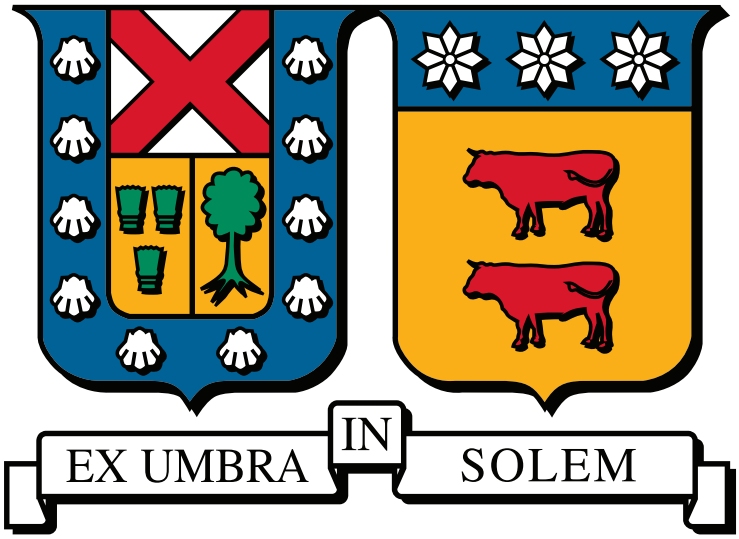
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
VALPARAÍSO - CHILE



"DISEÑO Y EVALUACIÓN ECONÓMICA DE UN GENERADOR DE IMPULSOS DE CORRIENTE PARA APLICACIONES DOCENTES"

OSCAR DAVID BARRA CONTERAS

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRICISTA

PROFESORES GUÍAS: SR. JAVIER RÍOS VIELMA
SR. JOHNY MONTAÑA CHAPARRO

ENERO - 2020

"La Santa María no es una carrera de velocidad,
es una carrera de resistencia"

Algún Sansano Promedio

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Ema Contreras y Juan Barra por haberme dado la vida, permitirme estudiar lejos de casa, tener paciencia y darme apoyo cuando todo parecía interminable.

A Valentina Oyarzún por ayudarme a crecer, trabajar mis defectos, fortalecer mis virtudes y acompañarme desde que decidimos estudiar en Valparaíso.

A mis abuelos Marta Cabrera y Juan Barra, con quienes viví en mis primeros años de universidad, así como también a mi abuela Carmen Sierra, mis tíos y primos por estar pendientes de mí cuando lo necesitaba.

A Los Palafitos Sebastián Gamonal, Sebastián Gajardo e Ignacio Roa, por tenerme paciencia, soportar las desafinaciones, las incontables veces que repetíamos las canciones hasta que salían bien, ayudarme a dejar lo demás atrás haciendo ruido en la sala de ensayo cada semana y permitirme soñar con ser rock star en cada presentación en vivo.

A mis amigos, a los que conocí desde el principio, a quienes se han sumado y a quienes se han ido a lo largo del tiempo, por que sin ustedes habría sido inmensamente más difícil y solitario este proceso. En especial a Victor Morales y Joaquín Echaíz, gracias por escucharme y hacerme una mejor persona, los llevaré siempre en el corazón.

A los pañoleros del Departamento de Ingeniería Eléctrica, quienes han tenido la paciencia y disponibilidad para ayudarme durante el desarrollo del proyecto, a Francisco Alamos por su ayuda desinteresada cuando necesitaba alguna pieza que no podía construir y a los pañoleros de mecánica e IDP quienes me orientaron y ayudaron cuando necesitaba mejorar las fijaciones mecánicas del núcleo de la bobina.

Al profesor Javier Rios por confiar en mí al momento de proponerle el tema de memoria y por resolver mis dudas en torno al proyecto con paciencia y siempre de manera amable.

A las actividades extra curriculares de la universidad, que hacen mas llevaderas las largas horas de estudio y cumplen la importante misión de brindar un espacio de convivencia y apoyo entre los estudiantes. Especialmente a Buceo, al Club de Música y a ProIE.

RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo se refiere al "Diseño y Evaluación Económica de un Generador de Impulsos de Corriente para aplicaciones docentes", desde ahora GIC, para el Laboratorio de Alta Tensión (LAT) de la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM), en el contexto de la Memoria de Titulación para optar al título de Ingeniero Electricista de Oscar David Barra Contreras del Departamento de Ingeniería Eléctrica (DIE) de la misma universidad.

Este diseño se realiza ante la necesidad del LAT de implementar equipamiento adicional para mejorar las prestaciones del mismo. Este estudio consiste en diseñar un prototipo de GIC que cumpla con las características mínimas de transportabilidad, robustez y funcionalidad necesarias para energizar diversos experimentos dentro y fuera del laboratorio.

Se presenta el proceso de diseño del GIC comenzando con la evaluación bibliográfica, elección y simulación del modelo a construir, pasando por determinación de los límites térmicos del diseño, construcción de equipos faltantes para el circuito, establecimiento del margen de funcionamiento del prototipo construido y finalizando con la evaluación económica del banco de condensadores.

En este trabajo se sigue el procedimiento de diseño, construcción y prueba para cada elemento, con lo que se fue modificando el prototipo utilizado para cumplir con requisitos autoimpuestos como generar ondas de $20\ [kA]$ sin deformación aparente en la señal.

Originalmente el prototipo consideraba una corriente de $5\ [kA]$ como requisito, sin embargo al avanzar en el proyecto se descubre que el equipo diseñado puede alcanzar $20\ [kA]$ de manera teórica. En la práctica no todos los elementos resisten dicho nivel de descarga sin deteriorarse, por lo tanto, se deja para oportunidades posteriores el mejoramiento de la inductancia variable para asegurar su funcionamiento hasta por lo menos $30\ [kA]$ de impulsos de corriente $8/20$, así como también la construcción del modelo sugerido.

Los errores máximos de los ensayos de cortocircuito son $3,30\,\%$ para el tiempo de frente, $10,57\,\%$ en el tiempo de cola y $28,33\,\%$ en la magnitud de corriente.

Los errores máximos obtenidos cuando se ensayó el descargador MWK4 de ABB son $7,94\,\%$ para el tiempo de frente, el tiempo de cola es despreciable para efectos de norma así que no se considera, $22,78\,\%$ en el caso de la magnitud de corriente y $15,66\,\%$ para la tensión residual considerando incluso que el dispositivo estaba dañado.

A pesar del deterioro del descargador y aunque los ensayos no cumplen con la norma establecida, los resultados son bastante cercanos a lo simulado en los parámetros críticos por lo que se consideran exitosos.

Finalmente se realizó un ensayo a un conjunto de descargadores VARSIL HE-S06 pertenecientes a una planta desalinizadora el que arroja discrepancias del orden de $30\,\%$ de error en cuanto a magnitud de la onda, por lo tanto, se corrige el valor obtenido con corriente continua para la resistencia shunt de $8,581\ [m\Omega]$ a $6,021\ [m\Omega]$.

Como se trata de un equipo con fines docentes, se asume que los equipos de carga y las uniones se encuentran disponibles en el laboratorio a implementar, por lo tanto al evaluar económicamente el GIC se consideran solamente los capacitores.

El criterio de selección de los equipos cotizados se basa en la robustez eléctrica y mecánica, por lo que se opta por la cotización de Shanghai Qiyu Optoelectronics Technology Co. Ltd. la que asciende a un total de $16750\,USD$ para un grupo de 6 capacitores de $60\,[kV]$, $1\,[\mu F]$ y $> 8\,[kA]$ cada uno. Se estima que el costo de los equipos restantes es despreciable frente al de los condensadores.

ABSTRACT

This work refers to the "Design and Economic Evaluation of a Current Impulse Generator for educational applications", from now on GIC, for the High Tension Laboratory (LAT) of the Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM), in the context of the Qualifying Report to opt for the degree of Electrical Engineer of Oscar David Barra Contreras of the Department of Electrical Engineering (DIE) of the same university.

This design is made in response to the need of the LAT to implement additional equipment to improve its performance. This study consists of designing a GIC prototype that meets the minimum characteristics of transportability, robustness and functionality necessary to energize various experiments inside and outside the laboratory.

ICG design process presented starting with the bibliographic evaluation, choice and simulation of the model to be built, going through the determination of the thermal limits of the design, construction of missing equipment for the circuit, establishment of the operating margin of the built prototype and ending with the economic evaluation of the capacitor bank.

This work follows the design, construction and testing procedure for each element, modifying the prototype used to meet self-imposed requirements such as generating $20\ [kA]$ waves without apparent deformation in the signal.

Originally the prototype considered a current of $5\ [kA]$ as a requirement, however when advancing in the project it is discovered that the designed equipment can reach $20\ [kA]$ theoretically. In practice, not all the elements can withstand this level of discharge without deteriorating, therefore, the improvement of the variable inductance is left for later opportunities to ensure its operation up to at least $30\ [kA]$ of $8/20$ current impulses, as well as the construction of the suggested model.

The maximum errors in short-circuit tests are $3{,}30\,\%$ for the front time, $10{,}57\,\%$ for the time to half-value and $28{,}33\,\%$ for the magnitude of the current.

The maximum errors obtained when testing ABB's MWK4 surge arrester are $7{,}94\,\%$ for the front time, the time to half-value is negligible for standard effects so it is not considered, $22{,}78\,\%$ in the case of the magnitude of current and $15{,}66\,\%$ for the residual voltage even when considering that the device was damaged.

In spite of the deterioration of the surge arrester and although the tests do not meet the established standard, the results are quite close to that simulated in the critical parameters and are therefore considered successful.

Finally, a test is performed on a set of VARSIL HE-S06 surge arresters belonging to a desalination plant which gives discrepancies of the order of $30\,\%$ of error as regards the magnitude of the wave, therefore, the value obtained with direct current for shunt resistance is corrected of $8,581\ [m\Omega]$ to $6,021\ [m\Omega]$.

As this is a teaching device, it is assumed that the loading equipment and the joints are available in the laboratory to be implemented, therefore only the capacitors are considered in the economic evaluation of the GIC.

The selection criteria for the equipment quoted is based on electrical and mechanical robustness, so the quotation of Shanghai Qiyu Optoelectronics Technology Co. Ltd. is chosen, which amounts to a total of

16750 USD for a group of 6 capacitors of 60 $[kV]$, 1 $[\mu F]$ and > 8 $[kA]$ each. It is estimated that the cost of the remaining equipment is negligible compared to that of capacitors.

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos II

Resumen Ejecutivo III

Abstract V

Índice General VII

Índice de Tablas XI

Índice de Figuras XIV

Glosario XVIII

I Desarrollo del Trabajo de Título XIX

1. Introducción 1

1.1. Objetivos 1

1.2. Estructura del trabajo de título 2

1.3. Plan de trabajo 2

2. Revisión Bibliográfica 4

2.1. Los generadores de impulso 4

2.2. Tipos de generadores de impulso 4

2.2.1. GIC $4/10$ y $8/20$ $[\mu s]$ 5

2.2.2. GIC $10/350$ $[\mu s]$ 6

2.2.3. GIC para pruebas en aeronaves 8

2.2.4. GIC tiempo de frente rápido 9

2.2.5. GIC corriente de larga duración 9

2.2.6. GIC pruebas bajo condiciones de operación 10

2.3. Pruebas realizables con GIC Haefely 11

2.4. Metodología de Diseño 12
2.4.1. Cálculo de parámetros del GIC 12
2.4.2. Inductancia variable 13

3. Marco Teórico **14**
3.1. Circuito equivalente y etapas del generador de impulsos $8/20\ [\mu s]$ 14
3.1.1. Etapa de carga 14
3.1.2. Etapa de descarga 15
3.2. Comportamiento dinámico del circuito 16
3.2.1. Etapa de carga 16
3.2.2. Etapa de descarga 18
3.3. Forma de onda normada 21
3.4. Tolerancias de norma en pruebas de alta corriente 23
3.5. Mediciones de las pruebas de alta corriente 24
3.5.1. Medición corriente 24
3.5.2. Medición tensión 25
3.6. Energía disipada 26
3.6.1. Conductores 27
3.6.2. Condensadores 27
3.7. Modelos de simulación descargadores sobretensión 28
3.7.1. Modelo IEEE 29
3.7.2. Modelo Pinceti-Giannettoni 29
3.8. Diseño de bobina 31

4. Simulaciones GIC **33**
4.1. Simulación sin probeta 33
4.2. Simulación sin probeta onda normada 38
4.3. Simulación con descargador de sobretensión ABB MWK4 39
4.3.1. Modelo IEEE 40
4.3.2. Modelo Pinceti-Giannettoni 41

5. Diseño, Evaluación Técnica y Construcción **43**
5.1. Características de diseño 43

5.1.1. Aspectos eléctricos de diseño . . . 43
5.1.2. Marco estructural de diseño . . . 46
5.2. Construcción y ensayos de diseño . . . 47
5.2.1. Equipos y prototipo inicial . . . 47
5.2.2. Modificaciones . . . 55
5.2.3. Prototipo final . . . 58
5.2.4. Pruebas finales . . . 61
5.2.5. Observaciones generales resultados prototipo final . . . 73

6. Límites de Operación **75**
6.1. Límite de los equipos . . . 75
6.2. Recomendaciones de uso . . . 75

7. Evaluación de Costos **77**
7.1. Equipos constitutivos GIC . . . 77
7.2. Cotización de equipos . . . 77

8. Conclusiones, Recomendaciones y Observaciones Generales **79**
8.1. Conclusiones . . . 79
8.2. Recomendaciones . . . 81
8.3. Observaciones Generales . . . 82

Bibliografía **84**

II Anexos **87**

A. Cálculo Soluciones EDO Segundo Orden **88**
A.1. Solución sobre-amortiguada . . . 88
A.2. Solución sub-amortiguada . . . 89
A.3. Solución críticamente amortiguada . . . 90

B. Parámetros de Circuito **91**

C. Cálculo Simulación Descargador MWK4 **92**
C.1. Modelo IEEE . . . 92

C.2. Modelo Pinceti-Giannettoni 95

D. Integral Corriente Onda Normada **96**

E. Mediciones Ensayo Absorción **97**

F. Cálculo Energía Disipada en Condensadores **98**

G. Cálculo Resistencia Shunt **99**

H. Cálculo Espinterómetro de Barras **101**

I. Planos Constructivos Modelo Generador de Impulsos de Corriente **102**

J. Cálculo Resistencia Variable **109**

K. Mediciones Descargadores de Sobretensión Desalinizadora **110**

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Pruebas realizables con generadores de corriente 12

3.1. Tolerancias de tiempo para impulso de corriente normado 23
3.2. Tolerancia relación de tiempo impulso normado 23

4.1. Valores de variación onda crítica al cambiar la resistencia 36
4.2. Valores de variación onda crítica al cambiar la inductancia 36
4.3. Valores de variación onda crítica al cambiar la capacitancia 36
4.4. Influencia variación de parámetros del circuito 37
4.5. Valores para cálculo de parámetros del circuito para onda normada 38
4.6. Valores característicos onda simulada 10 y 20 $[kA]$ 39
4.7. Valores lineales iniciales modelo descargador MO IEEE 40
4.8. Valores lineales definitivos modelo descargador MO IEEE 40
4.9. Valores lineales modelo descargador MO Pinceti y Guiannettoni 41

5.1. Datos diseño nicrom y cobre 44
5.2. Secciones mínimas diseño conductores considerando temperatura 44
5.3. Secciones mínimas diseño conductores considerando materiales vecinos 44
5.4. Secciones mínimas definitivas de diseño conductores 45
5.5. Resistencias conducción condensadores 45
5.6. Datos placa condensadores 48
5.7. Datos estructurales condensadores 48
5.8. Datos eléctricos bobina 49
5.9. Datos estructurales bobina 49
5.10. Datos onda segundo prototipo con descargador 56
5.11. Datos onda ensayo 1 y 2 62
5.12. Variación de parámetros impulso 10 $[kA]$ del prototipo final ensayo 1 y 2 62
5.13. Datos del ensayo 1 y sus simulaciones 62
5.14. Datos del ensayo 2 y sus simulaciones 62

5.15. Datos eléctricos reales banco de condensadores 63
5.16. Datos del ensayo 1 y sus simulaciones considerando banco de condensadores real 63
5.17. Datos del ensayo 2 y sus simulaciones considerando banco de condensadores real 63
5.18. Datos ondas ensayo 3 y 4 65
5.19. Variación de parámetros impulso 20 $[kA]$ del prototipo final ensayo 3 y 4 65
5.20. Datos del ensayo 3 y sus simulaciones considerando banco de condensadores real 65
5.21. Datos del ensayo 4 y sus simulaciones considerando banco de condensadores real 65
5.22. Parámetros divisor capacitivo medición tensión residual descargador 66
5.23. Datos ondas ensayo 5A, 6A y 7A 67
5.24. Variación de parámetros tensión residual a descargador MWK ensayo 5A, 6A y 7A 68
5.25. Datos del ensayo 5A y sus simulaciones al descargador MWK4 69
5.26. Datos del ensayo 6A y sus simulaciones al descargador MWK4 69
5.27. Datos del ensayo 7A y sus simulaciones al descargador MWK4 69
5.28. Datos ondas ensayo 5. 1B, 5. 2B, 5. 3B, 6B, 7. 1B y 7. 2B 71
5.29. Variación de parámetros tensión residual a descargador MWK ensayo 5B, 6B y 7B 71
5.30. Datos del ensayo 5. 2B y sus simulaciones al descargador MWK4 71
5.31. Datos del ensayo 6B y sus simulaciones al descargador MWK4 72
5.32. Datos del ensayo 7. 1B y sus simulaciones al descargador MWK4 72

7.1. Cotización condensadores 78

B.1. Parámetros circuito onda normada 10 $[kA]$ 91
B.2. Parámetros circuito onda normada 20 $[kA]$ 91

C.1. Datos de placa ABB MWK4 92
C.2. Datos estructurales ABB MWK4 92
C.3. Valores lineales iniciales modelo descargador MO IEEE 93
C.4. Parámetros no lineales iniciales modelo MO IEEE 93
C.5. Errores amplitud tensión simulación MO IEEE 93
C.6. Valores no lineales finales simulación MO IEEE 94
C.7. Iteraciones L_1 ajustes modelo MO IEEE 94
C.8. Valores no lineales modelo MO Pinceti y Giannettoni 95

E.1. Datos corrientes prorrateadas ensayo absorción 97

E.2. Resistencias conducción condensadores 97

G.1. Factor resistividad eléctrica nicrom 6015 99
G.2. Datos diseño resistencia shunt 100

H.1. Datos para diseño espinterómetro de seguridad 101

J.1. Error por calentamiento resistencia variable para $20\ [kA]$ 109

K.1. Datos de placa Ensto Varisil $HE - S\ 06$ 110
K.2. Valores no lineales modelo MO Pinceti y Giannettoni descargadores desalinizadora 110
K.3. Valores lineales modelo descargador MO Pinceti y Guiannettoni dispositivos desalinizadora 111
K.4. Errores corriente máxima descargadores desalinizadora 111
K.5. Valores resistencia shunt ajustada 112
K.6. Errores corriente máxima descargadores desalinizadora resistencia shunt corregida 112

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Circuito GIC tipo $4/10$ y $8/20$ $[\mu s]$ 5
2.2. Forma de onda GIC tipo $4/10$ y $8/20$ $[\mu s]$ 6
2.3. Circuito GIC tipo $10/350$ $[\mu s]$ 6
2.4. Forma de onda GIC tipo $10/350$ $[\mu s]$ 7
2.5. Circuito GIC tipo $10/350$ $[\mu s]$ paralelo 7
2.6. Forma de onda GIC ensayo aeronaves 8
2.7. Circuito GIC para onda C ensayo aeronaves 8
2.8. Circuitos GIC para impulso de frente rápido 9
2.9. Circuito GIC impulso larga duración modelo 2 9
2.10. Circuito GIC impulso larga duración 10
2.11. Forma de onda GIC impulso larga duración 10
2.12. Circuito GIC para impulso en condiciones de servicio 11
2.13. Diagrama inductor variable 13

3.1. Circuito equivalente GIC 14
3.2. Circuito etapa de carga y de descarga GIC 15
3.3. Circuito etapa de carga GIC 16
3.4. Curva de carga de condensador con corriente continua 17
3.5. Curva de carga de condensador por rectificador de media onda 18
3.6. Circuito equivalente de descarga GIC 19
3.7. Forma de onda impulso de corriente normado 21
3.8. Tolerancia de punta de polaridad inversa 24
3.9. Circuito conexión resistencia shunt 25
3.10. Recomendación uso sistema medicion tensión 25
3.11. Circuito divisor resistivo de tensión 26
3.12. Circuito para determinar corriente de absorción 28
3.13. Modelo equivalente descargador MO IEEE 29
3.14. Gráfico parametros A_0 y A_1 para MO IEEE 30

3.15. Modelo equivalente descargador MO Pinceti y Giannettoni 30
3.16. Gráfico parametros A_0 y A_1 para MO Pinceti y Guiannettoni 31
3.17. Dimensiones de bobina con nucleo de aire 32

4.1. Simulación de variación onda crítica al cambiar la resistencia 34
4.2. Simulación de variación onda crítica al cambiar la inductancia 35
4.3. Simulación de variación onda crítica al cambiar la capacitancia 35
4.4. Onda normada simulada con Imo-Schwab 39
4.5. Simulación descargador MO modelo IEEE 41
4.6. Simulación descargador MO modelo Pinceti y Guiannettoni 42

5.1. Condensador del banco de condensadores 47
5.2. Banco de condensadores 48
5.3. Bobina de descarga 49
5.4. Generador de impulsos pequeño 50
5.5. Espinterómetro de proximidad 50
5.6. Resistencia shunt sin blindaje 51
5.7. Resistencia shunt blindada 51
5.8. Cilindro de aluminio 52
5.9. Resistencia Variable 52
5.10. Fleje de conexión tipo 52
5.11. Prototipo inicial GIC en proceso de armado 53
5.12. Mediciones primer prototipo 54
5.13. Cilindro de aluminio sin refuerzo abollado 55
5.14. Gráfico de calibración segundo prototipo 55
5.15. Mediciones segundo prototipo con descargador de sobretensión 56
5.16. Cilindro de aluminio con refuerzo de remaches abollado 57
5.17. Soporte de madera del cilindro de aluminio 58
5.18. Espinterómetro vertical 59
5.19. Conductor flexible espinterómetro 59
5.20. Prototipo final GIC 60
5.21. Esquema prototipo final GIC 60
5.22. Mediciones prototipo final ensayo 1 y 2 61

5.23. Mediciones prototipo final ensayo 3 y 4 64
5.24. Mediciones prototipo final ensayos 5A, 6A y 7A 67
5.25. Mediciones prototipo final ensayos 5. 1B, 5. 2B, 5. 3B, 6B, 7. 1B y 7. 2B 70
5.26. Cilindro de aluminio con refuerzo de madera abollado 73

G.1. Resistencia shunt sin filamentos 100

I.1. Despiece modelo propuesto GIC 102

K.1. Medición tipo descargador desalinizadora 111

GLOSARIO

V_f	Tensión fuente
R_c	Resistencia de carga
v_{Rc}	Tensión resistencia de carga
D	Diodo
T	Transformador
C	Banco de condensadores
v_C	Tensión banco condensadores
V_0	Tensión de carga banco condensadores
R_d	Resistencia reguladora de descarga
v_{Rd}	Tensión resistencia de descarga
L_d	Inductancia reguladora de descarga
v_{Ld}	Tensión inductancia reguladora de descarga
$v_{probeta}$	Tensión probeta
E	Explosores o espinterometro
T_s	Tierra de servicio
A	Medidor de carga
I_0	Corriente máxima transitoria
$R_{probeta}$	Resistencia probeta
$L_{probeta}$	Inductancia probeta
$C_{probeta}$	Capacitancia probeta
i_c	Corriente de carga
i_d	Corriente de descarga
α	Coeficiente de amortiguamiento
ω_0	Frecuencia resonante
ω_d	Frecuencia resonante amortiguada
R_t	Resistencia total del circuito
L_t	Inductancia total del circuito
C_t	Capacitancia total del circuito
t	Tiempo
τ	Constante de tiempo del circuito
Z	Variable auxiliar EDO
Y	Variable auxiliar EDO
I_{max}	Corriente máxima del impulso
T_{max}	Tiempo donde se alcanza corriente máxima del impulso
R_{cond}	Resistencia conductor
i_{cond}	Corriente conductor
T_1	Tiempo de frente
T_2	Tiempo de cola
T	Tiempo entre 10 y 90 % de la onda
O_1	Origen Virtual
Q	Carga impulso corriente

ΔT	Diferencial de temperatura
R_{sh}	Resistencia shunt
ΔE	Diferencial de energía
C_{esp}	Calor específico
P_{cal}	Potencia disipada por calor
l	Largo conductor
S	Sección transversal conductor
ρ	Resistividad material conductor
P_{esp}	Peso específico conductor
I_g	Corriente conducción
R_g	Resistencia de conducción

PARTE I

DESARROLLO DEL TRABAJO DE TÍTULO

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El estudio de las descargas atmosféricas ha sido objeto de análisis durante mucho tiempo ya que éstas ocurren rápidamente y pueden provocar daños considerables en los elementos que encuentran a su paso. Es entonces crucial conocer la reacción de los objetos con los que se pueda encontrar esta descarga, por lo cual, se deben simular dichas situaciones con Generadores de Impulso de Alta Tensión (GIT) y Generadores de Impulso de Alta Corriente (GIC) en ambientes controlados. Este trabajo evalúa y propone un diseño de GIC para equipar al LAT utilizando equipos preexistentes y construyendo los que se necesiten para su implementación.

Los daños por descargas atmosféricas se clasifican en los que se deben a la Alta Tensión (Campo Eléctrico) y los que son ocasionados por Alta Corriente (efectos directos por calentamiento de conductores e indirectos por corrientes y tensiones inducidas). Dichos efectos pueden ser estudiados por separado al contar con un GIT y un GIC, disminuyendo así la energía necesaria para dichos ensayos y estudiando de manera específica la situación deseada.

Dentro de los usos tradicionales del GIC se encuentra [1]:

1. Probar descargadores, varistores, elementos de protección de edificios, aviones, helicópteros, aspas de generadores eólicos, interruptores, etc.
2. Usos en aplicaciones militares e investigación.
3. Pruebas de pulsos electromagnéticos y pulsos electromagnéticos nucleares.
4. Alimentación de láser.
5. Fractura de rocas con plasmas.

En este sentido, es beneficioso para los estudiantes de Ingeniería Eléctrica tener experiencia con este tipo de equipamiento, con el cual, seguramente se encontrarán en su vida profesional.

