

Ecuación 1.2 Voltaje pico.

$$V_P = 100kV * \sqrt{2}$$

$$V_P = 141.421kV$$

Al realizar la medición del voltaje en el secundario se tuvo como resultado un $V_{RMS} = 113.5kV$, el circuito que se empleó se muestra en la Figura. 1.23.

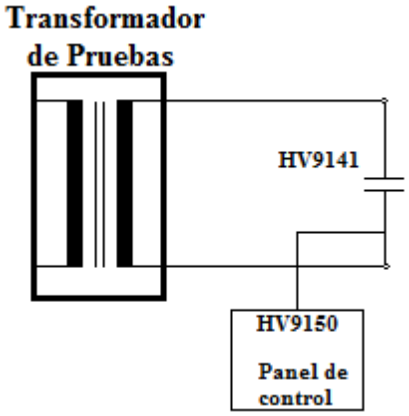


Figura. 1.23. Medición de voltaje alterno en el secundario del transformador del Laboratorio de Alta Tensión. Imagen tomada de [1].

En tal virtud los resultados obtenidos se ven afectados, por lo cual es necesario realizar un nuevo cálculo de V_P.

$$V_P = V_{RMS} * \sqrt{2}$$

Ecuación 1.3 Voltaje pico (medido).

$$V_P = 113.5kV * \sqrt{2}$$

$$V_P = 160.513kV$$

Todos los elementos que operen sobre los 1000 msnm, deben considerar un factor de corrección K_a, para este caso, $K_a = 1.35$ por lo cual V_P, es[1]:

$$V_P = V_{RMS} * \sqrt{2} * K_a$$

Ecuación 1.4 Voltaje pico por corrección de altitud.

$$V_P = 113.5kV * \sqrt{2} * 1.35$$

$$V_P = 216.69kV$$

Con este valor de tensión, se realizan los cálculos necesarios para determinar el número de condensadores internos en cada capsula, de las 2 que son parte del proyecto de tesis, la selección del modelo de condensador MZC-CT8G-50KV-153M y el proceso de construcción se describen en el capítulo 3, sección 3.1.1.

1.3.Simulación del sistema de condensador de alta tensión.

"El condensador, es un dispositivo pasivo, utilizado en electricidad y electrónica, capaz de almacenar energía sustentando un campo eléctrico."[2]

Está formado por un par de superficies conductoras, generalmente en forma de láminas o placas, separadas por un material aislante o por el vacío.

Las placas, sometidas a una diferencia de potencial, adquieren una determinada carga eléctrica, positiva y negativa, esta propiedad se la llama capacidad del condensador, se mide en Faradios, y está en función del dieléctrico, de la forma geométrica y

[1] Véase sección 1.2.1
[2] http://es.wikipedia.org/wiki/Condensador_eléctrico

dimensiones del componente. Puede variar con la humedad, temperatura, vibraciones, presión e incluso con el nivel de voltaje aplicado. [2]

Un condensador real, además de una capacidad, presenta también resistencia e inductancia, que corresponden a los terminales y estructura del componente. Un modelo del circuito equivalente se puede observar en la Figura. 1.24, [2]

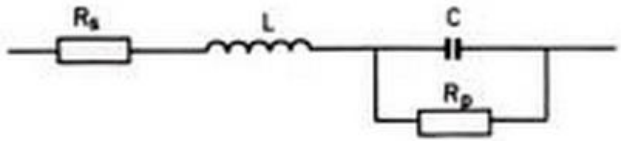


Figura. 1.24. Modelo de circuito equivalente para un condensador, imagen tomada de [2]

Donde:

Rs Resistencia de los terminales, placas y contactos.

L Inductancia de los terminales y placas.

Rp Resistencia de fugas del dieléctrico y encapsulado.

C Capacidad del condensador

La impedancia real esta expresada por:

$$Z = ESR + \frac{1}{jwC_e}$$

Ecuación 1.5. Impedancia real para un condensador, [2]

Donde:

$ESR = \frac{R}{(1 + w^2C^2R^2)}$ Resistencia equivalente serie (ESR) (mayor siempre que Rs).

Ce Capacidad equivalente.

Dado que Rp es suficientemente grande:

$$ESR \approx R_s$$

En corriente continua, el modelo se reduce a un circuito RC, la presencia de la resistencia serie equivalente (ESR) significa que existirá disipación de energía, reflejada en un aumento de la temperatura.

1.3.1 Constantes de tiempo.

Todo circuito resistor capacitor en serie, se puede describir en términos de constantes de tiempo (τ), Ecuación 1.6.

$$\tau = RC$$

Ecuación 1.6. Constante de tiempo para un circuito RC.

Donde

- τ Constante de tiempo, expresada en segundos.
- R Resistencia en ohms.
- C Capacitancia en faradios.

Se debe tener en cuenta, las siguientes observaciones.

- Un capacitor se carga al 99.3% de su voltaje de alimentación, en un periodo de 5 constantes de tiempo. [3]
- Un capacitor se carga al 63% de su voltaje de alimentación, en una constante de tiempo. [3]

Con esta información y mediante experimentación, se calcula los valores de resistencia para un condensador base, un condensador del laboratorio y un condensador del proyecto de tesis.

Los resultados se presentan en la Tabla 1.16

τ= 600 ns			
	Capacitor Base C = 15000 pF	**Capacitor Laboratorio C = 25000 pF**	**Capacitor Proyecto C = 25000 pF**
C_{medida} (pF)	14500	24000	25800
$R_{calculada}$ (Ω)	41.38	25	23.25

Tabla 1.16. Valores de τ medidos y calculados para capacitores.

1.3.2 Simulación mediante la herramienta Simulink de Matlab.

El circuito a ser simulado, mediante la obtención de su ecuación diferencial es el mostrado en la Figura. 1.25.

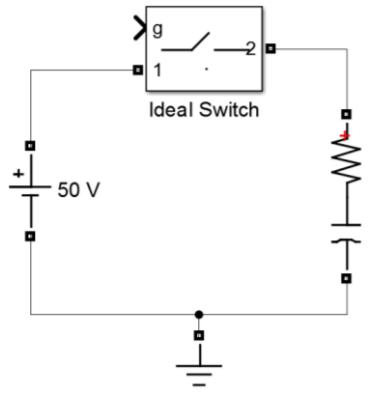


Figura. 1.25 Circuito a ser simulado.

Aplicando la LVK, al circuito serie.

$$v = Ri(t) + \frac{1}{C}\int i(t)dt + V_{C(t=0)}$$

Ecuación 1.7. Ecuación para circuito RC

$$V_{C(t=0)} = 0$$

Reordenando para i (t).

$$i(t) = \left[v - \frac{1}{C}\int i(t)dt\right] * \frac{1}{R}$$

Ecuación 1.8 Ecuación para la corriente en el circuito RC.

Aplicando la transformada de Laplace.

$$\frac{V}{s} = RI(s) + \frac{1}{C} * \frac{I(s)}{s}$$

$$\frac{V}{Rs} = I(s) + \frac{I(s)}{RCs}$$

Haciendo $\alpha = \frac{1}{RC}$

$$\frac{V}{Rs} = I(s)\left[1 + \frac{\alpha}{s}\right]$$

$$I(s) = \frac{V}{R(s+\alpha)}$$

Aplicando la transformada inversa de Laplace.

$$i(t) = \frac{V}{R} e^{\left(\frac{-t}{RC}\right)}$$

Ecuación 1.9. Valor de corriente para el circuito RC.

Por medio de la Ecuación 1.9, se calcula el voltaje en el condensador.

$$V_c = \frac{1}{C}\int i(t)dt$$

$$V_c = \frac{1}{C}\int \frac{V}{R} e^{\left(\frac{-t}{RC}\right)} dt$$

$$V_c = \frac{V}{RC}\int e^{\left(\frac{-t}{RC}\right)} dt$$

$$V_c = V\left(1 - e^{\left(\frac{-t}{RC}\right)}\right)$$

Ecuación 1.10. Valor de voltaje en el condensador.

El modelo en Simulink para la Ecuación 1.8 se muestra en la Figura. 1.26.

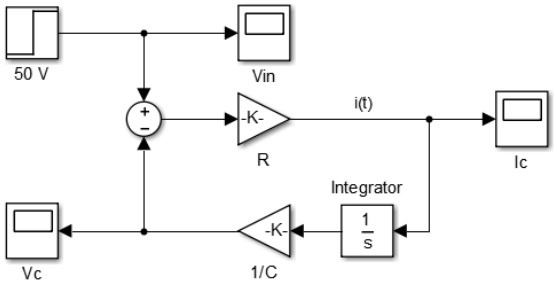


Figura. 1.26 Ecuación del circuito implementado en Simulink.

1.3.2.1Régimen transitorio.

En la Figura. 1.27, Figura. 1.29 y Figura. 1.31 se muestran las respuestas simuladas de los diferentes condensadores a una señal de tipo escalón.

Gráficas obtenidas para simulación y medición de la respuesta del condensador base.

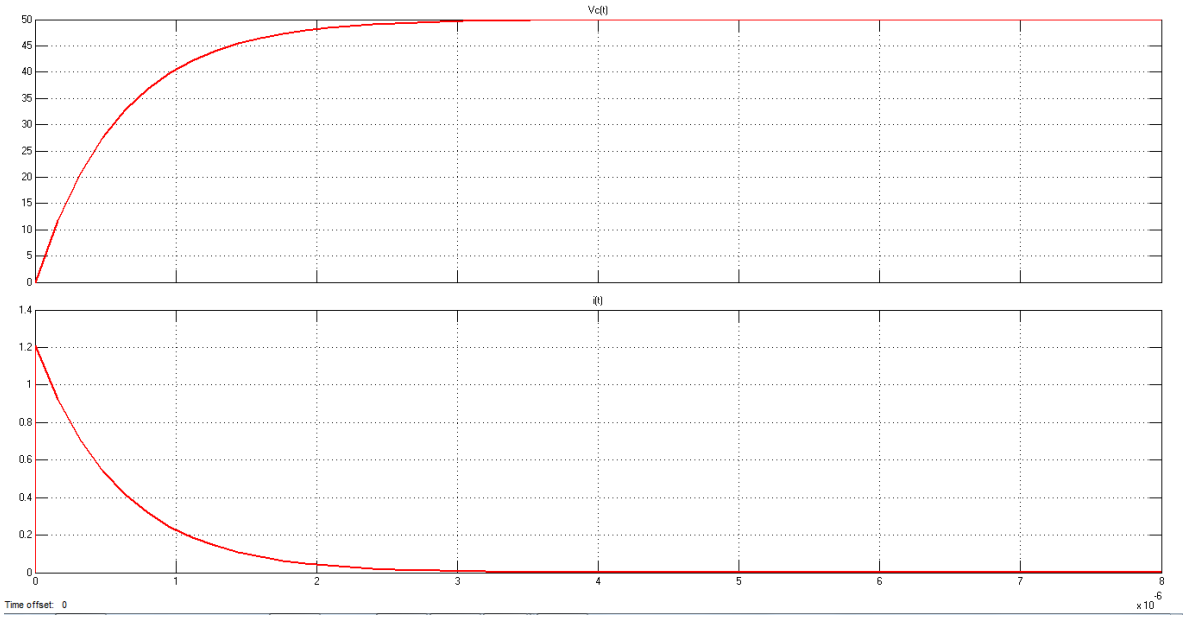


Figura. 1.27 Simulación de la respuesta para condensador base.

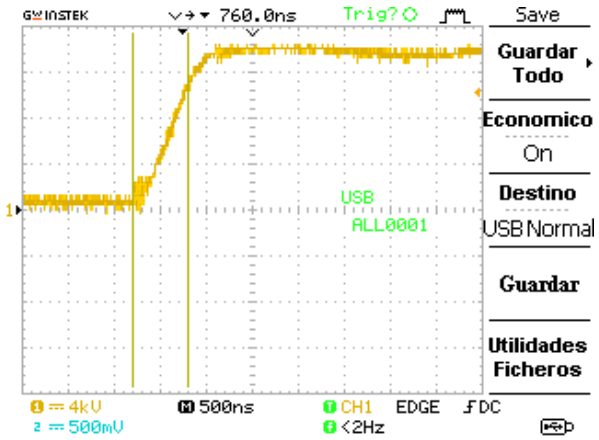


Figura. 1.28 Captura de osciloscopio de la respuesta para condensador base.

Gráficas obtenidas para simulación y medición de la respuesta del condensador del laboratorio.

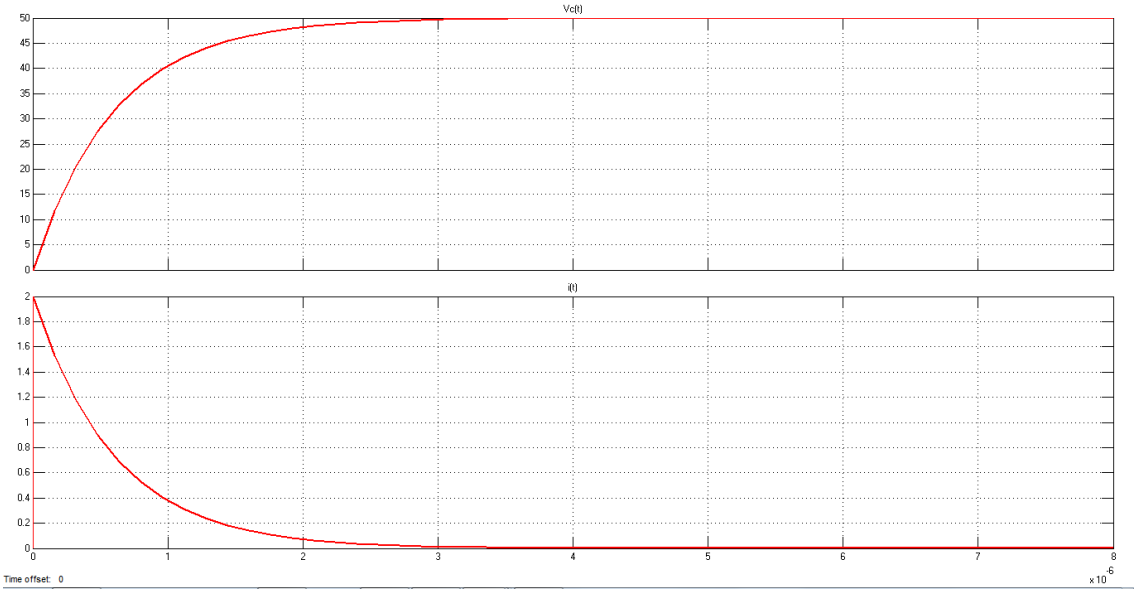


Figura. 1.29 Simulación de la respuesta para condensador del laboratorio.

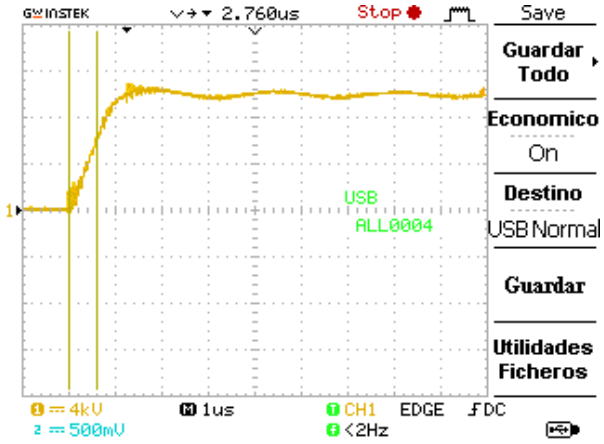


Figura. 1.30 Captura de osciloscopio de la respuesta para condensador del laboratorio.

Gráficas obtenidas para simulación y medición de la respuesta del condensador del proyecto.

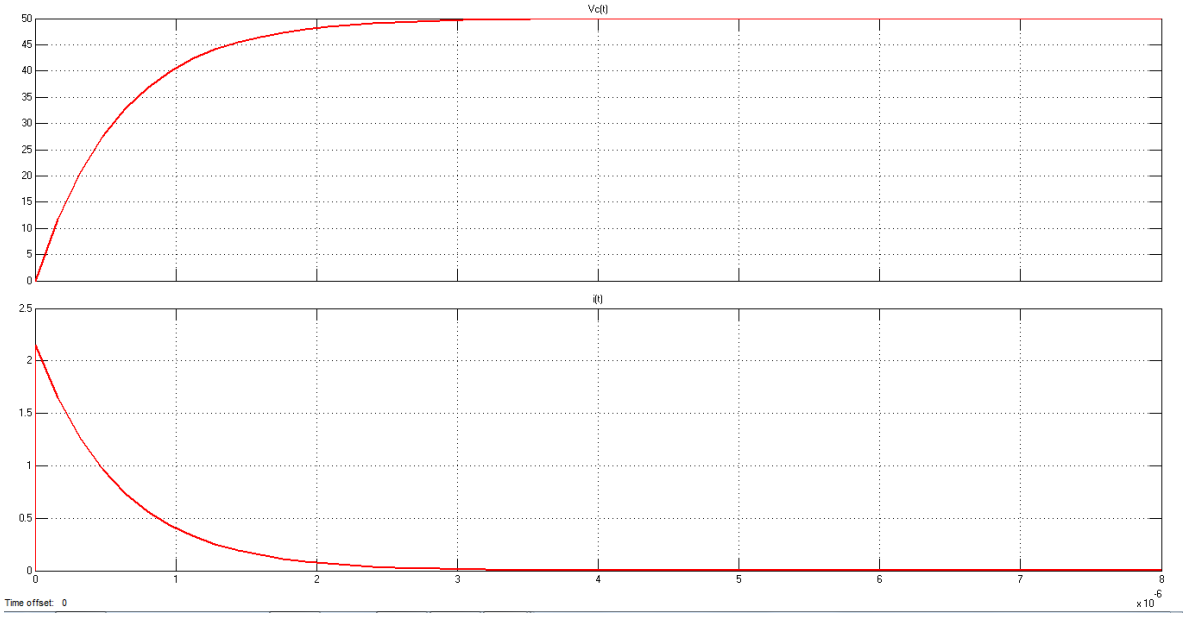


Figura. 1.31 Simulación de la respuesta para condensador del proyecto.

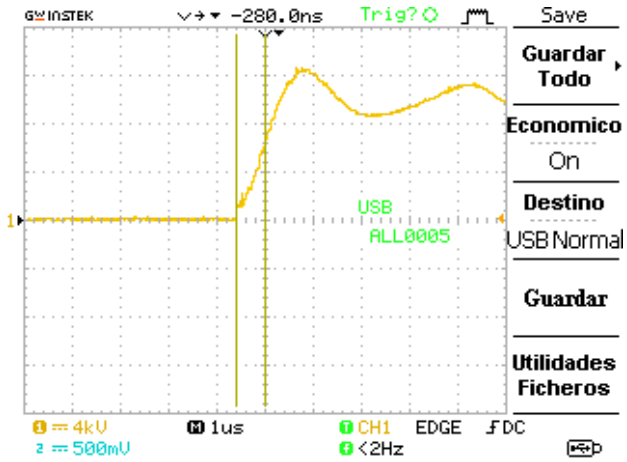


Figura. 1.32 Captura de osciloscopio de la respuesta para condensador del proyecto.

1.3.2.2Régimen estable.

Para los 3 condensadores, cuya intensidad y tensión, se hallan descritas por la Ecuación 1.9 y Ecuación 1.10.

En régimen permanente, con t = infinito, se tiene:

$$i(t) = \frac{V}{R} e^{\left(\frac{-t}{RC}\right)}$$

$$i(inf) = \frac{V}{R} * \frac{1}{e^{\left(\frac{inf}{RC}\right)}}$$

$$i(inf) = 0$$

El voltaje en el condensador en régimen permanente es.

$$V_c = V\left(1 - e^{\left(\frac{-t}{RC}\right)}\right)$$

$$V_c = V\left(1 - \frac{1}{e^{\left(\frac{t}{RC}\right)}}\right)$$

$$V_c = V\left(1 - \frac{1}{e^{\left(\frac{inf}{RC}\right)}}\right)$$

$$V_c = V$$

CAPÍTULO II:

2. CÁLCULO Y DISEÑO DE UNA RESISTENCIA DE MEDICION DE 300MΩ PARA 150kV

A lo largo de este capítulo, son expuestos los requerimientos, tanto mecánicos como eléctricos, que deben ser satisfechos para una resistencia de medición, destinada al Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca.

Las especificaciones que deben ser tomadas en consideración, están en función de las exigencias propias de la aplicación o el circuito de prueba armado.

A continuación se presentan los componentes disponibles en el laboratorio, con los cuales se realizan las diferentes pruebas.

2.1. Recursos disponibles.

Los componentes disponibles en el laboratorio, con los cuales se realizan las diferentes pruebas, son los mismos que los expuestos en el capítulo 1, sección 1.1

2.2. Proceso de diseño

2.1.1. Resistencia Eléctrica.

La resistencia eléctrica descubierta por Georg Simon Ohm en 1827, tiene una similitud conceptual a la fricción en la física mecánica. La unidad de la resistencia en el Sistema Internacional (S.I.) de Unidades es el ohmio (Ω); para su medición en la práctica existen varios métodos, entre los que se encuentra el uso del ohmímetro, su cantidad recíproca es la conductancia, medida en Siemens (S). [4]

La resistencia de cualquier objeto depende de su geometría, longitud (l) en metros (m) y área o sección (S) en metros cuadrados (m^2), de su resistividad (ρ) en ohmios*metro ($\Omega * m$) que está en función del material y de la temperatura (T) a la cual se encuentra sometido el objeto.

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}$$

De acuerdo con la ley de Ohm la resistencia de un material puede definirse como la razón entre la caída de tensión y la corriente que fluye en dicha resistencia, así: [4]

$$R = \frac{V}{I}$$

Donde:

R = resistencia en ohmios (Ω).

V = diferencia de potencial en voltios (V).

I = intensidad de corriente en amperios (A).

La resistencia eléctrica puede entenderse como la oposición que presentan los objetos conductores al paso de la corriente eléctrica, en régimen continuo y estacionario, esto significa que un flujo constante de corriente se mantiene por la única presencia de un campo eléctrico. [5]

La cuantificación de la resistencia eléctrica es posible a través del cociente entre la diferencia de potencial (voltaje) presente en los extremos del elemento eléctrico tratado y la intensidad de la corriente que lo atraviesa, según la ley de Ohm. [5]

Si la fuente de alimentación es alterna, la resistencia eléctrica se define como la parte real del cociente complejo de la tensión y la corriente.

La resistencia eléctrica, cambia su valor, dependiendo de la fuente de alimentación (C.C. ó C.A.), siendo de menor valor cuando la frecuencia se eleva, esto debido al efecto pelicular. [2]

La resistencia eléctrica de un objeto, material o componente, da la pauta de cuanta energía eléctrica se convierte en energía térmica, cuando es atravesado por una intensidad de corriente eléctrica.

El valor de la resistencia de un objeto conductor, depende de factores físicos propios de cada material, entre los cuales están:

- La resistividad, misma que depende en gran medida de la temperatura.
- El número de ensayos o estrés, al cual se halle sometido.
- La humedad.

- Intensidad de diferentes radiaciones electromagnéticas.
- Las dimensiones y el estado cristalino o físico del material como sus impurezas.
- La frecuencia.
- La presión.

Aprovechando estas dependencias es posible desarrollar dispositivos de protección a transitorios, como también diversos transductores. [2]

2.1.1.1. Comportamientos Ideales y Reales de la Resistencia.

Se considera como elemento pasivo a una resistencia ideal que pierde energía en forma de calor según la ley de Joule. Constituye una dependencia proporcional entre la corriente que la atraviesa y el voltaje medible en sus terminales, ley de Ohm: [4]

$$u(t) = R \cdot i(t)$$

Donde:

$i(t)$ = corriente eléctrica que atraviesa la resistencia de valor R.

$u(t)$ = diferencia de potencial que se origina.

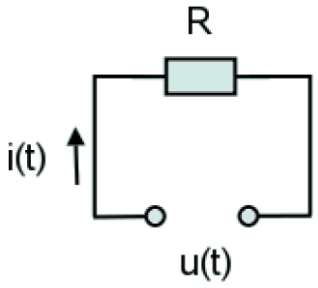


Figura. 2.1. Circuito con resistencia. Imagen tomada de [4]

2.1.1.2.1. **Comportamiento en Corriente Continua (C.C.)**

En corriente continua (C.C.), una resistencia real se comporta como si fuera ideal, convirtiendo la energía eléctrica en calor (efecto Joule). La ley de Ohm para corriente continua establece que: [4]

$$R = \frac{V}{I}$$

Donde:

R = resistencia en ohmios (Ω).

V = diferencia de potencial en voltios (V).

I = intensidad de corriente en amperios (A).

2.1.1.2.2. Comportamiento en corriente alterna (C.A.)

En corriente alterna (*C.A.*), a bajas frecuencias se observa que una resistencia real se comportará de forma parecida a como lo haría en corriente continua (C.C.). En altas frecuencias la resistencia crece en medida en la que la frecuencia aplicada aumenta, lo que se explica por los efectos inductivos que producen los materiales que conforman la resistencia real.

Para analizar los circuitos, la resistencia real se sustituye por una asociación serie formada por una resistencia ideal y por una bobina ideal, aunque a veces también se les puede añadir un condensador ideal en paralelo con dicha asociación serie. En los conductores, aparecen otros efectos como es el efecto pelicular. [4]

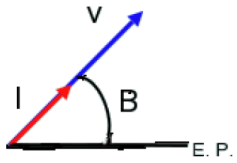


Figura. 2.2. Diagrama Fasorial.

Se considera una resistencia R, (Figura. 2.1), a la que se aplica una tensión alterna de valor:

$$u(t) = V_0 \cdot \text{sen}(\omega t + \beta)$$

De acuerdo con la ley de Ohm circulará una corriente alterna de valor:

$$i(t) = \frac{u(t)}{R} = I_0 \cdot sen(\omega t + \beta)$$

Donde:

$$I_0 = \frac{V_0}{R}$$

Obteniendo así una función senoidal para la corriente, que está en fase con la tensión aplicada (Figura. 2.2).

Si se representa el valor eficaz de la corriente obtenida en forma polar:

$$\vec{I} = I \measuredangle \beta$$

Operando matemáticamente:

$$\vec{I} = \left(\frac{V}{R}\right)_{\measuredangle \beta} = \frac{V \measuredangle \beta}{R \measuredangle 0°}$$

De donde se deduce que en los circuitos de C.A. la resistencia puede considerarse como una magnitud compleja con parte real y sin parte imaginaria, cuya representación binómica y polar serán:

$$\vec{R} = R + 0j = R \measuredangle 0°$$

2.1.1.2. Influencia de la temperatura.

El cambio de la temperatura produce una variación en la resistencia. En la mayoría de los metales sube su resistencia al aumentar la temperatura, y en otros elementos, como el carbono o el germanio la resistencia disminuye. [4]

En algunos materiales la resistencia llega a ser nula cuando la temperatura baja lo suficiente. [4]

Para temperaturas no muy elevadas, la resistencia a cierta temperatura (R_T), viene dada por la expresión: [4]

$$R_T = R_0 \cdot \left(1 + \alpha \cdot (T - T_0)\right)$$

Donde:

R_0 = Resistencia de referencia a la temperatura T_0.

α = Coeficiente de temperatura. Para el cobre $\alpha = 0.00393$

T_0 = Temperatura de referencia en la cual se conoce R_0.

2.1.1.3. Potencia que disipa una resistencia.

Una resistencia pierde en calor una cantidad de potencia cuadráticamente proporcional a la intensidad que la atraviesa y a la caída de tensión que aparece en sus terminales. [4]

Comúnmente, la potencia disipada por una resistencia, así como la potencia disipada por cualquier otro dispositivo resistivo, se puede hallar mediante:

$$P = V \cdot I$$

También se puede utilizar la ley de Joule para el cálculo de la potencia disipada:

$$P = R \cdot I^2$$

O también:

$$P = \frac{V^2}{R}$$

Observando las dimensiones del cuerpo de la resistencia, las características de conductividad de calor del material que la forma y que la recubre, y el ambiente en el cual está pensado que opere, el fabricante calcula la potencia que es capaz de disipar cada resistencia como componente discreto, sin que el aumento de temperatura provoque su destrucción. Esta temperatura de fallo puede ser muy distinta según los materiales que se utilicen. [4]

2.1.1.4. Tipos de Resistencias.

El objetivo de una resistencia es producir una caída de tensión, la cual es proporcional a la corriente que la atraviesa; según la ley de Ohm. El valor de la resistencia idealmente debería ser constante, independiente del tiempo, temperatura, corriente y tensión al que está siendo sometida y si bien las resistencias actuales se aproximan mucho a la ideal, estas sufren variaciones en su valor debido a las causas ya mencionadas. [6]

Por su composición, podemos distinguir varios tipos de resistencias (Tabla 2.1):

- De hilo bobinado.
- Carbón prensado.
- Película de carbón.
- Película metálica.
- Película óxido metálico.
- Metal vidriado.

Características Tipos de Resistencia					
	Constitución	**Estabilidad Térmica**	**Coeficiente de temperatura**	**Disipación de Potencia**	**Tolerancia**
De Hilo Bobinado	Conductor bobinado en forma de espiral sobre un sustrato cerámico	Si	Extremadamente pequeño	Desde 10W a 400W	Baja del 0.25%
Carbón Prensado	Grafito en polvo prensado hasta formar un tubo	No	Bajo	Desde 0.25W a 4W	Muy elevada hasta un 10%
Película de Carbón	Capa de carbón sobre un tubo cerámico como sustrato	Si	Elevado	Hasta 2W	Del ±1% y ±2%
Película Metálica	Capa de metal sobre un tubo cerámico como sustrato	Si	Muy pequeño 50ppm/°C	Hasta 6W	Del ±1% al ±5%
Película Óxido Metálico	Capa de óxido metálico sobre un tubo cerámico como sustrato	Si	Bueno	Desde 0.25W en adelante	Del ±1% al ±2%
Metal Vidriado	Capa de vidrio con polvo metálico sobre un tubo cerámico como sustrato	Si	No muy bueno 150 a 250ppm/°C	Hasta 3W	Del ±1%

Tabla 2.1. Características de Tipos de Resistencias.