A lo largo del trabajo se citarán normas internacionales, principalmente de los estándares IEC, publicaciones relacionadas de construcción de GIT y GIC, así como también libros de Alta Tensión y apuntes de ramos dictados en la universidad.

SECCIÓN 1.1
Objetivos

1. Realizar una revisión bibliográfica sobre los GIC y sus variaciones, para establecer en base a simulaciones las opciones disponibles para su construcción.
2. Evaluar Técnico-Económicamente las opciones disponibles para definir como se implementará el GIC en el LAT.

3. Construir un prototipo del generador de impulso propuesto para comprobar su funcionamiento y posibilidades de operación.
4. Definir los límites de operación del generador de impulsos construido a partir de ensayos de laboratorio.

SECCIÓN 1.2

Estructura del trabajo de título

El presente informe contará con dos partes, el Desarrollo del Trabajo de Título, el cual contiene:

1. Introducción, donde se comentan los objetivos del trabajo y el alcance del mismo.
2. Revisión Bibliográfica y Marco Teórico, donde se plantearán todos los conocimientos previos necesarios para al desarrollo del trabajo.
3. Simulaciones, donde se analizará el comportamiento del circuito estudiado.
4. Diseño, Evaluación Técnica y Construcción, donde se llevará a la práctica lo estudiado para la confección de prototipos.
5. Evaluación de costos, donde se analizarán los costos de la implementación del equipo en un LAT para fines académicos, comparando los costos de las distintas partes.
6. Límite de operación, se establecerán los límites máximos del equipo y cuales son los componentes que se deben mejorar para aumentar su capacidad.
7. Conclusiones, Recomendaciones y Observaciones, se presentan principales temas de comprensión referentes al trabajo de título, se hace énfasis en los puntos importantes y se plantean las recomendaciones a seguir para el uso del equipo diseñado.

En los Anexos, se encuentra toda la información y cálculos necesarios para el trabajo de título que no se presentan en el desarrollo del mismo.

SECCIÓN 1.3

Plan de trabajo

1. Se estudiará en la literatura y publicaciones los métodos para generar impulsos de corriente.
2. Se consultarán las características esperadas del equipo con lo que se escoge un modelo de generador a simular.
3. Se revisarán los equipos disponibles en el laboratorio que puedan ser útiles para la implementación del GIC.
4. Se realizaran las simulaciones considerando los equipos disponibles en el laboratorio y se realizará el cálculo de parámetros para conocer las características de los equipos faltantes.

5. Se diseñarán, construirán y probarán los equipos con lo que se irá definiendo el modelo final.
6. Se evaluarán los límites del prototipo construido.
7. Se realizará una evaluación de los equipos más costosos para construir el diseño propuesto.

Dentro de las motivaciones de este trabajo se encuentra que el diseño propuesto contribuirá a la formación de nuevos profesionales en nuestra universidad, por lo que contarán con una formación mas integral al poder utilizar este tipo de equipamiento, así como también poder realizar ensayos a equipos utilizados en la industria.

CAPÍTULO 2

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

SECCIÓN 2.1

Los generadores de impulso

Los generadores de impulso son equipos que permiten simular en laboratorio las condiciones a las que se ve enfrentado cualquier tipo de material ante una descarga atmosférica o ante un impulso intempestivo de energía eléctrica.

El primer desarrollo de un generador de impulsos se remonta al año 1863, cuando Ányos Jedlik descubrió la posibilidad de multiplicar la tensión, lo que logró demostrar en 1868 cuando construyó un generador de voltaje tubular [2].

En 1873 Jedlik expuso su modelo de generador tubular en Vienna World Exposition exitosamente y junto con ello ganó el premio "Por Desarrollo" con su propuesta de conexión en cascada de los condensadores, lo que más adelante sería el inicio de los generadores de impulso [3].

En 1925, Erwin Marx propone un circuito de generador de impulsos en el cuál se cargan los condensadores conectados en paralelo y luego se descargan conectados en serie mediante la acción de un conjunto de espinterómetros [4].

Los generadores actuales, al igual que el generador de Marx, funcionan bajo el principio de carga de un banco de condensadores donde se almacena la energía del impulso, la que luego se libera sobre un objeto de prueba. Se utiliza un circuito que cuenta con una parte inductiva y resistiva, que al interactuar con el banco capacitivo, le da la forma requerida al impulso.

SECCIÓN 2.2

Tipos de generadores de impulso

Cuando una descarga atmosférica alcanza a algún tipo de equipo, éste puede presentar daños producto de la alta tensión a la que se ve expuesto, así como también a la alta corriente que puede circular por ellos[1].

Los daños por la alta tensión se deben principalmente al efecto que causa la diferencia de campo eléctrico en su aislacion, entre los bornes del equipo y su configuración interna[1].

Los daños causados por las altas corrientes, están relacionados con el calentamiento que ocasiona dicho flujo de energía y a las corrientes inducidas en equipos cercanos debido a la variacion del campo magnético al momento del impacto [1].

Como los generadores de impulso funcionan bajo el mismo principio, carga de un banco de condensadores que se descarga en un circuito que contiene a la probeta, los valores de tensión y corriente que se alcancen dependen netamente del comportamiento eléctrico que tenga el elemento en evaluación. Si la carga tiene una

alta impedancia, lo mas probable es que se genere un impulso de alta tensión en sus bornes pero no de alta corriente, en el caso de que sea baja, el impulso obtenido no será necesariamente de alta tensión pero si de alta corriente.

Este trabajo se centra en el diseño de un Generador de Impulsos de Corriente (GIC) por lo que solo se analizarán los generadores de este tipo.

2.2.1 GIC $4/10$ y $8/20$ $[\mu s]$

Para lograr corrientes exponenciales de tipo $4/10$ o $8/20$ $[\mu s]$ se utiliza el circuito representado en la Figura 2.1, donde el banco de condensadores se descarga mediante el accionamiento del espinterómetro en una resistencia y bobina ajustadas para el perfil de onda requerido [1].

La forma de onda en los ensayos $4/10$ o $8/20$ $[\mu s]$ debe ser subamotiguada, sin embargo, si se cambian los valores de los elementos del circuito, se pueden lograr formas de ondas sobreamortiguadas y críticamente amortiguadas [5].

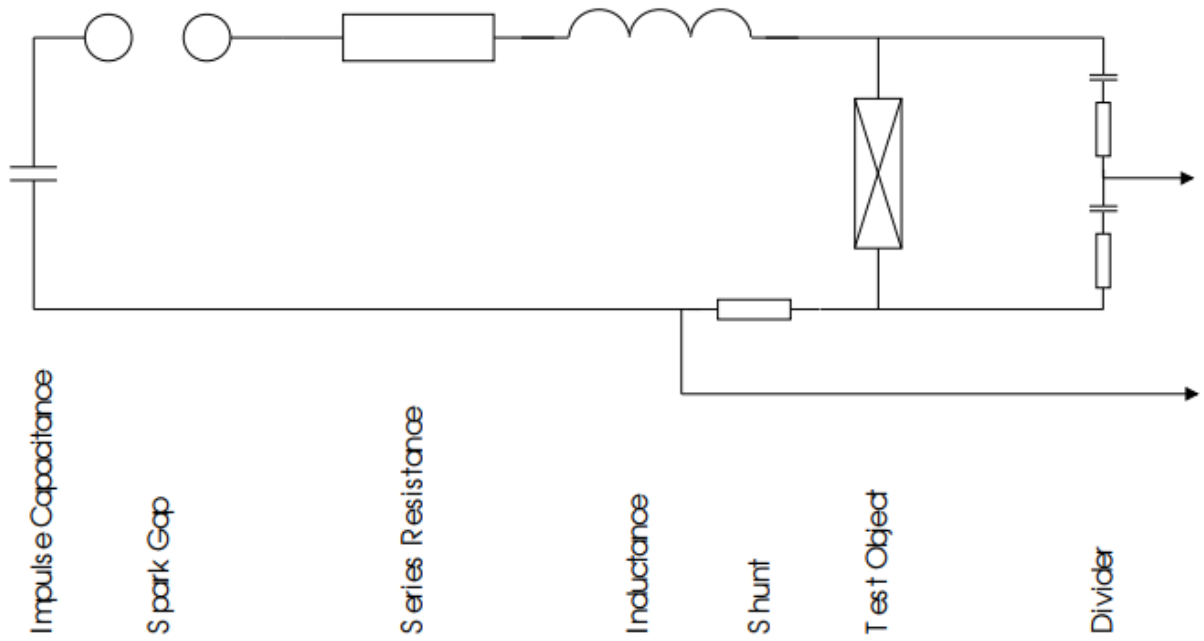


Figura 2.1: *Circuito típico de un GIC* $4/10$ *y* $8/20$ $[\mu s]$. *Fuente: Referencia [1].*

El perfil de onda buscado con los puntos de interés se muestra en la Figura 2.2, las tolerancias mostradas en la imagen, corresponden al modelo producido por Haefely, quienes aseguran un error de $\pm 10\,\%$ para el valor máximo de corriente, T_1 que se denomina tiempo de frente[1] y T_2 como tiempo de cola[2] de la onda.

[1] Es el tiempo que transcurre entre $10\,\%$ y el $90\,\%$ de la onda antes de llegar a su valor máximo multiplicado por 1.25

[2] Es el tiempo que transcurre entre el origen virtual O_1 y cuando la onda alcanza el $50\,\%$ de su valor después del máximo

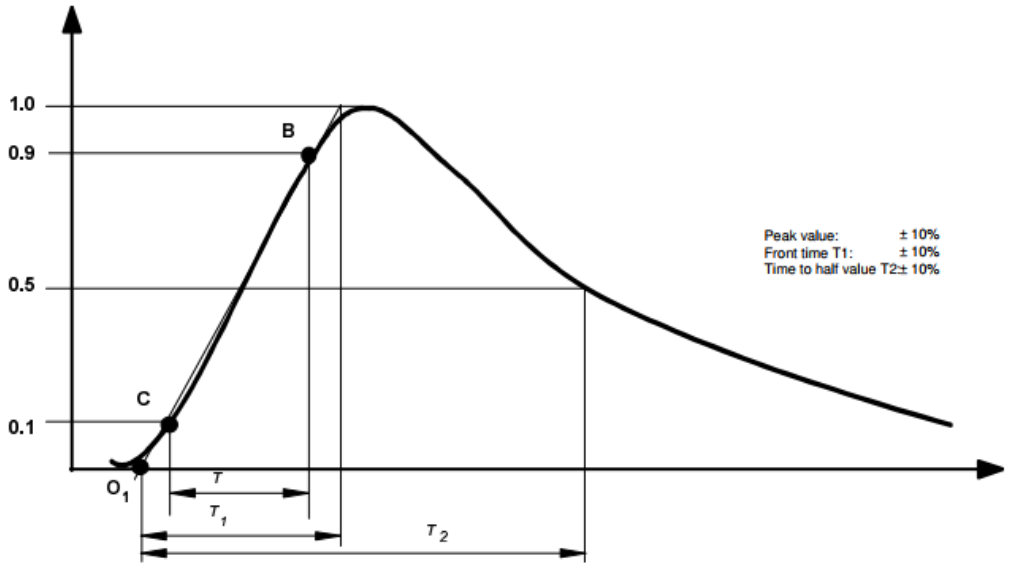


Figura 2.2: *Forma de onda de un GIC* $4/10$ *y* $8/20$ $[\mu s]$. *Fuente: Referencia [1].*

2.2.2 GIC $10/350$ $[\mu s]$

Cuando se busca un tiempo de cola más largo como la onda de perfil $10/350$ $[\mu s]$ se utiliza el circuito que muestra la Figura 2.3 el que acciona el espinterómetro CS cuando la onda de corriente alcanza su nivel máximo dejando el circuito de la probeta en serie con la bobina y la resistencia, por lo que la cola del impulso se mantiene por un tiempo prolongado como lo muestra la Figura 2.4 [1] [5].

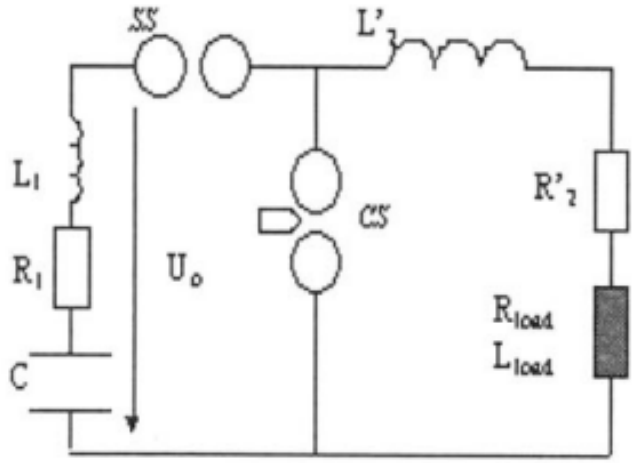


Figura 2.3: *Circuito típico de un GIC* $10/350$ $[\mu s]$. *Fuente: Referencia [5].*

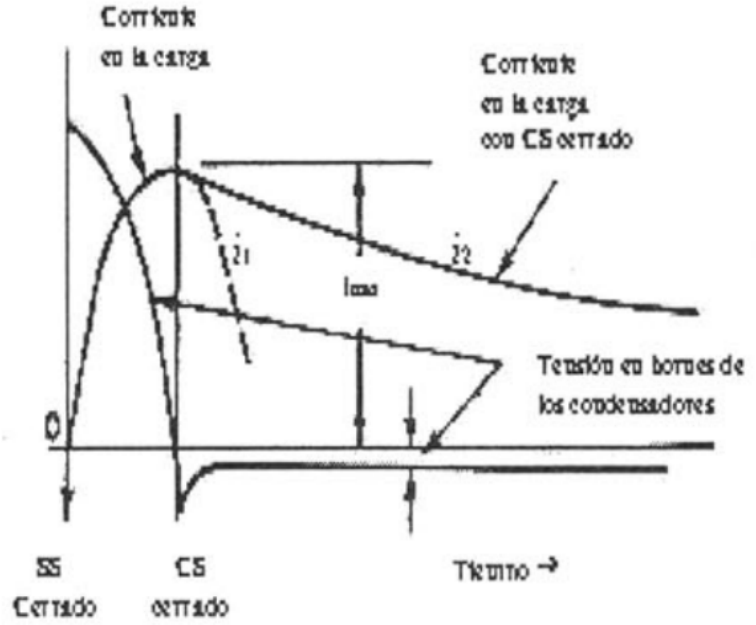


Figura 2.4: *Forma de onda de un GIC* $10/350\ [\mu s]$. *Fuente: Referencia [5].*

En caso que se necesite mayor amplitud de corriente, como en el caso de la instalación de la referencia [5] donde se busca llegar a $200\ [kA]$, se pueden utilizar dos circuitos $10/350$ en paralelo accionados en el mismo instante como lo muestra la Figura 2.5.

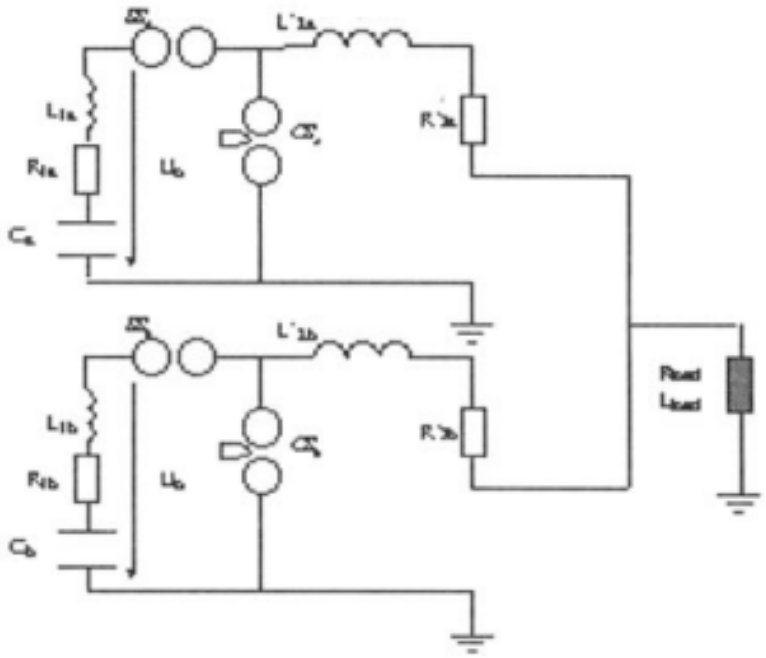


Figura 2.5: *Circuito típico de un GIC* $10/350\ [\mu s]$ *en paralelo. Fuente: Referencia [5].*

2.2.3 GIC para pruebas en aeronaves

Para lograr la forma de onda mostrada en la referencia [5] se necesitan 4 tipos de onda disparados sincronizadamente para lograr el perfil de la Figura 2.6.

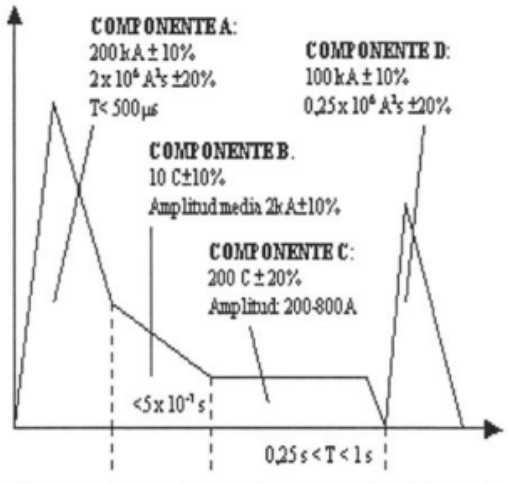


Figura 2.6: *Forma de onda de un GIC ensayo aeronaves. Fuente: Referencia [5].*

La componente A se logra utilizando el circuito de la Figura 2.3, como se necesita una gran corriente, se pueden montar dos circuitos en paralelo para lograr el impulso necesario.

La componente B se logra utilizando el circuito de la Figura 2.1 calibrado para producir una onda críticamente amortiguada.

En el caso de la componente C la onda se puede lograr con el circuito mostrado en la Figura 2.7 el que cuenta con un interruptor para controlar la duración de la corriente en la carga.

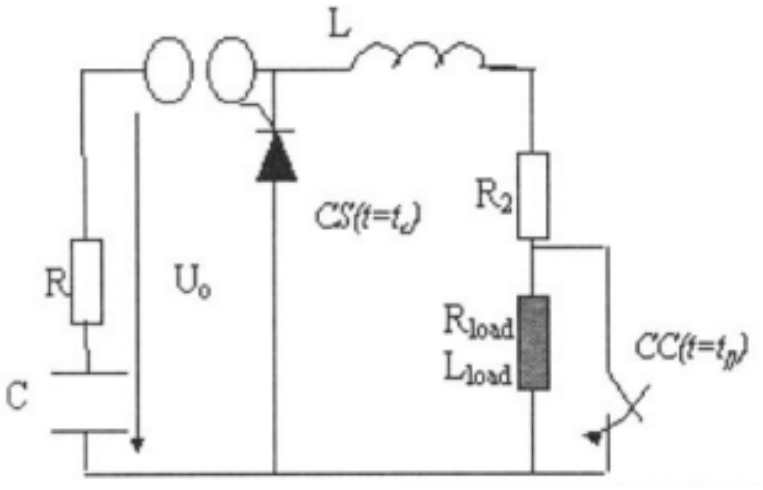
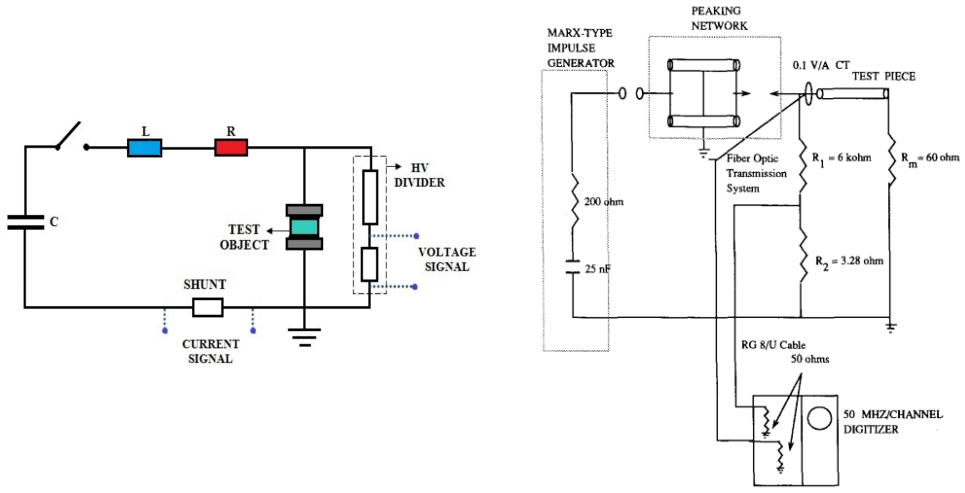


Figura 2.7: *Circuito típico de un GIC para onda C ensayo aeronaves. Fuente: Referencia [5].*

La componente D se logra mediante de forma similar a la componente A pero en la rama del trielectrodo se pone una resistencia variable en serie, con lo que se puede manipular la energía entregada a la carga.

2.2.4 GIC tiempo de frente rápido

Para el caso de las corrientes con tiempo de frente rápido (Steep current impulse) se pueden utilizar los circuitos de las Figuras 2.8a y 2.8b. En el primer caso, el perfil de onda se logra modificando los valores de los elementos del circuito ya que éste es prácticamente igual que el del perfil $8/20\ [\mu s]$ y para el caso del segundo se logra mediante el uso de un espinterómetro de barras, con lo que se pueden lograr tiempos de frente de $0,5\ [\mu s]$ [6].



(a) *GIC frente rápido modelo 1* ***(b)*** *GIC frente rápido modelo 2*

Figura 2.8: *Circuitos GIC para realizar ensayos de impulsos de frente de onda rápido. Fuente: Referencia [6] y [7].*

2.2.5 GIC corriente de larga duración

Las corrientes de larga duración se obtienen con circuitos como los mostrados en las Figuras 2.9 y 2.10 mediante el uso de inductancias para retrasar la descarga de cada condensador.

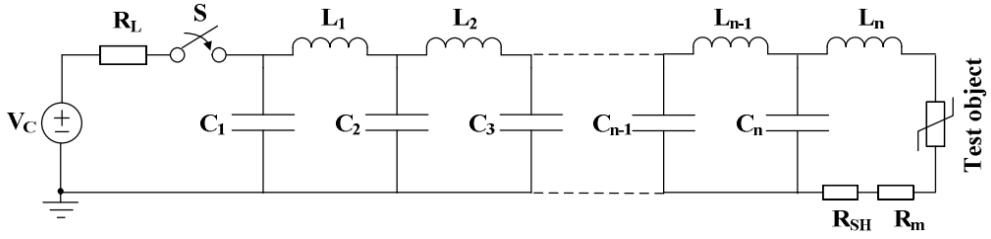


Figura 2.9: *Circuito GIC para generar impulsos de larga duración variación. Fuente: Referencia [8].*

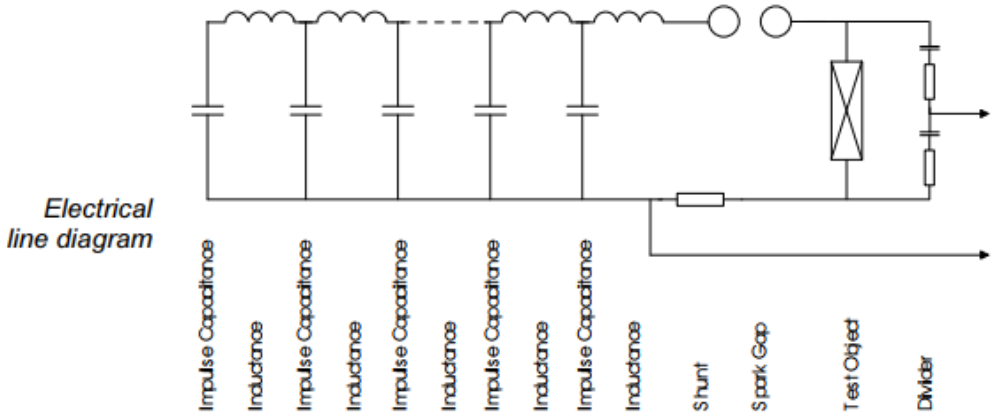


Figura 2.10: *Circuito GIC para generar impulsos de larga duración. Fuente: Impulse current test systems Type SSGA Haefely [1].*

La onda resultante de los circuitos se muestra en la Figura 2.11.

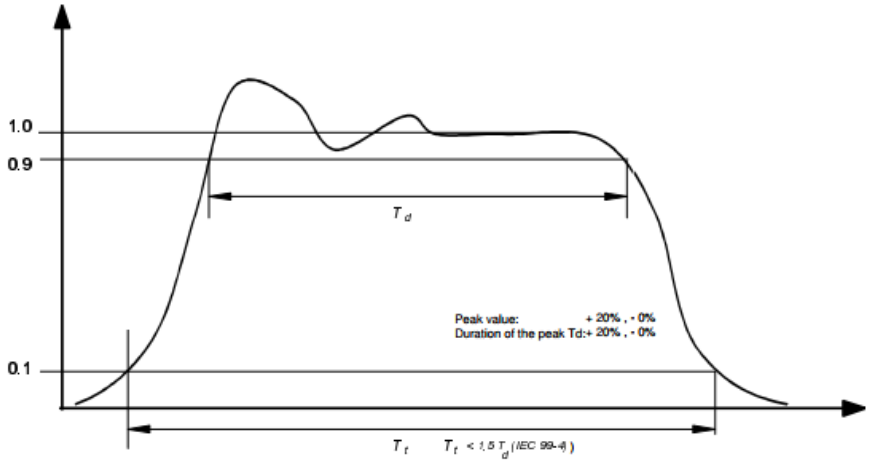


Figura 2.11: *Forma de onda GIC para impulsos de larga duración. Fuente: Impulse current test systems Type SSGA Haefely [1].*

2.2.6 GIC pruebas bajo condiciones de operación

En el caso de las pruebas bajo condiciones de operación se puede utilizar el circuito de la Figura 2.12, el cual tiene una etapa alimentación nominal, otra de generación de impulso y cuenta con un conmutador. El objetivo de esta prueba es comprobar el enfriamiento del descargador cuando está conectado a la red luego de ser accionado, por lo que la etapa de energización nominal se conecta por 30 minutos luego de realizar los impulsos de corriente correspondientes [1].