2.1.1.5. Construcción de elementos para circuitos de alto voltaje.

La mayor parte del equipo para experimentos de alto voltaje, son configurados para un "ambiente normal", sin adecuaciones, como las requeridas para un cuarto limpio usado en la industria.

Las dimensiones necesarias para los elementos dependen del nivel de voltaje al cual trabajaran, adicionalmente se debe considerar la disipación de perdidas, de tal forma que se prevengan sobrecalentamientos.

2.1.1.7.1. Resistencias para alto voltaje.

Las resistencias para alto voltaje son requeridas como resistencias de carga, descarga, amortiguación o medición, sin embargo los requerimientos de precisión, capacidad de carga térmica y fortaleza dieléctrica pueden variar.

En aplicaciones con altas demandas térmicas, son adecuadas resistencias sumergidas en agua con electrodos a prueba de oxidación, contenidos en un tubo flexible o un cilindro de material aislante.

Los valores de resistencia dependen de la longitud y sección del contenedor, pudiendo ser modificados sobre un amplio rango, al usar aditivos en agua destilada o potable, con valores de 105 Ω*cm, y desde 102 hasta 103 Ω*cm, respectivamente [7].

Con respecto a la estabilidad de estas resistencias, su valor esta por un ±10% por lo que son aplicables donde se necesiten precisiones moderadas, por ejemplo como resistencias limitadoras de corriente en circuitos de carga, también para investigaciones en las cuales sea necesario determinar los límites de carga térmica en generadores de voltaje para pruebas.

Una mayor estabilidad en el valor de resistencia puede lograrse con resistencias liquidas construidas con Cu_2SO_4.

Una adecuada forma de construcción es conectar varias resistencias de bajo voltaje en serie, con la precaución de que los elementos sean ordenados de tal forma, que un voltaje externo sea distribuido lo más uniformemente posible.

En resistencias de capa o compuestas cuyo valor óhmico sea muy elevado, este se incrementa debido al estrés por las rápidas variaciones de voltaje., esto es válido para

resistencias de película de carbón, con alto coeficiente de temperatura y fuerte dependencia del voltaje durante largas cargas [8].

Las resistencias de película metálica y película de carbón, a pesar de sus buenos coeficientes de temperatura, no son adecuadas para circuitos de alto voltaje, debido al delgado espesor de la capa y su bajo peso, pues la capa resistiva puede ser destruida por las rápidas variaciones de tensión, y los esfuerzos mecánicos involucrados.

Las resistencias más adecuadas para circuitos de alta tensión son las resistencias de capa de óxido metálico, las cuales poseen un coeficiente de temperatura adecuado y su dependencia al voltaje se puede ignorar en aplicaciones prácticas [7].

En el diseño de una resistencia de alto voltaje el valor debe ser independiente del tiempo y la carga, haciéndose uso de conductores metálicos tales como el Constantan o el Nicrothal, lo importante es lograr una alta resistencia específica con un bajo coeficiente térmico.

Dado la baja resistencia específica, el principal problema es la sensibilidad mecánica de los finos alambres, necesarios para un alto valor de resistencia (106 Ω por cada KV), para reducir el tamaño del dispositivo, los alambres son bobinados en un aislante, frecuentemente cilíndrico, una bobina presenta una alta inductancia, por esta razón 2 capas son bobinadas en direcciones opuestas y aisladas una de otra, aunque es mejor un bobinado en cruz a lo largo de la misma capa.

2.1.2. Parámetros de diseño.

El desarrollo de cálculo y diseño de la resistencia de medición, se toma como base las características técnicas de la resistencia disponible en el laboratorio HV9113.

Los parámetros se muestran en la Tabla 2.2.

Datos Técnicos de la resistencia de medición a ser construida.	
Voltaje nominal C.C.	150kV
Resistencia	300Mohm +/- 0.25%
Corriente continua especificada	0.5mA

Tabla 2.2. Parámetros de la resistencia.

2.1.2.1. Factor de Corrección (K_a)

Véase el cálculo realizado en el capítulo 1, sección 1.2.1

2.1.3. Cálculos de Voltaje.

El voltaje fue calculado en el capítulo 1, sección 1.2.2, cuyo resultado fue $V_P = 216.69kV$, con el mismo se procede a realizar el cálculo de la potencia que debe ser disipada en la cápsula de la resistencia.

2.1.4. Cálculos de Potencia.

La resistencia de medición planteada en el proyecto, además de soportar el valor de tensión de acuerdo a las prácticas realizadas, también deberá disipar una potencia propia en su funcionamiento normal.

2.1.4.1. Calculo de Disipación de Potencia en Corriente Alterna

$$P_{disipada_C.A.} = V_{RMS} * I_N * K_a$$

$$P_{disipada_C.A.} = 113.5kV * 0.5mA * 1.35 = 76.61W$$

2.1.4.2. Cálculo de Disipación de Potencia en Corriente Continua (Rectificación de Onda Completa)

Para este cálculo se hace la suposición que toda la tensión del secundario, es transformada en tensión continua por medio de diodos y condensadores ideales.

$$V_{RMS} = \frac{V_P}{\sqrt{2}}$$

$$V_{RMS} = \frac{216.69kV}{\sqrt{2}} = 153.22kV$$

$$I_{RMS} = \frac{V_{RMS}}{R}$$

$$I_{RMS} = \frac{153.22kV}{300Mohm} = 0.51mA$$

$$P_{disipada_C.C.} = (I_{RMS})^2 * R * K_a$$

$$P_{disipada_C.C.} = (0.51mA)^2 * 300Mohm * 1.35$$

$$P_{disipada_C.C.} = 105.34W$$

La cápsula está conformada por 12 resistencias, por lo que cada resistencia debe disipar 8.77W., la resistencia SGP78 nominalmente puede disipar 11W por lo que se tiene un margen de seguridad del 7.9%.

2.3. Simulación del sistema de resistencia de medición en alta tensión.

En la simulación del sistema resistencia de medición en alta tensión se empleó el programa Simulink que es un componente de Matlab R2011b o R2014a.

2.3.1 Simulación del comportamiento de la resistencia de medición.

Para esta simulación se empleó la ley de Ohm, con este se observa el comportamiento de la resistencia en el circuito simulado.

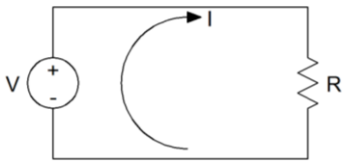


Figura. 2.3. Circuito con resistencia en corriente continua.

$$V = I \cdot R$$

$$I = \frac{V}{R}$$

En esta simulación se tomó en cuenta las características técnicas de las resistencias empleadas en el diseño y la construcción (Tabla 2.3).

Datos Técnicos de las Resistencias SGP 78			
Modelo	**Tensión Continua Máxima de Operación (kV)***	**Resistencia (MΩ)**	**Cantidad de Resistencias (n)**
SGP 78	15.0	25.0	12

Tabla 2.3. Características técnicas de la resistencia SGP78.

** Sin considerar factor de corrección por altitud.*

En la Tabla 2.3 se observa las características técnicas de la resistencia SGP78 que fue elegida para la elaboración de la resistencia de medición.

$$V_T = V_{c/R} \cdot n = 15kV \cdot 12resistencias = 180kV$$

El valor de voltaje calculado anteriormente se encuentra a una altura a nivel del mar, se debe considerar el factor de corrección por altitud de 0.86 observado en la norma ANSI C37.20.2-1986.

$$V_T = V_{c/R} \cdot n \cdot K_a = 15kV \cdot 12resistencias \cdot 0.86 = 154.8kV$$

La resistencia total se calculó de acuerdo al número de resistencias y al valor óhmico de cada una de las resistencias.

$$R_T = R_{c/R} \cdot n = 25\text{M}\Omega \cdot 12resistencias = 300\text{M}\Omega$$

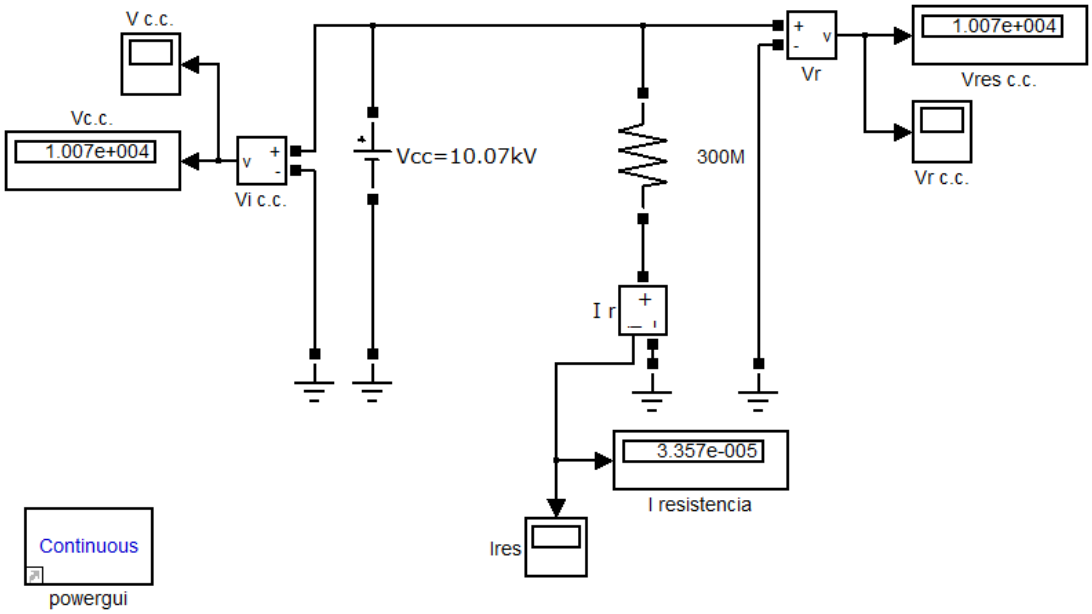


Figura. 2.4. Simulación de circuito con resistencia en C.C. a 10.07kV

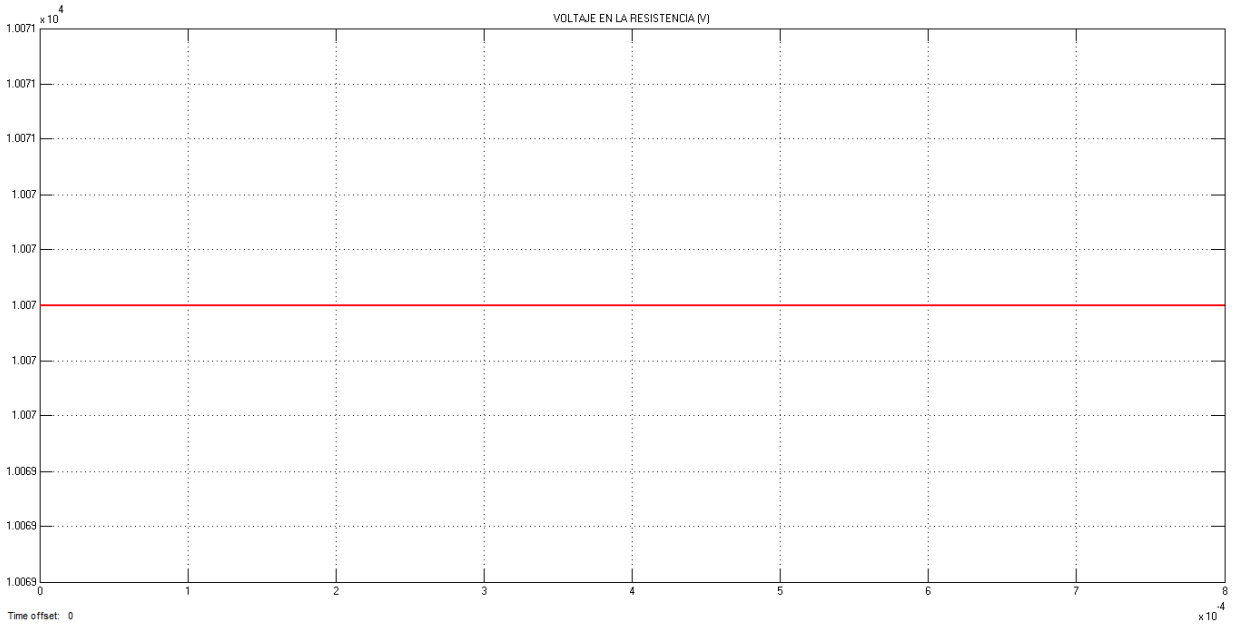


Figura. 2.5. Voltaje en c.c. medido en la resistencia.

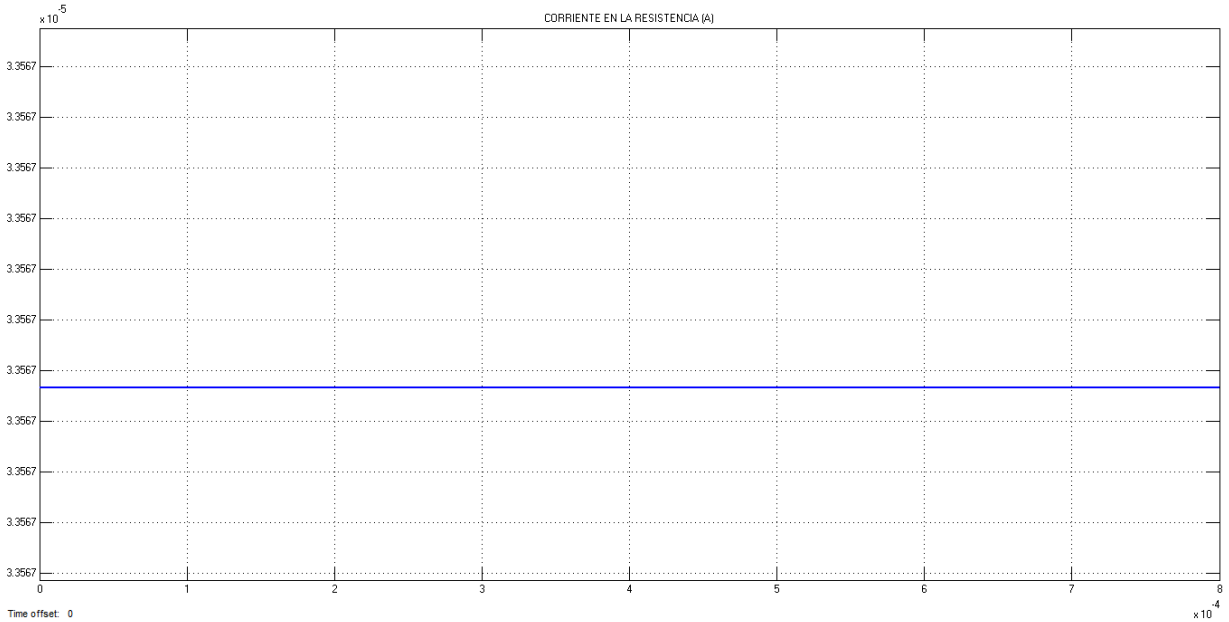


Figura. 2.6. Corriente continua medida en la resistencia.

Voltaje (V)	Corriente (A)	Resistencia (Ω)
10.070	33,57E-6	299’970.211,49

Tabla 2.4. Resistencia calculada de acuerdo a los valores de voltaje y corriente medidos.

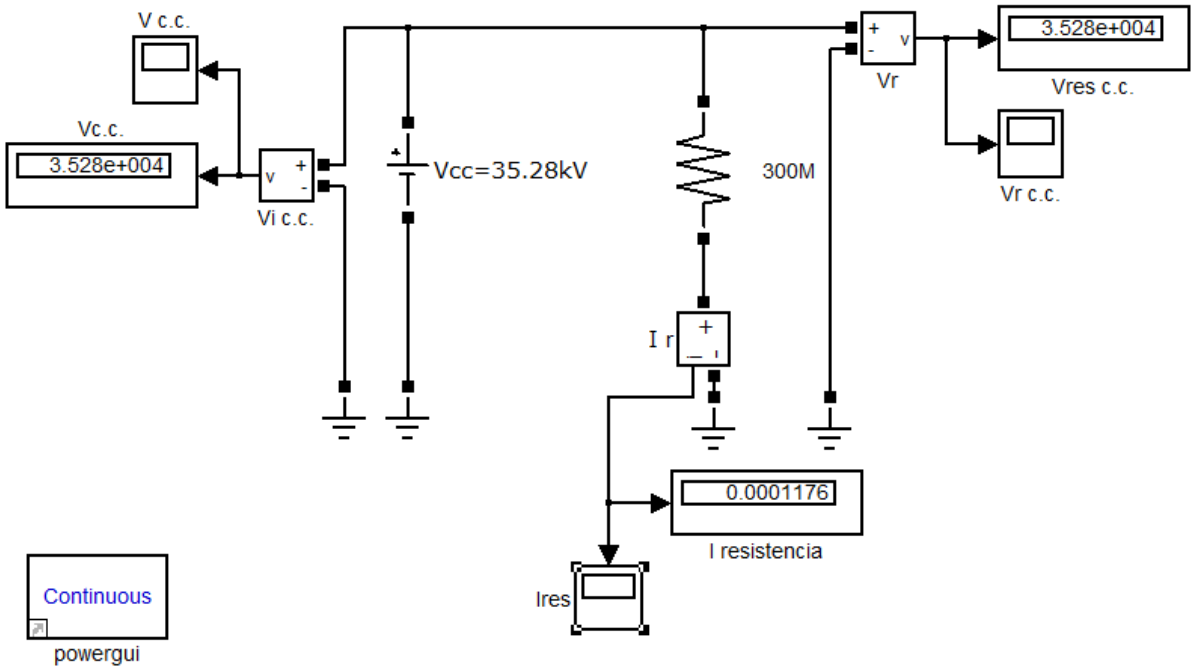


Figura. 2.7. Simulación de circuito con resistencia en C.C. a 35.28kV

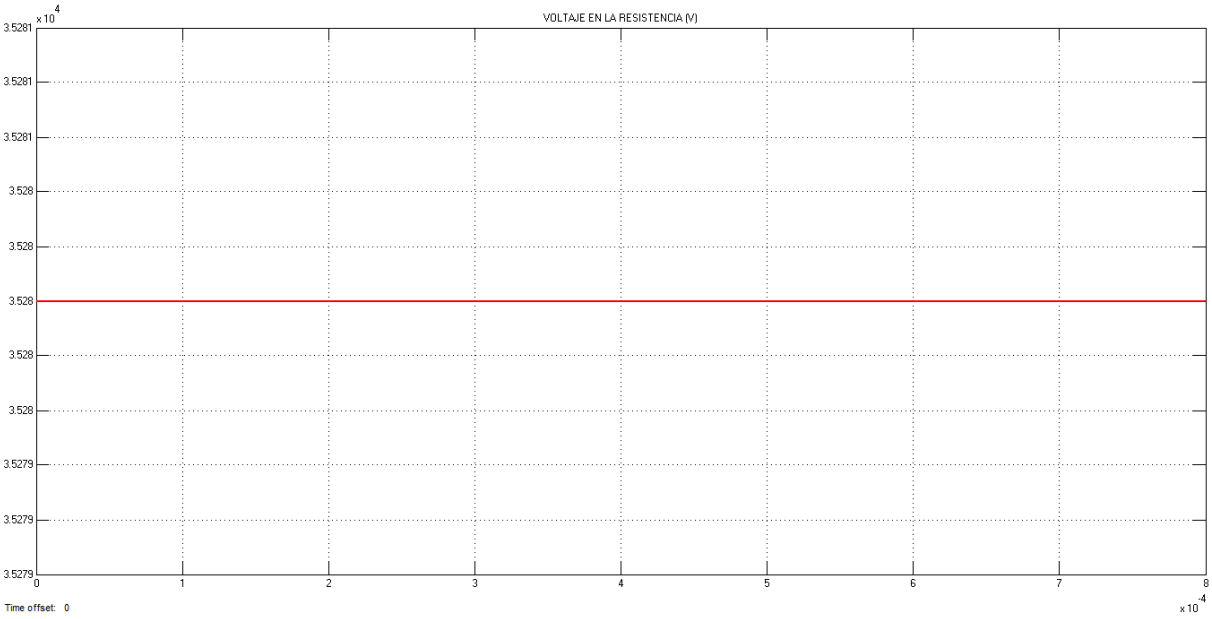


Figura. 2.8. Voltaje en c.c. medido en la resistencia.

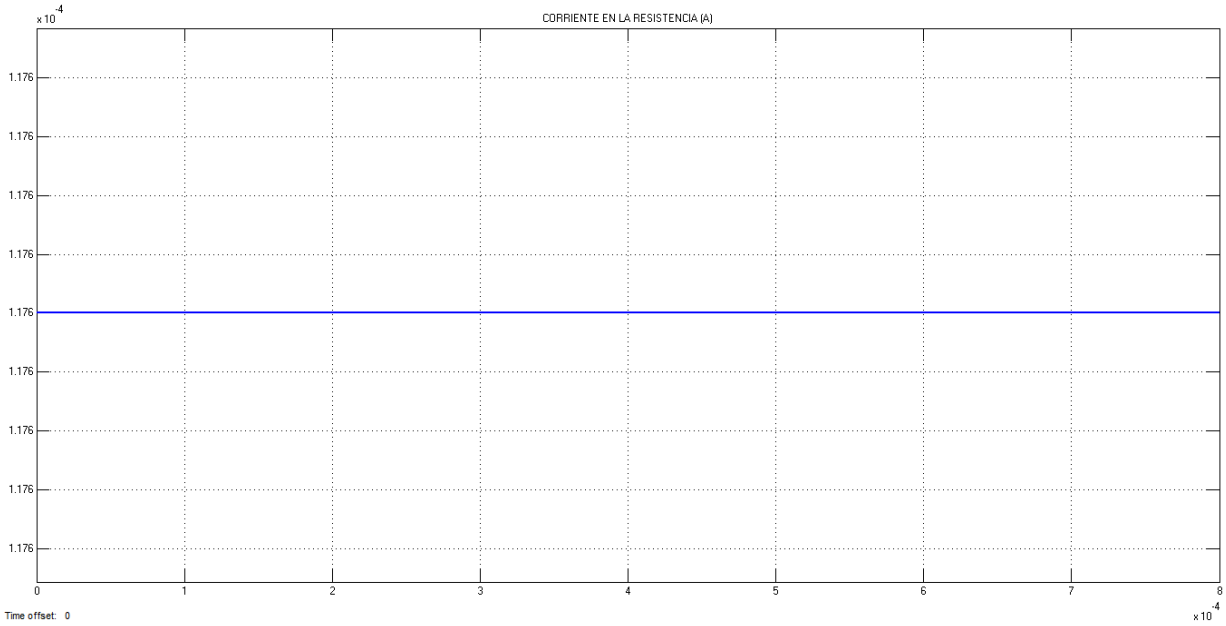


Figura. 2.9. Corriente continua medida en la resistencia.

Voltaje (V)	Corriente (A)	Resistencia (Ω)
35.280	117,6E-6	300'000.000

Tabla 2.5. Resistencia calculada de acuerdo a los valores de voltaje y corriente medidos.

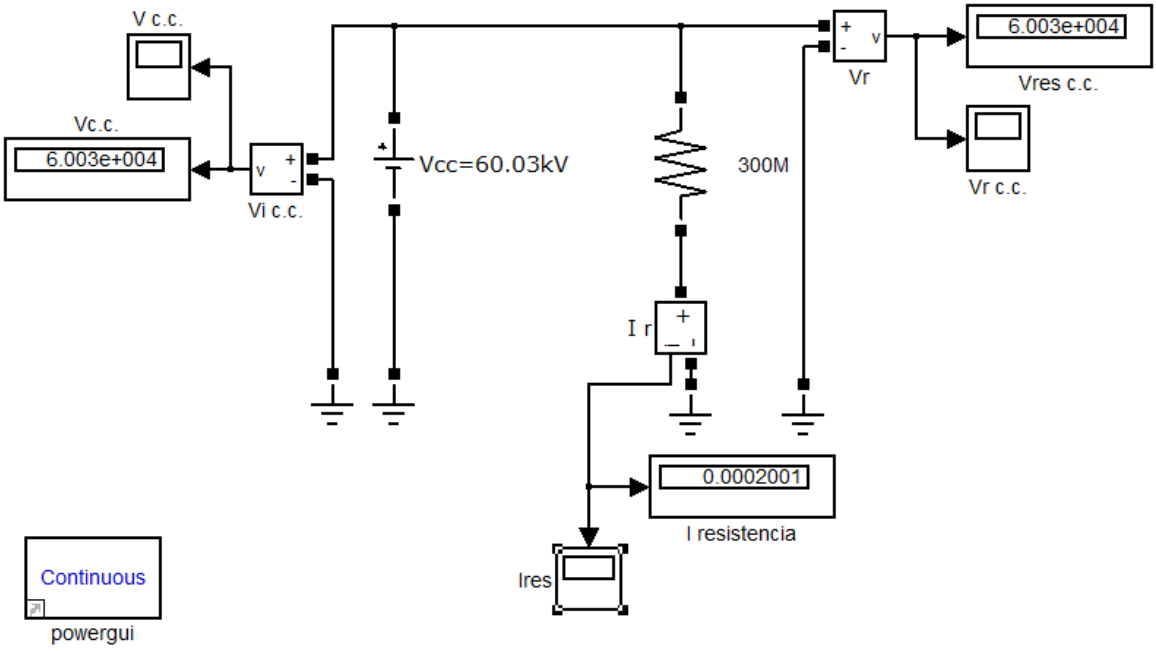


Figura. 2.10. Simulación de circuito con resistencia en C.C. a 60.03kV

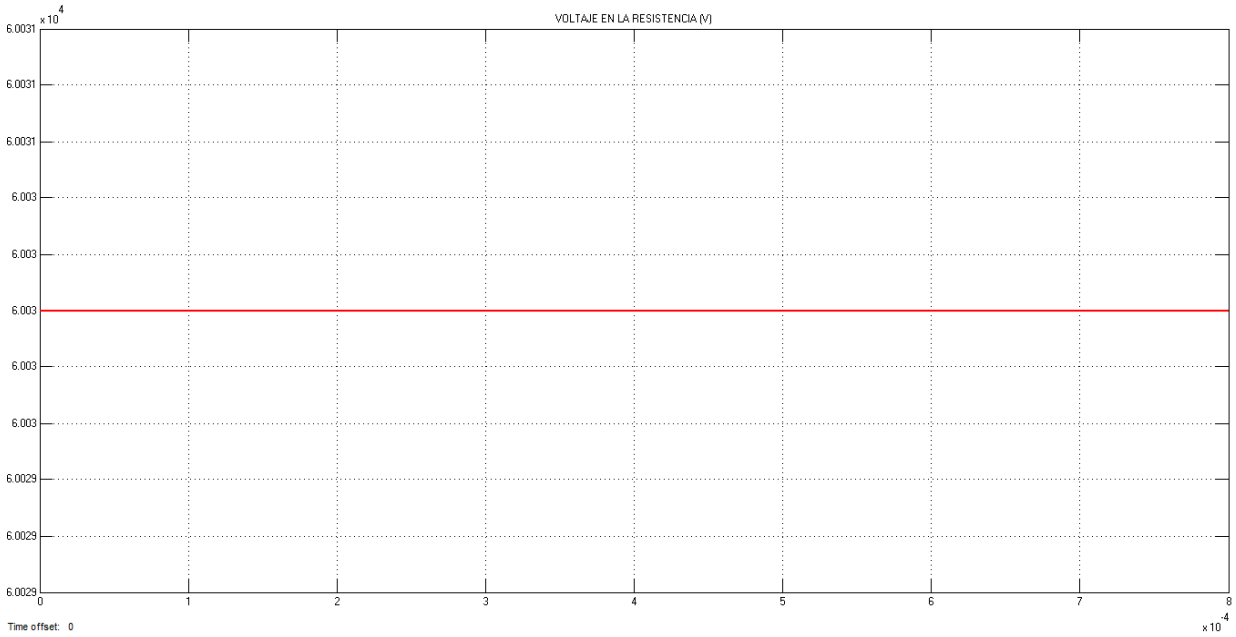


Figura. 2.11. Voltaje en c.c. medido en la resistencia.