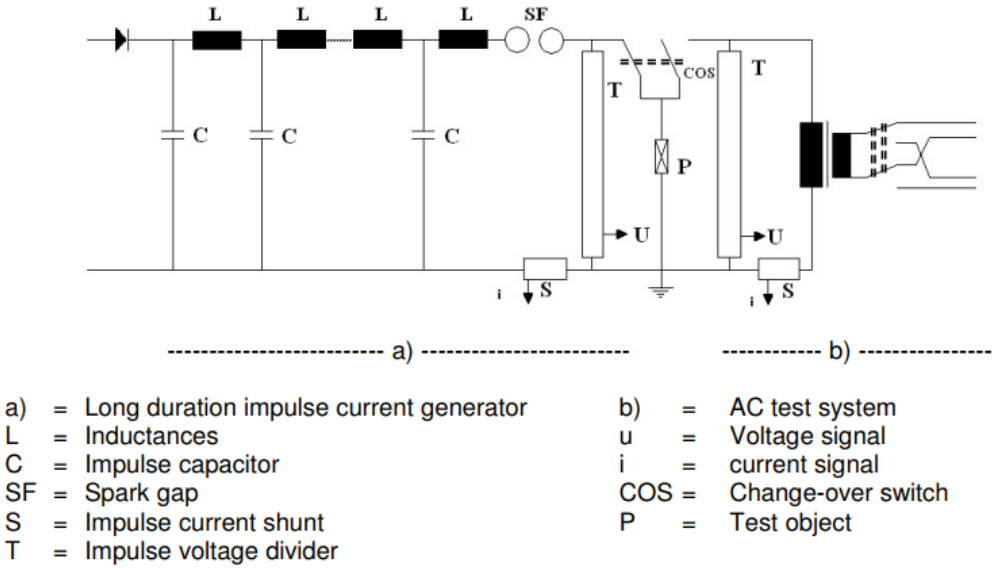


Figura 2.12: *Circuito GIC para realizar ensayos de impulsos en condiciones de servicio. Fuente: Impulse current test systems Type SSGA Haefely [1].*

SECCIÓN 2.3

Pruebas realizables con GIC Haefely

Para determinar de forma empírica los efectos de las altas corrientes en ciertos elementos se hizo necesario desarrollar pruebas y equipos que permitieran realizarlas. Dentro de las evaluaciones que se pueden llevar a cabo con distintos tipos de GIC según [1] se tiene:

- Prueba de tensión residual
- Prueba de alta corriente
- Prueba operación en servicio
- Prueba impulso de frente rápido
- Prueba tensión residual para impulso tipo rayo
- Prueba de impulso de corriente de larga duración
- Prueba en servicio ante impulso tipo rayo
- Prueba en servicio para corriente de maniobra

Los ensayos que se pueden realizar a los descargadores, según la recomendacion de la norma IEC 60099-4 [**?**], se muestran resumidos en la Tabla 2.1 [1].

Impulso de corriente en elementos individuales	Forma de onda $[\mu s]$	Corriente máxima o energía	Tensión residual $[kV]$
Impulso de alta corriente $4/10\ [\mu s]$	$4\ [\mu s] \pm 0,5[\mu s]$ $10\ [\mu s] \pm 1[\mu s]$	$100\ [kA]$	$40\ [kV]$
Impulso de corriente tipo rayo $8/20\ [\mu s]$	$8\ [\mu s] \pm 1[\mu s]$ $20\ [\mu s] \pm 2[\mu s]$	$40\ [kA]$	$50\ [kV]$
Impulso de corriente tipo maniobra $36/90\ [\mu s]$	$T_1 > 30\ [\mu s]$ $T_2\ approx.\ 2,5\ [\mu s] \cdot T_1$	$2\ [kA]$	$30\ [kV]$
Impulso de corriente rápida $1 < 20\ [\mu s]$	$1\ [\mu s] \pm 0,1[\mu s]$ $< 20\ [\mu s]$	$20\ [kA]$	$40\ [kV]$
Impulso de alta corriente rápida ($30/80\ [\mu s]$) para prueba en servicio	$30\ [\mu s] \pm 5\ [\mu s]$ $80\ [\mu s] \pm 10\ [\mu s]$	$40\ [kA]$	$45\ [kV]$
Prueba de descarga de línea	$2000\ [\mu s]$ línea con carga clase 1 y 2 $2400\ [\mu s]$ línea con carga clase 3 $2800\ [\mu s]$ línea con carga clase 4 $3200\ [\mu s]$ línea con carga clase 5	$\leq 65\ [kJ]$	$12\ [kV]$

Tabla 2.1: *Pruebas realizadas con generadores de corriente segun norma IEC 60099-4. Fuente: Impulse current test systems Type SSGA Haefely [1].*

Por su utilidad, facilidad de construcción y cantidad de equipos necesarios, se establece entonces que el GIC a fabricar deberá entregar un perfil de onda tipo $8/20\ [\mu s]$ por lo que sólo se analizará dicho modelo.

SECCIÓN 2.4
Metodología de Diseño

Para implementar el GIC se deben considerar los equipos disponibles y los que se deben construir, como el circuito de descarga debe estar calibrado para producir un impulso que cumpla con la norma establecida, se debe intentar que los elementos de éste sean variables para poder realizar un ajuste fino de sus propiedades.

Debido a la limitación y complejidad constructiva de los condensadores, estos no pueden ser calibrados de forma fina, solo se puede agregar o quitar condensadores del banco, por lo que éste es un punto de partida a considerar en la elaboración del diseño [9].

Conociendo las limitaciones del banco (capacitancia y tensión de carga) se procede por lo tanto al cálculo de parámetros del circuito para lograr el impulso requerido.

Finalmente se deben diseñar modelos de resistencia e inductancia variables para realizar el ajuste de parámetros en el lugar [10].

2.4.1
Cálculo de parámetros del GIC

Antiguamente se utilizaban métodos gráficos para determinar el valor de los componentes, en el caso del impulso $8/20$ y variaciones del mismo circuito, se puede utilizar el método de F. Imo y A. Schwab [11] [12].

En la referencia [9], se obtiene la solución de la ecuación diferencial de segundo orden para el circuito $8/20$ $[\mu s]$ utilizando métodos de análisis numérico, en el caso de la publicación utilizando Runge Kutta-Nystrom. En la referencia [13] del año 2002, también optan por un programa que maximice el rendimiento del GIC y que determine los parámetros de él, haciendo hincapié en que para el perfil $8/20$ las ondas deben ser subamortiguada o sobreamortiguada, prefiriendo la primera ya que alcanza corrientes mayores con la misma tensión de carga.

Por lo tanto, entre los métodos para lograr los valores de ajuste del GIC, se tiene que el desarrollo de método numérico se vuelve engorroso ya que se debe escribir un código que permita la resolución del problema, sin embargo, al utilizar el método gráfico éste da buenos resultados sin realizar ningún desarrollo de software.

2.4.2 Inductancia variable

La referencia [10] establece que es provechoso construir un inductor variable para el ajuste de parámetros cada vez que se realice un ensayo. Esto es posible mediante el uso de un cilindro de material conductor no ferromagnético (aluminio en el caso de la publicación) al interior de la bobina, el que confine las líneas de fuerza a un espacio variable dependiendo si el cilindro se introduce completamente o hasta algún punto intermedio de la bobina. En la Figura 2.13 se muestra un diagrama de la configuración de la bobina variable.

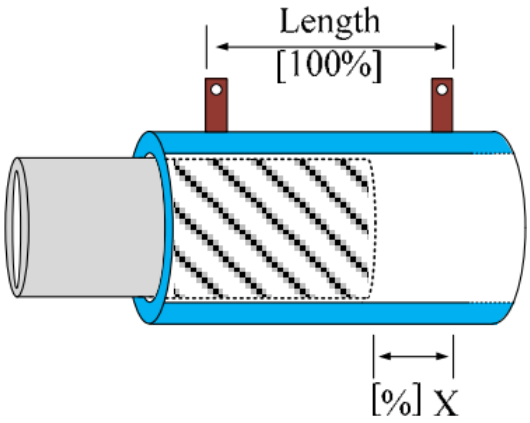


Figura 2.13: *Diagrama inductor variable. Fuente: Referencia [10].*

CAPÍTULO 3

MARCO TEÓRICO

SECCIÓN 3.1

Circuito equivalente y etapas del generador de impulsos $8/20\ [\mu s]$

El principio de funcionamiento del generador de impulsos de tensión y corriente consiste básicamente en un conjunto de condensadores que se cargan a una tensión continua deseada y luego se descargan sincronizadamente sobre una probeta.

La descarga presenta una cantidad de energía considerable en un tiempo muy corto sobre el objeto en estudio, suficiente para evaluar su comportamiento ante dicho estímulo.

Basado en [9] y [13] el circuito equivalente simplificado del generador de impulsos es el que se muestra en la Figura 3.1.

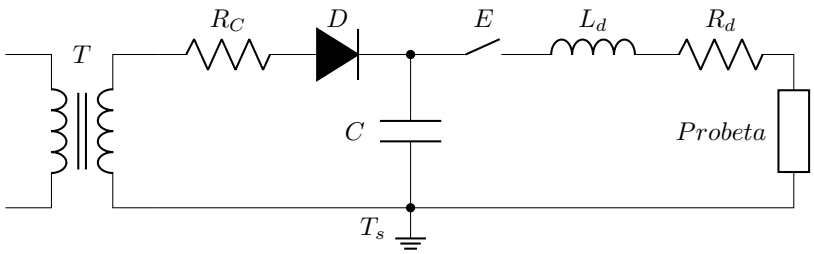


Figura 3.1: *Circuito simplificado del GIC, con T: Transfomador alimentador, R_c: Resistencia reguladora de carga, D: Diodos rectificadores, C: Banco de condensadores, R_d: Resistencia reguladora de descarga, L_d: Inductancia reguladora de descarga, E: Explosores y T_s: Tierra de servicio. Fuente: Elaboración propia.*

En base a este modelo, se estudiarán en forma separada las partes que componen el generador, en etapa de carga y etapa de descarga.

3.1.1 Etapa de carga

Es la encargada de alimentar el generador de impulsos con la energía necesaria para producir el impulso, específicamente, suministra corriente con alta tensión a los condensadores.

Dentro de los componentes principales se tienen:

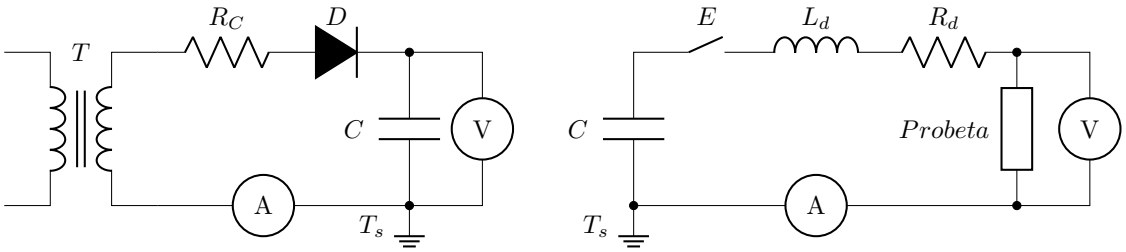
Transformador elevador de tensión (T): Aumenta la tensión lo suficiente para que al rectificarla los condensadores se carguen al nivel deseado.

Arreglo de diodos rectificadores (D): Rectifican la forma de onda para volverla polarizada (que sea solo positiva o negativa) y cargar los condensadores. Cabe destacar que la tensión inversa que debe soportar el arreglo de diodos es del doble de la tensión máxima del transformador elevador.

Resistencia reguladora de carga (R_c): Limita la intensidad de carga (corriente máxima) del banco de condensadores.

Banco de condensadores de alta tensión (C): Acumulan la energía que será liberada en la probeta a ensayar.

Medidor de carga (A): Muestra con que intensidad de corriente se carga el banco de condensadores.



***(a)** Etapa de Carga* *(**b**) Etapa de Descarga*

***Figura 3.2:** Circuitos simplificados de la Etapa de Carga y Descarga del GIC donde R_c: Resistencia reguladora de carga, T: Transformador elevador, D: Arreglo de diodos, C: Banco de condensadores, R_d: Resistencia reguladora de descarga, L_d: Inductancia reguladora de descarga, E: Explosores, A: Medidor de corriente y V: Medidor de tensión de descarga. Fuente: Elaboración propia.*

3.1.2 Etapa de descarga

Es la encargada de conducir la energía hasta la probeta, dando forma a la onda para el ensayo. Dentro de los componentes principales de esta etapa se encuentran:

Inductancia reguladora de descarga (L_d): Atenúa la variación de la onda de corriente de descarga a la que se enfrenta la probeta interactuando con los componentes del circuito para lograr la forma de onda requerida.

Resistencia reguladora de descarga(R_d): Atenúa la magnitud de la onda de tensión de la probeta y logra la forma de onda requerida.

Medidor de descarga(A): Muestran las magnitudes del impulso aplicado a la probeta.

Explosores (E): Son los encargados de iniciar la descarga, el interruptor del circuito.

Probeta por examinar: Es el objeto que se encuentra en evaluación y se expondrá al impulso de corriente.

Si se desea que el generador de impulsos sea de Alta Tensión, los condensadores se conectan de forma tal que cuando se realice la carga éstos se alimenten en paralelo y cuando se descarguen queden en serie sumando sus tensiones, en cambio si se desea que el generador de impulsos sea de Alta Corriente, los condensadores del circuito se cargarán y descargarán en paralelo. Sin embargo quien determinará en mayor medida si el generador de impulsos generará Alta Tensión o Alta Corriente es la naturaleza de la probeta a evaluar, ya que si esta tiene una alta impedancia, se producirá un impulso de Alta Tensión, pero si ésta presenta una baja impedancia, lo más probable será que se produzca un impulsos de Alta Corriente.

La probeta que se estudiará en este trabajo consiste en un descargador de sobretensión que presenta una baja resistencia al exponerse a impulsos de alta corriente los que se produzcan a una tensión suficientemente elevada.

SECCIÓN 3.2

Comportamiento dinámico del circuito

Los procesos de carga y descarga del circuito no son inmediatos ni estacionarios, más bien, son situaciones donde las magnitudes de tensión y corriente dentro del mismo van cambiando a lo largo del tiempo, por esta razón se denominan estados transitorios.

Para analizar los distintos estados del circuito, es necesario recurrir al análisis dinámico mediante ecuaciones diferenciales.

Entonces para cada parte del circuito se tiene:

3.2.1 Etapa de carga

La carga del banco de condensadores se puede realizar tanto con una fuente de tensión continua así como también con una fuente de tensión alterna rectificada, en este caso, utilizando un rectificador de media onda.

Caso Fuente Continua

Si la carga se realiza con una fuente de alta tensión continua, el circuito resultante se muestra en la Figura 3.3:

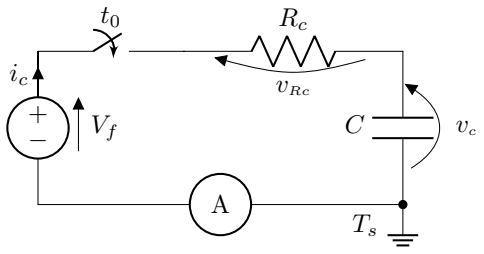


Figura 3.3: *Circuito de la etapa de carga del GIC utilizando una fuente de tensión continua externa y una resistencia limitadora. Fuente: Elaboración propia.*

Si se calcula la carga del condensador según la Figura 3.3 con $t_0 = 0\ [s]$, se tiene que:

$$V_f = v_{Rc}(t) + v_C(t) \qquad ; \qquad para\ t > 0\ [s] \tag{3.1}$$

$$V_f = i_c(t) \cdot R_c + \frac{1}{C} \int_0^t i_c(t)dt \tag{3.2}$$

Despejando la corriente se tiene que:

$$i_c(t) = I_0 \cdot e^{-\frac{t}{R_c \cdot C}} \quad [A] \tag{3.3}$$

Donde:

$$I_0 = \frac{V_f}{R_c} \tag{3.4}$$

Y la tensión queda:

$$v_C(t) = V_f \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{R_c \cdot C}}\right) \quad [V] \tag{3.5}$$

La onda de carga se muestra en la Figura 3.4.

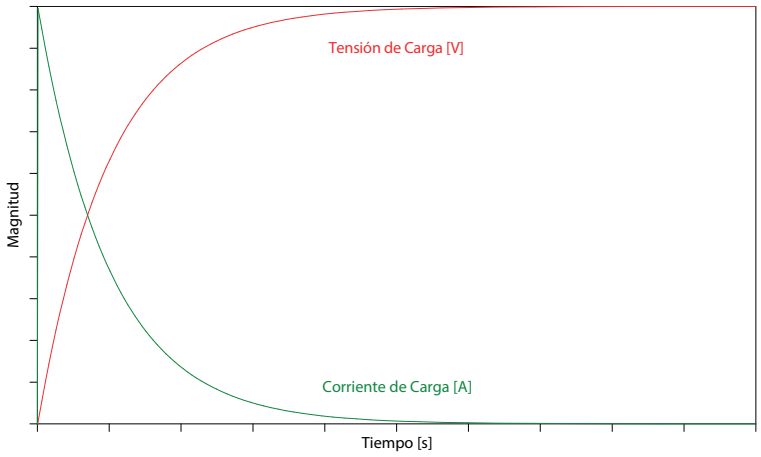


Figura 3.4: *Curva característica de la carga de un condensador mediante una fuente de corriente continua limitada por una resistencia. Fuente: Elaboración propia a partir de simulación en ATP.*

Se asume que el banco de condensadores se encuentra cargado a $v_C(t) \approx V_f$ cuando ha transcurrido un tiempo igual a $t = 5\tau$, con:

$$\tau = R_c \cdot C \quad [s] \tag{3.6}$$

Caso Rectificador Media Onda

En el caso de realizar una carga con un transformador y un rectificador de media onda, observado en la Figura 3.3, al ser una señal pulsante la que alimenta los condensadores, se tiene que la carga de los mismos se irá tomando pausas para realizarse, por lo que 5τ ya no será un tiempo de carga aceptable y deberá comprobarse mediante la medición directa de la tensión o corriente de carga cuando el banco de condensadores esté cargado a un nivel óptimo.

La carga del banco de condensadores queda como se muestra en la Figura 3.5.

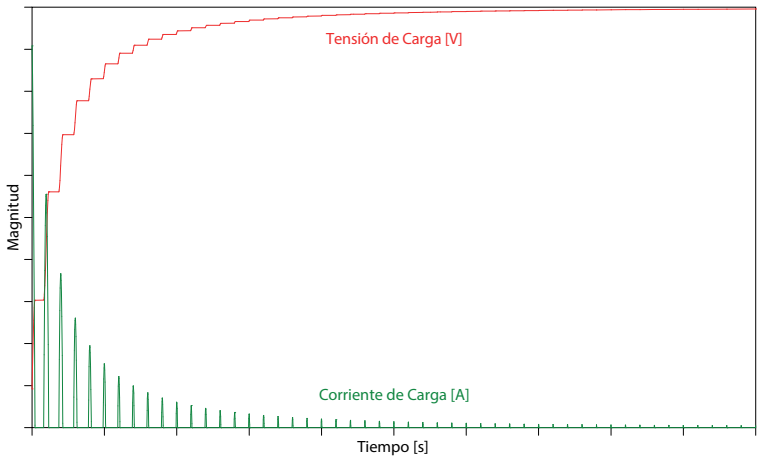


Figura 3.5: *Forma de onda de la carga del banco de condensadores mediante un rectidicador de media onda. Fuente: Elaboración propia a partir de simulación en ATP.*

Se observa que la carga en el caso del rectificador de media onda se da por pulsos, por lo que queda tiempo muerto entre ellos, así que se deberá considerar una espera mayor que en caso de la fuente de corriente continua.

En el proyecto de memoria se medirá la tensión directamente, por lo que el tiempo de espera variará dependiendo la tensión de carga que se utilice.

3.2.2 Etapa de descarga

El explosor o espinterómetro utilizado consiste en dos esferas de material conductor, que se ajustan a una distancia dada, utilizando entre ellas algún fluido aislante, en este caso aire. Cuando el banco de condensadores se encuentra cargado, se produce una diferencia de potencial eléctrico (Tensión) entre las esferas. Si esta diferencia energética sobrepasa la rigidez dieléctrica del aire, éste se vuelve conductor y se cierra el circuito.

Como en el proceso de descarga, el explosor se comporta como un conductor y asumiendo que la probeta en estudio tiene características lineales, se tiene que para conocer la descarga del banco de condensadores, se debe analizar el circuito de la Figura 3.6 considerando $t_0 = 0\ [s]$.

Por Ley de voltaje de Kirchhoff se tiene que:

$$v_C(t) = v_{Rd}(t) + v_{Ld}(t) + v_{probeta}(t) \quad [V] \qquad ; \qquad para\ t > 0\ [s] \tag{3.7}$$

Si el banco de condensadores se carga a una tensión $v_C(0) = V_0$ y se suman las características de la probeta a los parámetros del circuito, se tiene que la relación entre tensiones será:

$$V_0 = R_t \cdot i_d(t) + L_t \cdot \frac{di_d(t)}{dt} + \frac{1}{C_t} \cdot \int_0^t i_d(t)t \tag{3.8}$$

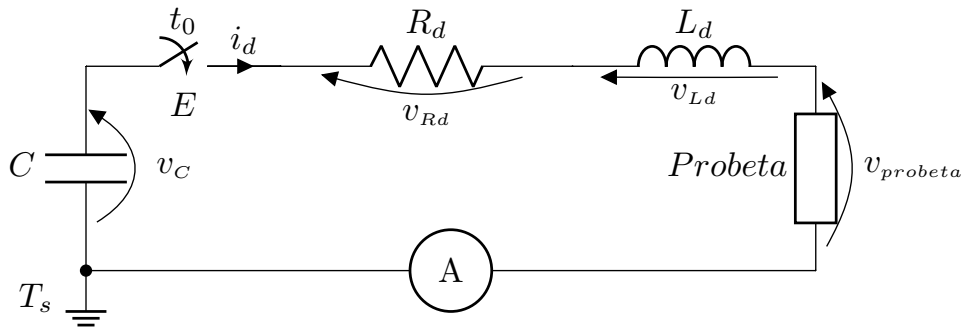


Figura 3.6: *Circuito equivalente de la etapa de descarga al momento producirse el impulso. Fuente: Elaboración propia.*

Donde:

$$R_t = R_d + R_{probeta} \quad , \quad L_t = L_d + L_{probeta} \quad , \quad C_t = \frac{C \cdot C_{probeta}}{C + C_{probeta}} \tag{3.9}$$

Según el desarrollo de la Ecuación 3.8 realizado en Anexo A se tiene que la solución de ecuación es de la forma:

$$i_d(t) = A_1 e^{s_1 t} + A_2 e^{s_2 t} \tag{3.10}$$

Con:

$$s_{1,2} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} \tag{3.11}$$

Donde:

$$\alpha = \frac{R_t}{2L_t} \quad ; \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_t C_t}} \quad ; \quad \omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} \tag{3.12}$$

Por lo que se obtienen tres soluciones posibles dependendiendo de los valores asociados a los elementos:

$$\alpha > \omega_0 \quad , \quad \alpha < \omega_0 \quad y \quad \alpha = \omega_0 \tag{3.13}$$

Siendo α el coeficiente de amortiguamiento expotencial, representa lo rápido que decae la respuesta natural a su valor final permanente, ω_0 como frecuencia resonante del circuito, es decir la frecuencia a la que oscilará la corriente del circuito en caso de que α sea cero y ω_d como frecuencia resonante amortiguada, es la frecuencia a que que oscilará la corriente del circuito cuando α sea distinto de cero.

Los análisis para los distintos casos de solución se listan a continuación.

Caso Sobre-Amortiguado

Para el caso en que $\alpha > \omega_0$, ω_d es imaginario y se dice que la solución es sobre-amortiguada, quedando:

$$i_d(t) = \frac{V_0}{Z}\left[e^{\frac{Z-R_t}{2L_t}t} - e^{\frac{-(Z+R_t)}{2L_t}t}\right] \quad [A] \tag{3.14}$$

Donde:

$$Z = \sqrt{R_t^2 - \frac{4L_t}{C_t}} \quad [\Omega] \tag{3.15}$$

Por lo tanto, el tiempo en el que se alcanza la corriente máxima para este caso viene determinado por:

$$T_{max} = \frac{L_t}{Z} ln\left(\frac{R_t + Z}{R_t - Z}\right) \quad [s] \tag{3.16}$$

Y la corriente máxima alcanzada en este punto se determina mediante:

$$I_{max} = \frac{V_0}{Z}\left(e^{\frac{Z-R_t}{2L_t}T_{max}} - e^{\frac{-(Z+R_t)}{2L_t}T_{max}}\right) \quad [A] \tag{3.17}$$

Caso Sub-Amortiguado

Para el caso en que $\alpha < \omega_0$, ω_d es real y se dice que solución es sub-amortiguada, quedando:

$$i_d(t) = \frac{V_0}{Y} e^{-\frac{R_t}{2L_t}t} \operatorname{sen}\left(\frac{Y}{L_t}t\right) \quad [A] \tag{3.18}$$

Donde:

$$Y = \sqrt{\frac{L_t}{C_t} - \frac{R_t^2}{4}} \quad [\Omega] \tag{3.19}$$

Por lo tanto, el tiempo en el que se alcanza la corriente máxima para este caso viene determinado por:

$$T_{max} = \frac{L_t}{Y} \arctan\left(\frac{2Y}{R_t}\right) \quad [s] \tag{3.20}$$

Entonces la corriente máxima será:

$$I_{max} = \frac{V_0}{Y} e^{-\frac{R_t}{2L_t}T_{max}} \operatorname{sen}\left(\frac{Y}{L_t}T_{max}\right) \quad [A] \tag{3.21}$$

Caso Críticamente Amortiguado

Para el caso en que $\alpha = \omega_0$, $\omega_d = 0$ y se dice que la solución es críticamente amortiguada.

$$i_d(t) = \frac{V_0}{L_t} t e^{-\frac{R_t}{2L_t}t} \quad [A] \tag{3.22}$$

Por lo tanto, el tiempo en el que se alcanza la corriente máxima para este caso viene determinado por:

$$T_{max} = \frac{2L_t}{R_t} \quad [s] \tag{3.23}$$

Entonces la corriente máxima es:

$$I_{max} = \frac{2V_0}{eR_t} \quad [A] \tag{3.24}$$

Nótese que $\alpha > \omega_0$ es análogo a $R_t^2 > \frac{4L_t}{C_t}$.

Para el caso de que la probeta tenga características no lineales, se realizará el cálculo de la solución mediante el Software ATP.