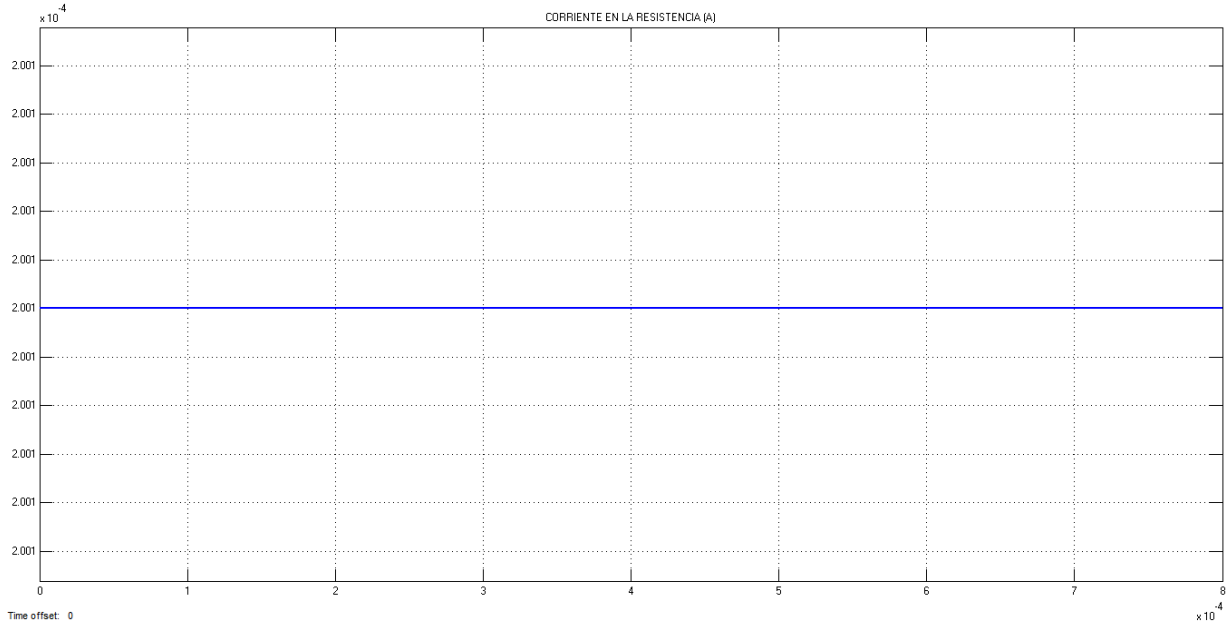


Figura. 2.12. Corriente continua medida en la resistencia.

Voltaje (V)	Corriente (A)	Resistencia (Ω)
60.030	200,1E-6	300’000.000

Tabla 2.6. Resistencia calculada de acuerdo a los valores de voltaje y corriente medidos..

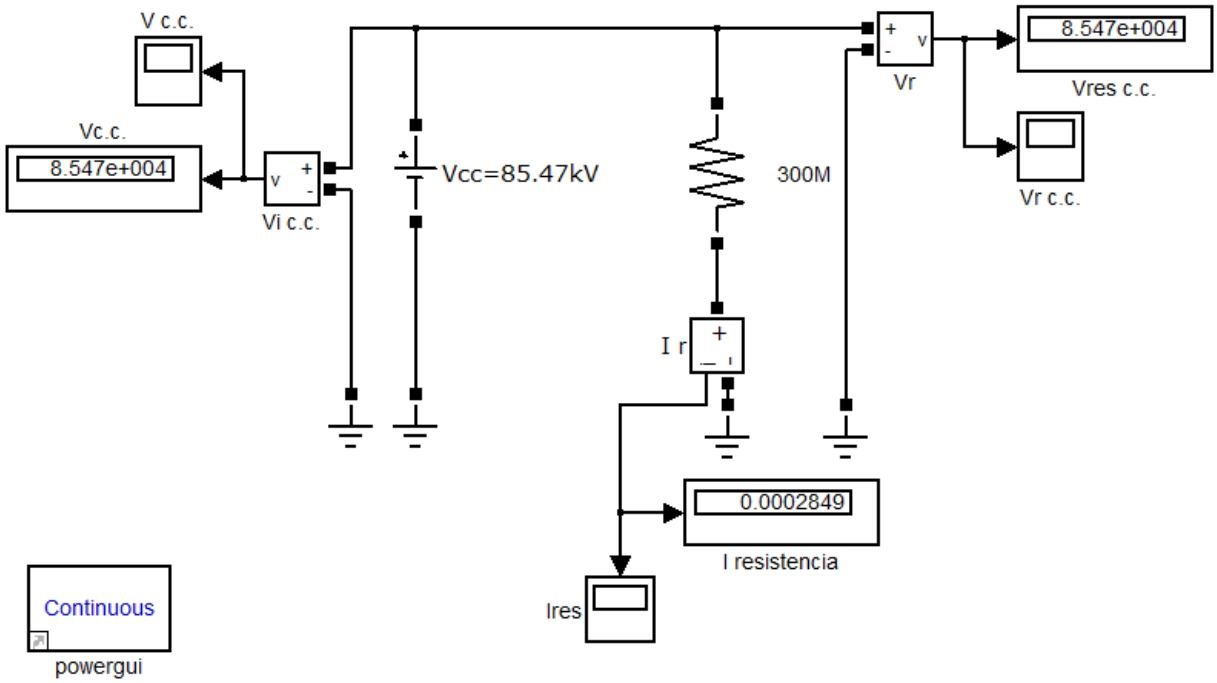


Figura. 2.13. Simulación de circuito con resistencia en C.C. a 85.47kV

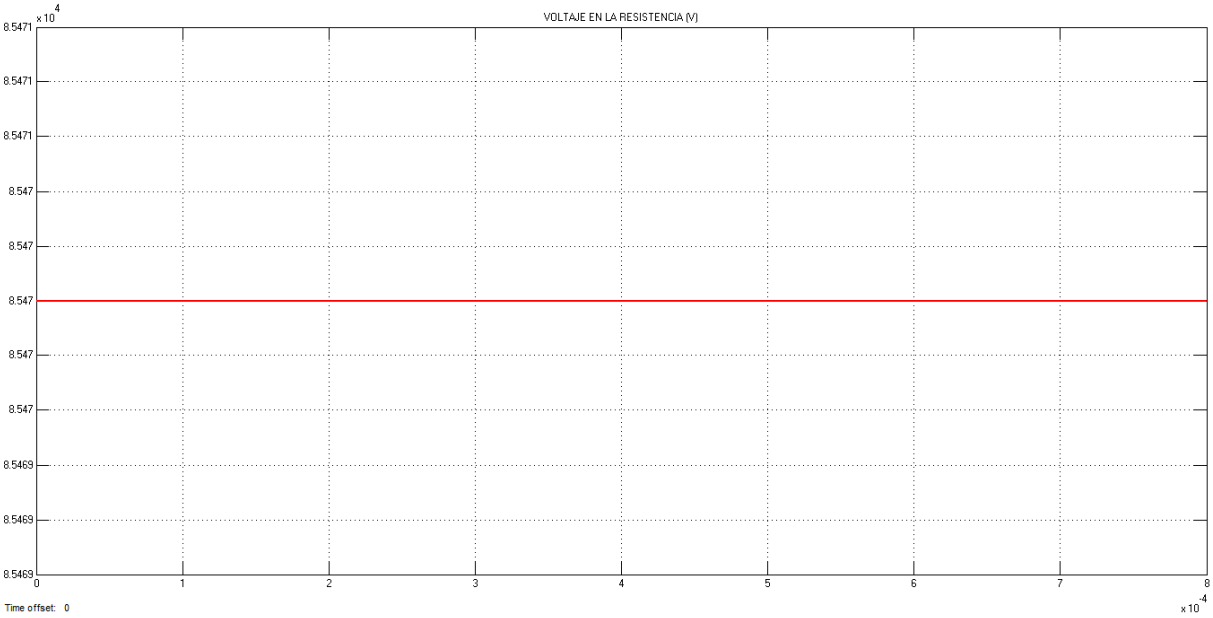


Figura. 2.14. Voltaje en c.c. medido en la resistencia.

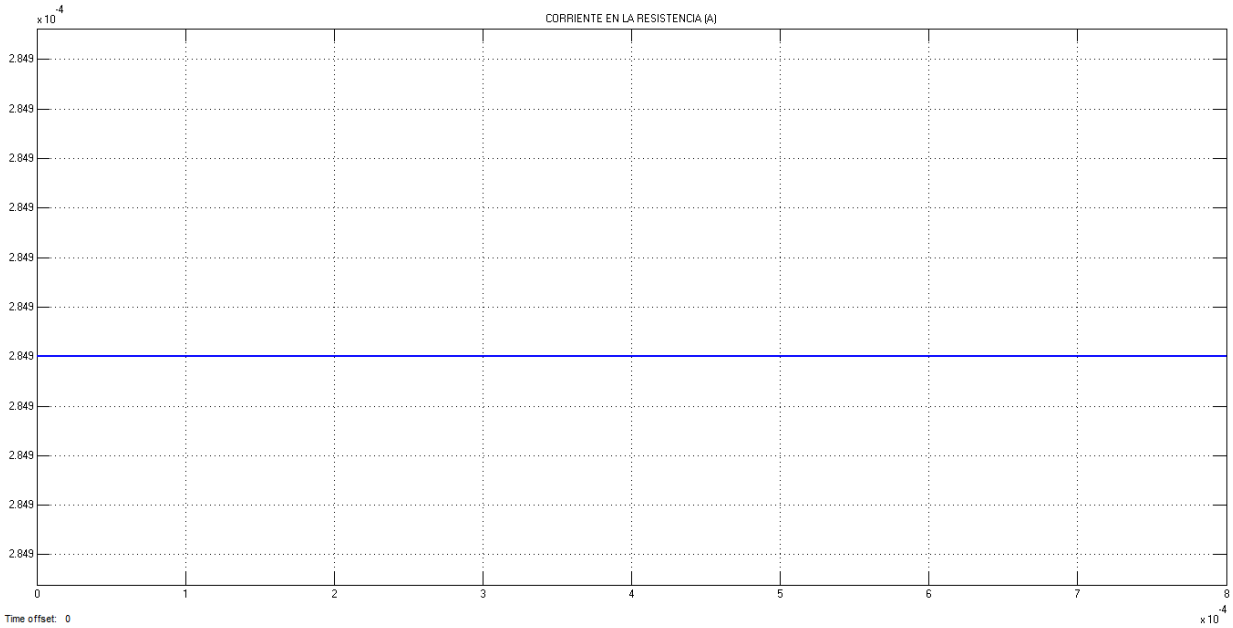


Figura. 2.15. Corriente continua medida en la resistencia.

Voltaje (V)	Corriente (A)	Resistencia (Ω)
85.470	284,9E-6	300’000.000

Tabla 2.7. Resistencia calculada de acuerdo a los valores de voltaje y corriente medidos.

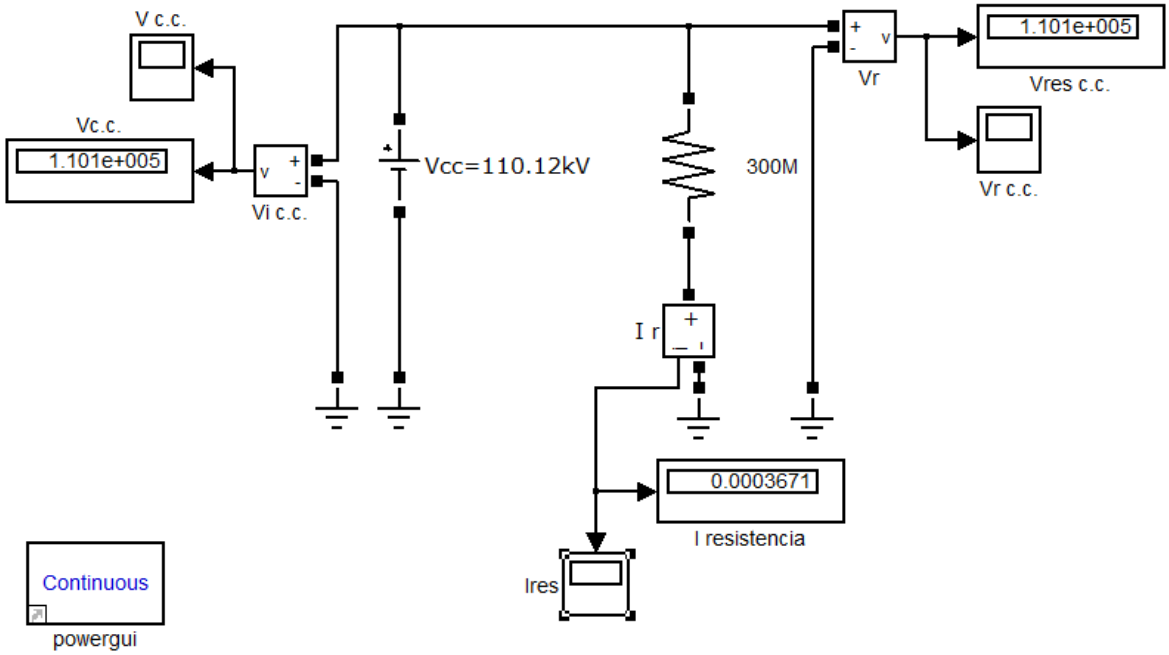


Figura. 2.16. Simulación de circuito con resistencia en C.C. a 110.12kV.

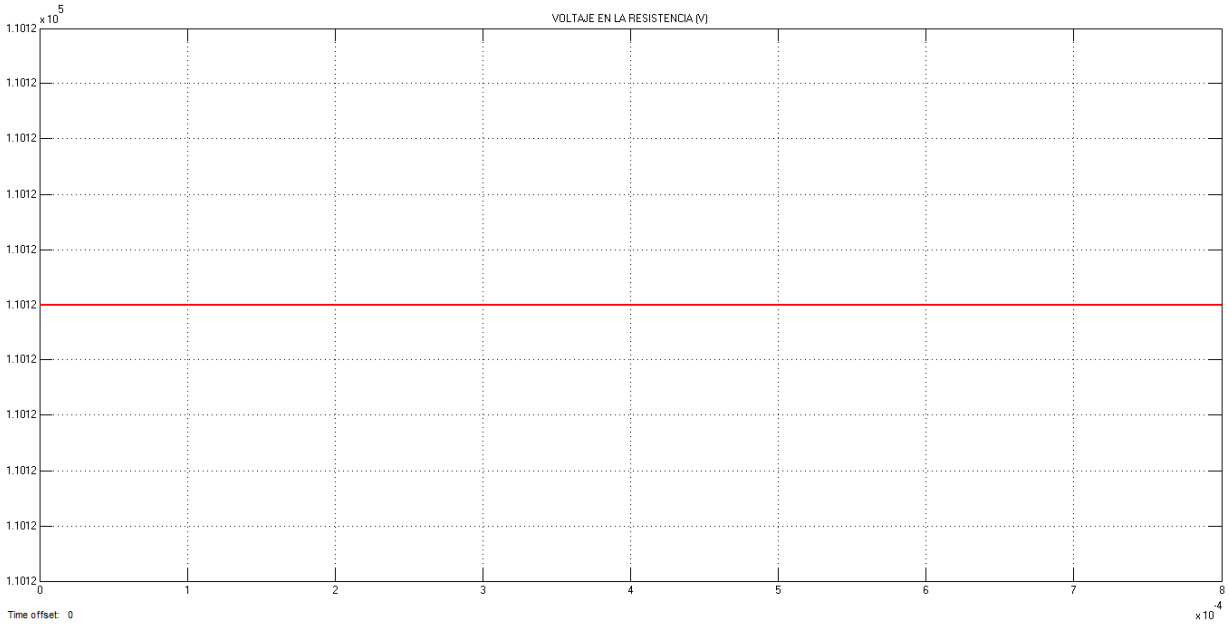


Figura. 2.17. Voltaje en c.c. medido en la resistencia.

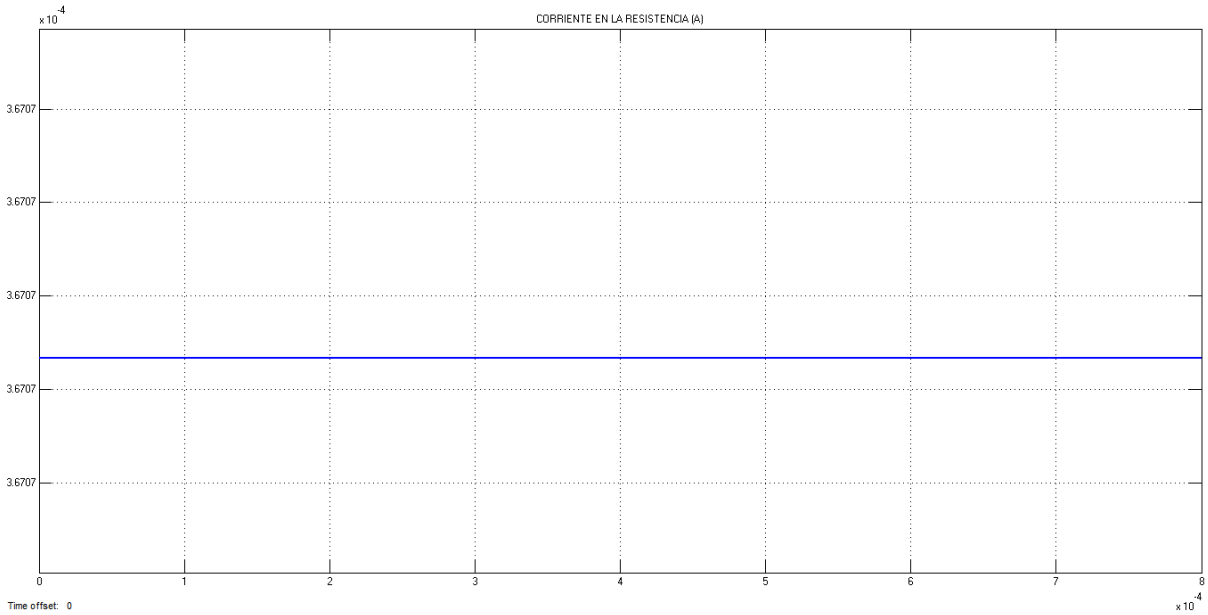


Figura. 2.18. Corriente continua medida en la resistencia.

Voltaje (V)	**Corriente (A)**	**Resistencia (Ω)**
110.120	367,1E-6	299’972.759,46

Tabla 2.8. Resistencia calculada de acuerdo a los valores de voltaje y corriente medidos.

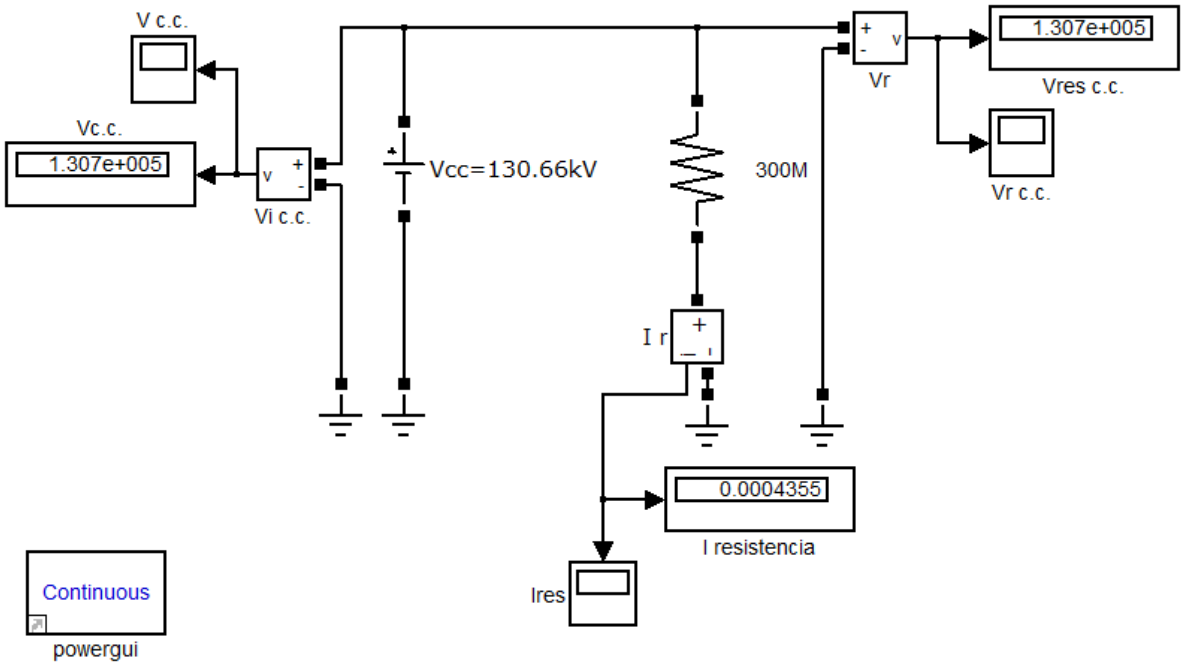


Figura. 2.19. Simulación de circuito con resistencia en C.C. a 130.66kV.

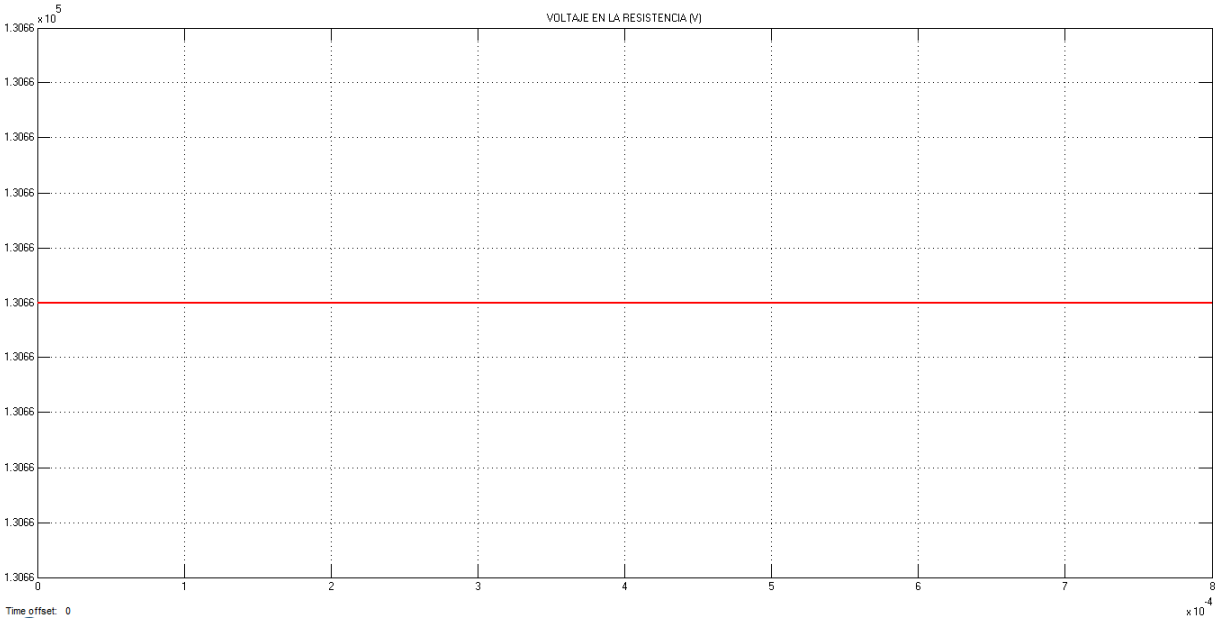


Figura. 2.20 Voltaje en c.c. medido en la resistencia.

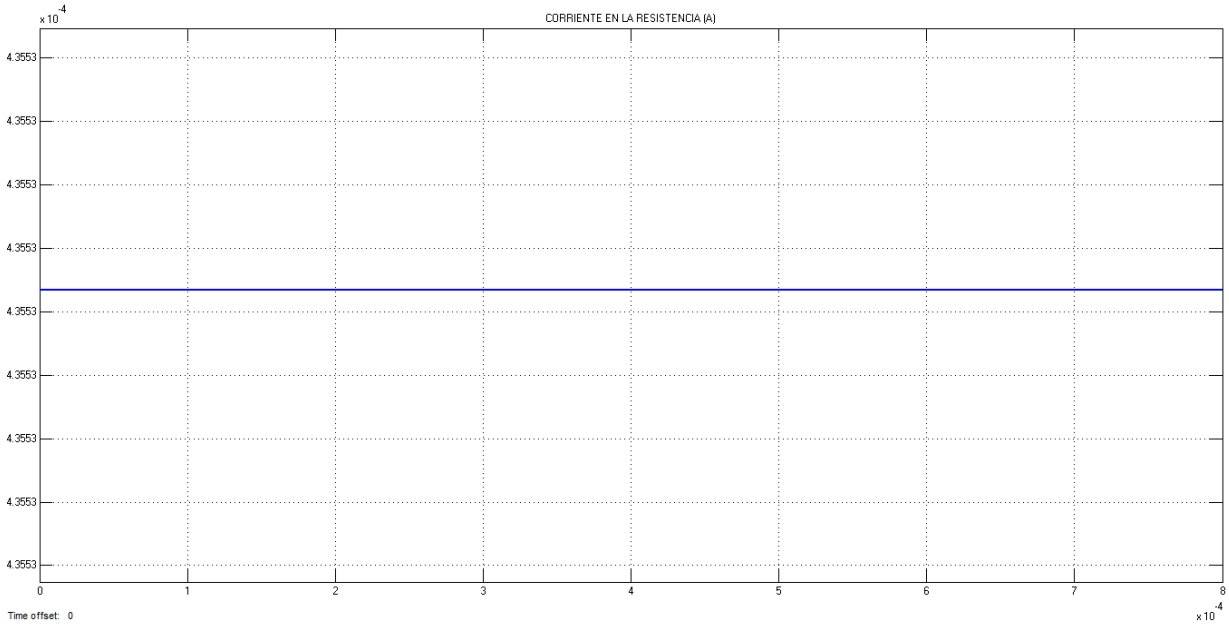


Figura. 2.21. Corriente continua medida en la resistencia.

Voltaje (V)	Corriente (A)	Resistencia (Ω)
130.660	435,53E-6	300’022.962,11

Tabla 2.9. Resistencia calculada de acuerdo a los valores de voltaje y corriente medidos.

CAPITULO III

3. CONSTRUCCIÓN DE LOS ELEMENTOS.

3.1. Construcción de 2 condensadores de impulso 25000 pF y tensión nominal 150 KV

3.1.1. Elección de los condensadores MZC-CT8G-50KV-153M.

Las especificaciones técnicas para los condensadores de impulso, necesarias para que puedan ser usados en las diferentes prácticas en el laboratorio de alta tensión de la U.P.S, sede Cuenca, son detalladas en la sección 1.2, tabla 1.14.

Se toma como punto de partida $V_p = 216.69\ KV$ [1].

Las características que brindan los condensadores MZC-CT8G-50KV-153M, tanto en la tensión que soportan, valor de capacitancia, dimensiones físicas, fueron los aspectos de mayor influencia para su elección, sin embargo, su adquisición, manufactura y transporte, tomaron un tiempo muy extenso, lo cual repercutió en el avance del proyecto.

Los condensadores MZC-CT8G-50KV-153M, tienen un Vcc = 50 KV y una capacitancia individual de 15000 pF [2], son de tipo cerámico, construidos a partir de la metalización de su superficie, con una suspensión de óxido de plata o sumergiendo en esta, las piezas cerámicas. [9]

Las cerámicas tienen un amplio rango de características eléctricas, haciéndolos para condensadores, con constantes dieléctricas k entre 6 y 10E3; se clasifican en Clase 1, Clase 2 y Clase 3, siendo el mineral base para todos ellos el Dióxido de Titanio. (TiO_2), las principales características de los 3 tipos de condensadores cerámicos se muestran en la Tabla 3.1. [9]

[1] Valor calculado en el capítulo 1, sección 1.2, ecuación 1.3
[2] Información obtenida de las Hojas de datos., sección 3.1.2

Atributo	Tipo de cerámica.			
	Clase 1	Clase 2		Clase 3
		Estable	Inestable.	
Constante dieléctrica k a 25°C	6-500	250 – 2400	3000 – 10000	900 – 5100 (antes de reducción)
Rango operativo de temperatura	-55 a +125	-55 a +125	+10 a +85	-55 a +85
Coeficiente de variación de la capacitancia con la temperatura (ppm/°C)	P150 a N5600			
Factor de disipación	0,001 – 0,4	0,4 – 1,0	1,0 – 4,0	4 – 8
Máximo cambio de la capacidad, 25 – 55°C (%)	-	+2, -8	+0, -90	-15 a 3V -85 a 10V -71 a 12V -75 a 25 V -29 a 30V
Máximo cambio de la capacidad, 25°C hasta máximo rango de temperatura (%)	-	+2, -10(125°C)	+0, -60(90°C)	+13 a 3V (80°C) +17, -60 a 10V (80°C) +50 a 12V (80°C) +4, -30 a 25V (80°C) 0.5 a 30V (80°C)

Envejecimiento por década de tiempo	-	0.8 – 2.8	2.5 – 8.0	1 - 6
Uso	Circuitos sintonizados, alta frecuencia (microondas), alto Q.	Acoplamiento, temporizado.	Paso, filtrado.	Acoplamiento de bajo voltaje y paso en circuitos con transistores (3 a 50V).
Características	Condensador ultra estable con respecto a la temperatura, c.c. y c.a., frecuencia y tiempo. Alto Q. Amplio rango de temperatura.	Tamaño pequeño. Amplio rango de características, bajo costo. Amplio rango de temperatura.	Alta eficiencia volumétrica	Grandes capacidades. Alta eficiencia volumétrica. Bajo costo.
Desventajas	Gran tamaño y costo.	Efectos piezoeléctricos.	Rango de temperatura limitado (usualmente de 0 a 65°C). Efectos piezoeléctricos.	Baja resistencia de fuga. Alta sensibilidad a la tensión.

Tabla 3.1. Características principales de las 3 clases de condensadores cerámicos.

El valor de voltaje que deberá soportar los condensadores del proyecto de tesis se calcula asumiendo que toda la tensión del secundario, estará aplicada al condensador, lo cual supone idealmente, que toda la tensión alterna del secundario del transformador, será transformada en tensión continua, por medio de otros dispositivos del laboratorio (diodos).

$$V_{RMS} = \frac{V_P}{\sqrt{2}}$$

$$V_{RMS} = \frac{216.69kV}{\sqrt{2}}$$

$$V_{RMS} = 153.19kV$$

Con este nuevo valor se nota que la tensión es superior en 2% a la tensión nominal, razón por la cual se llenara la cápsula con aceite dieléctrico.