Analizando el circuito y las ecuaciones de descarga, se destaca que la magnitud y los tiempos del impulso dependen de la tensión de carga y de los componentes de dicha rama, por lo tanto, se puede variar el tamaño de la resistencia o inductancia haciendo que el impulso sea subamortiguado o sobreamortiguado.

SECCIÓN 3.3

Forma de onda normada

La norma que regula la forma de onda en ensayos de impulsos de Alta Corriente es la IEC 62475 [14], la cual indica que un impulso de Alta Corriente Exponencial debe tener las características mostradas en la Figura 3.7.

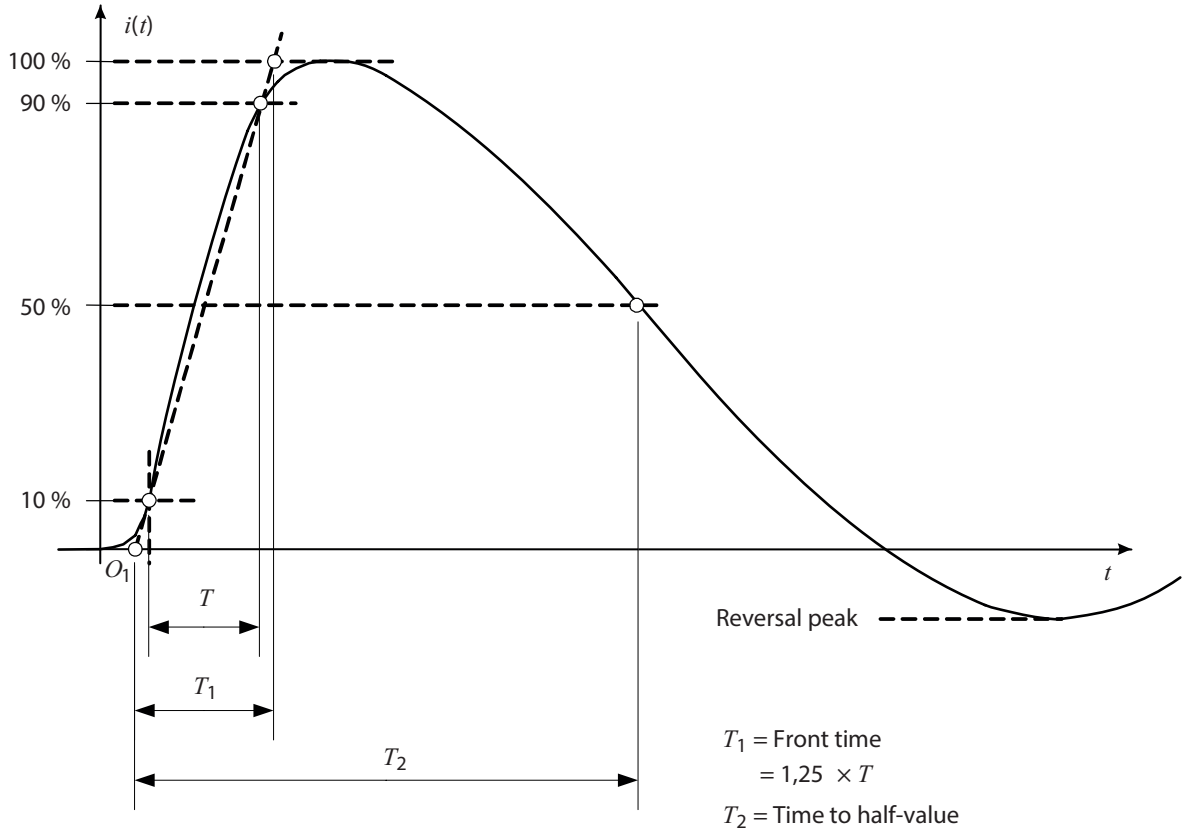


Figura 3.7: *Forma de onda de un impulso de alta corriente normado incluyendo las especificaciones correspondientes para su caracterización. Fuente: Elaboración propia a partir de [14], Figure 18.*

Las distancias corresponden a los tiempos de caracterización de la onda donde:

$\boldsymbol{O_1}$	: Origen virtual, punto donde la proyección de la recta que une los puntos del $10\,\%$ y el $90\,\%$ de la onda de impulso cruzaría por $i_d = 0[A]$.
$\boldsymbol{T}$	: Tiempo que toma la onda en llegar desde el $10\,\%$ al $90\,\%$ de su valor total antes de llegar a su valor máximo.
$\boldsymbol{T_1}$	: Tiempo de frente, es un tiempo virtual que corresponde a $1,25 \cdot T$.
$\boldsymbol{T_2}$	: Tiempo de cola, el tiempo que transcurre desde el origen virtual O_1 hasta la mitad de la tensión de prueba.
$\boldsymbol{Reversal\ peak}$	: Punta de polaridad negativa, es la máxima corriente inversa que alcanza la onda en su carrera de bajada.

Cabe mencionar también los conceptos de:

Carga de un impulso de corriente: Integral del valor absoluto de la corriente en el tiempo.

$$Q = \int_0^\infty |i_d(t)|dt \tag{3.25}$$

Por razones prácticas, el límite superior de la integral debe ser escogido de forma que la contribución residual sea menor a un valor especificado por el comité técnico relevante.

El valor absoluto de la corriente es aplicable en ciertos casos donde se trate de puntos de arco con una caída de tensión significativamente constante.

Integral de Joule: Integral de la corriente del impulso al cuadrado en el tiempo.

$$I^2t = \int_0^\infty i_d^2(t)dt \tag{3.26}$$

Por razones prácticas, el límite superior de la integral debe ser escogido de forma que su contribución residual sea menor que un valor especificado dado por el comité técnico relevante.

Según [13], si se toma el caso críticamente amortiguado y se despeja una expresión para el tiempo de frente y de cola se tiene que:

$$T_1 = 1,43\frac{L_t}{R_t} \tag{3.27}$$

$$T_2 = 5,42\frac{L_t}{R_t} \tag{3.28}$$

Es decir, la relación entre los tiempos de frente y de cola para el tipo de impulso críticamente amortiguado no depende de C_t, ni de L_t y tampoco de R_t.

$$\frac{T_1}{T_2} = 0,26 \tag{3.29}$$

SECCIÓN 3.4

Tolerancias de norma en pruebas de alta corriente

Entre las pruebas de alta corriente para impulsos de tipo exponencial normadas según [14] se establece lo siguiente:

Tipo de impulso	Tiempo de frente $T_1[\mu s]$	Tiempo de cola $T_2[\mu s]$	Tolerancia de tiempo
$1/\leq 20$	1	≤ 20	$T_1 \pm 10\,\%$ $T_2 \leq 20[\mu s]$
$8/20$	8	20	$T_1 \pm 20\,\%$ $T_2 \pm 20\,\%$
$10/350$	10	350	$T_1 \pm 30\,\%$ $T_2 \pm 20\,\%$

Tabla 3.1: *Valores de tolerancia de tiempo para las pruebas de corriente de impulso tipo exponencial según [14]. Fuente: [14], Tabla 10.*

Si se considera el $20\,\%$ de tolerancia para el impulso $8/20$ se tiene que los límites admisibles son:

Tipo de impulso	T_1/T_2
$1/\leq 20$	$\geq 0,045$
$8/20$	$0,27 - 0,6$
$10/350$	$0,017 - 0,046$

Tabla 3.2: *Valores límites de relación de tiempo para los distintos tipos de impulso exponencial según las tolerancias de 3.1 [14]. Fuente: Elaboración propia.*

Por lo tanto, el tipo de impulso de $1/\leq 20$ se puede realizar según norma con un circuito críticamente amortiguado, en cambio los de tipo $8/20$ y $10/350$ no pueden ser realizados con dicho ajuste según norma.

Como el impulso se hace posible sólo con una onda sub-amortiguada, se concluye con los datos aportados por la norma, que los parámetros del circuito se ajustarán para cumplir con las exigencias de tiempo que ésta propone y la tensión se ajustará para obtener la magnitud de corriente deseada.

En el caso de las tolerancias según la norma que no están relacionadas al tiempo si no mas bien a magnitudes, se tiene que:

Carga: $0\,\%$, el límite superior se establece por el comité técnico relevante, como se mencionó anteriormente.

Integral de Joule: $0\,\%$, el límite superior se establece por el comité técnico relevante.

Valor corriente de prueba: $\pm 10\,\%$ del valor de amplitud de la onda.

Determinar la tolerancia de la máxima corriente inversa no es tan sencillo, ya que, por la naturaleza del circuito, los valores de ésta pueden cambiar. La Figura 3.8 muestra una ilustración que contiene dichos niveles.

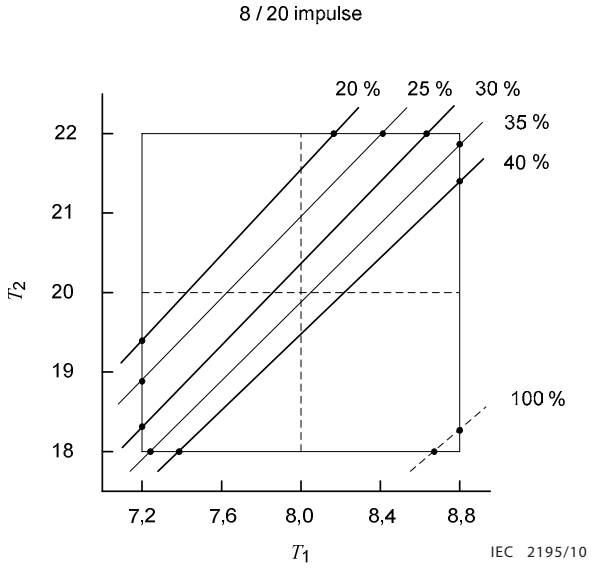


Figura 3.8: *Valores de la punta de polaridad inversa, respecto del valor de prueba, para una forma de onda* $8/20$*, estas tolerancias son aplicables también a los perfiles de curva curvas de* $1/2.5$ *y* $4/10$*. Fuente: [14], Figura E.2.*

SECCIÓN 3.5

Mediciones de las pruebas de alta corriente

Una de las partes fundamentales de los equipos para realizar ensayos es la medición de las variables a estudiar, para el impulso de corriente se debe tener en consideración lo siguiente:

3.5.1 Medición corriente

La medición de corriente se realiza mediante la instalación de una resistencia en serie con la probeta a medir como muestra la Figura 3.9, dentro de los requisitos necesarios según [11] para ésta se encuentran:

- Soportar, sin recalentarse ni variar R_{sh}, las corrientes de impulso aplicadas.
- Generar una tensión no peligrosa ($< 600\ [V]$).
- Insensible a interferencias electromagnéticas.
- Ancho de banda compatible con el impulso a medir.
- No generar oscilaciones diferentes a las del impulso a medir.

Dentro de los requerimientos especificados por [14] se encuentran que:

- Que la incertidumbre del valor máximo del impulso de corriente μ_{mes} no sea mayor al $3\,\%$ con confiabilidad del $95\,\%$.
- Que la incertidumbre de las mediciones de tiempo sean no sea mayor al $10\,\%$ con una confiabilidad del $95\,\%$.

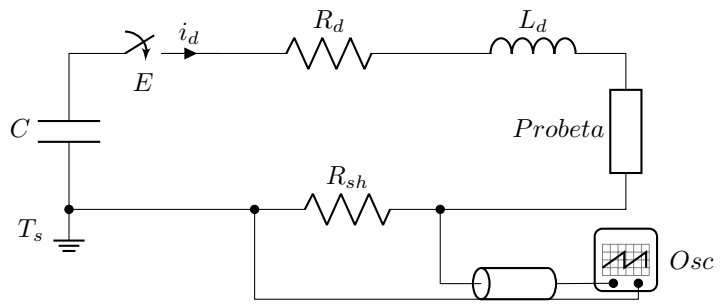


Figura 3.9: *Circuito de conexión de resistencia shunt en la etapa de descarga. Fuente: Elaboración propia.*

3.5.2 Medición tensión

La medición de tensión se puede realizar de forma directa e indirecta.

En el método directo se encuentra el uso de espinterómetro esférico (sensible a la amplitud de la señal) y el de voltímetro electrostático (que se basa en un sistema de deformación mecánica).

En el caso del método indirecto, se emplean miliamperímetros, divisores resistivos, divisores capacitivos y divisores mixtos.

Según [15] los métodos de medición de tensión se muestran en la Figura 3.10.

Table 3.1 *(Note '+' means 'in combination with')*

Type of voltage / *Quantity*	*d.c. voltages*	*a.c. voltages*	*Impulse voltages*
Mean value	3.3 3.4 3.6.4	Not Applicable	Not Applicable
r.m.s. value	3.2 3.6.4 + 3.2	3.2 3.6.4 + 3.2	Not Applicable
Crest values	3.1 3.4 (special des.) 3.3 (divider) + ripple by CRO or 3.7 (see also 3.6.4)	3.1 3.4 (special des.) 3.5.1 3.5.2 + 3.5.3 (see also 3.6.4)	3.1 3.6.4 (special) + 3.5.3 or 3.7
Voltage shape	3.4 (special des.) or 3.6.4 + CRO or 3.7	3.4 (special des.) or 3.6.4 + CRO or 3.7	3.6.4 (special) + CRO or 3.7

Figura 3.10: *Tabla que indica la recomendación de medición de los diferentes tipos alta tensión. Donde* 3.1 *corresponde a mediciones mediante explosores,* $3.6.4$ *a divisores de Tensión y* $3.5.3$*,* 3.7 *y* CRO *a registradores de valores lo que se pueden remplazar actualmente por la medicion de un osciloscopio. Fuente: [15], Table 3.1.*

Por lo tanto, se tiene que para medir la magnitud y la forma de onda de tensión del impulso se puede realizar mediante la utilización de divisores de tensión acompañados por registradores de medición (osciloscopios) y también se puede hacer uso de explosores/chisperos en el caso de medir solo la magnitud.

Los explosores pueden ser del tipo esférico o de barras, sin embargo, los últimos presentan demasiada variación con la humedad y una gran dispersión al producir las descargas disruptivas [15].

Para la medición de tensión de impulso se utiliza generalmente un divisor de tensión capacitivo ya que según [15] y [16] éste tiene buen comportamiento en su respuesta ante altas frecuencias y posee gran confiabilidad en la proporcionalidad de medición.

En este caso solo se requiere medir la tensión de carga del banco de condensadores (tensión continua) para lo que se utilizará un divisor resistivo como se muestra en la Figura 3.11 y para la tensión residual del equipo en estudio se usará una punta de medición directa (Tektronix $P6015A$).

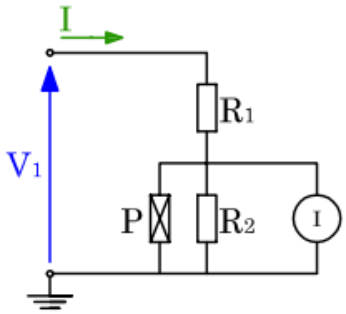


Figura 3.11: *Circuito del divisor resistivo utilizado para medir alta tensión continua, donde I representa el instrumento de medición. Fuente: Referencia [16], Figura* 10.28.

SECCIÓN 3.6

Energía disipada

Uno de los aspectos fundamentales a tener en cuenta al diseñar el GIC es la solicitación térmica a la que se someten los equipos utilizados directamente en el circuito de descarga.

En este caso, para realizar un cálculo con cierto factor de seguridad, se asume que la duración del impulso es tan corta que no se alcanza a producir intercambio de calor entre los componentes y el ambiente, por lo que se omite dicha parte, considerando que toda la energía que se convierte en calor solamente aumenta la temperatura de los equipos.

La expresión general que gobierna dicho proceso es la 3.30 [17].

$$\Delta T = \frac{\Delta E}{C_{esp} \cdot Masa} = \frac{\int_0^\infty P_{cal}(t)dt}{C_{esp} \cdot Masa} \tag{3.30}$$

3.6.1 Conductores

Para el caso de los conductores se tiene que la potencia disipada en ellos corresponde a la ecuación 3.31, la que se reemplaza en la expresión 3.30 para obtener el aumento de temperatura producto del impulso.

$$P_{cal}(t) = i^2_{cond}(t) \cdot R_{cond} \tag{3.31}$$

Se deben considerar los materiales con los que se fabrica cada sección para determinar la resistencia, la masa y el calor específico de cada uno y calcular si soportarán la solicitación de corriente.

Para el cálculo de la resistencia de cada sección se requiere el largo (l), la sección transversal (S) y la resistividad del material (ρ).

$$R_{cond} = \frac{l \cdot \rho}{S} \tag{3.32}$$

Finalmente el límite térmico se traduce en encontrar una sección mínima del conductor para garantizar que no se alcanzará la temperatura crítica al utilizar el equipo normalmente.

Considerando:

$$Masa = l \cdot S \cdot P_{esp} \tag{3.33}$$

Se tiene que la sección debe ser:

$$S > \sqrt{\frac{\rho \cdot \int_0^\infty i_d^2(t)dt}{P_{esp} \cdot C_{esp} \cdot \Delta T}} \tag{3.34}$$

3.6.2 Condensadores

Para determinar si los condensadores son capaces de soportar las exigencias de la descarga intempestiva de energía, se busca determinar la energía que se perderá en su calentamiento.

Dicho cálculo se basa en determinar la resistencia interna equivalente de cada capacitor, según el esquema mostrado en la Figura 3.12, mediante un ensayo de absorción utilizado para evaluar el estado de los aislantes [18].

Según se detalla en [19] se debe exponer el elemento en prueba a una tensión suficiente para poder medir la corriente que fluye por el aislador a los 10 minutos de comenzar el ensayo y medir las corrientes que circulan a 1, a 3, 16 y 10 minutos de comenzar el ensayo.

Para determinar la corriente de conducción se utiliza la siguiente ecuación:

$$I_g = \frac{I_1 \cdot I_{10} - I^2_{3,16}}{I_1 + I_{10} - 2I_{3,16}} \tag{3.35}$$

La resistencia equivalente entonces corresponde al cociente entre la tensión del ensayo y la corriente de conducción:

$$R_g = \frac{V_{ensayo}}{I_g} \tag{3.36}$$

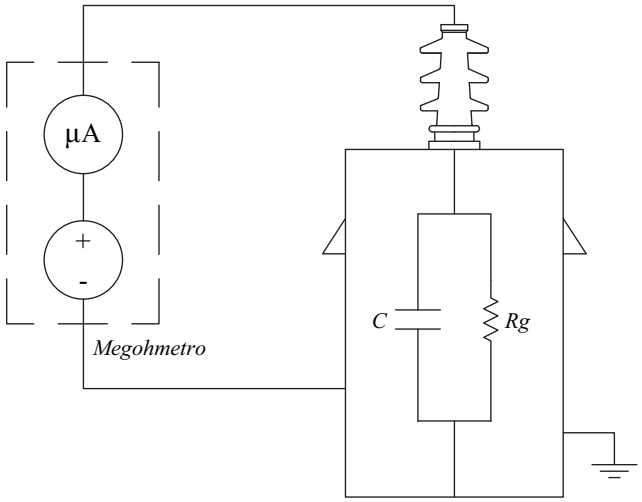


Figura 3.12: *Circuito equivalente del condensador utilizado para determinar la corriente de conducción. Fuente: Elaboración Propia.*

Según la placa de los capacitores, existe una energía máxima que no se debe sobrepasar, por lo cual se realiza solo el cálculo de energía disipada en forma de calor, la expresión utilizada es la 3.37

$$\Delta E = \int_0^\infty P_{cal}(t)dt = \int_0^\infty \frac{v_C(t)^2}{R_g}dt \tag{3.37}$$

Donde $v_C(t)$ corresponde a la tensión de descarga del condensador al momento del impulso, es decir:

$$v_C(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt} + R \cdot i(t) \tag{3.38}$$

SECCIÓN 3.7

Modelos de simulación descargadores sobretensión

La simulación del comportamiento no lineal de un descargador de sobretensión toma gran importancia al momento de determinar las magnitudes de los elementos del circuito necesarios para realizar un ensayo exitoso.

Existen modelos que consideran la respuesta dinámica del circuito y otros que son más sencillos dependiendo el cálculo que se realice.

Cabe destacar que los modelos desarrollados por IEEE y Pinceti-Giannettoni son utilizados para simular el comportamiento de tensión de los descargadores, ya que este permitirá dimensionarlo correctamente y conocer el efecto que tendrá en el sistema utilizado.

3.7.1 Modelo IEEE

El modelo propuesto por IEEE consiste en un conjunto de elementos de comportamiento lineal y el uso de dos resistores de comportamiento no lineal. La disposición se muestra en la Figura 3.13.

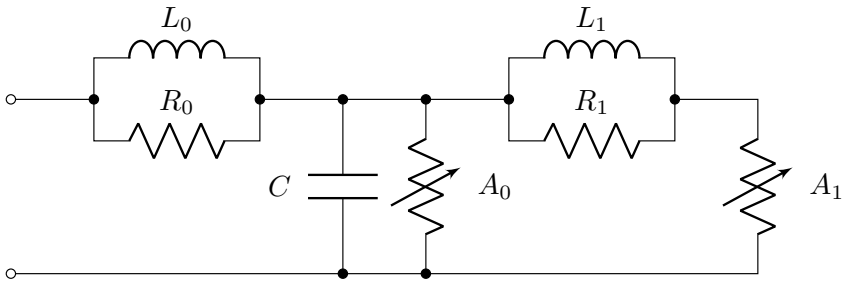


Figura 3.13: *Circuito del modelo propuesto por IEEE para simular un descargador de sobretensión MO. Fuente: Referencia [20].*

Los elementos lineales del modelo propuesto se calculan con las expresiones 3.39, 3.40, 3.41, 3.42 y 3.43, donde d es la altura del descargador en $[m]$ y n es el número de columnas en paralelo de óxido de metal del descargador.

$$C = \frac{100n}{d}\ [pF] \tag{3.39}$$

$$L_0 = \frac{0,2d}{n}\ [\mu H] \tag{3.40}$$

$$R_0 = \frac{100d}{n}\ [\Omega] \tag{3.41}$$

$$L_1 = \frac{15d}{n}\ [\mu H] \tag{3.42}$$

$$R_1 = \frac{65d}{n}\ [\Omega] \tag{3.43}$$

Para el caso de los elementos no lineales del circuito, se utiliza como guía la Figura 3.14, en la que se debe reemplazar el valor de tensión máxima cuando circulan $10\ [kA]$ por el descargador escalado por $1,6$ que es el factor de referencia del gráfico.

En caso de que la respuesta del circuito no coincida con los valores de descarga asociados a las corrientes de impulsos de maniobra, se debe modificar el valor de $V10$ tomado como referencia para lograr una buena simulación, luego, se ajusta L_1 para obtener el valor de tensión publicada para la onda $8/20$.

De la Figura 3.14 se extrae la información de la Tabla C.4 ubicada en el anexo C.

3.7.2 Modelo Pinceti-Giannettoni

En el modelo propuesto por Pinceti y Giannettoni es una simplificación del modelo IEEE en el cual se considera que la componente capacitiva del descargador despreciable y se toman en cuenta solo las

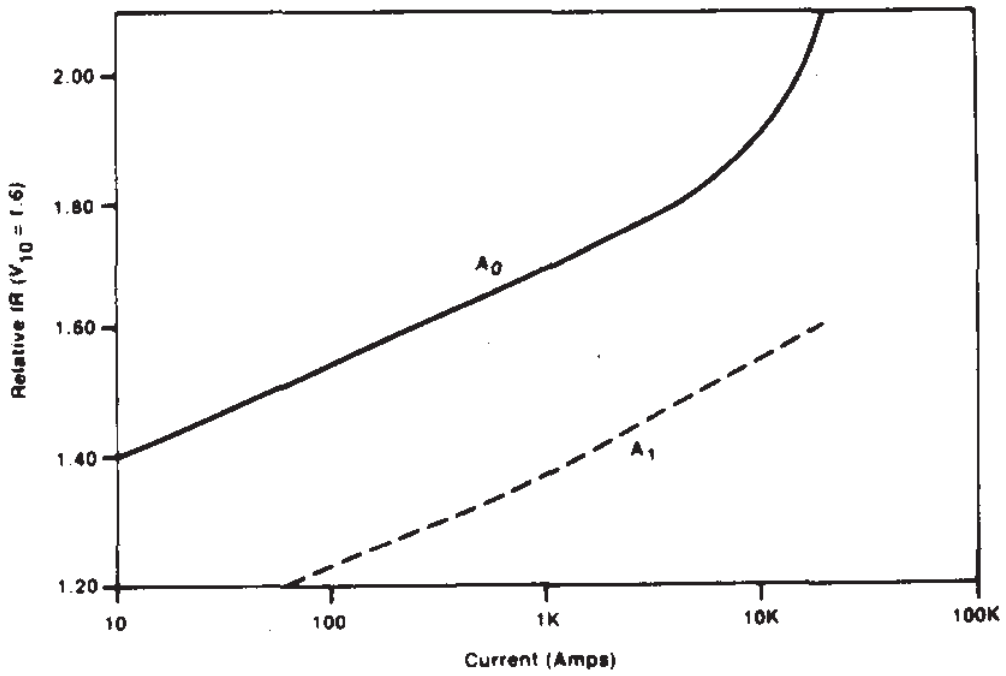


Figura 3.14: *Gráfico para la determinación de los parámetros A_0 y A_1 del modelo suerido por IEEE para la simulación del descargador de sobretensión. Fuente: Referencia [20] Figure 2.*

características eléctricas del elemento en estudio.

El circuito que permite modelar el descargador se muestra en la Figura 3.15.

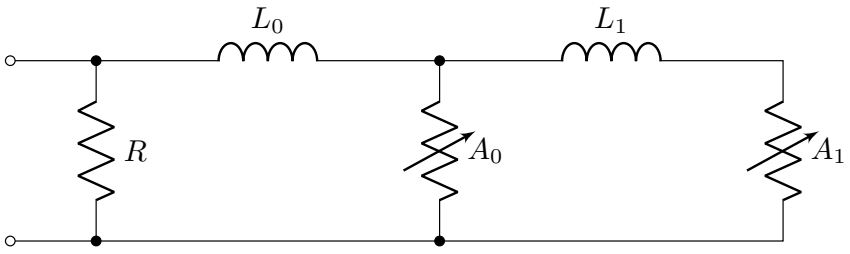


Figura 3.15: *Circuito del modelo propuesto por Pinceti y Giannettoni para simular un descargador de sobretensión MO. Fuente: Referencia [21].*

Éste modelo necesita los siguientes datos de placa:

V_n = Tensión nominal del descargador.
$V_{r8/20}$ = Tensión residual para una descarga tipo rayo de 10 $[kA]$.
$V_{r1/T2}$ = Tensión residual para una descarga de frente rápido de 10 $[kA]$.

Los parámetros lineales se determinan mediante las siguientes expresiones:

$$L_0 = \frac{1}{12} \cdot \frac{V_{r1/T2} - V_{r8/20}}{V_{r8/20}} \cdot V_n \ [\mu H] \tag{3.44}$$

$$L_1 = \frac{1}{4} \cdot \frac{V_{r1/T2} - V_{r8/20}}{V_{r8/20}} \cdot V_n \ [\mu H] \tag{3.45}$$

La resistencia del modelo toma un valor de $R = 1 \ [M\Omega]$ para eliminar problemas numéricos de cálculo.

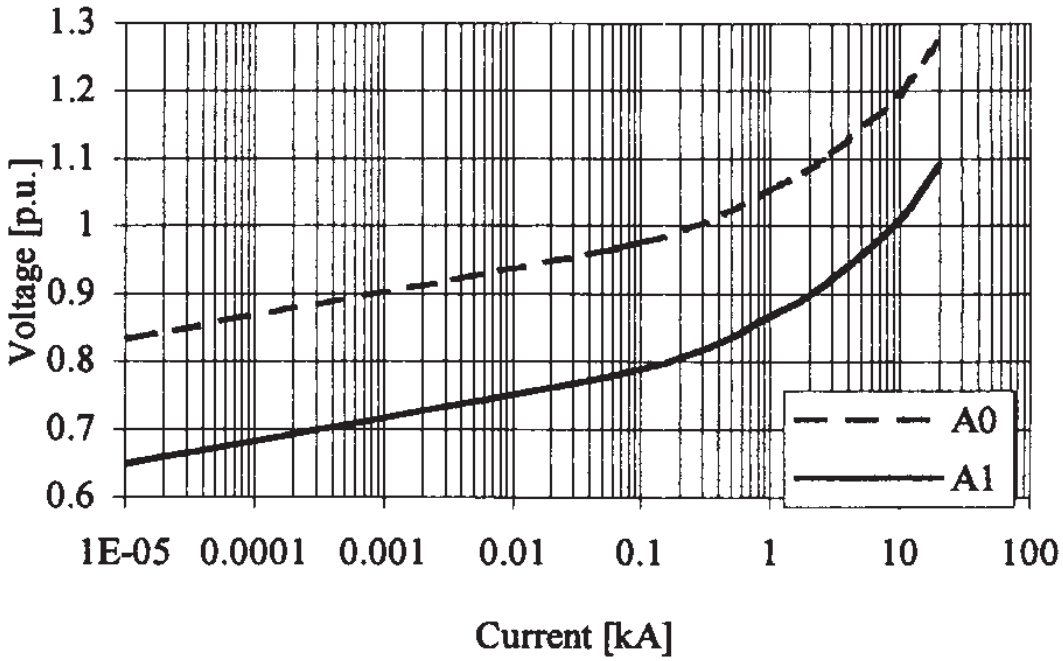


Figura 3.16: *Gráfico para la determinación de los parámetros A_0 y A_1 del modelo sugerido por Pinceti y Giannettoni para la simulación del descargador de sobretensión. Fuente: Referencia [21].*

Para determinar los valores no lineales del modelo, se utiliza la Figura 3.16, donde se grafican las proporcionalidades correspondientes considerando como tensión base la que, según el fabricante, ocurre cuando por el descargador circulan $10 \ [kA]$ con un perfil de onda $8/20 \ [\mu s]$.

Este modelo no requiere iteraciones de ajuste, sus valores cambian solamente cuando el descargador en estudio posee otros datos de placa.

De la Figura 3.16 se extraen los datos presentados en la Tabla C.8 del anexo C.

SECCIÓN 3.8

Diseño de bobina

Las bases para el diseño de bobinas con núcleo de aire se presenta en [22], donde la expresión que permite calcular la inductancia de la bobina es la siguiente:

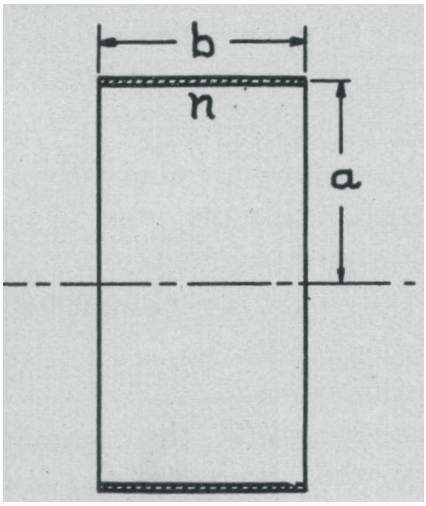


Figura 3.17: *Dimensiones asignadas a cada parte de la bobina para calcular su valor. Fuente: [22] Fig.* 2.

La expresión que permite calcular la inductancia de la bobina es la siguiente:

$$L = \frac{a^2 n^2}{9a + 10b}\ [\mu H] \tag{3.46}$$

Donde

- $\boldsymbol{a}$: Radio de bobina en pulgadas $[in]$.
- $\boldsymbol{n}$: Número de vueltas de la bobina.
- $\boldsymbol{b}$: Largo de la bobina en pulgadas $[in]$.

Wheeler menciona que si $b > 0{,}8a$ el error de la fórmula 3.46 esta en el rango del $1\,\%$.

De la referencia [10] se tiene que la inductancia de la bobina se puede variar introduciendo un recubrimiento metálico en su interior, disminuyendo la sección transversal disponible para las líneas de fuerza, lo que baja el valor del inductor.

Otra forma de variar una inductancia de aire es introducir un núcleo de material ferromagnético, el cual, facilita el paso de las lineas de fuerza por el interior de la bobina aumentando el valor de ésta.

CAPÍTULO 4

SIMULACIONES GIC

Existen distintos tipos de generadores de impulsos de corrientes, en la actualidad algunos se utilizan para la tronadura de rocas y hormigón mediante la vaporización de plasma, otros que simulan la caída de un rayo con una o mas descargas para evaluar el funcionamiento de los equipos en aviones y los que sirven para probar equipos de distribución tales como descargadores de sobre tensión, quienes son cruciales para la confiabilidad del sistema [1] [23].

Luego de revisar las publicaciones [9], [11] y [12] y [13] y dada la simplicidad y robustez del circuito, en este trabajo se construirá generador de corriente capaz de producir un perfil de onda $8/20$, el que se pondrá a prueba utilizando los descargadores de sobretensión disponibles en el laboratorio. Dicho circuito es el que se muestra en la Figura 3.1.

Como se desea construir un GIC que cumpla con las normas establecidas, se realizaron simulaciones para establecer lineamientos generales de la construcción del mismo.

Los resultados de simulaciones contenidos en éste capítulo fueron obtenidos utilizando el programa ATP.

En primer lugar se analizó el impacto de cada uno de los componentes del circuito para establecer como reacciona la onda ante los cambios de éstos, en este caso, se utilizó la onda críticamente amortiguada como punto de partida, para luego al variar las magnitudes obtener ondas sobre-amortiguadas y sub-amortiguadas.

Ya que algunos equipos a ensayar deben tener resistencia de 0 $[\Omega]$ o muy baja al momento de operar, se realizará una simulación sin probeta con forma de onda normada para conocer los parámetros de partida del análisis.

Finalmente se analizó el impacto que tiene agregar un descargador de sobretensión utilizando el modelo IEEE y el modelo de Pinceti-Giannettoni para su simulación.

SECCIÓN 4.1
Simulación sin probeta

La primera simulación se realizó reemplazando la probeta por un corto circuito, se tomaron las siguientes consideraciones:

- Por los equipos disponibles en el laboratorio se asume que el banco de condensadores equivalente tiene un valor de $C = 10$ $[\mu F]$.
- Por la característica de la onda normada se requiere que el valor del impulso máximo sea a en un tiempo $T_{max} = 10$ $[\mu s]$.
- Por el equipo de carga del laboratorio se establece una tensión de carga de $V_0 = 15$ $[kV]$.

Reemplazando los valores anteriormente dados en las ecuaciones 3.22, 3.23 y 3.24 se obtuvo que para una onda críticamente amortiguada los valores de los componentes del circuito serán:

$$R_d = 2\ [\Omega] \text{ y } L_d = 10\ [\mu H]$$

El primer conjunto de simulaciones se realizó variando la magnitud de R_d desde el valor de impulso crítico tomando un valor de $R_d = 1\ [\Omega]$ para el caso sub-amortiguado, y de $R_d = 3\ [\Omega]$ en el caso sobre-amortiguado, los resultados de las simulaciones se muestran en la Figura 4.1

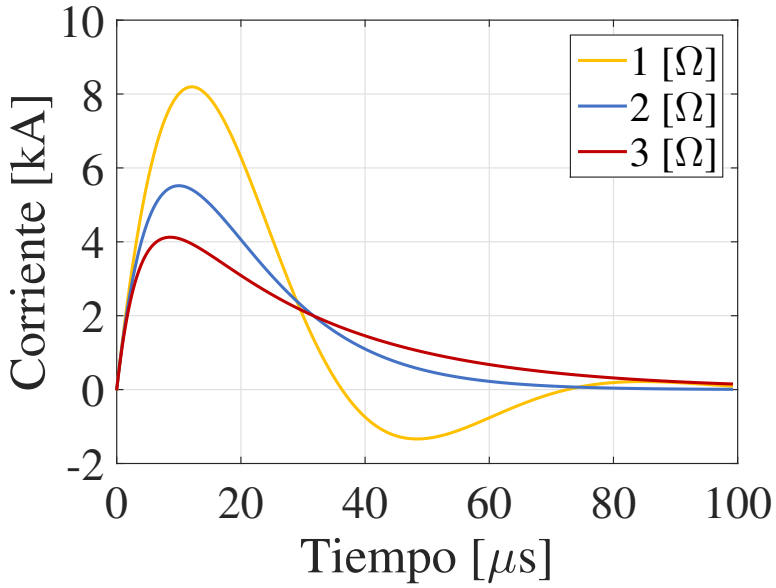


Figura 4.1: *Resultado de la simulación realizada para el caso critico estudiado y las variaciones de resistencia que se presentaron con $C = 10\ [\mu F]$ y $L_d = 10\ [\mu H]$. Fuente: Elaboración propia.*

Se aprecia que al disminuir el parámetro R_d, aumenta la corriente máxima que entrega el circuito, así como también aumenta el tiempo en el que se produce el máximo de dicha onda. Por su parte el tiempo de cola se ve muy poco afectado por la variación de resistencia.

El segundo conjunto de simulaciones se realizó variando la magnitud de L_d desde el valor de impulso crítico a $L_d = 5\ [\mu H]$ en el caso sobre-amortiguado y a $L_d = 15\ [\mu H]$ para el caso sub-amortiguado, los resultados se grafican en la Figura 4.2

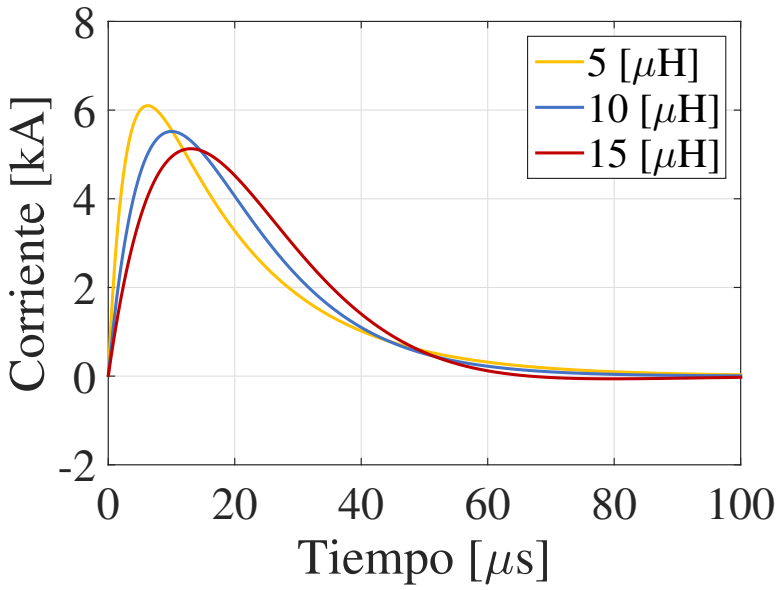


Figura 4.2: *Resultado de la simulación realizada para el caso critico estudiado y las variaciones de inductancia que se presentaron con $R_d = 2$ [Ω] y $C = 10$ [μF]. Fuente: Elaboración propia.*

Se aprecia que al disminuir el valor de inductancia, aumenta la magnitud de la corriente máxima y disminuye el tiempo en el que se alcanza dicho nivel de corriente. Por su parte el tiempo de cola disminuye con el valor de inductancia.

El tercer conjunto de simulaciones se realizó variando la magnitud de C desde el valor definido inicialmente a $C = 5$ [μF] en el caso sub-amortiguado y $C = 15$ [μF] para el caso sobre-amortiguado. Se distingue

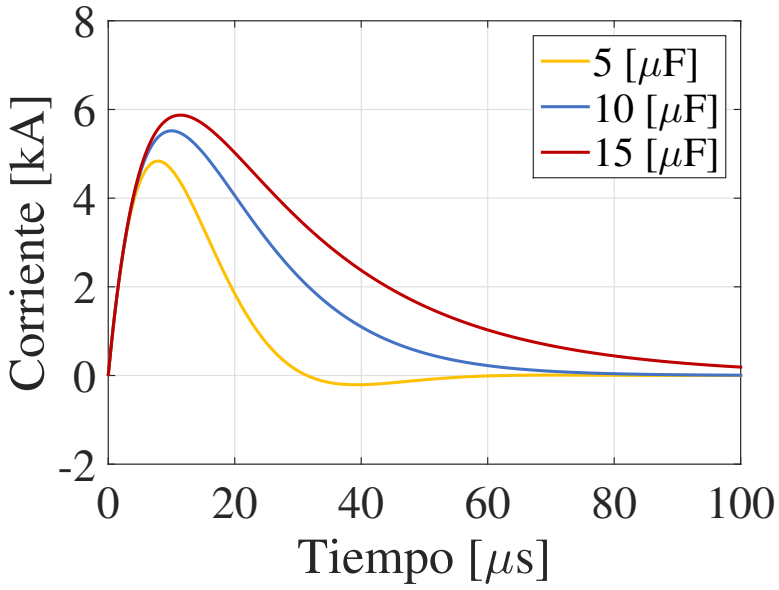


Figura 4.3: *Resultado de la simulación realizada para el caso critico estudiado y las variaciones de capacitancia que se presentaron con $R_d = 2$ [Ω] y $L_d = 10$ [μH]. Fuente: Elaboración propia.*

que al aumentar la capacitancia del banco aumenta el valor máximo del impulso, así como también lo hace el tiempo donde se produce el máximo. El tiempo de cola se ve fuertemente afectado por el condensador equivalente aumentando cuando el valor de este aumenta.

Los resultados de los máximos de las corrientes para los casos donde se varia la resistencia se muestran en el Tabla 4.1.

Amortiguamiento	Valor R_d $[\Omega]$	I_{max} $[A]$
Crítico	2	$5518,19$
Sub-amortiguado	1	$8194,40$
Sobre-amortiguado	3	$4124,00$

Tabla 4.1: *Magnitudes de resistencias utilizadas para la simulación de impulsos variando R_d, así como también la corriente máxima que se alcanza correspondiente a la Figura 4.1. Fuente: Elaboración propia.*

Los resultados de los máximos cuando se varió L_d se muestran en el Tabla 4.2.

Amortiguamiento	Valor L_d $[\mu H]$	I_{max} $[A]$
Crítico	10	$5518,19$
Sub-amortiguado	15	$5128,93$
Sobre-amortiguado	5	$6099,30$

Tabla 4.2: *Magnitudes de inductancias utilizadas para para la simulación de impulsos variando L_d, así como también la corriente máxima que se alcanza correspondiente a la Figura 4.2. Fuente: Elaboración propia.*

Para el caso donde se vario la capacitancia se tiene que los máximos se presentan en el Tabla 4.3.

Amortiguamiento	Valor C $[\mu F]$	I_{max} $[A]$
Crítico	10	$5518,19$
Sub-amortiguado	5	$4835,95$
Sobre-amortiguado	15	$5872,40$

Tabla 4.3: *Magnitudes de capacittancia utilizadas para para la simulación de impulsos variando C, así como también la corriente máxima que se alcanza correspondiente a la Figura 4.3. Fuente: Elaboración propia.*

Vale notar que las discrepancias entre los valores simulados y los valores teóricos calculados no existen cuando se utilizan dos dígitos decimales, por lo tanto se establece que el entorno de simulación ATP entrega resultados exactos y confiables para este tipo de circuitos.

Si se analiza la influencia que tiene cada uno de los componentes se tiene que al variarlos en $\pm 50\,\%$ la forma de onda resultante cambia en cuanto a magnitud máxima y a tiempo de frente de la onda con respecto a la onda críticamente amortiguada.

Parámetro y tipo de impulso		$\Delta\,\%$ Magnitud	$\Delta\,\%$ Tiempo Máximo
R_d	Sub-amortiguado	$48,50$	$20,92$
	Sobre-amortiguado	$25,27$	$13,92$
L_d	Sub-amortiguado	$7,05$	$30,56$
	Sobre-amortiguado	$10,53$	$37,68$
C	Sub-amortiguado	$12,36$	$21,46$
	Sobre-amortiguado	$6,42$	$14,05$

Tabla 4.4: *Influencia de cada uno de los parámetros del circuito cuando se varían en un rango de* $\pm 50\,\%$ *con respecto ala onda críticamente amortiguada. Fuente: Elaboración propia.*

La magnitud de la onda es claramente sensible a la variación de la resistencia del circuito, siendo muy poco sensible a los cambios de inductancia y capacitancia.

El tiempo donde se produce la magnitud máxima de la onda es sobre todo sensible a las variaciones de inductancia, quedando la variación de capacitancia en el segundo lugar y la de resistencia en como el parámetro que menos afecta, sin embargo estos valores de variación son bastante mas cercanos a la sensibilidad de la magnitud.

Como el tipo de onda que se trabaja en los impulsos de corriente tipo rayo $8/20$ es de carácter sub-amortiguado se tiene que los ordenes de sensibilidad desde el más importante al mas despreciable son los siguientes:

Δ **Magnitud:** Resistencia, Capacitancia e Inductancia.

Δ **Tiempo Máximo:** Inductancia, Capacitancia y Resistencia.

SECCIÓN 4.2

Simulación sin probeta onda normada

Para que la onda del impulso se encuentre dentro de los valores establecidos por IEC-62475 se definieron los parámetros del circuito utilizando el método de [12] desarrollado por F. Imo y A. Schwab.

Como en este caso la onda corresponde a una de tipo $8/20\ [\mu s]$ se tiene lo siguiente:

Parámetro	Valor
R^*	$0,59$
L^*	$3,1$
T_s^*	$1,75$

Tabla 4.5: *Valores necesarios para calcular los parámetros del circuito para obtener una onda normada. Fuente: Elaboración propia a partir de [12]*

Utilizando las siguientes ecuaciones:

$$R_0 = \frac{2 \cdot V_0}{I_{max} \cdot e} \quad ; \quad L_0 = \frac{R_0^2 \cdot C}{4} \quad ; \quad C = \frac{2 \cdot Ts}{R_0 \cdot Ts^*} \tag{4.1}$$

Considerando:

$$R = R_0 \cdot R^* \quad ; \quad L = L_0 \cdot L^* \tag{4.2}$$

Con:

$R, C, L =$ Parámetros finales que deberá tener el circuito para cumplir con la norma.
$T_s \quad =$ Tiempo de frente.
$I_{max} \quad =$ Corriente máxima requerida del impulso.

Como se conocen los valores de C e I_{max} que se desea, se determinaron V_0, R y L.

Se realizó la comprobación de los valores de la onda con un valor de condensador desde $1\ [\mu F]$ hasta $10\ [\mu F]$ y corrientes máximas de $10\ [kA]$ y $20\ [kA]$.

Al reemplazar estos valores en la ecuación 3.21 se obtiene un valor de corriente máxima distinto al buscado, sin embargo, los valores de tiempo y proporcionalidad referentes a la norma cumplen con ella. Por lo tanto, se agrega al cálculo la ecuación 3.21 con lo que se ajusta nuevamente la tensión de carga para cumplir con el requerimiento de corriente deseada.

Los valores de los parámetros del circuito se encuentran en el Anexo B, se observa que como se había propuesto, la tensión de carga es la única que varia y cambia la magnitud del impulso.

Las ondas simuladas se muestran en la Figura 4.4 y los valores característicos de éstas están contenidos en el Tabla 4.6

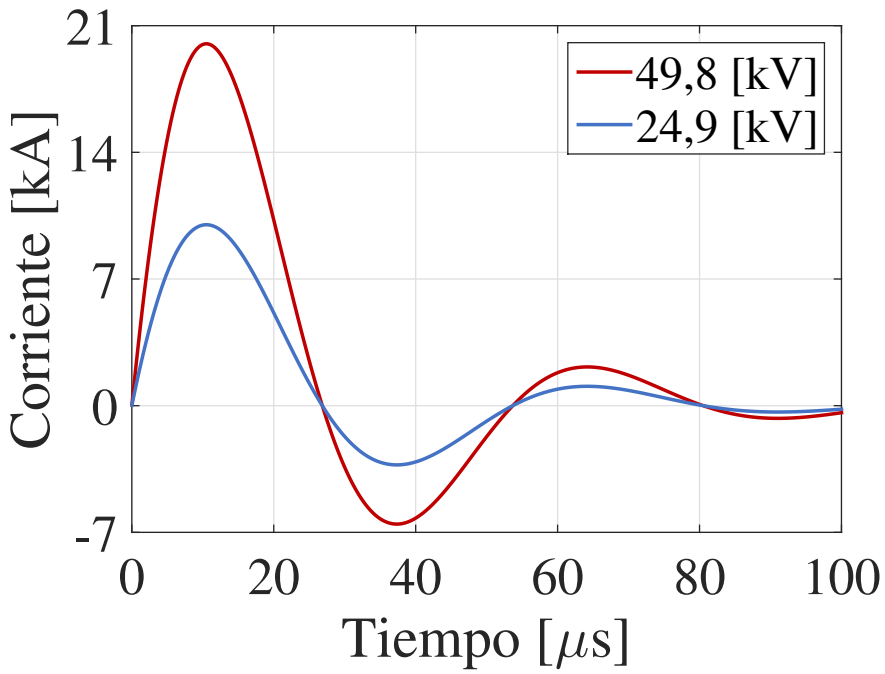


Figura 4.4: *Onda resultante al utilizar los parámetros calculados con el método Imo-Schwab, específicamente con* $C_t = 5\ [\mu F]$*,* $L_t = 12,97\ [\mu H]$*,* $R_t = 1,08\ [\Omega]$ *y una tensión de carga de* $24,92\ [kV]$ *para el impulso de* $10\ [kA]$ *y de* $49,85\ [kV]$ *para el impulso de* $20\ [kA]$*. Fuente: Elaboración propia.*

Parámetro	Valor
T_f	$8,14\ [\mu s]$
T_c	$19,88\ [\mu s]$
$I_{min@20kA}$	$-6543,0\ [A]$
$I_{min@10kA}$	$-3171,5\ [A]$

Tabla 4.6: *Valores resultantes de las ondas simuladas de* $10\ [kA]$ *y* $20\ [kA]$*. Fuente: Elaboración propia.*

Se comprueba entonces la validez de la onda evaluando sus resultados con los valores de norma.

Vale notar que los valores de tiempo de frente y de cola son iguales para ambas ondas.

En base a las simulaciones se establece que es posible teóricamente generar impulsos de corriente de $20\ [kA]$ con los equipos disponibles en el laboratorio operándolos dentro de sus límites permitidos.

SECCIÓN 4.3

Simulación con descargador de sobretensión ABB MWK4

A priori, la simulación del descargador se puede aproximar a un interruptor normalmente abierto (NA) que se cierra cuando la tensión en sus extremos sobrepasa el límite definido para el equipo en protección, por lo tanto, éste debería tener idealmente una resistencia muy baja cuando este en operación y altísima cuando la tensión sea más baja que el límite de protección requerido.

Según lo establece la norma IEC 60099-4 [24], los valores de interés para este tipo de ensayo son la magnitud de la corriente y el tiempo de frente. El equipo a estudiar fue un descargador de sobretensión MWK4 de ABB, para lo cual se realizaron dos modelos:

- IEEE.
- Pinceti Giannettoni.

4.3.1 Modelo IEEE

El cálculo de los parámetros lineales iniciales del circuito de la Figura 3.13 tiene como resultado:

Parámetro	Valor
$C \quad [pf]$	$534,759$
$L_0 \quad [\mu H]$	$0,0374$
$R_0 \quad [\Omega]$	1
$L_1 \quad [\mu H]$	$2,805$
$R_1 \quad [\Omega]$	$12,155$

Tabla 4.7: *Valores de los parámetros lineales iniciales para realizar la simulación según el método IEEE. Fuente: Elaboración propia.*

En cuanto al valor de tensión base para el cálculo de los elementos no lineales en un principio se utilizó $V^*_{base} = \frac{V10}{1,6} = 7,6875\ [kV]$, sin embargo, al comprobar las magnitudes de la tensión del modelo para el impulso de maniobra $30/60\ [\mu s]$ se tiene que se puede ajustar el valor de V^*_{base} para disminuir el error de las magnitudes.

El proceso de disminución del error se encuentra en la Tabla C.5 la que entrega como resultado $V_{base} = V^*_{base} \cdot 0,99 = 7,6106\ [kV]$.

Luego, se ajusta el parámetro L_1 según se muestra en C.7 quedando finalmente $L_1 = 0,65742\ [\mu H]$.

Se establece entonces que el modelo queda finalmente con los parámetros mostrados en 4.8 y C.6.