Los condensadores fueron colocados en serie, lo cual permite sumar los voltajes individuales, so pena de tener una disminución proporcional al número de elementos en serie, en el valor de la capacitancia equivalente, razón por la cual es necesario una combinación de 5 ramales serie – paralelo, para cada ramal el valor de capacitancia equivalente es:

$$\frac{1}{C_{equivalente}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \cdots + \frac{1}{C_n}$$

Ecuación 3.1. Capacitancia serie equivalente.

$$C_{eq1} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \cdots + \frac{1}{C_n}}$$

$$C_{eq1} = \frac{1}{\frac{1}{15000pF} + \frac{1}{15000pF} + \frac{1}{15000pF}}$$

$$C_{eq1} = C_{eq2} = C_{eq3} = C_{eq4} = C_{eq5} = 5000\ pF$$

Con este resultado, una rama serie, tiene la quinta parte de la capacitancia total requerida, por lo tanto, es necesario, contar 5 ramas serie, las cuales a su vez deben estar conectadas en paralelo.

$$C_T = C_{eq1} + C_{eq2} + C_{eq3} + C_{eq4} + C_{eq5} = 5 * C_{eq}$$

Ecuación 3.2. Capacitancia paralelo equivalente.

$$C_T = 5000pF + 5000pF + 5000pF + 5000pF + 5000pF = 5(5000pF)$$

$$C_T = 25000\ pF$$

En resumen se necesitaran 15 condensadores para cada cápsula, por lo tanto el número total de componentes a utilizar son 30 condensadores en las dos cápsulas.

La Figura. 3.1 muestra el circuito del condensador de alta tensión, montado con los condensadores.

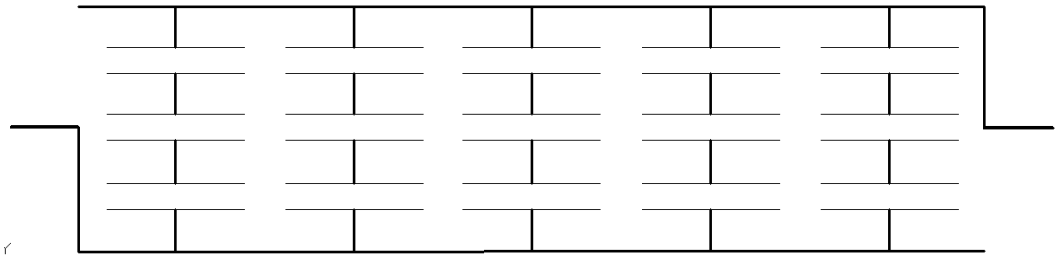


Figura. 3.1 Circuito del condensador de alta tensión.

Al disponer de los valores de tensión, capacitancia individual y numero de condensadores, se procedió al montaje del circuito que conforma el condensador de alta tensión, el siguiente paso, comprobar la hermeticidad de las capsulas contenedoras, para luego ser llenadas con aceite mineral de transformador UNIVOLT N 61B con inhibidor, finalmente se realizó una prueba en el laboratorio de alta tensión de la U.P.S sede Cuenca.

La práctica elegida del manual de experimentos de alta tensión para laboratorio de la U.P.S sede Cuenca fue “Generación y medición de Voltaje Directo”, (número 3).

Durante el desarrollo del experimento #3, con uno de los condensadores construidos, se logró un funcionamiento correcto hasta voltajes menores a 35 KV dc, sin embargo sobre este nivel de tensión, se presentó una disrupción en el interior de la capsula.

Este acontecimiento se originó por el uso de barras metálicas, para realizar la conexión eléctrica entre los componentes, como para dar la estabilidad mecánica al sistema, siendo su terminación en punta no tan redondeada.

Considerando esta situación se rediseño el soporte para la estructura de los condensadores, el soporte de barras metálicas fue reemplazado por soportes de polietileno de alta densidad (plástico) este material es un óptimo aislante por su estructura no polar a más de no sufrir por corrientes parasitas, debido a su elevada resistividad de volumen superficial [10], con un apantallamiento por medio de placas del mismo material en los extremos superior e inferior, la interconexión de los elementos fue realizada a través de alambre esmaltado AWG #22, usado en el bobinado de transformadores, conectores tipo o y tornillos de cabeza redonda.

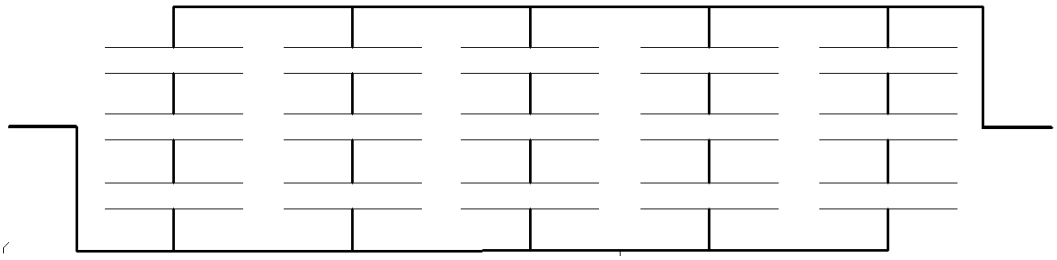


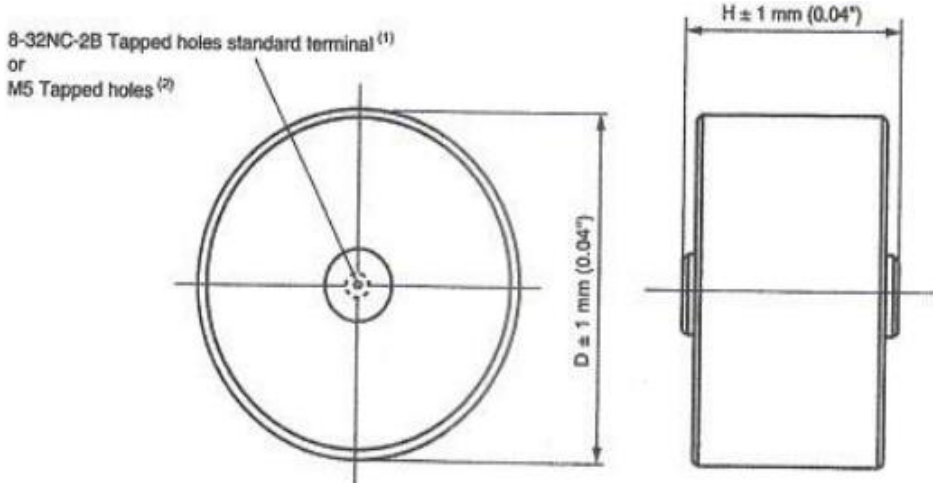
Figura. 3.2 Diagrama eléctrico condensador de alta tensión.

Luego de cambiar la estructura de soporte, montar los componentes, el circuito de los condensadores estaba listo para probar su funcionamiento, nuevamente se probó la hermeticidad de las capsulas, se llenó las capsulas con aceite mineral para transformador UNIVOLT N 61 B con inhibidor, y finalmente se transportó las capsulas hacia el laboratorio de alta tensión de la U.P.S sede Cuenca, para realizar los diferentes experimentos.

En esta ocasión los resultados fueron muy similares a los obtenidos mediante la utilización de los componentes propios del laboratorio.

3.1.2. Hojas de datos.

Figura. 3.3. Capacitor MZC-CT8G-50KV-153P



D	H
70 mm	36 mm

Tabla 3.2. Dimensiones físicas MZC-CT8G-50KV-153P

Part No	MZC-CT8G-50KV-153P.	Reference Standard	
Test Condition	GB9600-88		
Frequency 1KHZ Temperature : 25°C	Color	White/Brown	
Capacitance Range	15000 pf		
Capacitance Tolerance	+/- 20%		
Dissipation Factor	=< 0.2%		
Rated Voltage	50 KVDC		
Test voltaje	75 KVDC		
Voltage Impulse	>= 84 KVDC (in oil)		
Insulation Resistance	>= 200000 MΩ		
Temperature Characteristics	N4700 +22/-33%	Temperature	-25°C -- +85°C
Load life	>= 10 years	Brand	Amazing

Tabla 3.3. Información técnica del capacitor MZC-CTG8G-50KV-153P

3.1.3. Cuadro de procesos.

En la Figura. 3.4 se muestra el proceso, tanto eléctrico, como mecánico que se siguió para el diseño y construcción de los capacitores de alta tensión.

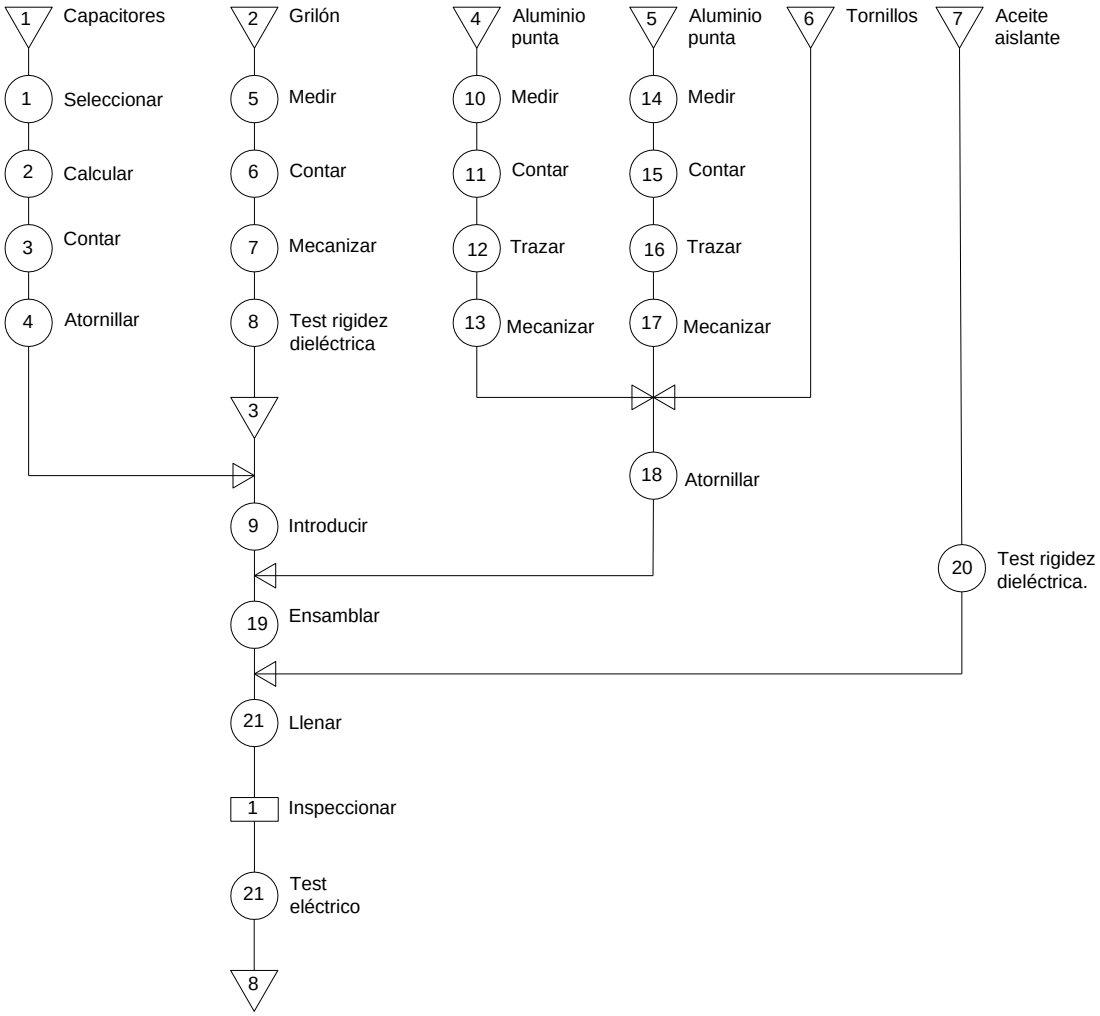


Figura. 3.4 Cuadro de procesos eléctricos y mecánicos para construir condensador de alta tensión.

3.1.4. Proceso mecánico.

En este apartado, se presentan los procesos mecánicos necesarios para la construcción de los condensadores para alta tensión, tomando muy en cuenta las características mecánicas y eléctricas de los materiales.

La capsula contenedora dieléctrica, está constituida por grilón, material de fácil adquisición en el mercado local y excelentes propiedades eléctricas; como conductor se eligió un alambre esmaltado de cobre, material comprobado y usado desde los inicios de la industria eléctrica.

En los siguientes párrafos se explica el proceso de fabricación de cada uno de los elementos constituyentes del condensador de impulso en alta tensión.

3.1.4.1. Armado del circuito.

Las dimensiones del cilindro, son dadas de acuerdo a la cantidad y características físicas de los componentes del circuito que estarán alojados en el interior del mismo, como los condensadores, tornillos prisioneros, conectores, alambres de conexión, placas aislantes y terminales.

De la Tabla 3.2, se obtienen las dimensiones de los condensadores, con 75 mm de diámetro y 36 mm de altura.

La red de condensadores se monta por medio de tornillos prisioneros M8 x 7 mm, en el capítulo anterior se explicó que el circuito consta de 5 ramales de 3 condensadores en serie, como se muestra en la Figura. 3.5.

Figura. 3.5 Disposición interna de los condensadores base.

La longitud de cada ramal es de 96 mm y un ancho de 45mm, estos valores multiplicados por 5, dan un total de 480 mm, a este valor se adiciona 100 mm correspondientes a los soportes de los pernos terminales y las placas de aislamiento.

3.1.4.2. Cuerpo del condensador.

El cuerpo del cilindro, Figura. 3.6, contendrá el circuito del condensador, y estará lleno de aceite dieléctrico, UNIVOLT N61B.

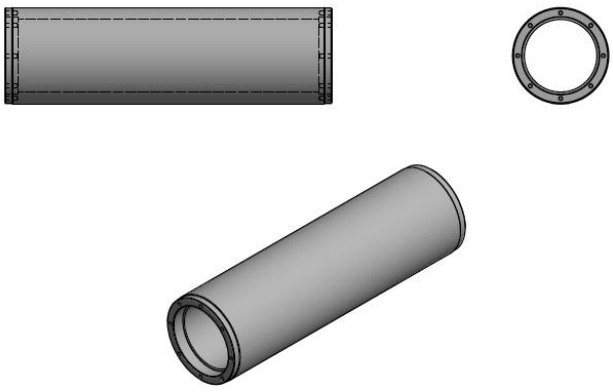


Figura. 3.6. Cuerpo del condensador de alta tensión.

3.1.4.3. Aluminio.

Durante el ensamblado del circuito se utilizó aluminio para los terminales, tapas puntas, debido a durabilidad, ligero peso y resistencia a la corrosión[1].

3.1.4.3.1. Punta.

Brinda soporte al cuerpo del condensador, su construcción tuvo en consideración un acoplamiento a las coronas de conexión disponibles en el laboratorio.

Las puntas se unirán a las tapas del condensador por medio de pernos cabeza hexagonal M8x20, como se muestra en la Figura. 3.7.

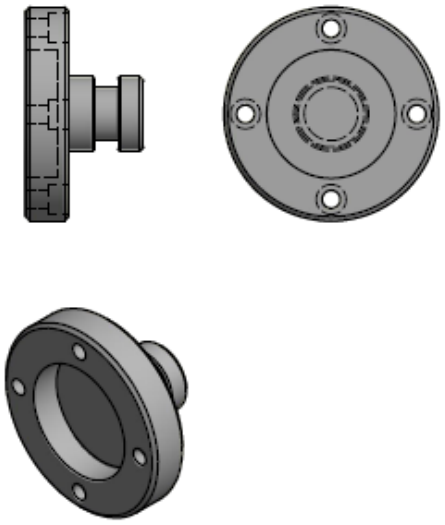


Figura. 3.7. Punta

3.1.4.3.2. Tapa.

Es el elemento que sella herméticamente mediante O rings, el cuerpo del cilindro, previniendo fugas del aceite aislante, su construcción toma en consideración los radios interno y externo del cuerpo.

Una de las tapas cuenta con 2 agujeros roscados, que permitirán el llenado con aceite dieléctrico, luego de realizar el sellado del cilindro, Figura. 3.8

[1] Véase, J. Padilla y J Rodriguez, "Diseño y construcción de dos diodos de potencia, voltaje ánodo cátodo inverso de 150 kV, corriente nominal de 50 mA para el laboratorio de alta tensión de la Universidad Politécnica Salesiana", sección 2.2.3.1, pág. 43.

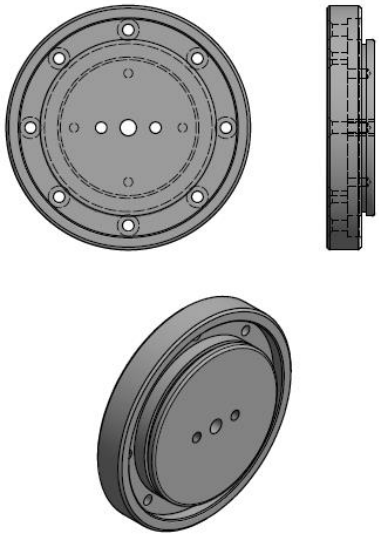


Figura. 3.8. Tapa para condensador de alta tensión.

3.1.4.3.3. Terminal del circuito.

El terminal es fijado a la estructura interna del condensador por medio de una tuerca e irá conectado a los extremos del circuito, ad*icionalmente conecta la tapa,* Figura. 3.9

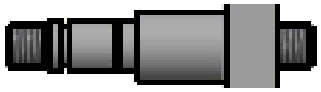


Figura. 3.9. Terminal del circuito.

La Figura. 3.10 muestra un corte del ensamblaje total del condensador de alta tensión.

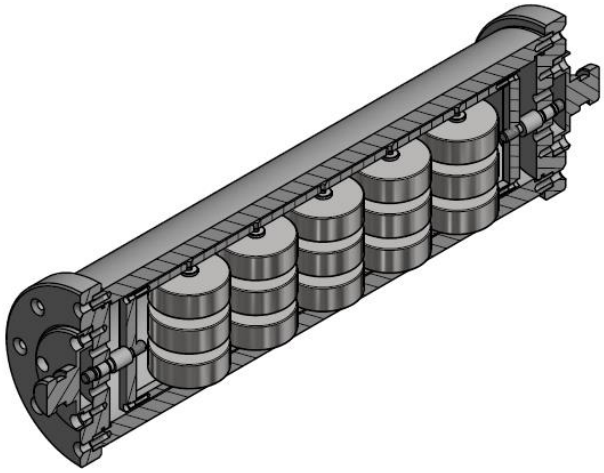


Figura. 3.10. Condensador de alta tensión.

3.1.5. Cálculo del volumen de aceite aislante para cada capsula.

La cantidad de aceite aislante requerida para llenar el cilindro de la Figura. 3.10, de tal forma que no se produzcan disrupciones se calculó por medio de la Ecuación 3.3, en la cual se considera el volumen individual y total de los componentes que irán alojados en el interior del cilindro.

$$V = r^2 * \pi * h - 15 * (r_c^2 * \pi * h_c)$$

Ecuación 3.3

$$V = (0.061)^2 * \pi * 550 - 15 * \{(0.0375)^2 * \pi * 0.036\}$$

$$V = 0.0040437\ m^3$$

$$V = 4.04\ ltrs$$

Se requieren aproximadamente 4.04 litros de aceite aislante por cada capsula.

3.1.6. Proceso eléctrico.

3.1.6.1. Llenado de aceite dieléctrico en los condensadores de alta tensión.

Concluido el proceso mecánico, los condensadores fueron transportados a las instalaciones de TECNIESAT S.A, para un llenado con aceite mineral, bajo condiciones de vacío.

El proceso realizado es el siguiente:

1. Limpiar la superficie de cada condensador de potencia con solvente Cloretheno.
2. Conectar una capsula a la vez, a la bomba de vacío por medio de los acoples adecuados, con derivación hacia un tanque de nitrógeno seco, cada ramal cuenta con un manómetro.
3. Limpiar el interior de la capsula, extrayendo cualquier partícula extraña, ya sea gotas de agua o pelusas por medio de la bomba de vacío, por un período de 10 minutos.
4. Llenar con aceite mineral dieléctrico, con el vacío realizado en la capsula (-0.8 bar), se cierra la válvula de vacío y se abre la válvula del depósito de aceite dieléctrico UNIVOL N 61B con inhibidor, debido a la presión atmosférica y el vacío de la capsula, el aceite fluye sin problema al interior del cilindro, el proceso se detiene al tener indicios de posible desbordamiento.

5. Sellar con nitrógeno seco, con la capsula llena, a continuación se retira una cantidad de aceite, que deje libre 2 cm entre el nivel más bajo de la tapa del cilindro y el nivel superior del aceite, con el fin de llevar este espacio con nitrógeno seco, el cual hará de sello para evitar o retardar el ingreso de humedad al interior de condensador.

Este procedimiento se realizó para los dos condensadores de alta tensión del proyecto de tesis, en la Figura. 3.11 se muestran los condensadores durante el proceso de llenado.

Figura. 3.11. Llenado de los condensadores de alta tensión.

Las pruebas de rigidez dieléctrica del aceite aislante así como las características eléctricas del grilón, han sido comprobadas en estudios previos[2].

3.1.7. Prueba de los condensadores MZC-CT8G-50KV-153M.

Antes de realizar el montaje completo del condensador de alta tensión, se realizaron pruebas a 3 condensadores base[3], MZC-CT8G-50KV-153M.

De acuerdo a la hoja de datos de este condensador, soporta una tensión dc nominal de 50 kV al aire libre y 75 kV al estar sumergido en aceite aislante, sin embargo a estos valores se les debe aplicar el factor de corrección por altitud[4], en cuyo caso las tensiones corregidas serian 43 kV y 64 KV respectivamente.

Con base a esta información, se montó el circuito de rectificación de media onda, detallado en el manual de prácticas del laboratorio, el condensador de prueba fue

[2] Véase, J. Padilla y J Rodriguez, "Diseño y construcción de dos diodos de potencia, voltaje anodo cátodo inverso de 150 kV, corriente nominal de 50 mA para el laboratorio de alta tensión de la Universidad Politécnica Salesiana", secciones 2.3.2 y 2.3.3, págs. 50-53.
[3] Condensador base es un condensador individual MZC-CT8G-50KV-153M, que en un numero de 15, forman el condensador de alta tensión.
[4] Capítulo 1, sección 1.2.1

sumergido en aceite aislante como se muestra en la Figura. 3.12 , con una tensión de alimentación de 55 kV c.a., el valor medido de tensión c.c., fue de 47KV, por lo tanto el condensador funcionaba adecuadamente.

Figura. 3.12. Condensador base sumergido en aceite aislante

3.1.8. Prácticas del laboratorio de alta tensión con los condensadores de alta tensión diseñados y construidos.

La comprobación del adecuado funcionamiento de los condensadores diseñados y construidos, se da al realizar las diferentes prácticas del manual del laboratorio de alta tensión de la U.P.S, sede Cuenca y luego contrastar los resultados obtenidos con los resultados logrados al realizar las mismas prácticas con los elementos propios del laboratorio.

3.1.8.1. Generación y medición de tensión en corriente directa.

El voltaje directo es usado para realizar pruebas en sistemas de aislamiento, pudiendo ser.

- Prueba de perforación (destructiva), la cual mide la capacidad de un aislante para soportar una sobretensión de duración media, sin que se produzca disrupción.
- Medición de resistencia de aislamiento (no destructiva), desarrollada bajo condiciones normales de funcionamiento, su valor expresa la calidad de aislamiento entre 2 elementos conductores. [11]

3.1.8.1.1. Rectificación de media onda.

El circuito empleado se muestra en la Figura. 3.13, la tensión dc, se registra con el instrumento de medición HV9150, del panel de control [12]

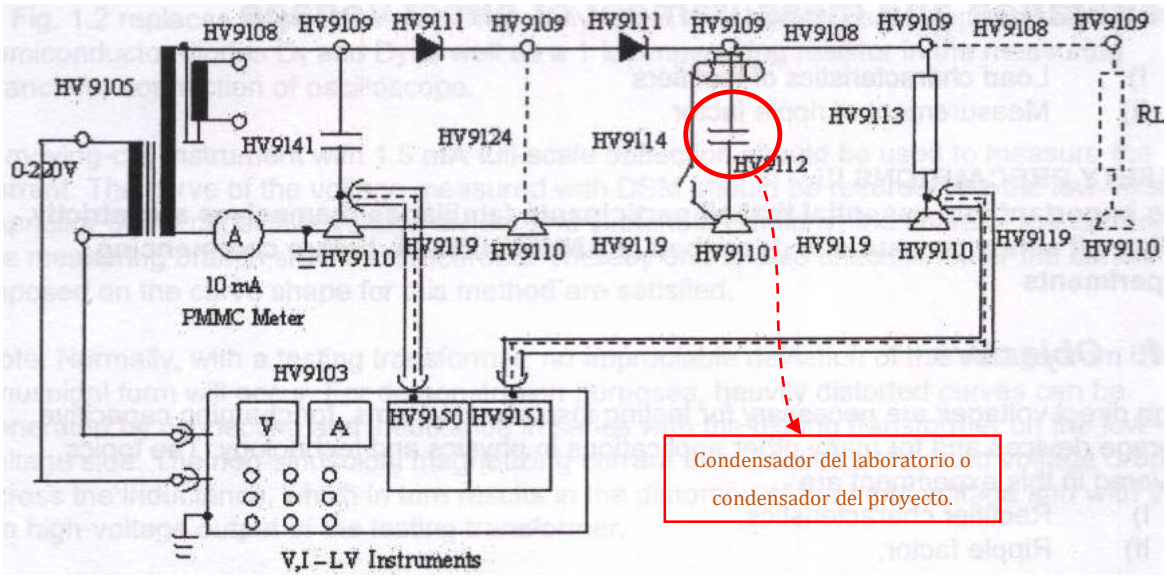


Figura. 3.13.Rectificación de media onda. Imagen obtenida del manual de prácticas del laboratorio de alta tensión, U.P.S Cuenca.

El modelo implementado en Simulink se muestra en la Figura. 3.14

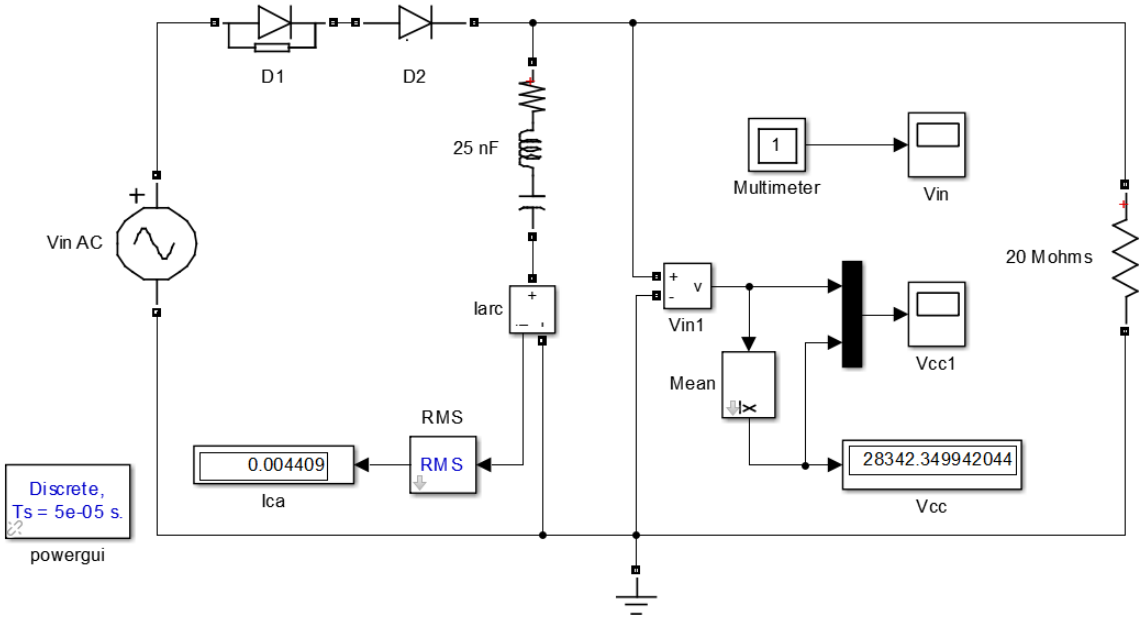


Figura. 3.14 Rectificador de media onda en Simulink.

Formas de onda obtenidas en la simulación, para una tensión de ingreso de 30.27 KV.