Parámetro	Valor
$C \quad [pf]$	$534,759$
$L_0 \quad [\mu H]$	$0,0374$
$R_0 \quad [\Omega]$	1
$L_1 \quad [\mu H]$	$0,657$
$R_1 \quad [\Omega]$	$12,155$

Tabla 4.8: *Valores de los parámetros lineales definitivos para realizar la simulación según el método IEEE. Fuente: Elaboración propia.*

Si se conservan los valores del circuito utilizados para la simulación de la Figura 4.4 y considerando una tensión de carga de $24,92\ [kV]$ y $49,85\ [kV]$ se tiene:

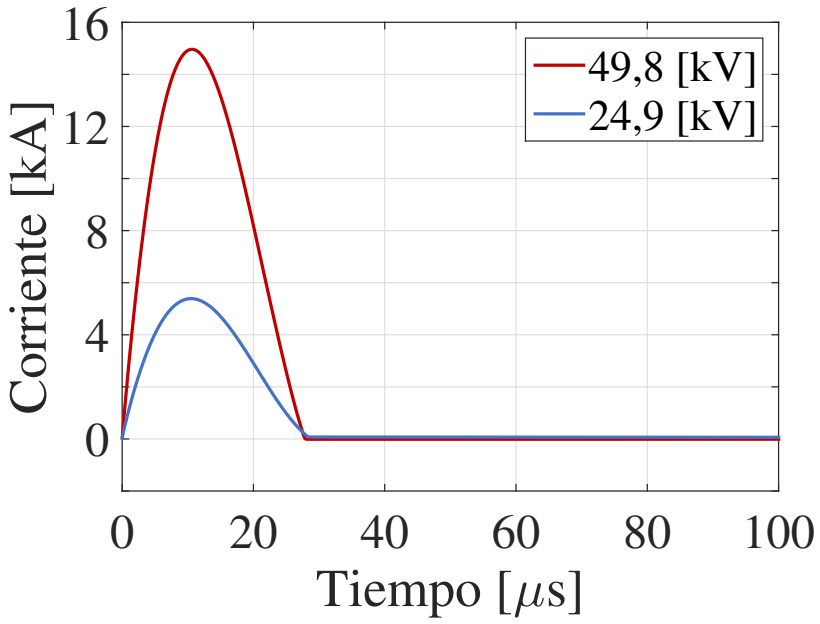


Figura 4.5: *Onda resultante al utilizar los parámetros calculados con el método Imo-Schwab, específicamente con* $C_t = 5\ [\mu F]$, $L_t = 12,97\ [\mu H]$, $R_t = 1,08\ [\Omega]$ *y una tensión de carga de* $24,92\ [kV]$ *para impulso de* $5,388\ [kA]$ *y de* $49,85\ [kV]$ *para impulso de* $14,963\ [kA]$ *utilizando como carga el modelo IEEE. Fuente: Elaboración propia.*

Ésta simulación cumple con la norma establecida ya que el frente de onda cuando se utilizan $24,92\ [kV]$ es de $8,149\ [\mu s]$ y cuando se utilizan $49,85\ [kV]$ es de $8,249\ [\mu s]$.

Se aprecia que duplicar la tensión de carga cuando se tiene el descargador en el circuito no tiene un efecto proporcional en la corriente máxima que circula por el elemento.

4.3.2 Modelo Pinceti-Giannettoni

El cálculo de los parámetros lineales tiene como resultado:

Parámetro	Valor
$R \quad [M\Omega]$	1
$L_0 \quad [\mu H]$	0,04065041
$L_1 \quad [\mu H]$	0,12195122

Tabla 4.9: *Valores de los parámetros lineales para realizar la simulación según el método de Pinceti y Giannettoni. Fuente: Elaboración propia.*

En cuanto al valor de tensión base para el cálculo de los parámetros no lineales es de $V_{base} = 12,3\ [kV]$, cuyo valor se encuentra en el cuadro C.8 del Anexo C.

Si se conservan los valores del circuito utilizados en la simulación de la Figura 4.4 y considerando una tensión de carga de $24,92\ [kV]$ y $49,85\ [kV]$ se tiene:

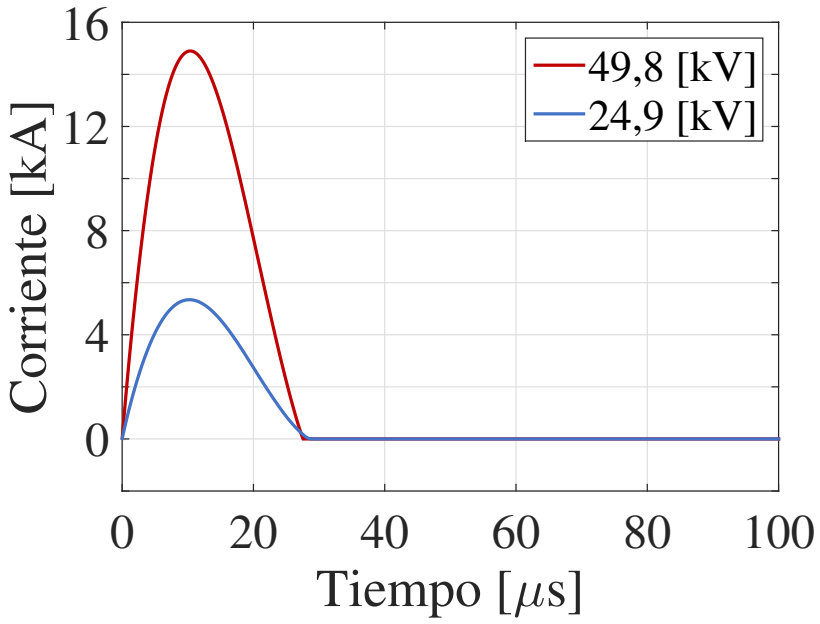


Figura 4.6: *Onda resultante al utilizar los parámetros calculados con el métoso Imo-Schwab, específicamente con* $C_t = 5\ [\mu F]$, $L_t = 12,97\ [\mu H]$, $R_t = 1,08\ [\Omega]$ *y una tensión de carga de* $24,92\ [kV]$ *para impulso de* $5,347\ [kA]$ *y de* $49,85\ [kV]$ *para impulso de* $14,899\ [kA]$ *utilizando como carga el modelo Pinceti-Giannettoni. Fuente: Elaboración propia.*

Ésta simulación cumple con la norma establecida ya que el frente de onda cuando se utilizan $24,92\ [kV]$ es de $7,898\ [\mu s]$ y cuando se utilizan $49,85\ [kV]$ es de $8,023\ [\mu s]$.

Se aprecia que ambas simulaciones tienen un comportamiento estrechamente similar entre sí.

CAPÍTULO 5

DISEÑO, EVALUACIÓN TÉCNICA Y CONSTRUCCIÓN

SECCIÓN 5.1

Características de diseño

Al momento de diseñar un GIC se deben considerar variados aspectos, tanto eléctricos, como físicos y de montaje.

Como exigencia mínima inicialmente se planteó que el generador de impulsos pudiera entregar una corriente de $5\ [kA]$, pero al realizar las simulaciones se descubrió que con los equipos disponibles en el Laboratorio de Alta Tensión se puede alcanzar teóricamente una corriente de $20\ [kA]$ bajo ciertas condiciones.

Ya que el GIC se utilizará con fines docentes, este debe ser construido de forma tal que su armado sea intuitivo, de fácil traslado y por lo tanto robusto.

5.1.1 Aspectos eléctricos de diseño

Las características esperadas del generador de impulsos en éste ámbito se reducen a una descarga que cumpla con las características de $20\ [kA]$ de corriente máxima y con forma de onda que se ajuste a las especificaciones $8/20\ [\mu s]$ según norma IEC 62475.

Se debe considerar que los elementos constitutivos del circuito deben soportar la descarga idealmente sin calentarse, por lo cual, se analiza el límite térmico de los conductores a utilizar y la energía que pueden disipar los condensadores.

Límite Térmico de los Conductores

Para calcular el límite térmico de los conductores de sebe tener en cuenta la naturaleza del conductor, su geometría y las características de la solicitación de corriente.

En esta sección se buscará calcular el calentamiento de los conductores para que estos no lleguen a un nivel crítico, el que comprometa la durabilidad del circuito.

Se evalúan dos límites posibles:

- Límite de operación del conductor.
- Perdida de resistencia mecánica de algún elemento constitutivo.

Lo que entregará la temperatura máxima de cada sección del circuito.

Si se considera entonces la ecuación 3.34 se tiene que:

$$S_{min} = \sqrt{\frac{\rho \cdot \int_0^{\infty} I^2(t)dt}{P_{esp} \cdot C_{esp} \cdot \Delta T}} \tag{5.1}$$

Se considera que la temperatura inicial de los conductores será 20 $[°C]$ y que la corriente normada tiene un valor máximo de 20 $[kA]$.

Las características de los conductores que componen el circuito se presentan en la Tabla 5.1.

Material	$\rho \left[\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}\right]$	Peso Esp $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	Calor Esp $\left[\frac{J}{g \cdot K}\right]$	Max Temp Operación $[°C]$
Cobre	$0,0171$	$8,90$	$0,385$	105
Nicrom 6015	$1,12$	$8,25$	$0,46 - 0,494$	1125

Tabla 5.1: *Datos nominales de los conductores utilizados. Fuente: Elaboración propia con datos de [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31].*

Como el resultado de la integral de la corriente al cuadrado para 20 $[kA]$ es $7425,4$ $\left[\frac{J}{\Omega}\right]$ (Anexo D), se tiene por lo tanto que las secciones mínimas de los conductores son:

Conductor	Sección mínima $[mm^2]$
Cobre	$0,660$
Nicrom 6015	$1,408$

Tabla 5.2: *Secciones mínimas de los conductores considerando la temperatura máxima de operación de cada conductor. Fuente: Elaboración propia.*

Si se analiza la interfaz cobre equipo, el elemento más decisivo es la bobina, donde el conductor está en contacto directo con PVC y el pegamento Araldite, por lo que la sección mínima de conductor de la bobina para cada consideración será:

Material-Conductor	Max Temp Operación $[°C]$	Sección mínima $[mm^2]$
PVC-Cobre	50	$1,111$
Araldite-Cobre	80	$0,786$

Tabla 5.3: *Secciones mínimas del conductor de cobre considerando la temperatura máxima de operación de los elementos con los que mantiene contacto. Fuente: Elaboración propia con datos de [32] y datos del fabricante de Araldite.*

Por lo tanto, se establece que la sección mínima de los conductores para que ningún elemento constitutivo del impulso sufra fatiga de material, son las siguientes:

Conductor	Sección mínima $[mm^2]$
Cobre	$1,111$
Nicrom 6015	$1,408$

Tabla 5.4: *Secciones mínimas de los conductores considerando la temperatura máxima de operación de cada conductor y de los materiales en contacto con ellos. Fuente: Elaboración propia.*

Energía Disipada en los Condensadores

Al observar los datos de placa, se tiene que el condensador posee solamente el dato de $W = 1,8\ [kJ]$, por lo que se calcula cuánta será la energía que se liberará intempestivamente en el condensador al momento del impulso.

Se utiliza un ensayo de absorción para determinar la resistencia equivalente en paralelo (R_g) del condensador, utilizando la onda de tensión se tendrá entonces la energía que se transformará en calor, la que se compara con el dato de energía de la placa.

Según el ensayo de absorción realizado a dos condensadores (Anexo E) se obtienen las siguientes resistencias:

Condensador	$R_g\ [G\Omega]$
C_1	$20,708$
C_2	$54,061$

Tabla 5.5: *Resistencias de conducción de los condensadores estudiados. Fuente: Elaboración propia.*

Utilizando la menor resistencia para considerar el caso mas crítico, se tiene que la energía disipada como calor por el condensador en el caso del impulso de onda normada de $20\ [kA]$, cuyo desarrollo se encuentra en Anexo F, es:

$$\Delta E = 1,04 \cdot 10^{-6}\ [J] \tag{5.2}$$

Por lo tanto este tipo de impulso se considera despreciable para la capacidad del condensador ($1,8\ [kJ]$).

Luego de realizar los ensayos del equipo, se midió el banco de condensadores final con el equipo Fluke $PM6306$ a $18,8\ [kHz]$ (frecuencia obtenida con el primer ciclo de oscilación de la Figura 4.4) lo que arroja que en dicha configuración el condensador equivalente tiene una resistencia en serie de $0,3893\ [\Omega]$ por lo que se procede a calcular nuevamente la energía en el condensador.

Según 3.37 se tiene que:

$$\Delta E = \int_0^\infty R \cdot I(t)^2\ dt = 0,3893 \cdot 7425,4 = 2,901\ [kJ] \tag{5.3}$$

Para el banco de condensadores considerando 6 capacitores en paralelo, por lo tanto para cada condensador se tiene que la energía disipada será de $483,54\ [J]$.

Se escoge la energía disipada mas grande por ser mas crítica para el diseño, bajo este concepto, los condensadores tendrían un factor térmico de seguridad de $3,72$.

5.1.2 Marco estructural de diseño

Como el GIC se utilizará en el laboratorio, es imprescindible que sea diseñado de forma modular, fácilmente manejable y en lo posible con un armado intuitivo. También existe la posibilidad de que éste generador de impulsos se utilice en terreno por lo que la robustez del mismo es sumamente importante.

De los materiales y equipos a utilizar

Para asegurar que el generador soportará los ciclos de trabajo se tiene que los equipos deberán cumplir con las características mencionadas a continuación:

- Los condensadores deben soportar un ciclo de trabajo de una descarga cada hora, para el caso de descargadores de sobretensión y de una descarga cada tres minutos en caso de realizar el ensayo en corto circuito.
- Los conductores deben soportar la corriente máxima de diseño del generador de impulsos por lo que se analizará el calentamiento de los mismos al momento de realizar el ensayo.

En caso de utilizar un rectificador de media onda, se deberá tener en consideración que el arreglo de diodos debe soportar el doble de la tensión máxima entregada por el transformador elevador.

Si se utiliza una fuente de tensión, esta debe a lo menos llegar a la tensión máxima de carga de los condensadores.

Se requerirá una bobina variable, así como también una resistencia adicional variable para poder calibrar los componentes del circuito a voluntad.

El GIC debe estar protegido en caso de que se sobrepase la tensión de diseño de los condensadores, por lo que se implementará un espinterómetro de protección.

El cálculo realizado para establecer la distancia de separación del espinterómetro de protección se encuentra en el Anexo H, se utiliza una idealización del espinterómetro de barras según la referencia [15].

En los planos del equipo se muestra el espinterómetro de barras junto al banco de condensadores.

SECCIÓN 5.2

Construcción y ensayos de diseño

A continuación se muestra el diseño del prototipo que se estudia en este trabajo, al cual va cambiando de acuerdo con los resultados obtenidos en las distintas pruebas realizadas.

5.2.1 Equipos y prototipo inicial

Dentro de los requisitos planteados al iniciar este trabajo, se consideró la utilización de los equipos disponibles en el laboratorio.

Equipos disponibles en el laboratorio

Para identificar que equipos se debían construir se procedió a buscar los que se encontraban disponibles para la realización del proyecto contenidos en la siguiente lista:

- Condensadores 60 $[kV]$.
- Bobina con núcleo de aire.
- Generador de impulsos pequeño.
- Espinterómetro de proximidad.
- Resistencias shunt.

Como el laboratorio contaba con capacitores de 1 $[\mu F]$ y 60 $[kV]$, se opta por utilizarlos para implementar el banco de condensadores capaz de alimentar al GIC.

Los condensadores se montaron en un embalaje de madera para realizar los ensayos como muestra la Figura 5.2.



Figura 5.1: *Tipo de condensador utilizado para el banco de condensadores. Fuente: Elaboración propia.*

Datos de placa	
O.A.	441401
Año	1990
Type	crs 6,170,75u
Tensión de carga	60 $[kV_{DC}]$
Tensión e	72 $[kV_{DC}]$
Capacitancia nominal	1 $[\mu F]$
Energía	$1,8$ $[kJ]$
Cat. temp.	$-10/40$ $[°C]$

Tabla 5.6: *Datos de placa de los condensadores utilizados en el GIC. Fuente: Placa de los condensadores.*

Datos Estructurales	
Altura	$54,3$ $[cm]$
Largo	$12,2$ $[cm]$
Ancho	34 $[cm]$
Peso	40 $[kg]$
Altura Aislador	$19,5$ $[cm]$

Tabla 5.7: *Datos estructurales de los condensadores utilizados en el GIC. Fuente: Elaboración propia.*



Figura 5.2: *Banco de condensadores utilizado para las pruebas. Fuente: Elaboración propia.*

La bobina utilizada para el equipo es preexistente y fue fabricada en un cilindro de PVC, en la Figura 5.3 se aprecia como era inicialmente, luego de los primeros experimentos se acondiciona realizando una división adicional y cambiando el punto de sujeción de su extremo, por lo que queda conformada por cuatro secciones.

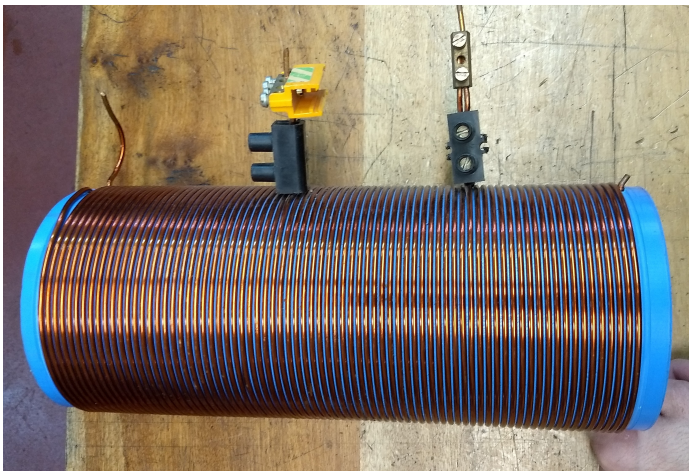


Figura 5.3: *Bobina utilizada para el generador de impulsos de corriente. Fuente: Elaboración propia.*

Características Eléctricas	
Inductancia sección A	$9,17\ [\mu H]$
Resistencia sección A	$0,0342\ [\Omega]$
Inductancia sección B	$23,54\ [\mu H]$
Resistencia sección B	$0,0789\ [\Omega]$
Inductancia sección C	$62,17\ [\mu H]$
Resistencia sección C	$0,1508\ [\Omega]$
Inductancia sección D	$83,64\ [\mu H]$
Resistencia sección D	$0,1609\ [\Omega]$

Tabla 5.8: *Datos eléctricos de la bobina medidos con el equipo Fluke* $PM6306$ *a* $18,8\ [kHz]$. *Fuente: Elaboración propia.*

Datos Estructurales	
Número de Vueltas	25
Largo Bobina	$28,8\ [cm]$
Diámetro Bobina	$12,5\ [cm]$
Sección Conductor	$6,74\ [mm^2]$

Tabla 5.9: *Dimensiones y datos de la bobina. Fuente: Elaboración propia.*

Se utilizó también partes de un generador de impulsos existente en el laboratorio, en primera instancia como soporte estructural y su espinterómetro de proximidad como disparador del circuito, sin embargo luego se soporta el circuito con estructuras encontradas en el laboratorio y se cambia el tipo de espinterómetro de disparo por uno que se puede controlar a distancia.

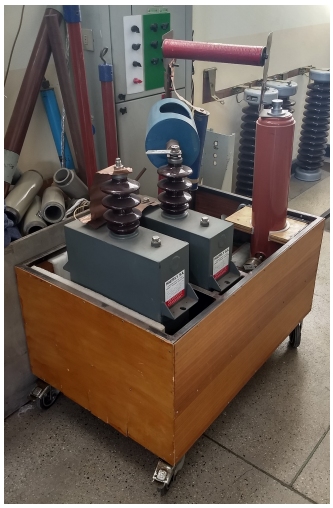
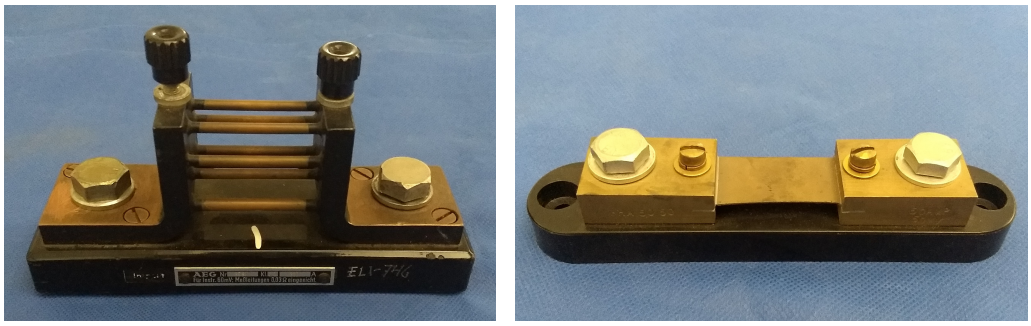


Figura 5.4: *Generador de impulsos pequeño que se encontraba en el laboratorio. Fuente: Elaboración propia.*



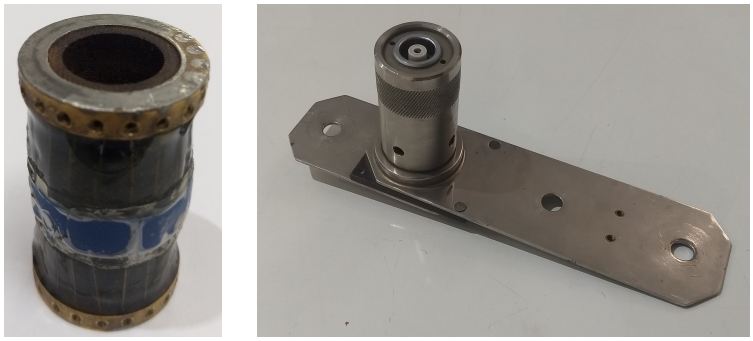
Figura 5.5: *Espinterómetro de proximidad que se utilizó en el primer y segundo prototipo del GIC. Fuente: Elaboración propia.*

Se utilizaron resistencias shunt en serie sin blindaje, al comprobar su mal funcionamiento se prueba y se opta por una con blindaje para la medición de corriente. Es importante destacar, que esta resistencia se ubica al final del circuito, con el extremo del blindaje conectado directamente a tierra para evitar problemas de descargas a través del osciloscopio.



(a) *Resistencia Shunt sin Blindaje 1* ***(b)*** *Resistencia Shunt sin Blindaje 2*

Figura 5.6: *Resistencias Shunt sin Blindaje utilizada para medir corriente en el circuito. Fuente: Elaboración propia.*



(a) *Resistencia Shunt* ***(b)*** *Blindaje Resistencia Shunt*

Figura 5.7: *Resistencia Shunt Blindada utilizada para medir corriente en el circuito. Fuente: Elaboración propia.*

Equipos no disponibles en el laboratorio

Luego se procede a construir los elementos que no se encontraron en el laboratorio listados a continuación:

- Cilindro aluminio para inductancia variable.
- Resistencia variable.
- Flejes de conexión.

A partir de una lámina de aluminio se confecciona un cilindro sin reforzamiento y se posiciona dentro de la bobina para disminuir su inductancia como muestra la Figura 5.8.

Se confeccionó una resistencia variable con nicrom 6015 por sus característica de resistividad eléctrica, ésta se confecciona con 3 hilos debido al calentamiento (considerando un impulso de 10 $[kA]$), su nivel de resistencia mecánica y la factibilidad de confeccionado en tamaño reducido.



Figura 5.8: *Bobina con el cilindro de aluminio para reducir la inductancia. Fuente: Elaboración propia.*

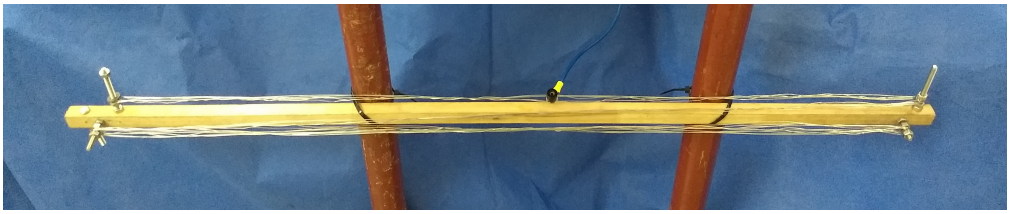


Figura 5.9: *Resistencia variable utilizada para el circuito. Fuente: Elaboración propia.*

Para realizar las conexiones entre los equipos se utilizaron flejes de cobre disponibles en el laboratorio, los que cuentan con una sección transversal de $52,5\ [mm^2]$, éstos se muestran en la Figura 5.10.

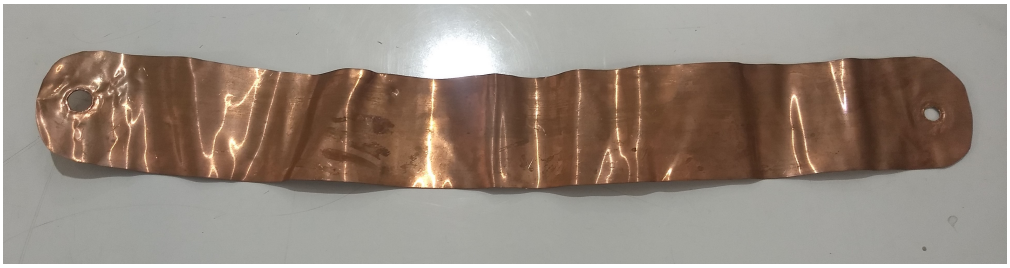


Figura 5.10: *Tipo de fleje utilizado para el circuito. Fuente: Elaboración propia.*

Prototipo inicial

En resumen, el prototipo de pruebas inicial contó con:

- Banco de condensadores.
- Bobina variable con núcleo de aluminio sin fijaciones (sujeto a presión).

- Resistencia variable.
- Resistencia Shunt de medición.
- Espinterómetro de disparo por proximidad.

La Figura 5.11 muestra la configuración del prototipo inicial.



Figura 5.11: *Prototipo inicial en proceso de armado utilizado en las primeras pruebas. Fuente: Elaboración propia.*

Pruebas iniciales

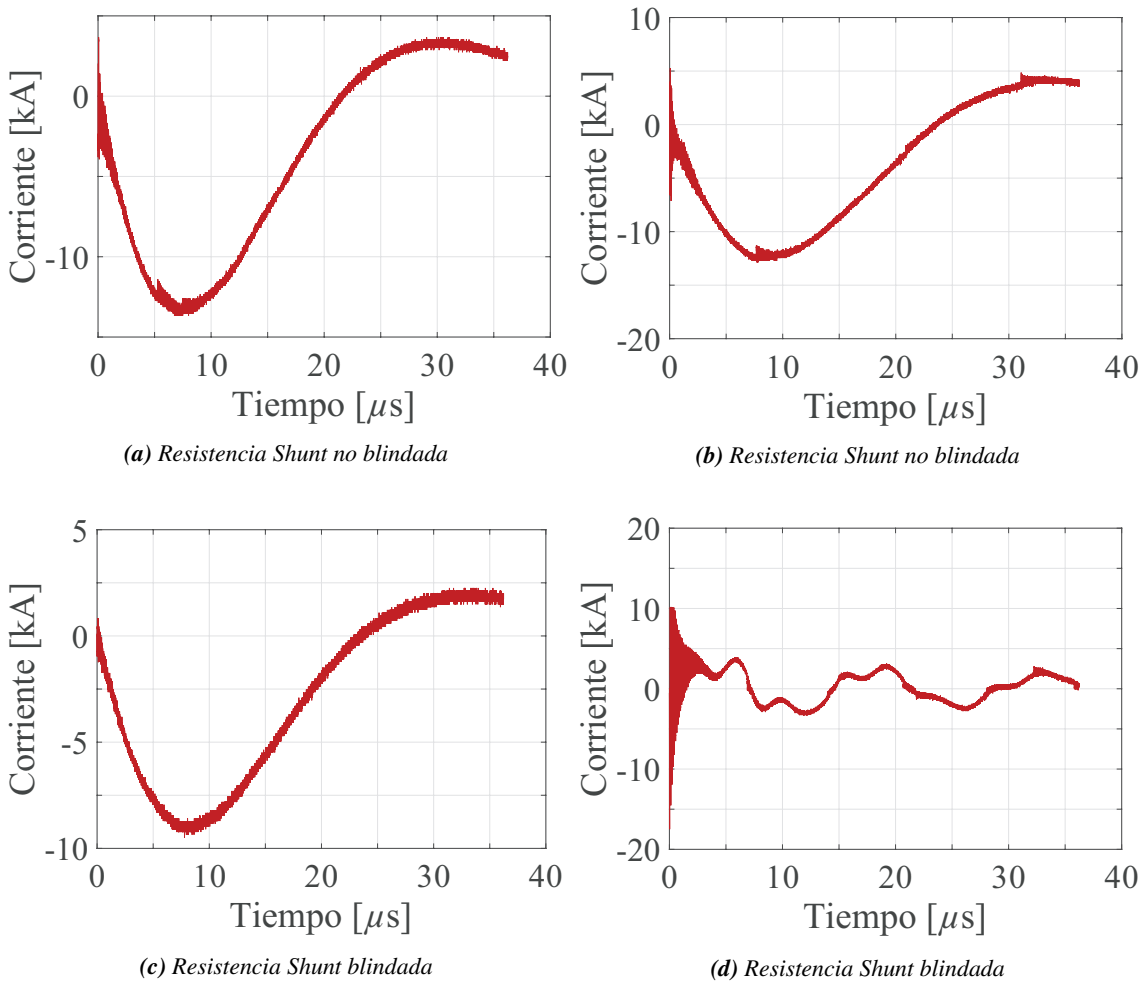
Con el primer prototipo se realizan las pruebas que sirven de base para las mejoras a realizar.

Se utilizó la configuración en cortocircuito, ésta permitió comprobar el funcionamiento del sistema de disparo así como también el de medición de corriente, los resultados se muestran a continuación:

Las Figuras 5.12a y 5.12b muestran cierta distorsión al inicio y en las crestas de la medición, esto se debe a que las resistencias shunt utilizadas no son blindadas (Figura 5.6) y los terminales conectados a ellas no estan completamente blindados hasta la resistencia.

La Figura 5.12c muestra la forma de onda más limpia, ya que se utilizó una resistencia shunt con blindaje (Figura 5.7), ésta resistencia se conecta a un cable coaxial completamente blindado hasta el momento de la conexión, por lo que no hay lugar a distorsiones externas.

La Figura 5.12d muestra una forma de corriente completamente errática medida con la resistencia blindada, ésto se debe a que el revestimiento interno de la bobina se encuentra fijo solamente por la presión que ejerce la lamina al desenrollarse, por lo cual sufre una deformación si se le aplica un impulso de corriente importante (mayor a 10 $[kA]$).



(a) *Resistencia Shunt no blindada*

(b) *Resistencia Shunt no blindada*

(c) *Resistencia Shunt blindada*

(d) *Resistencia Shunt blindada*

Figura 5.12: *Mediciones de corriente del primer prototipo con resistencia shunt sin blindaje y con blindaje. Fuente: Elaboración propia.*

Cabe destacar que el modo de disparo utilizado para estas mediciones fue realizado con el espinterómetro de proximidad, el que opera cuando la tensión sobrepasa el nivel de ruptura, por lo tanto no se tiene registro de las tensiones de carga de los ensayos realizados.

Luego de estas mediciones se comprobó el valor de la resistencia shunt con el equipo Megger $MTO210$, arrojando como resultado $31,83\ [m\Omega]$ y $30,14\ [m\Omega]$. Este valor no se había comprobado anteriormente, sin embargo, no correspondía al valor de etiquetado en el equipo.

La Figura 5.13 muestra el recubrimiento metálico después de realizar las pruebas al primer prototipo, se distingue claramente la abolladura que causó el campo magnético al circular la corriente del impulso por la bobina.

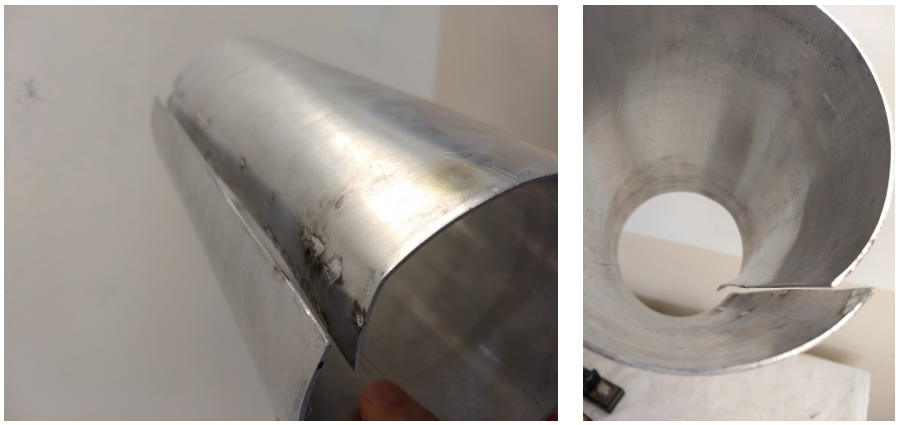


Figura 5.13: *Cilindro de aluminio sin refuerzo de la bobina abollado luego de las primeras pruebas. Fuente: Elaboración propia.*

5.2.2 Modificaciones

Dentro de las primeras modificaciones que se realizaron se encuentran:

- Mejoramiento de la fijación del revestimiento metálico con remaches de aluminio.
- Mejoramiento terminales de la resistencia variable.
- División de una sección de la bobina.

Se realizaron nuevamente pruebas en corto circuito al GIC arrojando resultados satisfactorios en cuanto a los tiempos característicos normados, la Figura 5.14 muestra dicho resultado.

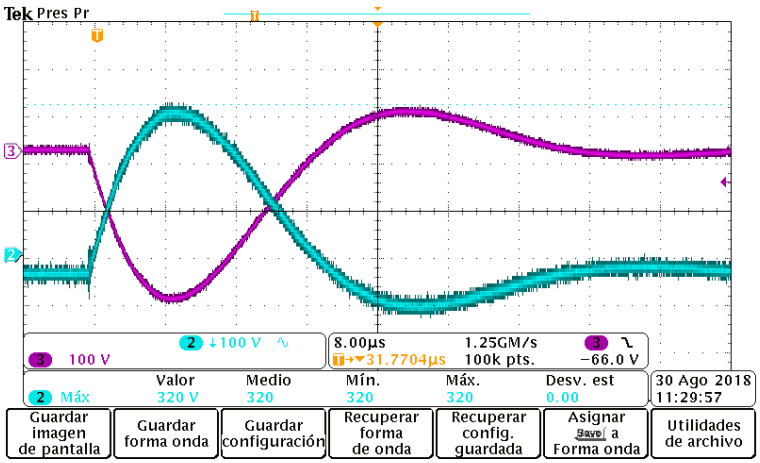
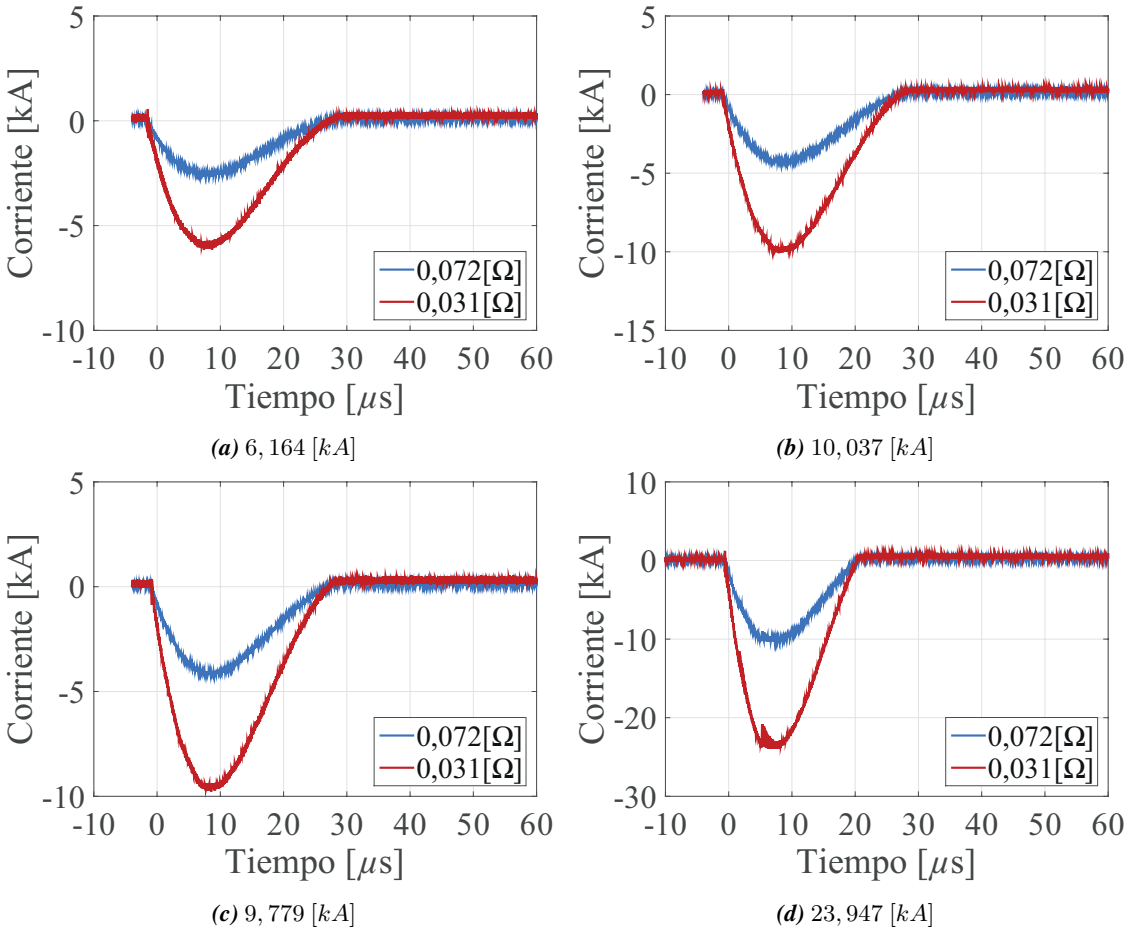


Figura 5.14: *Gráfico de calibración del segundo prototipo donde la onda celeste y violeta representan la misma medición de tensión de la resistencia shunt medida con dos puntas de prueba diferentes. Fuente: Medición directa con osciloscopio.*

Se procede a realizar ensayos al descargador de sobretensión simulados, las mediciones registradas están contenidas en la Figura 5.15 , cabe destacar que la tensión de ruptura se calibra en base a la separación del espinterómetro por lo que no se conoce la tensión de carga de los condensadores para los ensayos.

El valor de la resistencia shunt cambió drásticamente en las mediciones, por lo que se presentan los gráficos asumiendo el valor inicial y final de la resistencia de medición, pudiendo considerar entonces que la medición real se encuentra entre dichos límites.



(a) $6,164\ [kA]$ ***(b)*** $10,037\ [kA]$

(c) $9,779\ [kA]$ ***(d)*** $23,947\ [kA]$

Figura 5.15: *Mediciones de corriente del segundo prototipo realizando ensayo a descargador de sobretensión considerando una resistencia shunt de* $0,031$ *y* $0,072\ [\Omega]$. *Fuente: Elaboración propia.*

Magnitud corriente $[kA]$	$6,164$	$10,037$	$9,779$	$23,947$
Tiempo Frente $[\mu s]$	$7,43$	$7,36$	$7,45$	$5,31$

Tabla 5.10: *Datos de las ondas resultantes para los ensayos realizados sobre el descargador MWK4 con el segundo prototipo del GIC. Fuente: Elaboración propia.*

De las Figuras 5.15a, 5.15b y 5.15c, se aprecia que el comportamiento del generador de impulsos fue adecuado, ya que el perfil de corrientes concuerda con las simulaciones realizadas previamente. Destaca

el hecho de que los valores de frente se encuentran entre los valores de norma.

De la Figura 5.15d se aprecia que existe cierto nivel de deformación de la onda en la cresta, así como también, en su tiempo de frente, por lo que se establece que el generador de impulsos tiene un comportamiento errático a altas corrientes, debido al núcleo de la bobina el que incluso perdió un remache al realizar estos ensayos.

Se distingue también que el espinterómetro de disparo se comporta de manera arbitraria, bajando mucho la tensión de ruptura luego de un impulso por la inonización del aire dentro de la cámara, haciendo difícil el registro de la tensión de actuación, por lo que requiere de un nuevo sistema de disparo que sea más selectivo al momento de operar.

Luego de haber realizado los impulsos, se revisaron los componentes del circuito para evaluar su comportamiento.

Se comprobó el valor de la resistencia shunt, la que aumentó desde $0,031$ $[\Omega]$ a $0,072$ $[\Omega]$, por lo que se infiere que:

- Dicha resistencia no estaba diseñada para tal magnitud de impulso de corriente, por lo tanto, se deben fabricar nuevas resistencias para poder medir el GIC.
- Las mediciones realizadas no tenían necesariamente la magnitud mostrada en las mediciones correspondientes a la escala de $0,031$ $[\Omega]$.

Para poder medir con exactitud la corriente del GIC se evalúa el desempeño de nicrom 6015 con su hoja de datos característicos y así poder dimensionar una resistencia de medición. También se decide aumentar el número de conductores de la resistencia variable a 5 en paralelo.

Se revisa el cilindro de aluminio, el cual se ve afectado en gran medida por los campos magnéticos producidos en la bobina, los que generaron un esfuerzo de corte suficiente como para romper el remache del extremo del cilindro como lo muestra la Figura 5.16.



Figura 5.16: *Cilindro de aluminio reforzado con remaches luego del segundo grupo de pruebas. Fuente: Elaboración propia.*

Dentro del segundo grupo de modificaciones se encuentra:

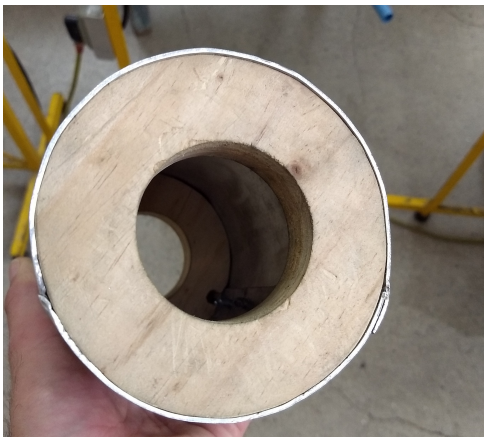
- Mejoramiento sistema de sujeción de revestimiento metálico con topes de madera y remaches de aluminio.
- Mejoramiento terminales y cantidad de filamentos de la resistencia variable.
- Confección de una nueva resistencia shunt de medida.
- Confección de espinterómetro de accionamiento a distancia.

5.2.3 Prototipo final

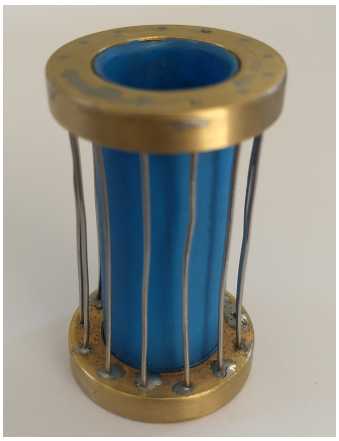
El prototipo final del generador de impulsos de corriente cuenta con lo siguiente

- Banco condensadores.
- Bobina variable.
- Resistencia variable.
- Resistencia shunt para medir corriente.
- Espinterómetro esférico de accionamiento a distancia.
- Espinterómetro de barras para limitar tensión de carga condensadores.
- Espinterómetro de separación de circuito de carga.

La bobina variable queda finalmente con el revestimiento metálico reforzado con madera en su interior, como la inductancia necesaria es pequeña, se reforzó solo $1,5$ $[cm]$ de los extremos del revestimiento metálico (Figura 5.17a).



(a) *Soporte madera cilindro aluminio*



(b) *Resistencia Shunt nueva*



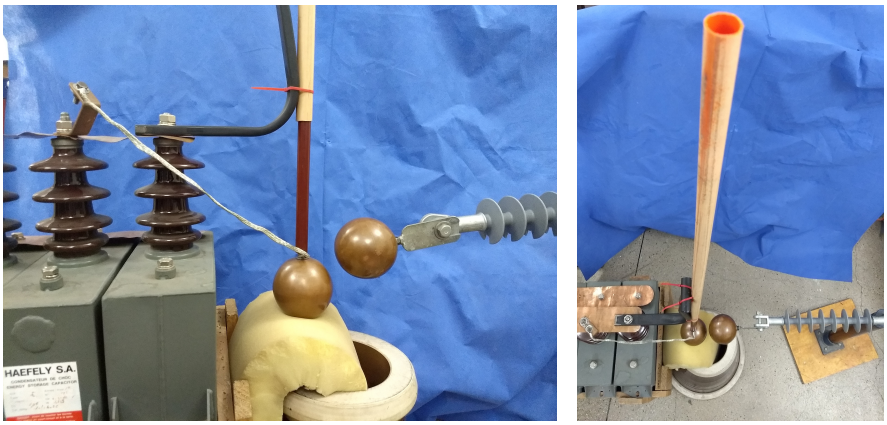
(c) *Espinterómetro de desconexión*

Figura 5.17: *Soporte de madera utilizado para reforzar el cilindro de aluminio,la resistencia shunt especialmente confeccionada para medir el impulso de corriente y el espinterómetro utilizado para realizar la conexión entre el equipo de carga y el banco de condensadores. Fuente: Elaboración Propia.*

Se diseña y confecciona una resistencia shunt (Figura 5.17b) que soporte la solicitación de corriente y que a su vez tenga un bajo porcentaje de error al impulso, dichos cálculos se encuentran en el Anexo G, cabe destacar que para un impulso de corriente de $20\ [kA]$ con forma de onda $8/20$ el error teórico por calentamiento de la resistencia es aproximadamente $0,42\,\%$ (calculado con la energía que disipará y datos de hoja técnica del Nicrom 6015).

En la Figura 5.17c se muestra el espinterómetro esférico de separación que aísla la etapa de carga de la de descarga del generador de impulsos.

Se diseña y confecciona un espinterómetro de accionamiento a distancia (Figura 5.18) para disparar el equipo cuando sea necesario sin exponer el equipo de carga.



(a) *Vista frontal* ***(b)*** *Vista superior*

Figura 5.18: *Espinterómetro vertical de disparo. Fuente: Elaboración propia.*

Se diseña un espinterómetro de barras para asegurar que la carga de los condensadores no supere su límite de fábrica, cuyas especificaciones se encuentran en el Anexo H, sin embargo, como el uso del prototipo final se limita al laboratorio, este limitador no se construye.

Se utiliza el doblador de Greinacher disponible en el laboratorio para realizar la carga del banco de condensadores conectándolo al GIC mediante una resistencia de agua. En caso de que la corriente de carga supere el límite permitido, se acciona la pértiga de protección del equipo para descargar el conjunto.

Se confeccionó un conductor flexible para la conexión entre el espinterómetro de disparo y el banco de condensadores.



Figura 5.19: *Conductor flexible fabricado para conectar el espinterómetro de disparo al banco de condensadores. Fuente: Elaboración propia.*

El prototipo final se muestra en las Figuras 5.20 y 5.21



Figura 5.20: *Prototipo final utilizado para realizar las pruebas de laboratorio. Fuente: Elaboración Propia.*

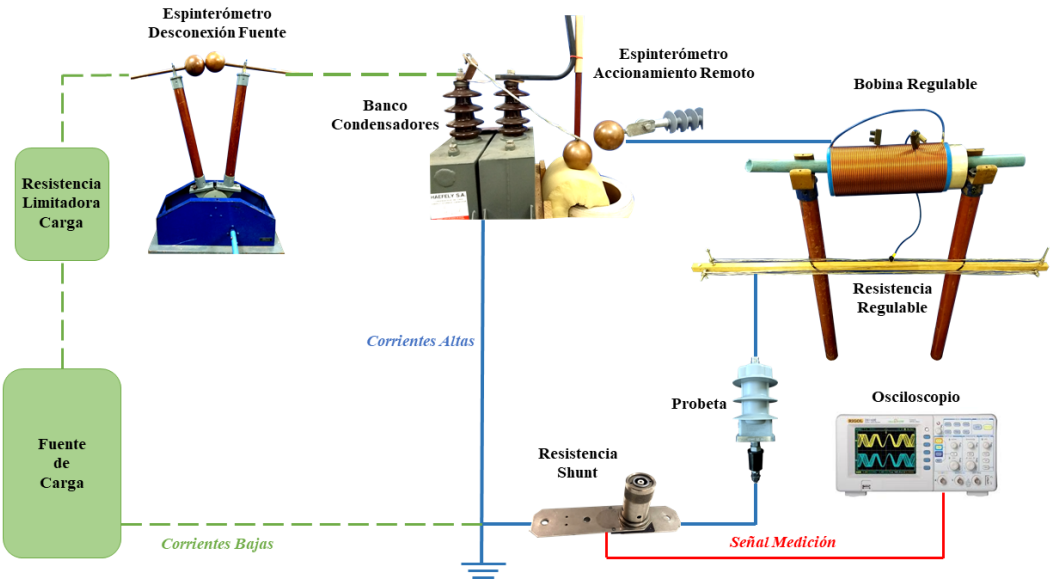


Figura 5.21: *Esquema del prototipo final utilizado para realizar las pruebas de laboratorio. Fuente: Elaboración Propia.*

5.2.4 Pruebas finales

Con el prototipo final se realizaron ensayos en corto circuito para 10 y 20 $[kA]$, así como también, ensayos al descargador de sobretensión ABB MWK4 a 0.5, 1 y 2 veces su corriente nominal.

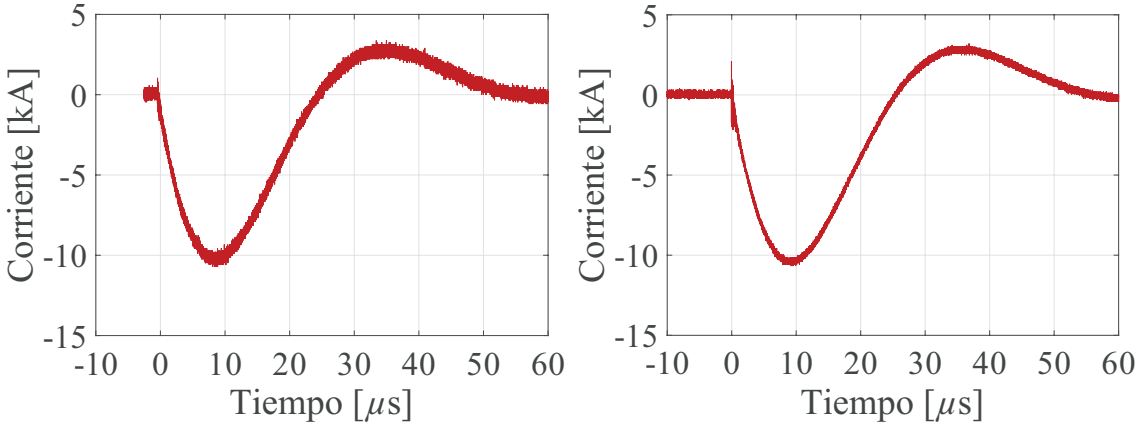
Como el banco de condensadores esta formado por 6 condensadores en el cajón, se opta por realizar las pruebas finales con todos ellos conectados en paralelo para evitar descargas indeseadas dada la cercanía de los equipos.

Por lo tanto, utilizando una capacitancia equivalente 6 $[\mu F]$ se calibra la resistencia a $0,8990$ $[\Omega]$ y la bobina a $10,80$ $[\mu H]$ según lo especifican las Tablas del Anexo B.

Se debe destacar que los ajustes realizados al equipo consideraron al banco de condensadores como un equipo ideal, es decir, puramente capacitivo de valor 6 $[\mu F]$.

Ensayos a 10 $[kA]$ en corto circuito

En los primeros ensayos realizados con el prototipo final se utilizó una tensión de carga de $V_c = 20$ $[kV]$ esperando obtener una amplitud máxima aproximada de 10 $[kA]$ con forma de onda tipo $8/20$, los resultados se muestran a continuación:



(a) *Ensayo* 1 ***(b)*** *Ensayo* 2

Figura 5.22: *Mediciones del ensayo* 1 *y* 2 *del prototipo final considerando una tensión de carga de* 20 $[kV]$ *resultando un impulso de* 10 $[kA]$. *Fuente: Elaboración propia.*

De los datos graficados, se destaca el hecho de que las mediciones tienen cierto nivel de distorsión cuando comienza el impulso, debido al comportamiento en frecuencia del circuito de medición.

Por análisis de los gráficos en el osciloscopio se obtuvieron las siguientes magnitudes:

Ensayo	1	2
Tiempo Frente $[\mu s]$	$7,39$	$7,56$
Tiempo Cola $[\mu s]$	$18,2$	$18,6$
Máxima Corriente Directa $[kA]$	$10,721$	$10,675$
Máxima Corriente Reversa $[kA]$	$3,380$	$3,211$

Tabla 5.11: *Datos de las ondas resultantes para los ensayos 1 y 2 del prototipo final. Fuente: Elaboración propia.*

Por lo tanto se aprecia que en ambos ensayos los parámetros corresponden al valor de norma especificados en IEC62475 [14].