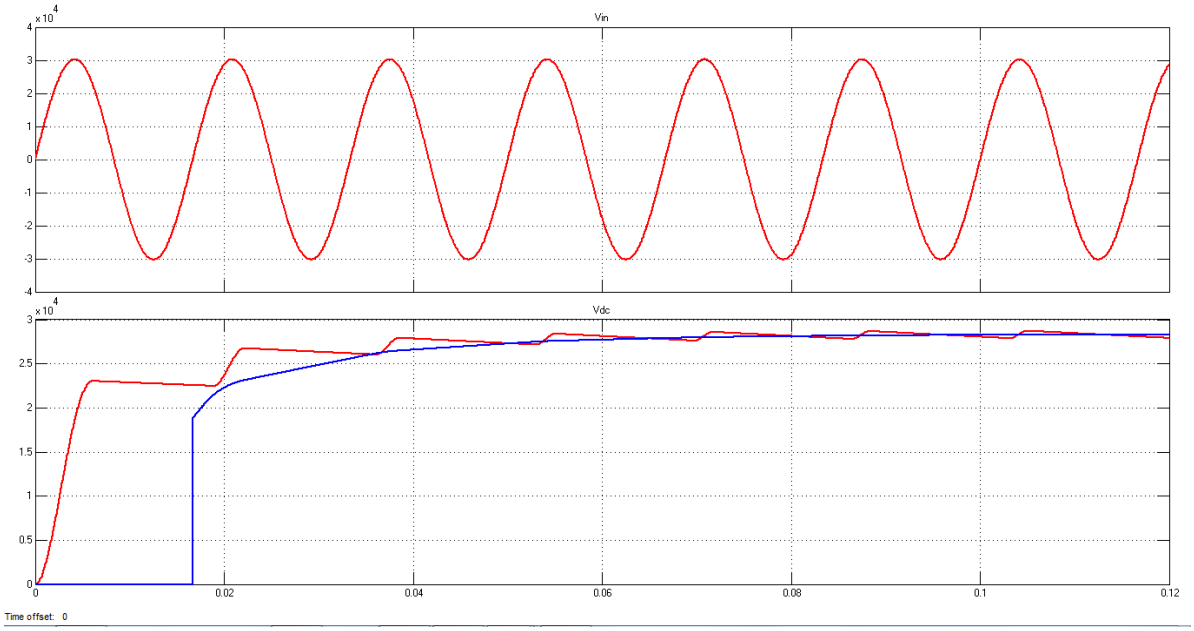


Figura. 3.15. Formas de onda obtenidas en la simulación.

Los resultados obtenidos tanto para el condensador 1 y 2 del proyecto, así como los resultados obtenidos para los condensadores del laboratorio se muestran en la Tabla 3.4 y la Tabla 3.5 respectivamente.

Donde:

- V_{ca} Voltaje rms suministrado por el secundario del transformador elevador de tensión.
- V_{cc} Voltaje dc medido, luego de la rectificación y filtrado.
- I_{rms} Corriente medida de la componente de rizado.

Capacitor 1 del Laboratorio.			**Capacitor 1 del Proyecto.**		
V_{ca}(KV)	**V_{cc}(KV)**	**I_{rms} (uA)**	**V_{ca}(KV)**	**V_{cc}(KV)**	**I_{rms} (uA)**
30.27	28.55	2546	30.13	28.39	2593
60.17	57.35	3673	60.08	56.66	5100
90.05	85.73	7700	90.49	84.23	7600
120.21	113.79	10400	120.5	110.09	10000
148.79	140.79	12800	150.52	135.02	12500

Tabla 3.4 Comparación capacitor 1 del laboratorio vs capacitor 1 del proyecto.

Capacitor 2 del Laboratorio.			Capacitor 2 del Proyecto.		
V_{ca}(KV)	V_{cc}(KV)	I_{rms} (uA)	V_{ca}(KV)	V_{cc}(KV)	I_{rms} (uA)
30.02	28.3	2600	30.47	28.71	2633
60.38	57.41	5100	60.51	57.13	5100
90.41	85.83	7800	90.02	83.93	7500
120.04	113.46	10400	120.27	110.13	10100
145.37	137.04	12800	150.03	134.88	12600
			155.5	139.25	13000

Tabla 3.5 Comparación capacitor 2 del laboratorio vs capacitor 2 del proyecto.

Al comparar los resultados de las 2 tablas, se nota una gran similitud, tanto en las tensiones logradas, así como el valor de la corriente de componente de rizado, por lo tanto su funcionamiento de los componentes construidos es correcto, la diferencia en los valores de tensión, se debe a la tolerancia en los valores de los condensadores base[5].

3.1.8.1.2. Factor de rizado.

El circuito de rectificación de media onda, se modifica como se muestra en la Figura. 3.16, los valores de C.A., serán registrados por el instrumento de medida HV9150. [12]

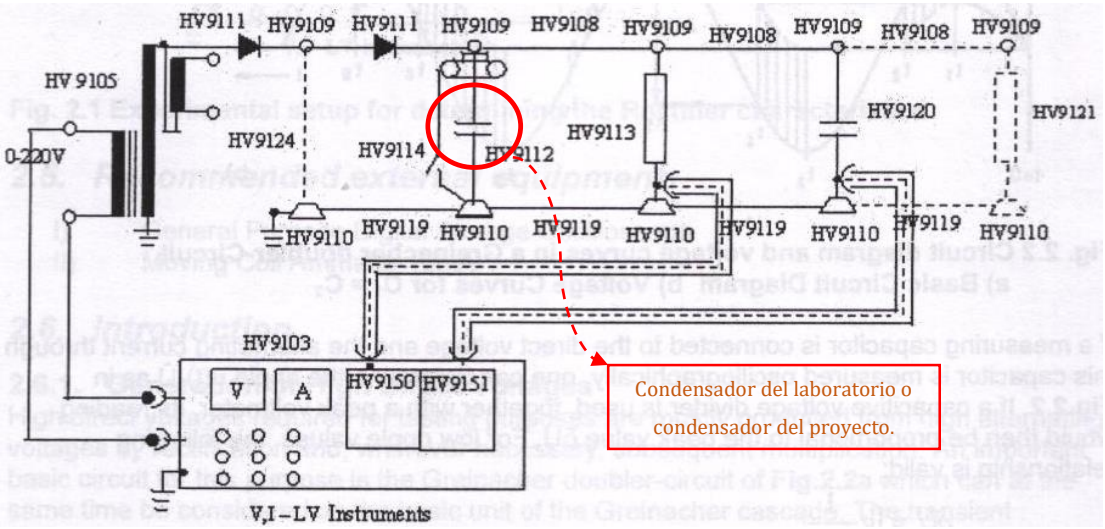


Figura. 3.16. Circuito para medición de factor de rizado. Imagen obtenida del manual de prácticas del laboratorio de alta tensión, U.P.S Cuenca.

[5] Tabla 3.3. Información técnica del capacitor MZC-CTG8G-50KV-153P

Donde:

- V_{cc} Voltaje dc medido, luego de la rectificación y filtrado.
- V_{rms} Voltaje rms del componente de rizado.
- I_{rms} Corriente medida de la componente de rizado.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.6 Rizado para el circuito de media onda.

Capacitor Tipo			**Capacitor 1 del Proyecto.**			**Capacitor 2 del Proyecto.**		
Vcc (kV)	**Irms (uA)**	**Vrms (kV)**	**Vcc (kV)**	**Irms (uA)**	**Vrms (kV)**	**Vcc (kV)**	**Irms (uA)**	**Vrms (kV)**
10.35	1650	1.78	10.38	1675	1.66	10.43	1646	1.67
20.23	3200	3.48	20.32	3233	3.46	20.03	3169	3.41
30.27	4700	5.16	30.17	4600	6.18	30.17	4600	6.14
40.27	6200	6.81	40.16	6000	11	40.29	6100	10.7
50.25	7800	8.41	50.15	7300	18	50.22	7400	17.3

Tabla 3.6 Rizado para el circuito de media onda.

Al comparar los resultados de la Tabla 3.6, se nota una gran similitud, tanto en las tensiones logradas, así como el valor de la corriente de componente de rizado, la diferencia en los valores de tensión de rizado, se debe a la tolerancia de los condensadores base.

3.2.Construcción de la resistencia de medición de 300MΩ.

3.2.1. Elección de las resistencias SGP78.

En la sección 2.1.2, se observan los parámetros que debe cumplir la resistencia de medición para realizar las prácticas en el laboratorio de alta tensión de la U.P.S sede Cuenca.

A continuación se explica porque se eligió las resistencias SGP78.

Partimos del $V_P = 141.421kV$,[1] para tener un margen de seguridad se redondeó a un voltaje nominal de $V_P = 150kV$ y teniendo en cuenta el valor nominal de la resistencia a construir $R = 300M\Omega$ se procedió con el cálculo de la corriente nominal:

$$I_N = \frac{V_N}{R_N}$$

$$I_N = \frac{150kV}{300M\Omega}$$

$$I_N = 0.5mA$$

Al tener la corriente nominal se calculó la potencia nominal, que tendría que disipar por efecto Joule el elemento en conjunto, en un caso ideal a una altitud de cero metros sobre el nivel del mar (*0 msnm*).

$$P_N = I^2 \cdot R$$

$$P_N = (0.5E-3)^2 \cdot (300E6)$$

$$P_N = 75W$$

Al encontrarnos a una altura de 2550 msnm se utiliza el factor de corrección $K_a = 1.35$ según la norma IEC 60071-2 se calculó una potencia corregida nominal excedida en un 35% que tendría que disipar el componente total con respecto a los datos del laboratorio.

$$P_C = P_N \cdot K_a$$

$$P_C = 75 \cdot 1.35$$

$$P_C = 101.25W$$

Teniendo las características de las resistencias según su hoja de datos se calculó el número de resistencias que se colocaron en el circuito para la resistencia de medición.

$$\#R = \frac{R_T}{R_i}$$

$$\#R = \frac{300}{25}$$

$$\#R = 12\ resistencias$$

$$P_T = P_i \cdot \#R$$

$$P_T = 11 \cdot 12$$

$$P_T = 132W$$

Aplicando el factor de corrección $K_a = 0.86$ de la norma ANSI/IEEE C30-20-2 con la cual se calcula una disipación de potencia corregida disminuida en un 24% que tendría que disipar el componente total con respecto a los datos del componente individual interno.

$$P_C = P_T \cdot K_a$$

$$P_C = 132 \cdot 0.86$$

$$P_C = 113.52W$$

La disponibilidad en el mercado local de las resistencias SGP78, fue uno de los aspectos que jugó un papel importante para elegirlos como elementos que formen parte de la resistencia de medición, ya que al ser relativamente fácil su adquisición esto permitiría que la construcción se realice en un menor tiempo.

La Figura. 3.17 muestra el circuito resistencia de alta tensión con estos elementos, tomando en cuenta que las resistencias tienen un valor de 25 MΩ individualmente y de 300 MΩ conectadas en serie.

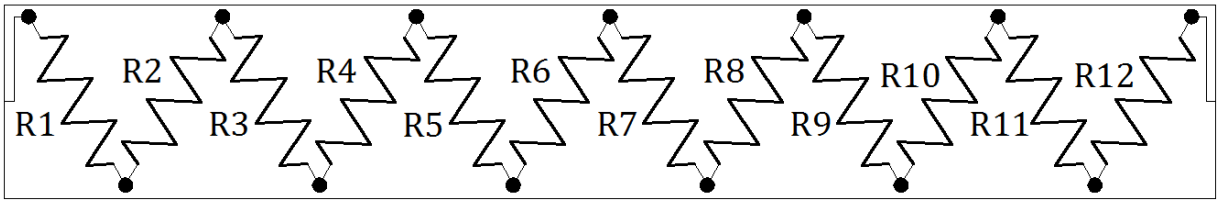


Figura. 3.17. Resistencias conectadas en serie.

Una vez realizados los cálculos de voltaje, resistencia y número de elementos se procedió a armar el circuito que conforma la resistencia de medición, posteriormente se realizó las pruebas en el laboratorio de alta tensión de la U.P.S sede Cuenca.

3.2.2. Hojas de Datos.

Las resistencias de alta tensión Serie SGP/OGP EE.UU. Patente-No. 4859981 con un coeficiente de temperatura de 80 ppm/°C en función de tolerancias de precisión (0.1% -10%) y rango óhmico (100 Ω - 10 GΩ)

La serie SGP cumple los requisitos de valores elevados de resistencia en función de alto voltaje (Figura. 3.18).

Diseño completo no inductivo con proceso de regulación digital. Esta serie emplea una película metálica (METOXFILM) especial, lo que demuestra una excelente estabilidad de la resistencia mientras oscila entre 100Ω a 10GΩ a altas temperaturas hasta 225°C. Potencia y tensión probada en funcionamiento continuo que han sido previamente

verificadas por rendimiento estacionario, así como condiciones de sobrecarga momentánea.

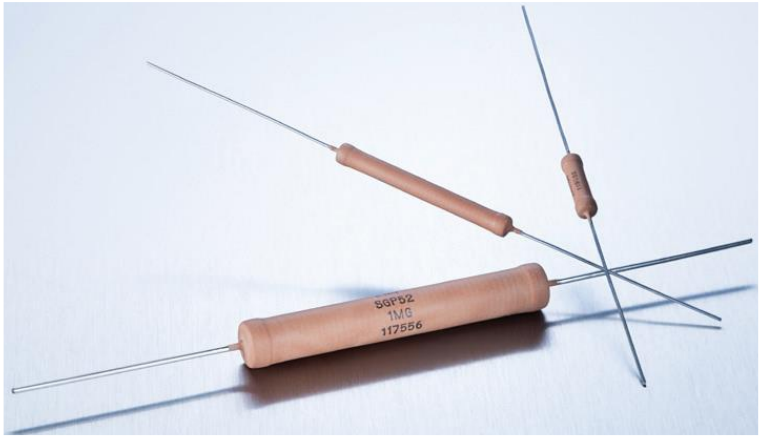


Figura. 3.18. Resistencias SGP de METOXFILM especial.

3.2.2.1. Características Generales:

- Valores de resistencia: hasta los 10 GΩ.
- Tolerancia de resistencia: desde ± 0.1% hasta ± 10%.
- Coeficiente de temperatura: 80 ppm/°C.
- Voltaje máximo de operación continua: 48000 V.
- Estabilidad de vida de carga: típico ±0.02% por 1000 horas.
- Temperatura máxima de operación: +225°C. (Figura. 3.19)

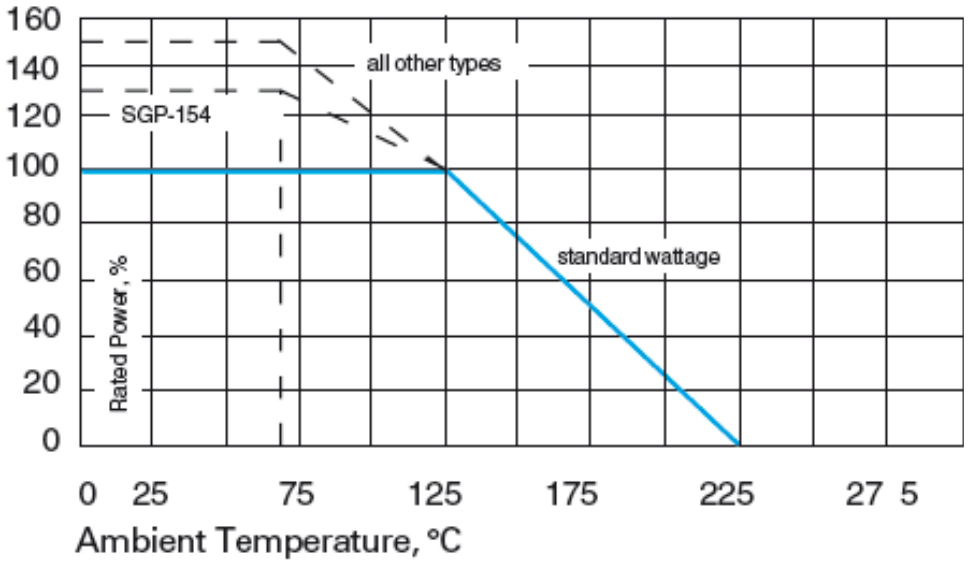


Figura. 3.19. Temperatura máxima de operación.

3.2.2.2. Especificaciones:

- Tolerancia de resistencia: estándar: ±1% a ±10% (±2% a ±10% por encima de 1GΩ) (tolerancias de hasta ± 0,1% a pedido especial).
- Coeficiente de temperatura: estándar ±80 ppm/°C de -15°C a +105°C, referenciado a +25°C.
- Coeficiente de tensión: ver esquema.
- Rigidez dieléctrica: 1000 V DC.
- Resistencia de aislamiento: 10 GΩ min.
- Sobrecarga/sobretensión: 5 veces la potencia nominal de 125°C con tensión aplicada que no exceda de 1.5 veces la máxima tensión de funcionamiento continuo durante 5 segundos. DR 0.5% máx.
- Vida de la carga: 1000 horas a 125°C y la potencia nominal, los componentes con 1% tol. DR 0.2% máx., excedencia de rango ("S") DR = 0.5% máx.
- Resistencia a la humedad: MIL-STD-202, Método 106, DR 0.4% máx.
- Choque térmico: MIL-STD-202, Método 107, Cond. C, DR 0.25% máx.
- Encapsulación: conformal de silicona.
- Material de ejecución: cobre OFHC, estañado.

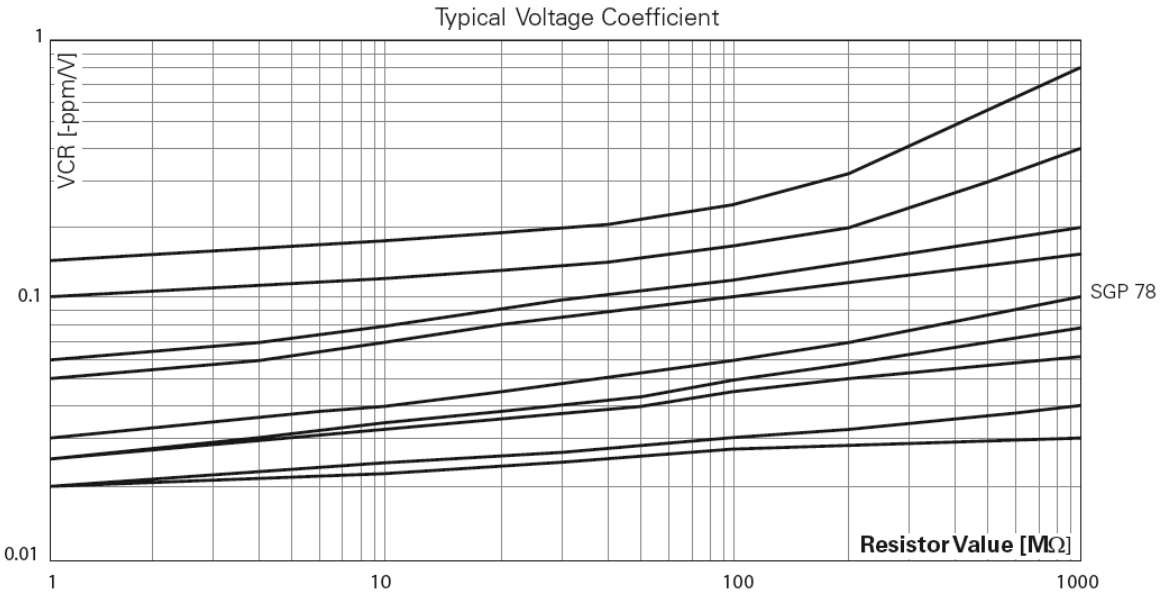


Figura. 3.20. Coeficiente de tensión de la resistencia SGP78.

3.2.2.3. Resistencia SGP78.

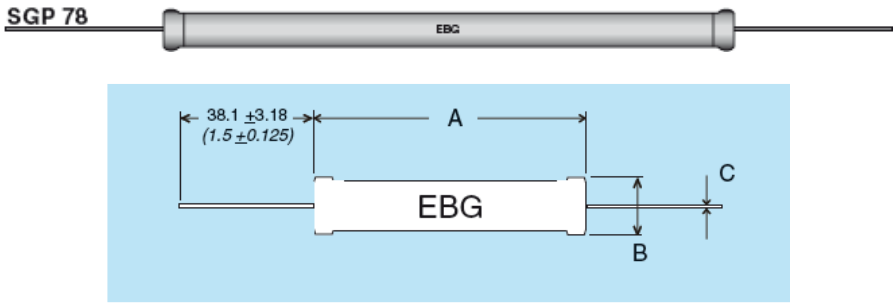


Figura. 3.21. Dimensiones de la resistencia SGP78.

Model no.	Watt-age 25°C	Watt-age 75°C	Watt-age 125°C	Max. Cont. Oper. V (kV)	Max. kV "S" **	Resistance F (=1%)		s-Resistance max. (2% Tol.)	Dimensions in millimeters		
						Min.	Max.		A ± 0.50	B ± 0.50	C ± 0.50
						ohmic values					
OGP 13	1.0	1.0	0.60	1.5	2.4	100	50M	500M	13.30	4.20	0.60
OGP 20	1.5	1.5	1.00	2.0	3.2	200	100M	1G	19.70	4.20	0.60
OGP 26	1.9	1.9	1.25	4.0	6.4	300	150M	2G	26.20	4.20	0.60
OGP 30	2.5	2.5	1.50	5.0	8.0	500	250M	3G	32.30	4.20	0.60
OGP 39	3.0	3.0	2.00	6.0	9.6	700	300M	5G	39.40	4.20	0.60
OGP 52	3.3	3.3	2.50	10.0	12.0	400	2G	-	49.50	4.20	0.60
SGP 20	2.5	2.5	1.50	3.0	4.8	200	250M	1G	20.20	8.20	1.00
SGP 26	3.7	3.7	2.50	4.0	6.4	250	300M	1G	26.90	8.20	1.00
SGP 32	4.5	4.5	3.00	5.0	8.0	300	400M	1.5G	33.00	8.20	1.00
SGP 39	5.2	5.2	3.50	8.0	12.8	400	500M	1.5G	39.50	8.20	1.00
SGP 52	7.5	7.5	5.00	10.0	16.0	500	750M	2.5G	52.10	8.20	1.00
SGP 78	11	11	7.50	15.0	24.0	900	1G	4G	77.70	8.20	1.00
SGP 103	12	12	8.00	20.0	32.0	1K2	1G	2G	102.90	8.20	1.00
SGP 124	15	15	10.00	25.0	40.0	1K5	1G	8G	123.70	8.20	1.00
SGP 148	30	30	20.00	45.0	-	10K	3G	10G	148.00	16.00	-
SGP 154	20	20	15.00	30.0	48.0	2K0	2G	10G	153.70	8.20	1.00

Tabla 3.7. Dimensiones de resistencias para alta tensión.

Las resistencias para tensiones de hasta un 60% superior a los valores que figuran en la Tabla 3.7 pueden ser pedidas mediante la adición de "S" a la designación del modelo.

Patentado especial (Patente EE.UU.-n de EBG. 4859981) de diseño no inductivo el cual ofrece una ventaja excepcional sobre otras técnicas.

El diseño incorpora un método único de valor de fabricación con recorte digital. Otros métodos poco deseables incluyen un método "analógico" de abrasión y retiro de material resistivo, que con frecuencia se traduce en una sección débil. El patentado de procesos EBG evita este problema.

** Las resistencias están diseñadas para funcionar en aire y atmósferas no agresivas.

3.2.3. Cuadro de Procesos.

En la Figura. 3.22 se observa el proceso eléctrico y mecánico seguido para diseñar y construir la resistencia de medición.

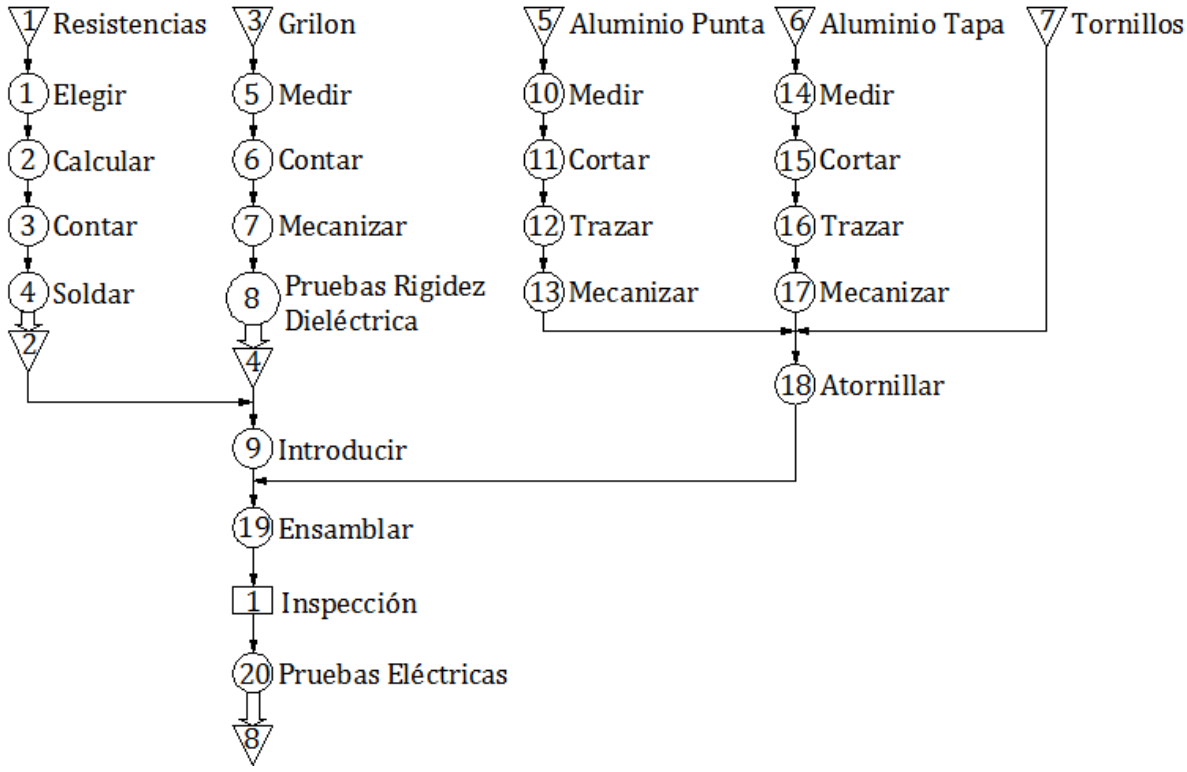


Figura. 3.22. Cuadro de procesos eléctricos y mecánicos.

3.2.4. Proceso Mecánico.

En este punto se presentan los procesos mecánicos de construcción que se realizaron para la fabricación de la resistencia de medición, considerando las características mecánicas y eléctricas de cada uno de los materiales que componen dicho elemento. El grilón como dieléctrico, es la mejor opción, por sus propiedades aislantes y su fácil adquisición en el mercado local. Y el aluminio como conductor, es uno de los materiales que presentan mayores ventajas sobre los demás.

A continuación, se explica el proceso de fabricación de cada uno de los elementos que componen la resistencia de medición.

3.2.4.1. Armado del Circuito.

Para elegir las dimensiones del cilindro, se parte de la cantidad y características físicas de cada uno de los componentes del circuito, el mismo que va a ir alojado dentro del cilindro, como por ejemplo: resistencias, barras de sujeción y correas de sujeción.

De la Tabla 3.7, se obtienen las dimensiones de la resistencia SGP78, que da una longitud de 70.70mm y un diámetro de 8.20mm. Partiendo de estas dimensiones se arma el circuito, como se explicó en el capítulo anterior. El circuito consta de doce resistencias conectadas en serie, como se presenta en la Figura. 3.17

3.2.4.2. Cuerpo de la resistencia.

El cuerpo del cilindro de la resistencia, Figura. 3.23, alojará el circuito, resistencias en serie, y aire como dieléctrico. Además tendrá un roscado NPT en cada uno de sus extremos.

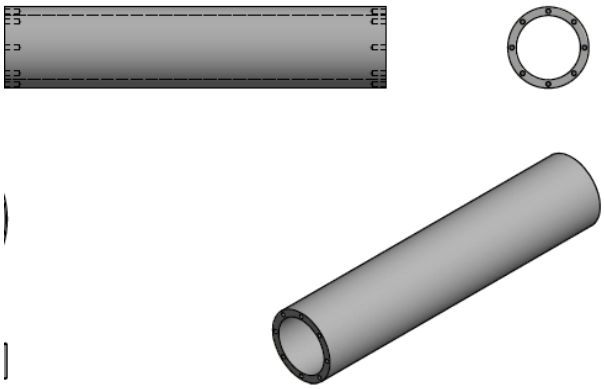


Figura. 3.23. Cuerpo de la resistencia de alta tensión.

3.2.4.3. Aluminio.

Para ensamblar el circuito se utilizó suelda de estaño para interconectar las resistencias, al igual que las tapas y terminales, ya que una de las ventajas del aluminio es la resistencia a la corrosión, su durabilidad y su peso ligero.

3.2.4.3.1. Características principales del aluminio.

El aluminio es un metal ligero, blando pero resistente, de aspecto gris plateado. Su densidad es aproximadamente un tercio de la del acero o el cobre. Es muy maleable y dúctil y es apto para el mecanizado y la fundición.

Debido a su elevado calor de oxidación se forma rápidamente al aire una fina capa superficial de óxido de aluminio (Alúmina Al2O3) impermeable y adherente que detiene el proceso de oxidación proporcionándole resistencia a la corrosión y durabilidad.

3.2.4.3.2. Punta.

La punta, Figura. 3.24 sirve de soporte al cuerpo de la resistencia. Está construida de tal manera que este elemento se acople a la corona de conexión, la punta se unirá a la tapa, a través de un perno de cabeza hexagonal M8x20.

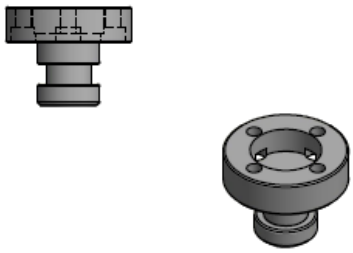


Figura. 3.24. Punta para la resistencia de alta tensión.

3.2.4.3.3. Tapa.

La tapa es el elemento que sellará el cuerpo del cilindro de tal forma que todas las resistencias queden cubiertas, está construida de acuerdo a las dimensiones, tanto del radio interno como del radio externo del cuerpo, Figura. 3.25

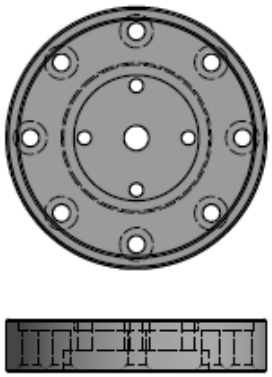


Figura. 3.25. Tapa de la resistencia de alta tensión.

3.2.4.3.4. Terminal del circuito.

Este terminal ira soldado, a cada uno de los extremos del circuito y se conectara al terminal hacia la tapa. Figura. 3.26.

Figura. 3.26.Terminal del circuito.

3.2.4.3.5. Terminal hacia la tapa.

Este elemento consta de dos roscas, una interna y otra externa. La rosca interna sirve para conectarse con el terminal del circuito y la rosca externa sirve para fijar el circuito de resistencias en serie a la tapa, como se muestra en la Figura. 3.27.

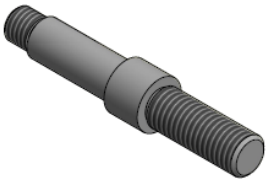


Figura. 3.27. Terminal hacia la tapa de la resistencia de alta tensión.

La Figura. 3.28, presenta el ensamble total de la resistencia de medición.

Figura. 3.28. Ensamblado total de la resistencia de medición.

3.2.5. Proceso Eléctrico.

3.2.5.1. Características del grilón y prueba de rigidez dieléctrica.

En la fase de construcción para la resistencia de medición no se emplearon materiales cerámicos debido a un costo elevado, originado en la construcción de moldes a medida, se optó por trabajar con grilón que es un material termoplástico dieléctrico, fácil de mecanizar, buena resistencia mecánica, no se desgasta con facilidad y puede soportar temperaturas de 10 a 100°C.

En la Tabla 3.8 se observa algunas características técnicas del grilón.

PROPIEDAD	UNIDAD	GRILON
Densidad	g/cm^3	1.14
Resistencia a la tracción	Kg/cm^2	630
Elongación	%	60 – 300
Dureza	---------	R 119
Resistencia al impacto	ft.lb/in	0.8 – 5.5
Resistencia dieléctrica	Kvolt/mm	23
Absorción de humedad 23°C a 60%	%	2.5
Temperatura de trabajo	°C	90*

Tabla 3.8.Características técnicas del grilón.

Información detallada sobre las pruebas de rigidez dieléctrica del grilón, referirse a la tesis "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE DOS DIODOS DE POTENCIA, VOLTAJE ANODO CATODO INVERSO DE 150kV, CORRIENTE NOMINAL DE 50mA PARA EL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA".

3.2.6. Prácticas del laboratorio de alta tensión con la resistencia de medición diseñada y construida para el laboratorio.

Verificamos el correcto funcionamiento de la resistencia de medición diseñada y construida para el laboratorio realizando las práctica 2 de Generación y Medición de Voltaje en Corriente Continua (Rectificación de Media Onda) y comparando los resultados con los valores obtenidos al realizar las mismas pruebas con la resistencia de medición existente en el laboratorio, como se puede observar en la Tabla 3.9 y Tabla 3.10, en la

Figura. 3.29 son contrastadas.

Resistencia del Laboratorio de 280MΩ		
Vp (KV)	**Vcc (KV)**	**Icc (uA)**
10,83	10,06	35
34,28	32,43	113
50,26	47,73	166
72,84	69,37	242
101,09	96,15	335
130,21	123,09	432

Tabla 3.9. Valores Medidos de voltajes y corrientes en la resistencia del laboratorio.

Resistencia del Proyecto de 300MΩ		
Vp (KV)	**Vcc (KV)**	**Icc (uA)**
11,58	10,07	35
34,19	30,25	105
50,76	45,21	158
72,98	65,04	228
101,68	90,45	316
130,47	115,13	406

Tabla 3.10. Valores Medidos de voltajes y corrientes en la resistencia del proyecto.

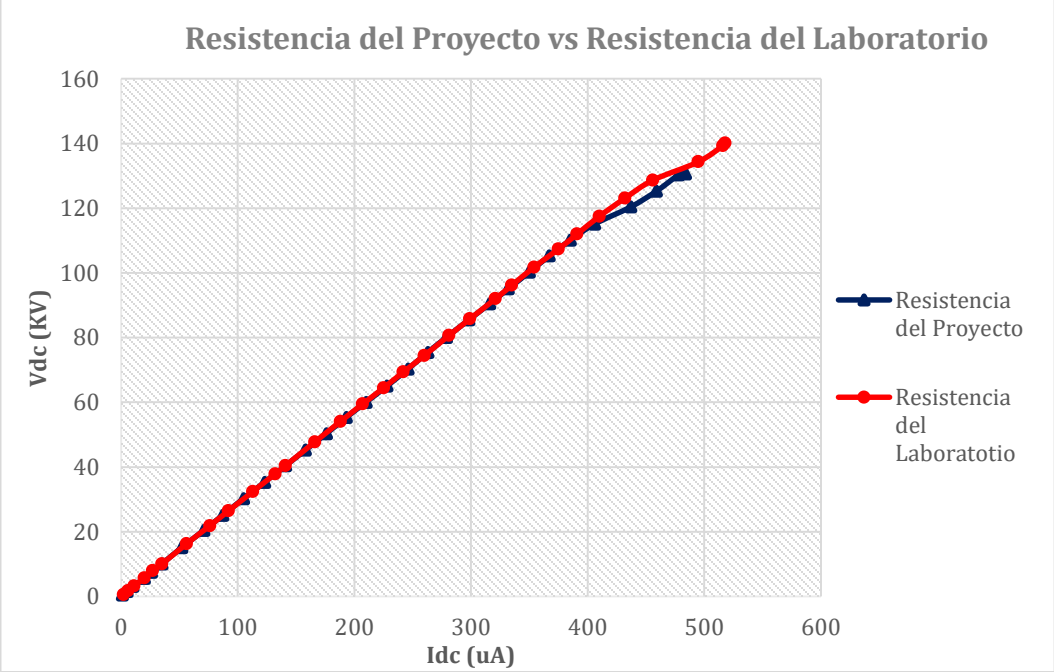


Figura. 3.29. Curvas contrastadas entre la resistencia del Proyecto y la del Laboratorio.

3.3. Pruebas del factor de disipación (tangente delta) en dos condensadores de impulso de 25000pF y una resistencia de medición de 300MΩ

Un test de tangente delta se orienta a la detección de defectos en el aislamiento a través de aplicar C.A., a transformadores, bujes, barras, generadores, motores, interruptores de alta tensión, etc. están constituidas por piezas metálicas y piezas de aislamiento, por lo tanto poseen y asocian propiedades capacitivas, cada objeto de prueba consta de varias capacidades.

Cada material aislante contiene electrones libres, los cuales muestran poca pérdida bajo condiciones de corriente continua *C.C.* con $P = U^2/R$. Aplicando corriente alterna *C.A.* se produce un comportamiento llamado pérdida por histéresis dieléctrica, que es análoga a la pérdida por histéresis en el hierro. [13]

De acuerdo con la norma IEC 60384-8/-21/-9/-22, los condensadores cerámicos Clase 1, no podrán sobrepasar los valores de factor de disipación, mostrados en la Tabla 3.11. [14]

Coeficiente de temperatura de la cerámica.	**Máximo factor de disipación.**
$100 \geq \alpha > -750$	$tan\delta \leq 15E-4$
$-750 \geq \alpha > -1750$	$tan\delta \leq 20E-4$
$-1500 \geq \alpha > -3300$	$tan\delta \leq 30E-4$
$-3300 \geq \alpha > -5600$	$tan\delta \leq 40E-4$
≤ -5600	$tan\delta \leq 50E-4$
Para valores de capacitancia $< 50\ pF$ el factor de disipación podría ser mayor.	

Tabla 3.11. Máximo FD, según coeficiente de temperatura de la cerámica.

Las perdidas óhmicas en estos condensadores dependen de factores tales como, temperatura, tensión aplicada y la frecuencia [14].

3.3.1. Prueba de Tangente Delta o Factor de Disipación en Cables y/o Resistencias.

La medida del factor de disipación es un promedio del factor de disipación de cada tramo elemental de aislamiento, pruebas eficaces de factor de disipación se pueden realizar en longitudes relativamente cortas de cable (especialmente en cables blindados y cables no blindados con cubierta metálica).

El modo UST del equipo HAEFELY TRENCH disponible en el laboratorio de alta tensión en la U.P.S sede Quito, Campus Kennedy Norte, es la situación más común al medir capacitancia y factor de disipación, diversas capacitancias, sin conexión a tierra pueden ser medidas usando este modo, posibilitando que la máxima corriente de prueba en los instrumentos de medición, no sea excedida.

En el modo UST, la máxima precisión es alcanzada, siendo su esquema básico el mostrado en la Figura. 3.30 [13]

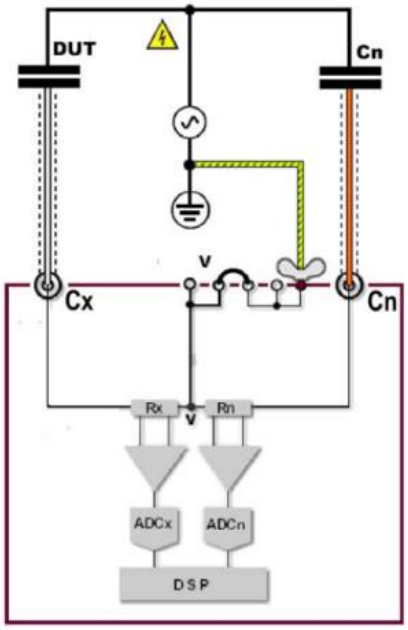


Figura. 3.30. Esquema estándar para pruebas de FD.

Una resistencia puede ser considerada un conductor blindado o cable forrado, para su prueba, se aplica tensión de prueba al conductor con el blindaje del cable conectado a tierra, como se muestra en la Figura. 3.31.

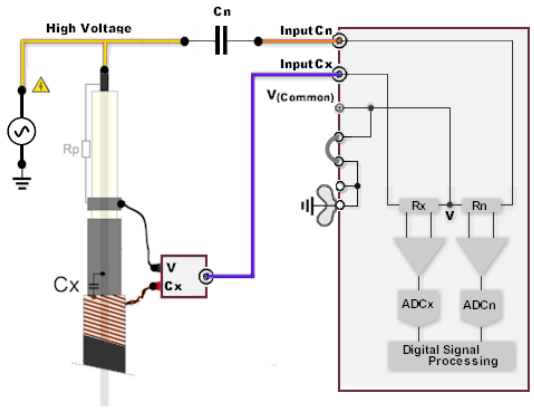


Figura. 3.31. Esquema de pruebas FD, para cables o resistencias.

La prueba se realiza en el modo UST (Test de muestra sin conexión a tierra) (HV con los conductores, *Cx* de entrada para blindar). [13]

3.3.2. Prueba de Tangente Delta o Factor de Disipación en Condensadores.

Con la prueba en condensadores se verifica la calidad del aislamiento del dispositivo. Normalmente, el factor de disipación debe ser bajo y permanecer estable, así como la capacitancia, generalmente se chequean capacitores para corrección del factor de potencia, capacitores para sobretensiones, capacitores para almacenamiento de energía, etc.

Los condensadores se pueden construir basados en módulos de capacitores individuales, si un módulo muestra un problema, el resultado siempre es el promedio de todos los módulos conectados, por lo tanto, un pequeño cambio en el valor total medido, podría mostrar un gran problema en un solo módulo. [13]

El circuito para realizar la prueba de factor de disipación es el mostrado en la Figura. 3.30

3.3.3. Factor de Disipación de aislamiento de aparatos típicos.

En la Tabla 3.12 se muestran valores típicos que se encuentran en la práctica; sin embargo, los límites superiores no son confiables para condiciones normales servicio.

Equipo	Factor de disipación a 20°C
Transformador con aceite, nuevo, AT (>115kV)	0.15% … 0.75%
Transformador con aceite, 15 años, AT (>115kV)	0.75% … 2.0%
Transformador con aceite, 15 años, BT, distribución	1.5% … 5%
Disyuntores, llenados con aceite	0.5% … 2.0%
Cables con papel impregnado de aceite, "solido" (hasta 27.6kV) nuevo	0.5% … 1.5%
Cables con papel impregnado de aceite, AT, con aceite o presurizados	0.2% … 0.5%
Bobinados del estator, 2.3 … 13.8kV	2.0% … 8.0%
Condensadores	0.2% … 0.5%
Bujes, (sólidos o secos)	3.0% … 10.0%
Bujes, llenados compuestos, hasta 15kV	5.0% … 10.0%
Bujes, llenados compuestos, 15 … 46kV	2.0% … 5.0%
Bujes, llenados compuestos, bajo los 110kV	0.8% … 4.0%
Bujes, llenados compuestos, por encima de los 110kV	0.3% … 3.0%

Tabla 3.12. Factor de disipación de equipos típicos.

3.3.4. Resultados obtenidos, para condensador tipo.

Device under Test DUT	
Type	Capacitor 25nF
Description	cap lab
User	UPS
Manufacturer	Haefely
Location	Quito – Kennedy
SerialNo	n.a.
InventoryNo	n.a.
AuxiliaryTitle	
Operator	Andres Arias., Jefferson Gutama
Supervisor	Diego Carrion

JobNo	1
Notes	
InsulationDefinition	Miscellaneous : CVT
InsulationTemperature	20.0 °C
AmbientTemperature	18.0 °C
RelativeHumidity	30 % r.h.
TemperatureCorrection	1

Tabla 3.13. Información del Elemento de Prueba Condensador Tipo.

Measurements					
Time	**SqNr**	**U rms [V]**	**DF (tand) @ 20°C**	**Cx [F]**	**Frequency [Hz]**
12/03/2014 0:47	1	467	0.001602	2.42E-04	60.04
12/03/2014 0:48	2	793	0.001602	2.42E-04	60.07
12/03/2014 0:49	3	941	0.001604	2.42E-04	59.97
12/03/2014 0:49	4	1246	0.001604	2.42E-04	59.99
12/03/2014 0:50	5	1527	0.001606	2.42E-04	59.97
12/03/2014 0:50	6	1862	0.001607	2.42E-04	59.94
12/03/2014 0:51	7	2173	0.001610	2.42E-04	60.01
12/03/2014 0:51	8	2415	0.001610	2.42E-04	59.98
12/03/2014 0:51	9	2609	0.001610	2.42E-04	60
12/03/2014 0:52	10	3099	0.001612	2.42E-04	60.06
12/03/2014 0:53	11	3410	0.001615	2.42E-04	59.98
12/03/2014 0:53	12	3586	0.001618	2.42E-04	59.97
12/03/2014 0:55	13	3796	0.001621	2.42E-04	60.01
12/03/2014 0:55	14	4344	0.001625	2.42E-04	60
12/03/2014 0:55	15	4619	0.001629	2.42E-04	60.01
12/03/2014 0:55	16	4866	0.001629	2.42E-04	60.05
12/03/2014 0:56	17	5031	0.001637	2.42E-04	59.98
12/03/2014 0:56	18	5507	0.001643	2.42E-04	60.07
12/03/2014 0:57	19	5860	0.001659	2.42E-04	60
12/03/2014 0:57	20	6257	0.001667	2.42E-04	60.05
12/03/2014 0:59	21	6720	0.001674	2.42E-04	60.04
12/03/2014 0:59	22	6828	0.001675	2.42E-04	60.03

Tabla 3.14. Datos y valores medidos del condensador tipo.

La información errónea de la columna Time, corresponde a los valores propios del sistema de medición.

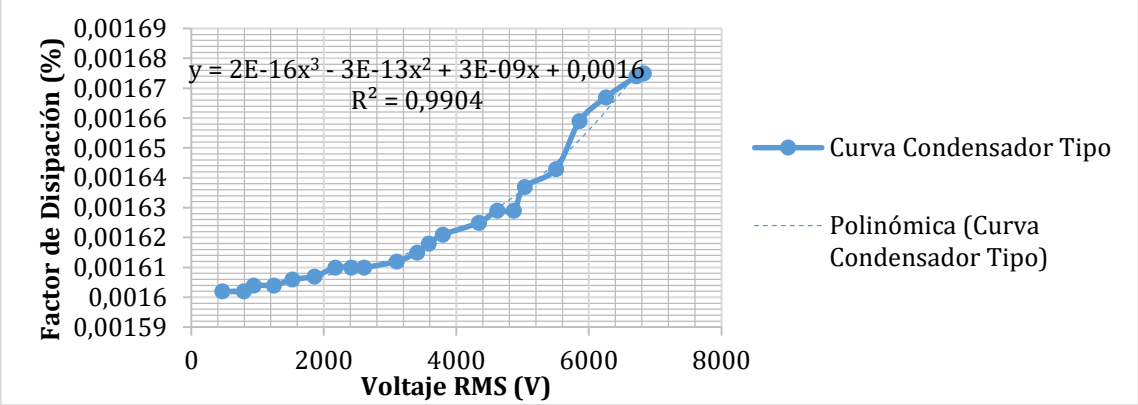


Figura. 3.32. Ajuste de curva y extrapolación para capacitor tipo.

3.3.5. Valores Medidos del Condensador 1 del Proyecto de Tesis.

Device under Test DUT	
Type	Condensador 25000pF
Description	cap proy
User	U.P.S Cuenca
Manufacturer	U.P.S Cuenca
Location	Cuenca - El Vecino
SerialNo	n.a.
InventoryNo	n.a.
AuxiliaryTitle	
Operator	Andres Arias., Jefferson Gutama
Supervisor	Diego Carrion
JobNo	1
Notes	
InsulationDefinition	Miscellaneous: CVT
InsulationTemperature	20.0 °C
AmbientTemperature	18.0 °C
RelativeHumidity	30 % r.h.
TemperatureCorrection	1

Tabla 3.15. Información del Elemento de Prueba Condensador 1.

Measurements					
Time	**SqNr**	**U rms [V]**	**DF (tand) @ 20°C**	**Cx [F]**	**Frequency [Hz]**
12/09/2014 1:04	1	519	0.00470	2.79E-04	59.99
12/09/2014 1:05	2	763	0.00502	2.80E-04	59.95
12/09/2014 1:06	3	970	0.00543	2.81E-04	60.01
12/09/2014 1:07	4	1304	0.00678	2.82E-04	60.03
12/09/2014 1:08	5	1561	0.00832	2.85E-04	59.93
12/09/2014 1:08	6	1878	0.00855	2.86E-04	59.95
12/09/2014 1:08	7	2247	0.01028	2.89E-04	59.93
12/09/2014 1:09	8	2471	0.01160	2.90E-04	59.96

12/09/2014 1:09	9	2752	0.01311	2.92E-04	60.03
12/09/2014 1:10	10	2952	0.01344	2.93E-05	60.04
12/09/2014 1:10	11	3391	0.01587	2.96E-04	60.07
12/09/2014 1:10	12	3654	0.01713	2.98E-04	60.05
12/09/2014 1:11	13	3917	0.01857	3.00E-04	60.02
12/09/2014 1:11	14	4478	0.02010	3.02E-04	60.02
12/09/2014 1:11	15	4547	0.02050	3.03E-04	60.04
12/09/2014 1:12	16	5032	0.02180	3.06E-05	59.97
12/09/2014 1:12	17	5134	0.02270	3.06E-04	59.98
12/09/2014 1:12	18	5357	0.02400	3.07E-04	59.96
12/09/2014 1:13	19	--	--	--	--
12/09/2014 1:13	20	--	--	--	--
12/09/2014 1:13	21	--	--	--	--
12/09/2014 1:13	22	--	--	--	--
12/09/2014 1:13	23	--	--	--	--

Tabla 3.16. Datos y valores medidos del condensador 1.

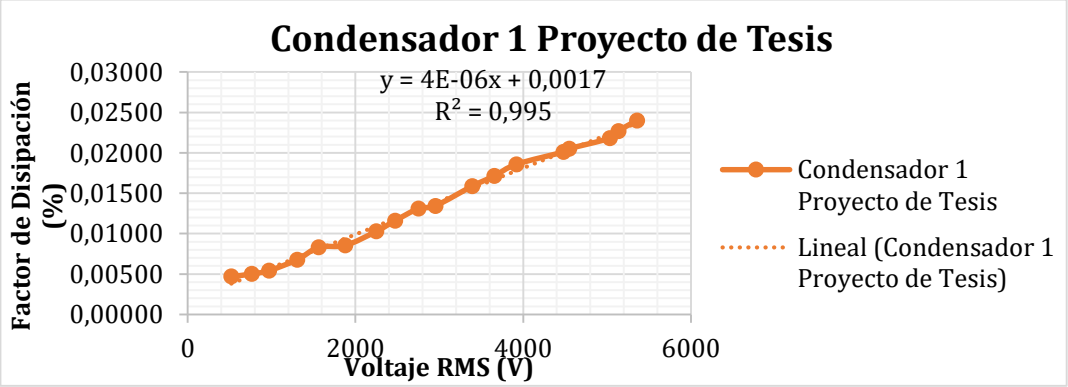


Figura. 3.33. Ajuste de curva y extrapolación para capacitor 1 del proyecto.

3.3.6. Valores Medidos del Condensador 2 del Proyecto de Tesis.

Device under Test DUT	
Type	Condensador 25000pF
Description	cap proy
User	U.P.S Cuenca
Manufacturer	U.P.S Cuenca
Location	Cuenca - El Vecino
SerialNo	n.a.
InventoryNo	n.a.
AuxiliaryTitle	
Operator	Andres Arias., Jefferson Gutama
Supervisor	Diego Carrion
JobNo	2
Notes	
InsulationDefinition	Miscellaneous : CVT

InsulationTemperature	20.0 °C
AmbientTemperature	18.0 °C
RelativeHumidity	30 % r.h.
TemperatureCorrection	1

Tabla 3.17. Información del Elemento de Prueba Condensador 2.

Measurements					
Time	**SqNr**	**U rms[V]**	**DF (tand) @ 20°C**	**Cx[F]**	**Frequency[Hz]**
12/09/2014 1:24	1	533	0.00414	2.80E-04	60
12/09/2014 1:25	2	738	0.00444	2.81E-04	60.01
12/09/2014 1:26	3	920	0.00531	2.82E-04	60.04
12/09/2014 1:26	4	1250	0.00638	2.84E-04	60.01
12/09/2014 1:26	5	1526	0.00715	2.85E-05	60.06
12/09/2014 1:26	6	1802	0.00853	2.87E-04	60.02
12/09/2014 1:26	7	2170	0.00946	2.89E-04	60.05
12/09/2014 1:27	8	2443	0.01127	2.91E-04	60.04
12/09/2014 1:27	9	2773	0.01235	2.93E-04	59.99
12/09/2014 1:27	10	2983	0.01350	2.94E-04	59.96
12/09/2014 1:27	11	3360	0.01505	2.97E-04	59.96
12/09/2014 1:27	12	3561	0.01606	5.96E-04	59.99
12/09/2014 1:27	13	3989	0.01750	3.00E-04	59.98
12/09/2014 1:28	14	4629	0.02010	3.04E-05	60.02
12/09/2014 1:28	15	4605	0.02010	3.04E-05	60.03
12/09/2014 1:29	16	4790	0.02110	3.05E-04	59.99
12/09/2014 1:29	17	5179	0.02140	3.07E-04	59.97
12/09/2014 1:29	18	--	--	--	--
12/09/2014 1:29	19	--	--	--	--
12/09/2014 1:29	20	--	--	--	--

Tabla 3.18. Datos y valores medidos del condensador 2.

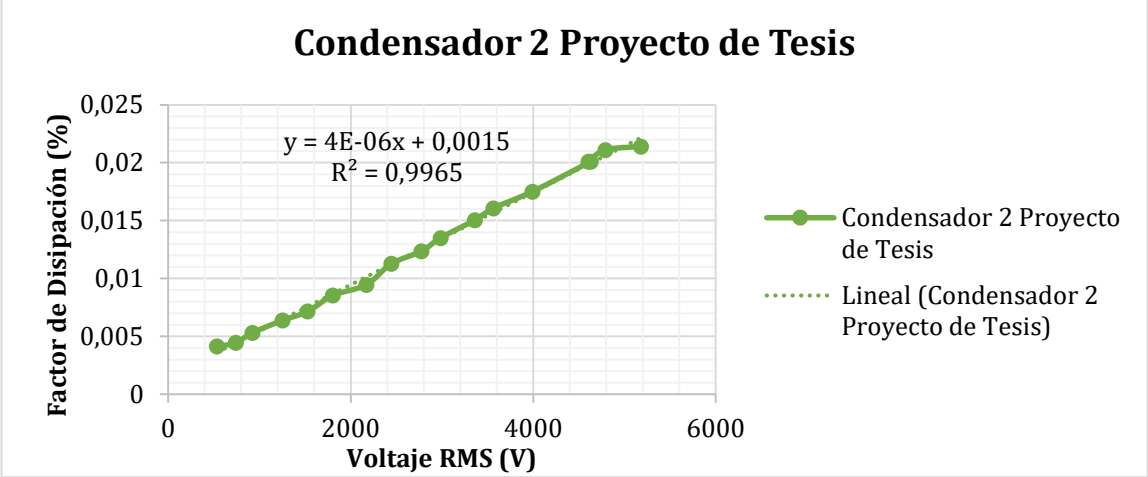


Figura. 3.34. Ajuste de curva para capacitor 2 del proyecto.

3.3.7. Valores de factor de disipación a 20°C de los condensadores comparados.

U rms [V]	% DF (tand) @ 20°C		
	Condensador Tipo	Condensador 1	Condensador 2
500	0.001602	0.00470	0.00414
750	0.001602	0.00502	0.00444
900	0.001604	0.00543	0.00531
1200	0.001604	0.00678	0.00638
1500	0.001606	0.00832	0.00715
1800	0.001607	0.00855	0.00853
2100	0.001610	0.01028	0.00946
2400	0.001610	0.01160	0.01127
2700	0.001610	0.01311	0.01235
3000	0.001612	0.01344	0.01350
3300	0.001615	0.01587	0.01505
3600	0.001618	0.01713	0.01606
3900	0.001621	0.01857	0.01750
4200	0.001625	0.02010	0.02010
4500	0.001629	0.02050	0.02010
4800	0.001629	0.02180	0.02110
5200	0.001637	0.02270	0.02140
5500	0.001643	0.02400	
5800	0.001659		
6200	0.001667		
6500	0.001674		
6800	0.001675		

Tabla 3.19. Comparación de valores de factor de disipación a 20°C de los condensadores.

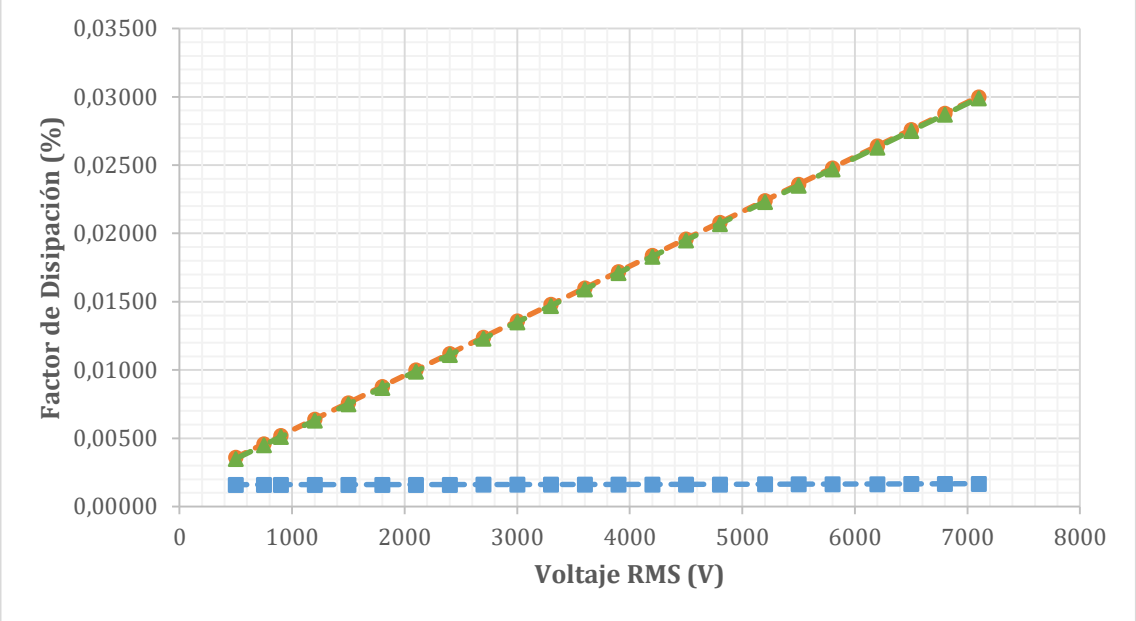


Figura. 3.35. Comparación entre capacitores, extrapolados.

3.3.8. Valores Medidos de la Resistencia Tipo.

Device under Test DUT	
Type	Resistencia 280Mohm
Description	res lab
User	UPS Quito
Manufacturer	Haefely
Location	Quito - Kennedy
SerialNo	1
InventoryNo	n.a.
AuxiliaryTitle	
Operator	Andres Arias., Jefferson Gutama
Supervisor	Diego Carrion
JobNo	1
Notes	
InsulationDefinition	Miscellaneous: Cables
InsulationTemperature	20.0 °C
AmbientTemperature	18.0 °C
RelativeHumidity	30 % r.h.
TemperatureCorrection	1

Tabla 3.20. Información del Elemento de Prueba Resistencia Tipo.

Measurements					
Time	**SqNr**	**U rms[V]**	**DF (tand) @ 20°C**	**Cx[F]**	**Frequency[Hz]**
12/09/2014 0:25	1	475	2.85	3.31E-12	59.98
12/09/2014 0:26	2	756	2.85	3.32E-12	59.95
12/09/2014 0:26	3	931	2.85	3.33E-09	59.95
12/09/2014 0:26	4	1235	2.85	3.33E-09	59.94
12/09/2014 0:26	5	1499	2.85	3.34E-09	59.96
12/09/2014 0:27	6	1701	2.85	3.34E-09	60
12/09/2014 0:27	7	2019	2.85	3.35E-09	60.04
12/09/2014 0:28	8	2373	2.85	3.35E-09	60.05
12/09/2014 0:28	9	2634	2.85	3.35E-09	60.05
12/09/2014 0:28	10	3020	2.85	3.36E-09	60.02
12/09/2014 0:28	11	3352	2.85	3.36E-09	60.05
12/09/2014 0:28	12	3632	2.85	3.36E-09	60.05
12/09/2014 0:28	13	3983	2.86	3.36E-12	60.01
12/09/2014 0:29	14	4281	2.86	3.36E-09	60.01
12/09/2014 0:29	15	4579	2.86	3.36E-09	60.04
12/09/2014 0:29	16	4758	2.86	3.36E-09	60.05
12/09/2014 0:29	17	5051	2.87	3.37E-09	60.03
12/09/2014 0:29	18	5370	2.87	3.37E-09	60.07
12/09/2014 0:29	19	5778	2.88	3.37E-09	60.03
12/09/2014 0:29	20	6032	2.89	3.37E-09	60.05
12/09/2014 0:30	21	6456	2.90	3.37E-09	60.03
12/09/2014 0:30	22	6689	2.91	3.37E-09	60.02
12/09/2014 0:30	23	7000	2.93	3.37E-09	60.01

Tabla 3.21. Datos y valores medidos de la resistencia tipo.

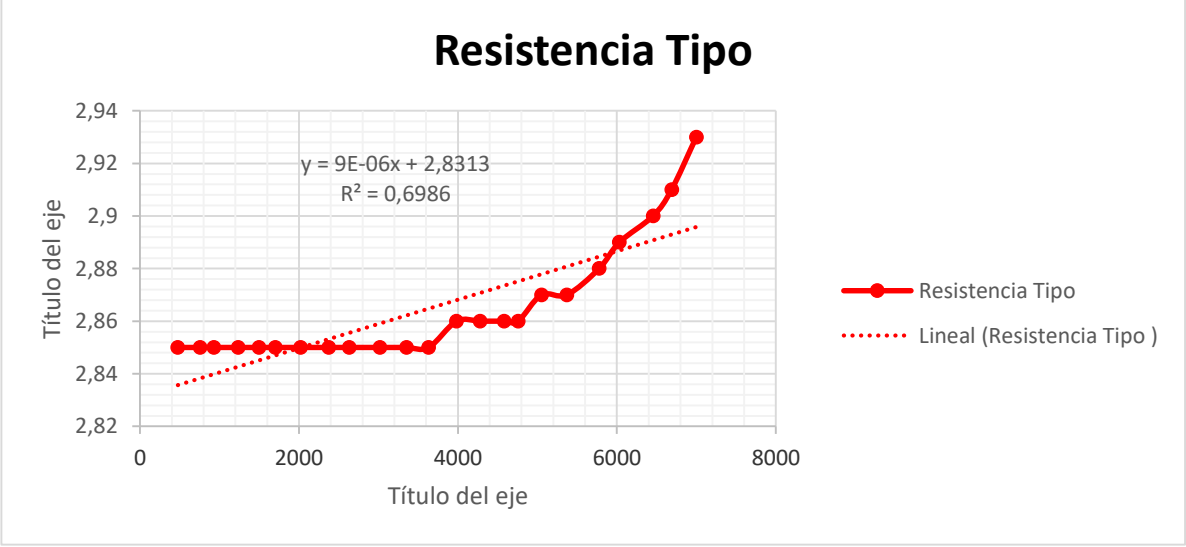


Figura. 3.36. Ajuste de curva para resistencia tipo.

3.3.9. Valores Medidos de la Resistencia del Proyecto de Tesis.

Device under Test DUT	
Type	Resistencia 300Mohm
Description	res proy
User	U.P.S Cuenca
Manufacturer	U.P.S Cuenca
Location	Cuenca - El Vecino
SerialNo	n.a.
InventoryNo	n.a.
AuxiliaryTitle	
Operator	Andres Arias., Jefferson Gutama
Supervisor	Diego Carrion
JobNo	1
Notes	
InsulationDefinition	Miscellaneous : Cables
InsulationTemperature	20.0 °C
AmbientTemperature	18.0 °C
RelativeHumidity	30 % r.h.
TemperatureCorrection	1

Tabla 3.22. Información del Elemento de Prueba Resistencia del Proyecto de Tesis.

Measurements					
Time	**SqNr**	**U rms[V]**	**DF (tand) @ 20°C**	**Cx[F]**	**Frequency[Hz]**
12/09/2014 0:46	1	503	2.72	3.39E-09	60.03
12/09/2014 0:47	2	740	2.72	3.40E-09	60.06
12/09/2014 0:47	3	894	2.72	3.40E-09	60.05
12/09/2014 0:47	4	1261	2.72	3.41E-09	60.04
12/09/2014 0:47	5	1552	2.72	3.42E-09	60.04
12/09/2014 0:47	6	1792	2.72	3.42E-09	60.02
12/09/2014 0:48	7	2007	2.72	3.43E-09	59.99
12/09/2014 0:48	8	2363	2.72	3.43E-09	59.99
12/09/2014 0:48	9	2695	2.72	3.43E-12	60.02
12/09/2014 0:48	10	2971	2.72	3.43E-09	60.03
12/09/2014 0:49	11	3335	2.72	3.43E-09	60.02
12/09/2014 0:49	12	3680	2.72	3.43E-09	60.02
12/09/2014 0:49	13	3981	2.72	3.44E-09	60.03
12/09/2014 0:49	14	4177	2.72	3.44E-09	59.95
12/09/2014 0:50	15	4614	2.72	3.44E-09	59.96
12/09/2014 0:50	16	4767	2.73	3.44E-12	60.02
12/09/2014 0:50	17	5100	2.73	3.44E-09	59.95
12/09/2014 0:50	18	5374	2.73	3.44E-09	59.95
12/09/2014 0:50	19	5811	2.73	3.44E-09	59.96
12/09/2014 0:50	20	6020	2.74	3.44E-09	59.96

12/09/2014 0:51	21	6335	2.75	3.44E-09	60.02
12/09/2014 0:51	22	6671	2.76	3.45E-09	59.95
12/09/2014 0:51	23	6805	2.78	3.45E-09	59.96

Tabla 3.23. Datos y valores medidos de la resistencia del proyecto de tesis.

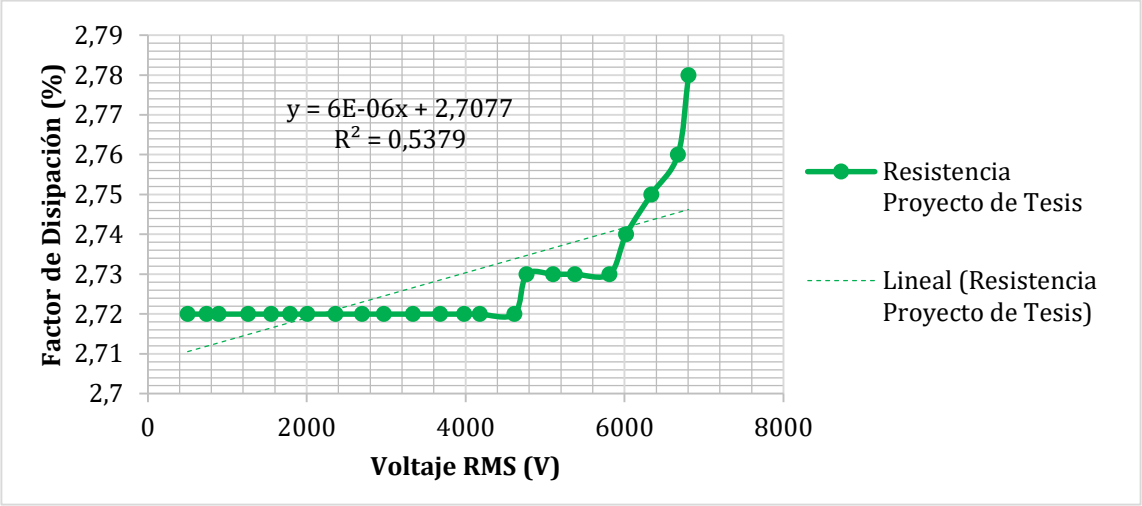


Figura. 3.37. Ajuste de curva para la resistencia del proyecto.

3.3.10. Valores de factor de disipación a 20°C de las resistencias comparados.

U rms [V]	% DF (tand) @ 20°C	
	Resistencia Tipo	Resistencia Proyecto
500	2.85	2.72
750	2.85	2.72
900	2.85	2.72
1200	2.85	2.72
1500	2.85	2.72
1800	2.85	2.72
2100	2.85	2.72
2400	2.85	2.72
2700	2.85	2.72
3000	2.85	2.72
3300	2.85	2.72
3600	2.85	2.72
3900	2.86	2.72
4200	2.86	2.72
4500	2.86	2.72
4800	2.86	2.73
5200	2.87	2.73
5500	2.87	2.73
5800	2.88	2.73

6200	2.89	2.74
6500	2.90	2.75
6800	2.91	2.76
7000	2.93	2.78

Tabla 3.24. Comparación de valores de factor de disipación a 20°C de las resistencias.

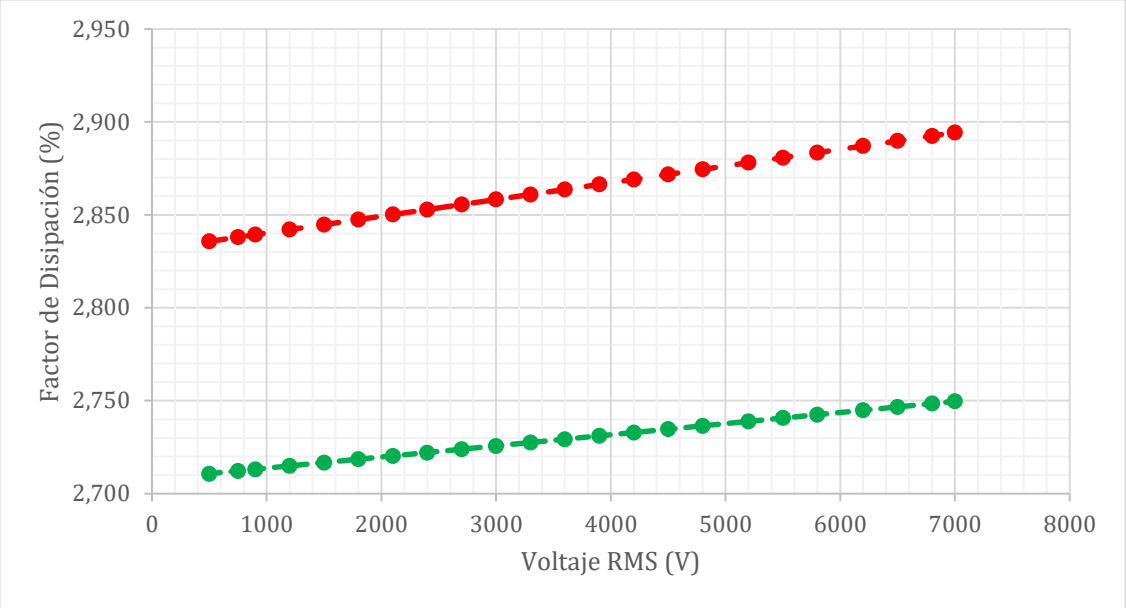


Figura. 3.38. Comparación entre resistencias, extrapolado a 150 KV.

3.3.11. Análisis de resultados.

CONDENSADORES.

- **Condensador tipo.**

Luego de realizar el test de factor de disipación, se tiene:

- ✓ Una capacitancia estable, lo cual indica que el elemento se halla en buena condición.
- ✓ Su factor de disipación al ser extrapolado mediante un ajuste de curva polinomial de grado 3, a una tensión de 150kV, es de 0.6703%, un 34% sobre el valor recomendado, pudiendo indicar la presencia de sustancias extrañas o humedad.

- **Condensador 1 del proyecto.**

Luego de realizar el test de factor de disipación, se tiene:

- ✓ Una capacitancia con tendencia lineal creciente, pudiendo indicar posibles ionizaciones en el aceite dieléctrico, o una presencia de humedad en el mismo.
- ✓ Su factor de disipación al ser extrapolado mediante un ajuste de curva lineal, a una tensión de 150kV, es de 0.6016%, un 20.32% sobre el valor recomendado, al igual que las mediciones de capacitancia, el factor de disipación tiene un incremento lineal, lo cual apuntaría a la presencia de humedad en el aislamiento.

- **Condensador 2 del proyecto.**

Luego de realizar el test de factor de disipación, se tiene un comportamiento similar al condensador 1 del proyecto, específicamente un factor de disipación de 0.6015%, un 20.30% sobre el valor recomendado.

RESISTENCIA.

- **Resistencia tipo.**

Luego de realizar el test de factor de disipación, se tiene:

- ✓ Una capacitancia estable, lo cual indica que el elemento se halla en buena condición.
- ✓ Su factor de disipación al ser extrapolado mediante un ajuste de curva exponencial, a una tensión de 150kV, es de 4.1813%.

- **Resistencia del proyecto.**

Luego de realizar el test de factor de disipación, se tiene:

- ✓ Una capacitancia estable, lo cual indica que el elemento se halla en buena condición.
- ✓ Su factor de disipación al ser extrapolado mediante un ajuste de curva exponencial, a una tensión de 150kV, es de 3.6077%.

3.3.12. Balance económico.

En el desarrollo del proyecto de tesis, se han realizado las inversiones mostradas en la Tabla 3.25.

BALANCE ECONOMICO PARA LA CONSTRUCCION DEL PROYECTO DE TESIS			
DESCRIPCIÓN	**CANTIDAD**	**PRECIO UNITARIO**	**PRECIO TOTAL**
Resistencias SGP78 25MΩ	12	$ 17,14	$ 205,68
Envío/manejo hasta Miami, EEUU	1	$ 14,17	$ 14,17
Envío EEUU hacia Ecuador	1	$ 50,00	$ 50,00
Grilón para capsula resistencia	1	$ 116,50	$ 116,50
Transporte grilón Quito-Cuenca	1	$ 3,00	$ 3,00
Tasa Banco de Guayaquil	1	$ 55,00	$ 55,00
Condensadores + flete	1	$ 35,39	$ 35,39
Condensadores cerámicos	33	$ 38,00	$ 1.254,00
Flete por Fedex	1	$ 300,00	$ 300,00
Tasa Banco Hongkong, Shanghai	1	$ 20,00	$ 20,00
Liquidación SENAE	1	$ 199,67	$ 199,67
Tramites y manejo Fedex	1	$ 117,60	$ 117,60
Construcción de capacitores para alta tensión (mecanizado).	2	$ 470,00	$ 940,00
Construcción de resistencia para alta tensión (mecanizado)	1	$ 430,00	$ 430,00
IVA, construcción de elementos	1	$ 164,40	$ 164,40
Materiales para tapas herméticas y conectores, tanto para condensadores y resistencia	1	$ 656,22	$ 656,22
Bloques de Grilón de 160mm*590mm	2	222,79	$ 445,58
Transporte 2 bloques de Grilón 160 mm*590mm	2	$ 2,50	$ 5,00
Transporte/Retorno de Grilón por falla, reposición	1	$ 2,50	$ 2,50
Transporte Grilón, reposición	1	$ 2,50	$ 2,50
Mecanizado adicional/corrección del cuerpo de la resistencia y diseño de tapas nuevas.	1	$ 300,00	$ 300,00
Llenado de condensadores, al vacío con aceite dieléctrico, tipo 2	2	$ 156,30	$ 312,60
Llenado de condensadores, al vacío con aceite dieléctrico, tipo 2, CORRECCION DE DISRUPCION A 35KV	2	$ 156,30	$ 312,60
Niquelado de tapas para resistencia	1	$ 30,00	$ 30,00
Niquelado de tapas resistencia, CORREGIDA	1	$ 30,00	$ 30,00

Placa grande de polietileno de alta densidad, de 400x300x8mm	1	$ 7,00	$ 7,00
Placa grande de polietileno de alta densidad, 400x300x5mm	2	$ 2,74	$ 5,48
Resina Epóxica	2	$ 4,25	$ 8,50
Tornillos M8	30	$ 0,05	$ 1,50
Campana de Descarga	1	$ 8,00	$ 8,00
Transporte interprovincial Cuenca-Quito y viceversa.	4	$ 13,00	$ 52,00
Transporte urbano Quito	8	$ 0,25	$ 2,00
Transporte Taxis Cuenca	10	$ 1,60	$ 16,00
Transporte Taxis Quito	5	$ 9,25	$ 46,25
INVERSIÓN TOTAL			**$ 6.149,14**

Tabla 3.25. Plan de inversión del proyecto de tesis.

CAPÍTULO IV.

4 ENSAYO DE LOS CONDENSADORES DE IMPULSO EN ALTA TENSIÓN

4.1 Normas.

Una norma es un "documento que establece requisitos impuestos por las prácticas habituales en la industria, ciencia o tecnología, tales documentos pueden incluir y normalizar términos definiciones, símbolos, métodos de medida, ensayos de parámetros o rendimientos de dispositivos, aparatos, sistemas o fenómenos, características, rendimiento y requisitos de seguridad, dimensiones y valores nominales" [15]

"Una norma técnica es un documento aprobado por un organismo reconocido que establece especificaciones técnicas basadas en los resultados de la experiencia y del desarrollo tecnológico, que hay que cumplir en determinados productos, procesos o servicios". [16]

La elaboración de una norma puede partir desde cero, sin tener un documento previo, como también, tomar como punto de partida una especificación técnica u otro documento público, en cualquier caso, entre sus principales características se tiene.

1. Es establecida con la cooperación y el consenso de todas las partes interesadas.
2. Fundada sobre los resultados conjugados de la ciencia, de la tecnología y de la experiencia del momento.
3. Aprobada por un organismo ad hoc (reconocimiento público). [17]

Entre las normas eléctricas más utilizadas se tienen

NEC	Código Eléctrico Nacional
ANSI	Instituto Nacional Americano de Estándares
NEMA	Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.

DIN	Normas Alemanas Generales.
VDE	Asociación Alemana de Ingenieros Eléctricos.
BS	Estándares Británicos.
UTE	Técnicos de la Unión de Electricidad.
IEC	Comisión Electrotécnica Internacional.
ASTM	Asociación Norteamericana para test de materiales.

Tabla 4.1. Normativa más utilizada.

Para el caso ecuatoriano, el Instituto Ecuatoriano de Normalización, dicta la normativa usada en las diferentes pruebas realizadas en laboratorios al equipamiento eléctrico.

NTE INEN-IEC 60076-12	Transformadores de potencia. Parte 12: Guía de carga para transformadores de potencia de tipo seco.
NTE INEN-IEC/TS 60815-1 NTE INEN-IEC/TS 60815-2 NTE INEN-IEC/TS 60815-3	Selección y dimensionamiento de aisladores de alta tensión destinados para su utilización en condiciones de contaminación.
NTE INEN-IEC 60050-617	Vocabulario electrotécnico. Parte 617: Organización y mercado de la electricidad.
NTE INEN-IEC 60076-10-1	Transformadores de potencia. Parte 10-1: Determinación de los niveles de ruido. Guía de aplicación. (IEC 60076-10-1:2005).
NTE INEN-IEC 60076-7	Transformadores de potencia. Parte 7: Guía de carga para transformadores de potencia sumergidos en aceites.
NTE INEN 2 133:98	Transformadores. Aceites aislantes para Transformadores e interruptores. Requisitos.
NTE INEN 2 110:1998	Transformadores. Definiciones.
ASTM Designation: D 877-87	Standard test method for dielectric breakdown voltage of insulating liquids using disk electrodes.
ASTM Designation: D 924-92	Standard test method for dissipation factor (or power factor) and relative permittivity (dielectric constant) of electrical insulating liquids.
IEC Publication 156:1963	Method for the determination of the electric strength of insulating oils.
IEC Publication 296:1982	Specification for unused mineral insulating oils for transformers and switchgear.

Tabla 4.2. Normativa ecuatoriana.

En el proceso de diseño y construcción de los condensadores de alta tensión se consideró la normativa que se expone en los siguientes párrafos.

4.1.1 Norma ASTM D-877-87 y D-1816

Por medio de esta prueba se evidencia la presencia de partículas extrañas o agentes contaminantes (agua, polvo, partículas conductoras) en el aceite aislante, usado en transformadores, cables, etc. provocando una disminución en la rigidez dieléctrica y por tanto, el origen de una falla.

La ASTM, acepta 2 métodos para las pruebas de rigidez dieléctrica.

4.1.1.1 Norma D-877.

Consta de un transformador, un regulador de voltaje, un swicth, un voltímetro y un recipiente de prueba, en el cual se hallan 2 electrodos en forma de disco, cuyo diámetro es de 25 mm, con sus caras perfectamente paralelas, con una separación de 2.54 mm

Los electrodos al igual que el recipiente contenedor, deben ser lavados con aceite en buenas condiciones o en su defecto, con el aceite bajo prueba.

Se debe vitar tocar los electrodos con los dedos, así como la presencia de humedad en el contenedor, de ser necesario, se deberá calentar el contenedor hasta evaporar la humedad presente.

Los electrodos deben ser inspeccionados, en busca de puntas, o escoriaciones, al punto de ser pulidas en caso de ser profundas.

Nunca se realizará una prueba, si la humedad relativa es igual o superior al 75% o la temperatura ambiental menor a 20°C.

El contenedor debe llenarse como mínimo a 20 mm sobre la parte superior de los electrodos y antes de aplicar tensión al sistema, se permitirá un reposo de la muestra entre 2 y 3 minutos.

Al realizar la prueba, la tensión se incrementara a razón de 3KV por segundo, si 2 muestras diferentes, superan el valor mínimo de 25 KV, las pruebas concluyen, siendo el promedio, el valor de la rigidez dieléctrica de la muestra.

4.1.1.2 Norma D-1816.

Se aplica aceites dieléctricos de petróleo, es similar a la norma D-877, excepto que se usan electrodos semiesféricos con una separación de 2 mm y una tensión mínima de 50 kV.

El voltaje aplicado varía gradualmente 500 voltios por segundo.

Antes de aplicar tensión, la muestra debe reposar 3 minutos y entre cada prueba sucesiva habrá intervalos de 1 minuto, tiempo en el cual se hará una girar el aceite.

Norma	ASTM D-877	ASTM D-1816
Geometría de los electrodos	DISCOS 25 mm	SEMIESFERICOS 36 mm
Separación	2,5 mm	1 mm
Rampa	3000 V/s	500 V/s
Alcance en KV	Por debajo de 69 KV	35 – 50 KV
Sensibilidad a la humedad	En el rango de 30 a 80 ppm o agua libre	Por debajo de 30 ppm
Aplicación recomendada según ASTM	Aceptación aceite nuevo a granel o en tambores	Aceites filtrados, desgasificado y deshidratados antes y después de tratamiento aceites en operación
Sensibilidad a fibras de celusosa	Menos sensible	Más sensible

Tabla 4.3 Resumen para normativa de test para rigidez dieléctrica.

4.1.1.3 Toma de muestras ASTM D 923.

Las muestras de líquidos aislantes se toman para realizar análisis que permitan determinar la calidad del líquido aislante, considera técnicas para análisis de gases en el líquido (D 3612), agua (D 1533) y partículas (D 6786).

Cubre líquidos aislantes eléctricos tales como aceites, askareles, siliconas, líquidos sintéticos, cuya viscosidad sea menor o igual a $6.476x10^{-4}$ m^2/s a 40°C.

Es muy importante tener cuidado en la manipulación de las muestras, para que no ganen ni pierdan propiedades, en tal sentido es imprescindible minimizar su exposición a la atmosfera. [18]

"La muestra será tomada en una botella seca y limpia será sellada y protegida contra la luz hasta que la muestra sea probada.

Antes de ser ensayada la muestra será inspeccionada por la presencia de partículas metálicas y otros materiales extraños.

Si la muestra presentara presencia de agua libre será desechada.

El Voltaje de ruptura de líquidos puede estar encubierto por migración de impurezas a través del líquido. Como el espécimen representativo de test puede tener impurezas, el contenedor de la muestra será invertido y agitado varias veces antes de llenar el recipiente donde va el líquido de prueba. La agitación rápida es indeseable desde una cantidad excesiva de aire puede ser introducida dentro del líquido. Inmediatamente después de agitar, una pequeña porción de la muestra será usada para limpiar el recipiente de la prueba.- El recipiente será llenado lentamente con el líquido de prueba a un nivel no menor de 20 mm por encima de la parte superior de los electrodos.

Para permitir el escape de aceite el líquido estará en reposo durante por lo menos 2 min y no más que 3 min antes de aplicar el voltaje." [19]

4.1.1.4 Seguridad.

La normativa no cubre este ítem, siendo el profesional de ingeniería el responsable de los protocolos de seguridad y salud aplicados.

4.1.1.5 Aplicación.

"El voltaje de ruptura dieléctrico de un líquido aislante de importancia como una medida de la habilidad del comportamiento de él, frente al esfuerzo eléctrico sin fallar.

Esto sirve para indicar la presencia de agentes contaminantes, tal como agua, suciedad, fibras celulosas, partículas conductoras en el líquido; una o más de las cuales pueden estar presentes en concentraciones significativas cuando valores de ruptura dieléctrico alto no indica la ausencia los contaminantes, esto puede significar que la concentración de contaminantes que está presente en el líquido entre los electrodos no son bastantes grande para afectar el voltaje de ruptura promedio de los líquidos cuando son probados por este método." [19]

4.1.2 Norma ASTM D 149

"La rigidez dieléctrica es el voltaje que aplicado a un material, resulta en la destrucción de sus propiedades aislantes, la falla está constituida por el paso de un arco a través de la pieza bajo ensayo. El gradiente de voltaje se obtiene al dividir el voltaje de ruptura por el espesor del aislamiento en el punto de falla. Se expresa en MV/m o KV/mm de espesor de aislamiento". [16]

La muestra diferentes normativas que son equivalentes, para el test de rigidez dieléctrica.

Test description			
Dielectric strength, MV/m or kV/mm			
	ASTM	DIN	IEC
No.:	D 149	53481/VDE 0303, part 2	60243 (ISO 1325)
Specimen:	sheets/films	sheets	sheet or film
Electrodes:	51 mm Ø	25, 50, 75 or 100 mm Ø cylinders or other shapes	75 and 25 mm Ø
Rise of voltage:	• Short time 100/200/500/1000/2000/5000 V/s	• Step by step 8% of foreseen breakdown voltage	• Short time steady speed
		• Step by step	• Step by step
	• Step by step equal increments working with expected breakdown voltage		20 s steps/50 V to 10 kV
Medium:	air; gas; oil	air	air; oil; gas; see IEC 212
Temperature:	25 ± 5°C	23 ± 2°C	23°C

Tabla 4.4 Normas para test de rigidez dieléctrica.

El valor de rigidez dieléctrica se ve afectaba por las condiciones del test (espesor de la muestra, temperatura, tipo de tensión aplicada, C.A. o C.C., frecuencia, electrodos y ambiente de prueba), por lo tanto, los valores varían de un método a otro, una particular atención debe ser puesta a las condiciones en las funcionara la aplicación.

La rigidez dieléctrica es la propiedad esencial de los aislantes plásticos, que los convierte en una excelente protección para personas y dispositivos contra partes bajo alto voltaje [16].

4.1.3 Norma IEC 60384-1.

La estandarización de todos los componentes eléctricos, electrónicos de tecnología relacionada, están regidas por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), la cual es una organización sin fines de lucro.

La definición de las características, procedimientos y métodos de prueba para condensadores cerámicos de valor fijo destinados a equipo electrónico, se basan en esta norma.

Las pruebas y requisitos que deben ser cumplidos por los condensadores cerámicos, para su utilización en equipo electrónico y su aprobación como tipo estandarizado, se establece en las siguientes especificaciones seccionales.

- IEC 60384-8, Condensadores fijos de dieléctrico cerámico, clase 1.
- IEC 60384-9, Condensadores fijos de dieléctrico cerámico, clase 2.
- IEC 60384-21, Condensadores de montaje superficial multicapa de dieléctrico cerámico, clase 1.
- IEC 60384-22, Condensadores de montaje superficial multicapa de dieléctrico cerámico, clase 2.

4.2 Protocolo de pruebas.

Antes de realizar cualquier práctica o experimento en el laboratorio de alta tensión de la U.P.S sede Cuenca, se debe seguir el siguiente protocolo de pruebas y seguridad, para evitar cualquier lesión a las personas o daños al equipamiento.

1. Todas las personas deben usar guantes, casco, y orejeras para evitar lesiones en las manos, cabeza u oído, originados en la caída de algún elemento u objeto, así como el sonido que producen las descargas durante las pruebas.
2. Durante el ingreso o permanencia de personal al interior de la jaula de seguridad, la puerta debe permanecer abierta, de esta forma los dispositivos de seguridad propios del laboratorio bloquean el secundario del transformador evitando la activación o elevación tensión a un valor que se haya establecido con anterioridad.
3. Descargar los elementos del laboratorio con la barra de descarga a tierra, con especial énfasis en los capacitores, evitando así, que cualquier tensión acumulada en los elementos se descargue a través de la persona que los manipula.
4. Con los elementos descargados, colocar la barra de descarga a tierra sobre el transformador, evitando un accionamiento erróneo del secundario, pues el sistema de seguridad del laboratorio lo bloquea.
5. Verificar el montaje de un circuito, luego de concluir su armado.
6. Retirar la barra de descarga a tierra del trasformador y colocarla en la puerta, esto hará que cualquier persona que ingrese, recuerde descargar los elementos.
7. Cerrar la puerta y verificar que ningún elemento esté conectado a tierra por medio de la señalización ubicada como luz verde en la zona de mando del panel de control, a continuación, se procede a realizar las diferentes mediciones.

8. En lo posible, evitar una ionización del ambiente y que los elementos que no cuentan con aceite para la refrigeración se sobrecalienten.
9. En caso de presentarse ionización del medio o sobrecalentamiento de elementos, abrir las ventanas para ventilar el espacio y sacar los elementos que se hayan calentado hasta que los mismos estén completamente fríos, caso contrario puede afectar la medición.
10. Si se debe usar equipo para medir rigidez dieléctrica de aceites, se debe utilizar guantes negros y tener cuidado al manipular las muestras, evitando que se contaminen, dejar que las mismas reposen por cinco minutos antes de hacer la prueba para que salgan las burbujas.
11. El aceite debe ser guardado en un recipiente color ámbar y no deben ser expuestas a la luz.
12. Si se debe usar el Megger, verificar que la batería tenga niveles adecuados de carga para obtener valores de medición acertados. [1]

4.3 Doblador de tensión.

Un doblador de tensión es un circuito cuya salida en corriente continua es el doble de la tensión pico de entrada al estar sin carga, es ideal para altas tensiones pero consumos mínimos de corriente.

Un doblador de tensión Figura. 4.1, en el semiciclo negativo, carga el condensador C_1 a través del diodo/rectificador R_1, a la tensión V_{max}, en el siguiente semiciclo positivo, la tensión del transformador elevara el voltaje de C_1 a $2V_{max}$.

De esta forma el condensador C_2, se carga por medio del diodo/rectificador R_2 a una tensión de $2V_{max}$, generalmente el voltaje dc de salida en la carga, es ligeramente menor, dependiendo de la contante de carga C_2R_L.

La tensión de rizado para para este circuito de aproximadamente el 2% para $R_L/r <= 10$ y $X/r <= 0.25$, donde X y r, son la reactancia y resistencia respectivamente, del transformador de entrada.

Los diodos/rectificadores deben ser dimensionados para un voltaje pico inverso de $2V_{max}$, al igual que los condensadores.

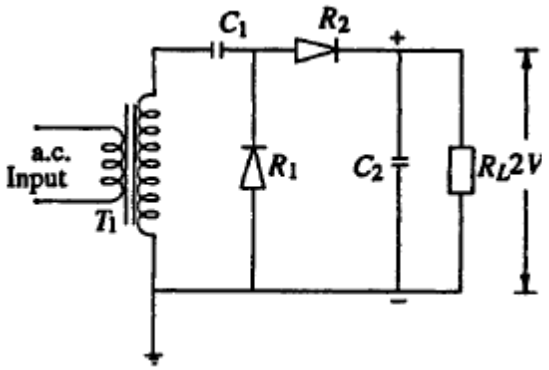


Figura. 4.1. Circuito doblador de tensión. Imagen tomada de [20]

4.4 Ensayo del Nivel Básico de Aislamiento (BIL), aplicando doblador de tensión.

Los aisladores eléctricos para uso exterior, se destinan a subestaciones, plantas, redes y líneas de distribución, por medio de los ensayos que se les aplica, se determina si cumplen las características mecánicas y eléctricas para las que fueron construidos, por ejemplo su calidad, tensión de contorneo, tensión de perforación y resistencia mecánica.

La tensión de contorneo es el valor de voltaje que produce un arco o descarga disruptiva por la superficie del aislamiento entre el soporte metálico y el conductor [11]

Durante un test de contorneo, un aislador soporta una tensión cada vez más alta entre sus puntos de conexión (caperuza, vastago), hasta cuando se produzca un arco eléctrico, para el caso de lluvia, la tensión de contorneo se determina, aplicando una lluvia artificial con inclinación de 45° sobre el aislador.

El interior de un aislador cuenta con varias ondulaciones, cuya finalidad es incrementar la longitud que deba saltar el arco eléctrico, esta distancia es denominada línea de fuga. [11]

En la Figura. 4.2, se muestra el modelo implementado en Simulink para la simulación del circuito doblador.

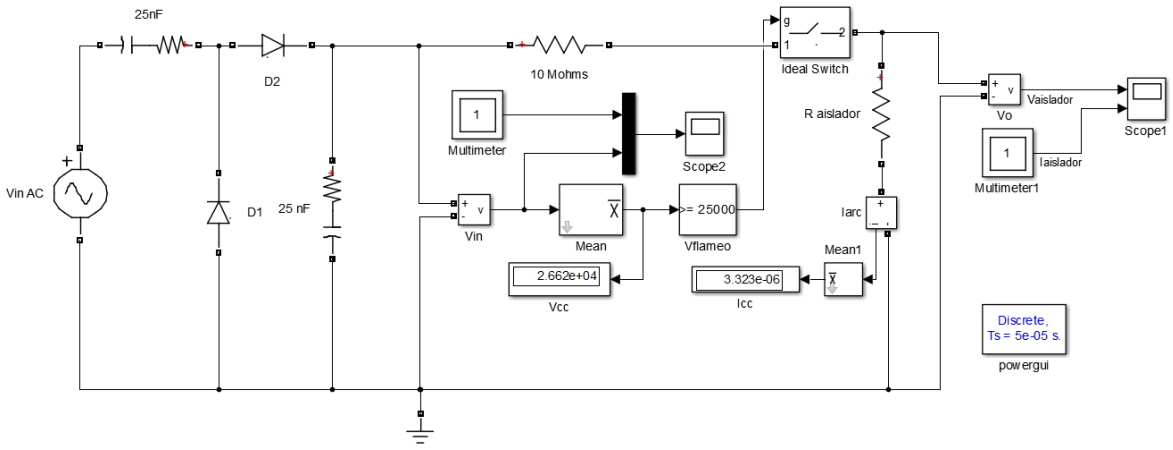


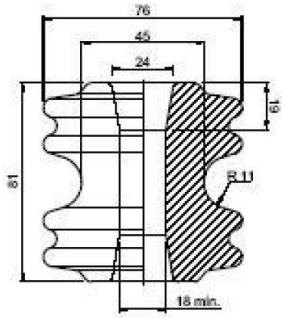
Figura. 4.2. Modelo Simulink para circuito doblador.

4.4.1 Ensayo Aisladores de carrete.

Este tipo de aislador debe ser construido con porcelana de buena calidad, libre de porosidad, alta rigidez dieléctrica y proceso de formación en húmedo. [21]

El esmalte debe cubrir la superficie, total y uniformemente, debe ser del tipo vítreo no conductor, con trabajo a la compresión y color gris claro.

La tensión de utilización es de 240 voltios para el aislador según norma ANSI C29.3, 600 voltios máximo para el aislador según norma ANSI C29.3 clase 53 – 3 para el aislador tipo carrete de 76 mm, Figura. 4.3.



ANSI 53-3

Figura. 4.3. Aislador tipo carrete, ANSI 53-3.

Su tensión de flameo a baja frecuencia en seco, está dada por la norma NTC 1285 numeral 6.3.1 y NTC 693 tabla2

Su tensión de flameo a baja frecuencia en húmedo de acuerdo con NTC 1285 numeral 6.3.3 y NTC 693 numeral 8.2.2 y Tabla 2.

Datos eléctricos aislador de Carrete (Clase ANSI 53.3)

DATOS ELECTRICOS		
DESCRIPCIÓN	**UNIDAD**	**REQUERIDO**
Flameo en seco a baja frecuencia	kV	25
Flameo en húmedo a baja frecuencia vertical	kV	12
Flameo en húmedo a baja frecuencia horizontal	kV	15

Tabla 4.5 Valores de flameo ANSI 53.3.

Valores Medidos		
Vp (kV)	**Vcc (kV)**	**Iaislador (uA)**
1.10	2.07	0
2.75	5.22	0
5.37	10.44	0
7.72	15.05	0
10.74	20.89	0
12.82	25.11	3
14.55	28.45	13
15.40	30.0	24

Tabla 4.6. Valores medidos para el aislador ANSI 53.3.

Simulación de la prueba.

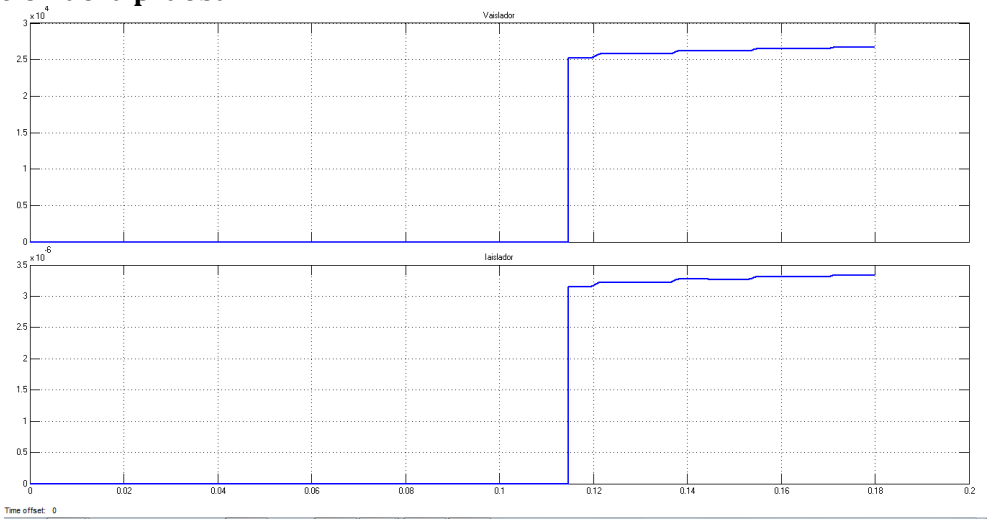


Figura. 4.4. Simulación de prueba al aislador ANSI 53.3.

4.4.2 Ensayo Aisladores de suspensión.

Normalmente son utilizados en estructuras donde los conductores están sometidos a la tracción; también en estructuras de suspensión (tipo "H" y líneas de transmisión) [21]

En un sistema de distribución se distinguen dos clases:

- Aislador de suspensión 273 mm (10 3/4") de diámetro, acoplamiento de pasador y lengüeta, según norma NTC 1170, clase AS-4 (ANSI C.29.2, clase 52-4).

- Aislador de suspensión 165 mm (6 1/2") de diámetro, acoplamiento del pasador y ojal, según norma NTC 1170, clase AS-1 (ANSI C29.2, clase 52-1), Figura. 4.5

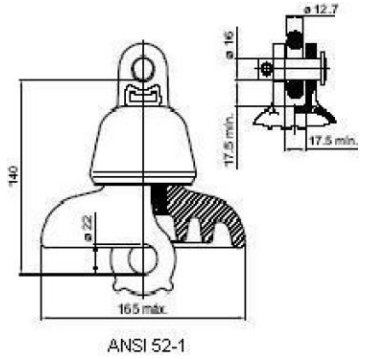


Figura. 4.5. Aislador de suspensión ANSI 52-1.

Para los aisladores de suspensión de porcelana, los ensayos de rutina se definen en la norma NTC 1170 (ANSI C29.2). [21]

- Ensayo de choque térmico (Frío a Caliente), cláusula 8.4.1 – "Cold to hot thermal shock test".
- Ensayo de choque térmico (Caliente a frío), cláusula 8.4.2 – "Hot to cold thermal shock test".
- Ensayo de resistencia mecánica a la tracción, cláusula 8.4.3 – "Tension proof test".
- Ensayo de flameo, cláusula 8.4.4 – "Flashover test".

El chequeo mecánico de rutina, efectuado al 100% del lote, cumplirá con: [21]

- Clase 52 - 4 / 33340 N
- Clase 52 – 1 / 22227 N

El chequeo eléctrico de rutina, también al 100 % del lote; 3 a 5 mm, tendrá los siguientes valores: [21]

- Clase 52 - 4 / 80 kV
- Clase 52 – 1 / 60 kV
- Inspección visual y dimensional, cláusula 8.3.1 – "Visual and dimensional test".
- Ensayos de porosidad, cláusula 8.3.2 – "Porosity test".
- Ensayos de galvanizado, cláusula 8.3.3 – "Galvanizing test".

- Ensayo combinado de resistencia eléctrica y mecánica, cláusula 8.3.4 – "Combined mechanical and electrical strenght test".
- Ensayos de perforación, cláusula 8.3.5 – "Puncture test".

Datos eléctricos aislador de suspensión (Clase ANSI 52.1)

DATOS ELECTRICOS		
DESCRIPCIÓN	**UNIDAD**	**REQUERIDO**
Flameo en seco a baja frecuencia	kV	60
Flameo en húmedo a baja frecuencia	kV	30
Flameo a impulso crítico (positivo)	kV	100
Flameo a impulso crítico (negativo)	kV	100
Perforación a baja frecuencia	kV	80

Tabla 4.7.Valores de flameo ANSI 52.1

Valores Medidos		
Vp (kV)	**Vcc (kV)**	**Iaislador (uA)**
1.06	2.10	0
2.9	5.84	0
5.37	10.85	0
10.37	21	0
15.30	31.12	0
19.79	40.24	1
24.79	50.40	9
30.34	61.58	22

Tabla 4.8. Valores medidos para aislador ANSI 52-1.

Simulación de la prueba.

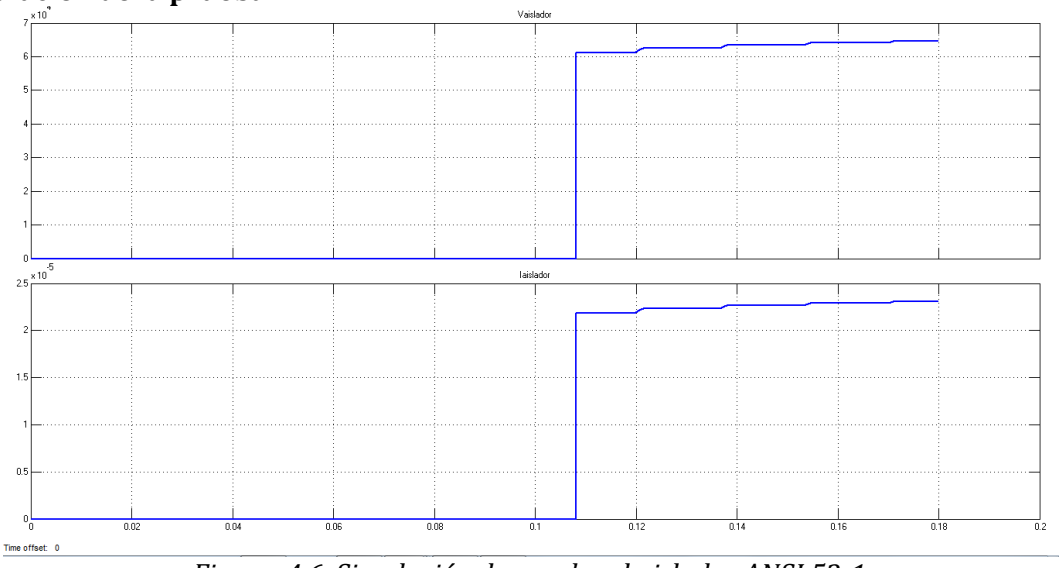


Figura. 4.6. Simulación de prueba al aislador ANSI 52-1.

CAPITULO V:

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones:

De acuerdo al desarrollo y al finalizar el presente trabajo de tesis se ha podido llegar a las siguientes conclusiones:

1. El laboratorio de alta tensión de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Cuenca, cuenta con el número justo de elementos que permiten realizar el montaje de los circuitos presentados en el manual de prácticas del laboratorio, sin embargo para circuitos más complejos o niveles de tensión superiores a 150 KV, resultan insuficientes.
2. Los niveles de tensión para los cuales se dimensionan los elementos construidos, toman en consideración el factor de corrección por altitud (IEC 60071-2, C37.20.2-1986), el cual se aplica para dispositivos cuyo funcionamiento habitual se da en locaciones sobre los 1000 msnm, (la ciudad de Cuenca se halla aproximadamente a 2450 msnm), tanto los condensadores de impulso como la resistencia de medición tienen una tensión nominal de 150 KV (los condensadores pueden soportar hasta 153 KV, 2% superior a la tensión nominal, la resistencia puede soportar hasta 154 KV, 3% superior a la tensión nominal).
3. En caso de sobrecargas debidas a un cortocircuito la resistencia puede disipar hasta 113W, un 10% adicional a su potencia nominal.
4. En el desarrollo de las simulaciones en la herramienta informática Matlab y su componente Simulink, para los distintos circuitos montados con los condensadores de impulso y la resistencia de medición, cuyos parámetros individuales fueron determinados experimentalmente, tanto las curvas como las mediciones de voltaje y corriente son parecidos a los valores obtenidos en las diferentes prácticas, lo cual confirma que los elementos construidos funcionan correctamente y de acuerdo a lo esperado.
5. Los cálculos realizados para determinar el comportamiento del condensador de impulso del proyecto de tesis se basan en el modelo matemático de un circuito RLC; permitieron establecer los valores tanto de corriente como de voltaje presentes en el Capacitor.

6. Al simular la ecuación del circuito, usando el software Matlab se obtienen curvas características que representan el comportamiento del capacitor, que inicialmente se encuentra descargado y alcanza una carga máxima en aproximadamente 5 constantes de tiempo T=RC, (esta aproximación se realiza debido al reducido valor de L), permaneciendo en este valor como un circuito abierto., la curva del valor de corriente inicia en un valor máximo para luego decrecer hasta alcanzar valores cercanos a cero.
7. Si bien los condensadores de impulso y la resistencia de medición son construidos con las mismas características, no tienen exactamente los mismos valores químicos-eléctricos, debido a las tolerancias propias de cada elemento base.
8. Las capsulas que forman los condensadores de impulso fueron llenados con aceite dieléctrico, cuyo propósito es evitar una disrupción interna entre los elementos y al mismo tiempo ser un componente refrigerante, que evite un calentamiento de los componentes base y la capsula, provocando un funcionamiento erróneo; El interior de la capsula lleva 1 cm de nitrógeno seco por seguridad, permitiendo la dilatación del aceite si el condensador llegara a trabajar a temperaturas muy altas, evitando una posible explosión, así también trabaja como un sello que evita el ingreso de humedad a la capsula y por ende una contaminación del aceite aislante dieléctrico.
9. Es importante tomar en cuenta el cambio de las condiciones atmosféricas y variaciones ambientales en las cuales se realizan los diferentes experimentos en el laboratorio, altas tensiones provocan campos eléctricos elevados, que empujan los electrones de las moléculas de aire dejándolas descompensadas y originando iones, al escuchar un sonido similar a una fritura u olor a ozono en el ambiente, se evidencia la presencia de efecto corona en los contactos del circuito.
10. Los incrementos de temperatura en el medio donde se desarrollen las pruebas de aprobación de los elementos, pueden modificar los resultados al punto de generar falsos aprobaciones o rechazos, de acuerdo los valores permitidos según la normativa correspondiente.
11. Los cambios bruscos de tensión podrían originar disrupciones de elemento a elemento o picos de tensión muy elevados que podrían llegar a dañar a los

condensadores y resistencias, el máximo valor que pueden soportar los mismo es de 180KV pico por un corto periodo de tiempo (tensión de impulso 1.2/50 us).

12. Las variaciones que se puedan obtener luego de un test de factor de disipación, ya sea en valores de tensión aplicada o capacitancia medida, son indicios de presencia de humedad, cortocircuitos internos, circuitos abiertos o sueldas frías, ataque químico, sobrecalentamiento, ahí la importancia de realizar los test a intervalos regulares y contrastar los resultados con registros anteriores o unidades similares a la bajo prueba.
13. De acuerdo a las gráficas de las curvas se pudo realizar una comparación entre el condensador tipo de 25000pF existente en el laboratorio de alta tensión de la U.P.S sede Quito - Kennedy Norte y los dos condensadores 1 y 2 de 25000pF del proyecto de tesis de la U.P.S sede Cuenca – El Vecino mediante estas curvas se pudo comprobar que el factor de disipación entre estos elementos tiene valores muy cercanos y parecidos entre ellos luego de hacer una extrapolación a 150kV.
14. La comparación entre la resistencia tipo de 280Mohm existente en el laboratorio de alta tensión de la U.P.S sede Quito - Kennedy Norte y la resistencia de 300Mohm del proyecto de tesis de la U.P.S sede Cuenca – El Vecino, mediante las curvas de datos medidos, permitió notar que sus comportamientos son parecidos, luego de hacer una extrapolación a 150kV.
15. De acuerdo al plan de inversión del proyecto de Tesis es considerablemente económico realizar la construcción de los elementos por cuenta propia, que comprarlos a un proveedor o marca en especial, pues brinda la oportunidad de aplicar los conocimientos adquiridos durante la carrera y adicionalmente permite desarrollar la creatividad, innovación y talento local.
16. El estudio de diferentes normas durante el desarrollado del dispositivo permiten que se pueda garantizar la calidad y el correcto funcionamiento del equipo, cumple con estándares internacionales en lo que respecta a aspectos esenciales como el manejo del aceite dieléctrico depositado en el interior de los condensadores de impulso, factores de corrección y diversos aspectos de calidad del material aislante empleado en la construcción (grilón) para el encapsulado de los componentes.
17. Los valores de rigidez dieléctrica tanto en el grilón como en el aceite dieléctrico, están muy afectados por las condiciones de la prueba (p. ej., de espesor de la

muestra, las temperaturas, el tipo de voltaje, C.A. o C.C., frecuencia, electrodos y el medio de prueba). Por lo cual, los valores varían de un método a otro (normas ASTM D 149, VDE 0303, ISO 1325, IEC 60243, DIN.53481, en el caso del grilón). Por lo que se debe prestarse especial atención a las condiciones en las que debe funcionar la aplicación.

5.2 Recomendaciones:

De acuerdo al desarrollo y al finalizar el presente trabajo de tesis se ha podido llegar a las siguientes recomendaciones:

1. Cualquier práctica o experimento desarrollado en el laboratorio de alta tensión, debe ser realizado respetando el protocolo de pruebas y seguridad, siendo primordial el uso de todos los elementos de seguridad como son casco, guantes y orejeras, en el caso de trabajar dentro de la Jaula de Faraday se recomienda utilizar guantes dieléctricos (hiflex) para manipular los elementos, en el caso de estar trabajando con aceites se recomienda utilizar guantes adecuados para manejo de productos químicos.
2. Cualquier práctica o experimento en el laboratorio debe ser realizado mínimo por dos personas, de presentarse algún percance con una de las personas la otra podría ayudarla o pedir ayuda.
3. Se recomienda descargar todos los elementos del laboratorio que no estén conectados al circuito o en su defecto ser colocados en el soporte metálico donde se colocan todos los elementos, ya que estos pueden ser cargados estáticamente.
4. La manipulación de los elementos del laboratorio y en especial de los condensadores de impulso debe ser realizada con cuidado y vigilar la presencia de fugas de aceite.
5. El aceite aislante dieléctrico puede perder sus características dieléctricas simplemente al soplarlo (micro gotas de saliva, humedad) o con la luz del sol, por lo cual hay que transportarlo en contenedores de color obscuro y mantenerlos en un lugar oscuro fresco y seco donde se guarde de la luz.

6. Para muestras de aceite aislante, las pruebas de rigidez dieléctrica son válidas hasta 4 días luego de obtener la muestra del depósito principal, de lo contrario las características propias del aceite, sufren modificaciones.
7. En futuros desarrollos, la calidad de los elementos construidos está relacionada directamente con la calidad de los elementos base.

5.3.Temas Futuros de estudio.

- Construcción de elementos para generación de tensiones de impulso, de tal forma que se posibilite el montaje de un circuito doblador o triplicador de tensión.
- Obtención de los parámetros del modelo matemático propio de elementos del laboratorio.
- Análisis de armónicos presentes en la red de alimentación del laboratorio de alta tensión.
- Mejora del panel de control, para un ingreso digital de nivel de tensión deseado.
- Diseño de un dispositivo capaz de realizar pruebas de factor de disipación (tangente delta).
- Análisis de los elementos del laboratorio, por medio del método de descargas parciales.

Referencias:

[1] J. R. Jorge Padilla, Diseño y construcción de dos diodos de potencia, voltaje anodo catodo inverso de 150 kV, corriente nominal de 50 mA para el laboratorio de alta tensión de la universidad politécnica salesiana., Cuenca: N/A, 2013, p. 57.

[2] F. D. R. E. R. P. Josep Balcells, Interferencias Electromagnéticas en Sistemas Electrónicos, Barcelona: Marcombo SA, 1992.

[3] T. J. Maloney., Electrónica Industrial Moderna., ND, México: Pearson Educación., 2006.

[4] varios, «wikipedia,» A Wikipedia Project, Powered by Mediawiki, 14 12 2014. [En línea]. Available: http://es.wikipedia.org/wiki/resistencia_electrica. [Último acceso: 06 06 2014].

[5] F. J. C. d. Antonio, Medidas eléctricas para ingenieros, S.L., 2007.

[6] U. N. d. L. P. Facultad de Ingeniería, «Tipos de resitencia.pdf,» 12 10 2005. [En línea]. Available: http://www.ing.unlp.edu.ar/electrotecnia/electronicos2/download/Herramientas/Resistores.pdf. [Último acceso: 03 07 2014].

[7] K. D. K. H, Hochspannungs-Isoliertechnick, Braunschweig: Vieweg, 1982.

[8] M. M, Der Drahtwiderstand als Bauelement fur die Hochs-pannungstechnik und Rechentechnik, MeBtechnik, 1969.

[9] R. C. R. V. Adolfo González, Capacitores, Parte 1, Mendoza: Universidad Tecnológica Nacional, 2009.

[10] TIGRE, Polietileno de alta densidad., «www.tigre.pe,» n/d n/d 2009. [En línea]. Available: www.tigre.pe/Download/Archive/221230. [Último acceso: 30 12 2014].

[11] F. C. Martinez, DISEÑO DEL AISLAMIENTO DE LINEAS DE TRANSMISION., POZA RICA DE HIDALGO, VERACRUZ: N/D, 2009.

[12] TERCO, Manual de practicas de laboratorio.

[13] HAEFELY TRENCH, Manual de laboratorio de alta tensión, MA_2840_2820a_4841866_V1, ND: ND, ND.

[14] Varios, «en.wikipedia.org,» A Wikimedia Project, Powered by MediaWiki, 05 11 2014. [En línea]. Available: en.wikipedia.org/wiki/Ceramic_capacitor#Class_1_ceramic_capacitors. [Último acceso: 31 12 2014].

[15] W. B. Donald Fink, Manual práctico de electricidad para ingenieros, Barcelona: Reverte, 1984.

[16] DUPONT, «Technical Report TRG 1424,» de *Test for thermoplastic materials used in the electrical and electronic industries*, N/A, Switzerland, Dupont, p. 10.

[17] G. A. Dolla, Barreras técnicas comerciales: Los obstaculos reglamentarios al comercio exterior y cómo solventarlos, Madrid: ICEX, 2012.

[18] R. Guzman., 24 Octubre 2012. [En línea]. Available: https://prezi.com/717-2vw0-ufp/toma-de-muestras-liquidas/. [Último acceso: 22 12 2014].

[19] ASTM, [En línea]. Available: http://nicolasdiruscio.redirectme.net/Facultad/3%20Nivel/Tecnolog%C3%ADa%20y%20Ensayo%20de%20los%20Materiales%20El%C3%A9ctricos/Tutoriales/ASTMD877.pdf. [Último acceso: 22 12 2014].

[20] V. K. M. S. Naidu, High Voltage Engineering, N/D: McGraw-Hill, 1996.

[21] Chec, «http://www.chec.com.co,» 14 12 2011. [En línea]. Available: http://www.chec.com.co/archivos/juridica/ANEXO1_1334_2012-01-04_anexo_aisladores.pdf. [Último acceso: 27 12 2014].

[22] «emagister.com,» [En línea]. Available: http://www.emagister.com/curso-tesis-investigacion/observacion-experimentacion. [Último acceso: 4 Enero 2014].

[23] Chauvin-arnoux, *Guia de la medición de aislamiento.*, Barcelona: ND, 2012.

[24] Universidad de Alcalá, «http://www.uah.es/,» [En línea]. Available: http://www2.uah.es/bibliotecaformacion/BPOL/FUENTESDEINFORMACION/normas_tcnicas.html. [Último acceso: 21 12 2014].

[25] «niveldostic.blogspot.com,» 06 2009. [En línea]. Available: http://niveldostic.blogspot.com/2009/06/metodo-inductivo-deductivo.html. [Último acceso: 5 Enero 2014].

[26] H. A., Elektrokeramik, Berlin: Springer, 1959.

[27] M. E., Hochspannungspraktikum, Berlin: Springer, 1952.

[28] F. J. G. Fernández, «Ensayos de tangente delta,» de *Teoría y práctica del mantenimiento industrial avanzado*, Madrid, FC, ND, pp. 198-200.

[29] H. H. Liebscher F, Kondensatoren, Berlin: Springer, 1968.

[30] M. P. Muñoz, Fundamentos básicos de finanzas, Universidad Arturo Prat.

ANEXOS.

Anexo A: Informe pruebas de Factor de Disipación (tangente delta).

Anexo B: Planos mecánicos de resistencia de medición.

Anexo C: Planos mecánicos de condensador de impulso.

Anexo D: Hojas de datos.

Anexo A.

Informe Pruebas de Factor de Disipación (Tangente Delta)

Anexo B.

Planos Mecánicos de Resistencia de Medición

Anexo C.

Planos Mecánicos de Condensador de Impulso

Anexo D.

Hojas de Datos