N° Ensayo	Parámetro	Antes del ensayo	Después del ensayo	Variación %
1	Inductancia $[\mu H]$	$10,32$	$10,66$	$3,29$
	Resistencia $[\Omega]$	$0,9103$	$0,8906$	$11,06$
2	Inductancia $[\mu H]$	$10,77$	$10,81$	$0,37$
	Resistencia $[\Omega]$	$0,8984$	$0,8954$	$0,33$

Tabla 5.12: *Variación de los parámetros del circuito para un impulso* $8/20$ *de* 10 $[kA]$ *medidos a* $18,8$ $[kHz]$ *en el prototipo final para el ensayo 1 y 2. Fuente: Elaboración propia.*

Luego de obtener los resultados anteriormente mostrados se simuló nuevamente el circuito, esta vez con los parámetros reales de los circuitos antes y después del ensayo.

Ensayo 1 y simulaciones	Tiempo Frente $[\mu s]$	Tiempo Cola $[\mu s]$	Máxima Corriente Directa $[kA]$	Máxima Corriente Inversa $[kA]$
Ensayo	$7,39$	$18,2$	$10,721$	$3,380$
Simulación Antes	$7,901$	$20,015$	$9,723$	$3,040$
Error relativo $\%$	$6,47$	$9,07$	$10,27$	$11,16$
Simulación Después	$8,095$	$20,336$	$9,702$	$3,186$
Error relativo $\%$	$8,71$	$10,50$	$10,51$	$6,07$

Tabla 5.13: *Datos del ensayo* 1 *y de las simulaciones resultantes del prototipo final. Fuente: Elaboración propia.*

Ensayo 2 y simulaciones	Tiempo Frente $[\mu s]$	Tiempo Cola $[\mu s]$	Máxima Corriente Directa $[kA]$	Máxima Corriente Inversa $[kA]$
Ensayo	$7,56$	$20,460$	$10,675$	$3,211$
Simulación Antes	$8,13$	$20,422$	$9,640$	$3,152$
Error relativo $\%$	$7,01$	$8,92$	$10,74$	$1,87$
Simulación Después	$8,16$	$20,460$	$9,640$	$3,172$
Error relativo $\%$	$7,35$	$9,09$	$10,73$	$1,21$

Tabla 5.14: *Datos del ensayo* 2 *y de las simulaciones resultantes del prototipo final. Fuente: Elaboración propia.*

Cabe destacar que la primera medición de parámetros del circuito se realizó desconectando la bobina del

espinterómetro de disparo, por lo que la variación tabulada no se debe solamente al impulso de corriente, si no que también se debe a la forma de medición.

Se aprecia que los ensayos 1 y 2 en cuanto a tiempo de frente tienen un error relativo entre $7,01$ y $8,71\,\%$, para el tiempo de cola, las comparaciones muestran un error de $10\,\%$ aproximadamente.

Si se analizan las corrientes directas máximas, se tiene que éstas poseen un error entre $10,27$ y $10,74\,\%$ lo que es bastante para este tipo de medición. Por su parte, las corrientes reversas tienen un error muy bajo, pero estas no son importantes mientras su valor máximo se mantenga bajo cierto porcentaje de la corriente máxima directa dado por la Figura 3.8.

Como los datos de tiempo poseen un error significativo, se revisan nuevamente los datos de simulación, pero esta vez se comprueba el valor del banco de condensadores medido mediante el equipo Fluke $PM6306$.

Equivalente serie	
Capacitancia $[\mu F]$	$6,0283$
Resistencia $[\Omega]$	$0,3893$

Tabla 5.15: *Datos eléctricos reales del banco de condensadores en su equivalente serie medido con Fluke* $PM6306$ *a* $18,8\,[kHz]$. *Fuente: Elaboración propia.*

Se realizan nuevamente las simulaciones considerando los valores reales del banco de condensadores.

Ensayo 1 y simulaciones	Tiempo Frente $[\mu s]$	Tiempo Cola $[\mu s]$	Máxima Corriente Directa $[kA]$	Máxima Corriente Inversa $[kA]$
Ensayo	$7,39$	$18,2$	$10,721$	$3,380$
Simulación Antes	$7,2491$	$20,005$	$8,377$	$1,388$
Error relativo $\%$	$1,95$	$9,02$	$27,98$	$143,47$
Simulación Después	$7,432$	$20,352$	$8,364$	$1,491$
Error relativo $\%$	$0,57$	$10,57$	$10,57$	$126,71$

Tabla 5.16: *Datos del ensayo* 1 *y de las simulaciones resultantes del prototipo final considerando el banco de condensadores real. Fuente: Elaboración propia.*

Ensayo 2 y simulaciones	Tiempo Frente $[\mu s]$	Tiempo Cola $[\mu s]$	Máxima Corriente Directa $[kA]$	Máxima Corriente Inversa $[kA]$
Ensayo	$7,56$	$20,460$	$10,675$	$3,211$
Simulación Antes	$7,469$	$20,005$	$8,318$	$1,479$
Error relativo $\%$	$1,08$	$9,09$	$28,33$	$117,03$
Simulación Después	$7,49$	$20,479$	$8,319$	$1,493$
Error relativo $\%$	$0,93$	$9,18$	$28,322$	$114,98$

Tabla 5.17: *Datos del ensayo* 2 *y de las simulaciones resultantes del prototipo final considerando el banco de condensadores real. Fuente: Elaboración propia.*

Los datos de simulación que presentan una menor desviación de la medición del ensayo, en este caso, son los que se toman después de éste.

Al considerar los parámetros reales del condensador, se tiene que el error del tiempo de frente disminuye considerablemente a valores admisibles entre $0,57$ y $1,95\,\%$.

El error del tiempo de cola del impulso se mantiene entre un $9,02$ y $10,57\,\%$, en el caso de las corrientes máximas directas, se tiene que éste casi triplica su magnitud, estando entre $27,98$ y $28,33\,\%$, sin embargo, este valor depende netamente de la tensión de carga del banco de condensadores, por lo cual, es fácil y sumamente ajustable.

Para las corrientes inversas se tiene que este error aumenta mucho, sin embargo este comportamiento sigue estando dentro de norma tanto para el caso de las simulaciones como para el caso de los ensayos reales.

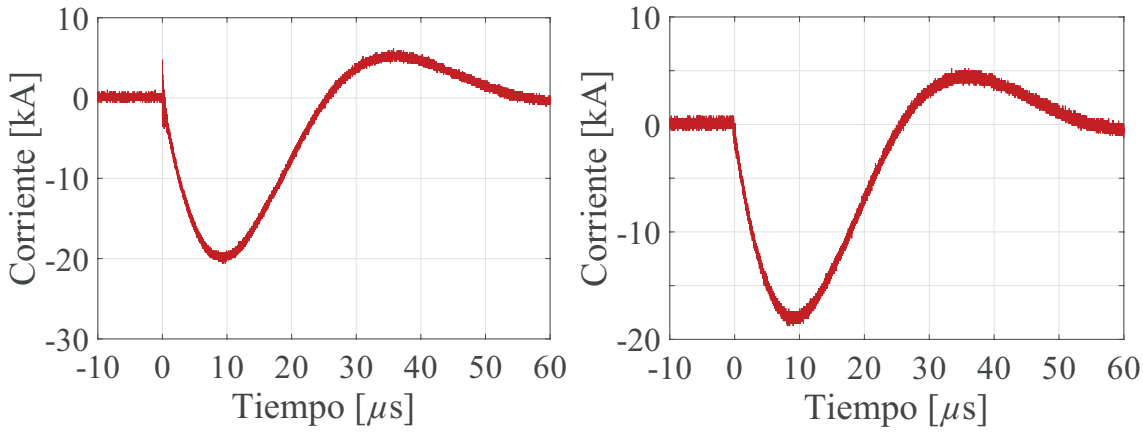
Como el error del tiempo de frente bajó, se descartan las simulaciones realizadas considerando el banco de condensadores como ideal.

Se observo en el laboratorio que el ajuste de la inductancia cambió levemente en este tipo de impulso.

Ensayos a $20\ [kA]$ en corto circuito

Luego se realizaron ensayos con una tensión de carga de $V_0 = 40\ [kV]$ con lo que se esperaba tener una onda tipo $8/20$ de $20\ [kA]$ de magnitud aproximadamente, las ondas resultantes se grafican en la Figura 5.23.

Se observa que en el ensayo 4 el ruido bajo considerablemente, esto se debe a que se realizó la medición con otra punta de osciloscopio en paralelo con la que se tomaban los datos originalmente, entregando una mejor respuesta ante el impulso.



(a) *Ensayo* 3 ***(b)*** *Ensayo* 4

Figura 5.23: *Mediciones del ensayo 3 y 4 del prototipo final considerando una tensión de carga de* $40\ [kV]$ *resultando un impulso de* $20\ [kA]$. *Fuente: Elaboración propia.*

Por análisis de los gráficos en el osciloscopio se obtuvieron las siguientes magnitudes mostradas en 5.18.

Por lo tanto se aprecia que en ambos ensayos los parámetros corresponden a los valores de norma especificados en IEC62475 [14].

Ensayo	3	4
Tiempo Frente $[\mu s]$	$7,71$	$7,56$
Tiempo Cola $[\mu s]$	$18,7$	$18,6$
Máxima Corriente Directa $[kA]$	$20,627$	$18,763$
Máxima Corriente Reversa $[kA]$	$6,176$	$5,243$

Tabla 5.18: *Datos de las ondas resultantes para los ensayos 3 y 4 del prototipo final. Fuente: Elaboración propia.*

N° Ensayo	Parámetro	Antes del ensayo	Después del ensayo	Variación %
3	Inductancia $[\mu H]$	$10,76$	$10,91$	$1,14$
	Resistencia $[\Omega]$	$0,8987$	$0,8957$	$0,33$
4	Inductancia $[\mu H]$	$10,78$	$10,96$	$1,67$
	Resistencia $[\Omega]$	$0,8940$	$0,8948$	$0,09$

Tabla 5.19: *Variación de los parámetros del circuito para un impulso $8/20$ de 20 $[kA]$ medidos a $18,8$ $[kHz]$ en el prototipo final para el ensayo 3 y 4. Fuente: Elaboración propia.*

Si el circuito se simula con sus datos reales se tiene que los tiempos de frente poseen un error bastante pequeño con respecto a la simulación entre $0,01$ y $3,30\,\%$ lo que es aceptable para dicho parámetro.

Ensayo 3 y simulaciones	Tiempo Frente $[\mu s]$	Tiempo Cola $[\mu s]$	Máxima Corriente Directa $[kA]$	Máxima Corriente Inversa $[kA]$
Ensayo	$7,71$	$18,7$	$20,627$	$6,176$
Simulación Antes	$7,464$	$20,431$	$16,638$	$2,954$
Error relativo $\%$	$3,30$	$8,47$	$23,98$	$109,03$
Simulación Después	$7,535$	$20,595$	$16,594$	$3,008$
Error relativo $\%$	$2,32$	$9,20$	$24,30$	$105,30$

Tabla 5.20: *Datos del ensayo 3 y de las simulaciones resultantes del prototipo final considerando el banco de condensadores real. Fuente: Elaboración propia.*

Ensayo 4 y simulaciones	Tiempo Frente $[\mu s]$	Tiempo Cola $[\mu s]$	Máxima Corriente Directa $[kA]$	Máxima Corriente Inversa $[kA]$
Ensayo	$7,56$	$18,6$	$18,763$	$5,243$
Simulación Antes	$7,480$	$20,609$	$16,658$	$2,989$
Error relativo $\%$	$1,07$	$9,75$	$12,64$	$75,45$
Simulación Después	$7,559$	$20,648$	$16,579$	$3,025$
Error relativo $\%$	$0,01$	$9,92$	$13,18$	$73,32$

Tabla 5.21: *Datos del ensayo 4 y de las simulaciones resultantes del prototipo final considerando el banco de condensadores real. Fuente: Elaboración propia.*

En el caso del tiempo de cola se encuentran entre $8,47$ y $9,92\,\%$, si bien esta diferencia puede sacar a la onda de la tolerancia de norma, si se maneja de forma adecuada, ajustando los valores del circuito para acercar lo

más posible la simulación a 20 $[\mu s]$ no debería existir problema alguno dado que la tolerancia admitida es de 20 % para este parámetro.

Si se observan las mediciones y simulaciones de corriente, se tiene que las diferencias comienzan a aumentar respecto a los ensayos anteriores. En el caso de la corriente directa, se tiene que este error se encuentra entre los $12,64\,\%$ y $24,30\,\%$ haciendo que la onda pudiese quedar fuera de los parámetros de norma.

El error de corriente reversa no es crítico salvo en condiciones que este valor sobrepase la tolerancia de norma, la diferencia que existe entre la simulación y el ensayo en cuanto a la corriente reversa es considerablemente mayor en el caso 3 comparado con el 4, sin embargo todas estas magnitudes cumplen con los niveles exigidos por IEC 62475 [14].

Se observó que el ajuste de la inductancia cambió notablemente en este tipo de impulso, por lo que luego de cada impulso, se debió ajustar nuevamente ya que el campo magnético producido desplaza el cilindro de aluminio para esta magnitud de corriente.

Ensayos a descargador de sobretensión ABB MWK4

Para comprobar el correcto funcionamiento del circuito se ensaya el descargador de sobretensión MWK4 de ABB.

Las pruebas se realizan a 0.5, 1 y 2 veces su corriente nominal según se especifica en IEC60099-4 [**?**], para lograr esto se debe cargar el banco de condensadores a 22 $[kV]$, 33 $[kV]$ y 55 $[kV]$ según las simulaciones realizadas a los modelos de IEEE y de Pinceti-Guiannettoni.

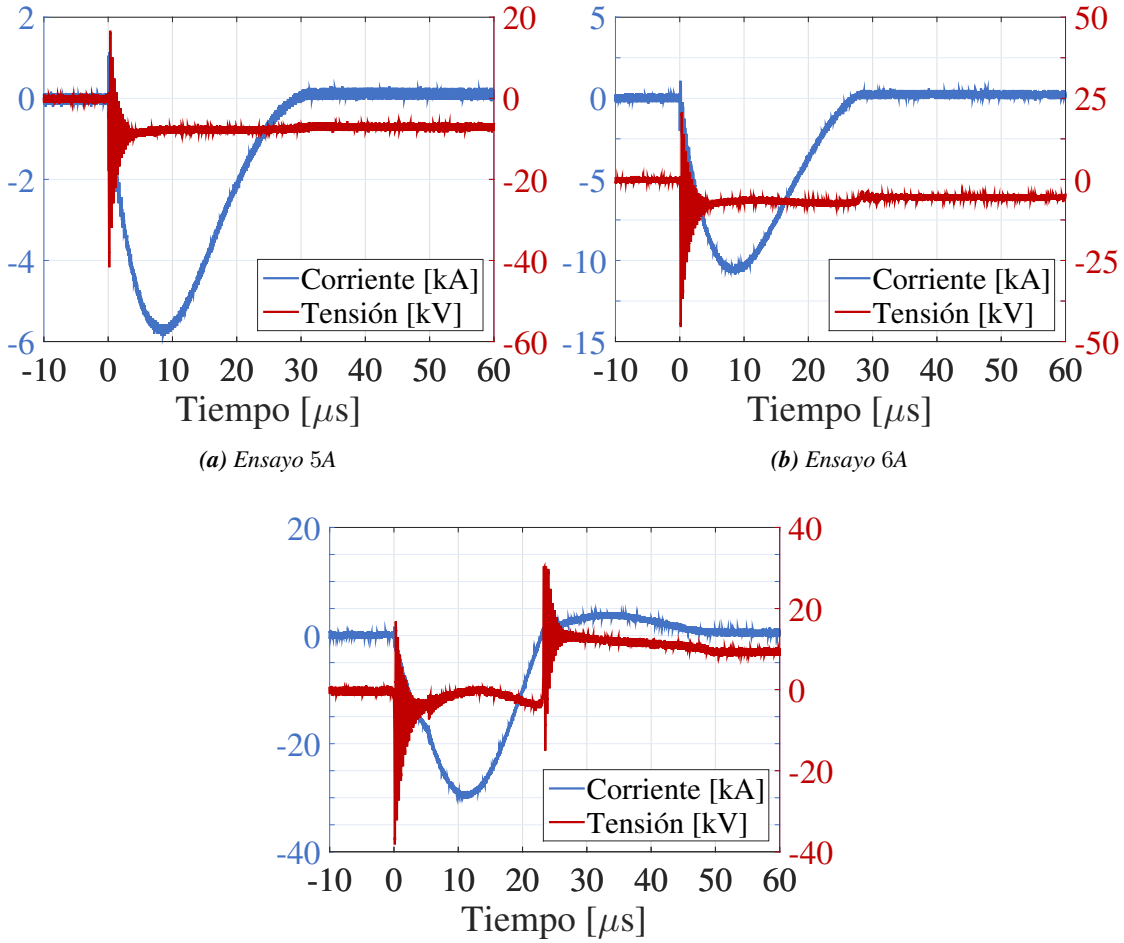
El modelo utilizado finalmente para realizar las simulaciones del descargador es el de la IEEE por arrojar un menor error con la hoja de datos.

En primera instancia la tensión residual del descargador se midió con un divisor de tensión capacitivo, donde:

Parámetro	Valor
C_1	1200 $[pF]$
C_2	$2,1$ $[\mu F]$
Factor	1751

Tabla 5.22: *Parámetros del divide sor capacitivo utilizado para medir la tensión residual del descargador ante ensayo de tensión residual. Fuente: Elaboración propia.*

Los resultados se muestran en la Figura 5.24, los valores característicos de las ondas se muestran en la Tabla 5.23 y la variación de los parámetros del circuito utilizado en la Tabla 5.24.



(a) *Ensayo 5A*

(b) *Ensayo 6A*

(c) *Ensayo 7A*

Figura 5.24: *Mediciones del ensayo 5, 6 y 7 del prototipo final, las que se realizan al descargador de sobretensión para conocer su tensión residual, se consideró una tensión de carga de 22 $[kV]$, 33 $[kV]$ y 55 $[kV]$ respectivamente. Fuente: Elaboración propia.*

Ensayo	5A	6A	7A
Tiempo Frente $[\mu s]$	$6,50$	$7,16$	$10,25$
Tiempo Cola $[\mu s]$	$18,3$	$17,9$	$19,0$
Máxima Corriente $[kA]$	$-5,850$	$-10,862$	$-30,184$
Máxima Tensión $[kV]$	$-41,675$	$-45{,}527$	$-38{,}173$

Tabla 5.23: *Datos de las ondas resultantes para los ensayos 5A, 6A y 7A del prototipo final. Fuente: Elaboración propia.*

N° Ensayo	Parámetro	Antes del ensayo	Después del ensayo	Variación %
5A	Inductancia $[\mu H]$	$10,75$	$10,75$	$0,00$
	Resistencia $[\Omega]$	$0,8943$	$0,8975$	$0,36$
6A	Inductancia $[\mu H]$	$10,78$	$10,75$	$0,28$
	Resistencia $[\Omega]$	$0,9001$	$0,9002$	$0,01$
7A	Inductancia $[\mu H]$	$10,74$	$11,47$	$6,80$
	Resistencia $[\Omega]$	$0,9034$	$0,8904$	$1,44$

Tabla 5.24: *Variación de los parámetros del circuito para tensión residual de descargador medidos a* $18,8$ $[kHz]$ *en el prototipo final para el ensayo* 5*A,* 6*A y* 7*A. Fuente: ElaBoración propia.*

A simple vista el perfil de corrientes del descargador concuerda con las simulaciones realizadas previamente, exceptuando el ensayo 7A donde la onda de corriente sufre un corte a los 7 $[\mu s]$ aproximadamente y ademas se presenta una corriente reversa.

Si se revisan los datos correspondientes al resultado buscado, el único ensayo que cumple con los valores de norma en cuanto a la onda $8/20$ es el 6A, los otros ensayos se desvían en el parámetro de máxima corriente y tiempo de frente.

Debido a problemas técnicos, se realizaron dos veces cada ensayo al descargador con un tiempo de espera entre las mediciones de 5 a 10 $[min]$ aproximadamente, sin embargo, dicho tiempo no fue suficiente para que el descargador se enfriara, razón por la cual la medición 5.24c ronda los 30 $[kA]$.

El tiempo de enfriamiento del descargador se comprende entre los 45 y 60 $[min]$ según el fabricante, por su parte la norma [**?**] establece que los ensayos deberán esperar hasta que la temperatura del descargador sea igual a la temperatura ambiente.

Adicionalmente, se distingue un quiebre en la forma de onda, el que se puede deber a una deformación momentánea del cilindro interno de la bobina o a un problema del descargador ocasionado por la energía acumulada anteriormente.

Se debe destacar el hecho de que la onda de corriente del ensayo 7A incluso cuenta con una parte corriente reversa, comportamiento completamente inesperado al analizar un descargador de las características presentadas.

Al comparar los ensayos con simulaciones obtenidas utilizando los parámetros medidos se tiene que las simulaciones muestran una corriente máxima considerablemente menor que la simulada anteriormente.

Como las ondas de tensión están fuertemente distorsionadas debido a que la medición de tensión se realiza utilizando un divisor capacitivo, considerando que la tensión estabilizada y la especificada por el fabricante del descargador es menor a 20 $[kV]$ se opta por realizar nuevos ensayos utilizando para la medición una punta de tensión Tektronix $P6015A$.

Ensayo 5A y simulaciones	Tiempo Frente $[\mu s]$	Máxima Corriente Directa $[kA]$	Máxima Tensión Descargador $[kV]$
Ensayo	$6,50$	$-5,850$	$-41,675$
Simulación Antes	$7,421$	$-4,427$	$-11,445$
Error relativo $\%$	$12,41$	$32,15$	$264,13$
Simulación Después	$7,415$	$-4,422$	$-11,444$
Error relativo $\%$	$12,34$	$32,30$	$264,16$

Tabla 5.25: *Datos del ensayo 5A y de las simulaciones resultantes del prototipo final con descargador MWK4. Fuente: Elaboración propia.*

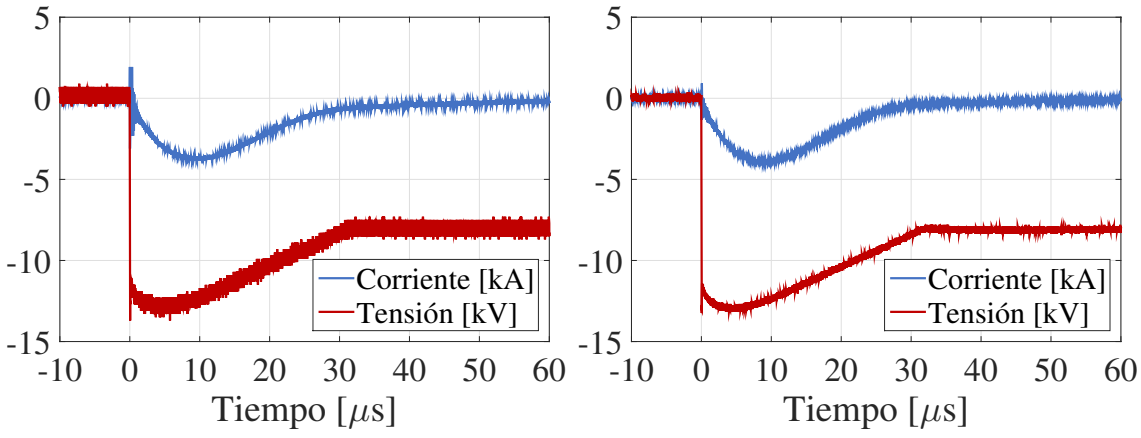
Ensayo 6A y simulaciones	Tiempo Frente $[\mu s]$	Máxima Corriente Directa $[kA]$	Máxima Tensión Descargador $[kV]$
Ensayo	$7,16$	$-10,862$	$-45,527$
Simulación Antes	$7,568$	$-8,749$	$-12,146$
Error relativo $\%$	$5,38$	$24,15$	$274,83$
Simulación Después	$7,543$	$-8,755$	$-12,148$
Error relativo $\%$	$5,07$	$24,07$	$274,77$

Tabla 5.26: *Datos del ensayo 6A y de las simulaciones resultantes del prototipo final con descargador MWK4. Fuente: Elaboración propia.*

Ensayo 7A y simulaciones	Tiempo Frente $[\mu s]$	Máxima Corriente Directa $[kA]$	Máxima Tensión Descargador $[kV]$
Ensayo	$10,25$	$-30,184$	$-38,173$
Simulación Antes	$7,585$	$-17,526$	$-13,279$
Error relativo $\%$	$35,14$	$99,83$	$99,71$
Simulación Después	$7,920$	$-17,318$	$-13,198$
Error relativo $\%$	$29,42$	$99,83$	$99,71$

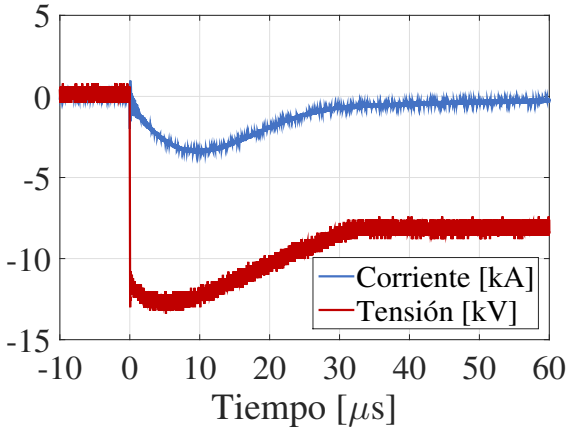
Tabla 5.27: *Datos del ensayo 7A y de las simulaciones resultantes del prototipo final con descargador MWK4. Fuente: Elaboración propia.*

Los resultados del segundo grupo de ensayos realizados al descargador se muestran en la Figura 5.25, los valores característicos de las ondas se muestran en la Tabla 5.28 y la variación de los parámetros del circuito utilizado en la Tabla 5.29.

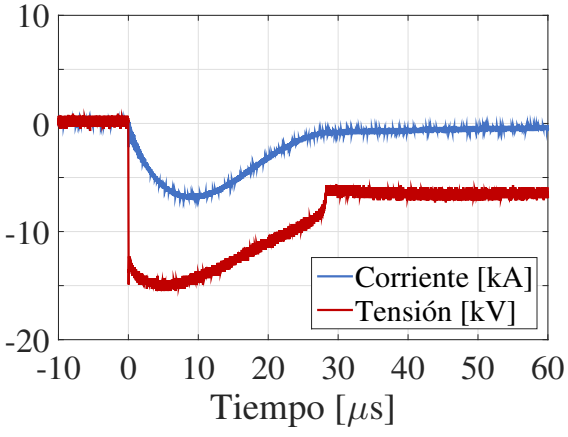


(a) *Ensayo* $5.1B$

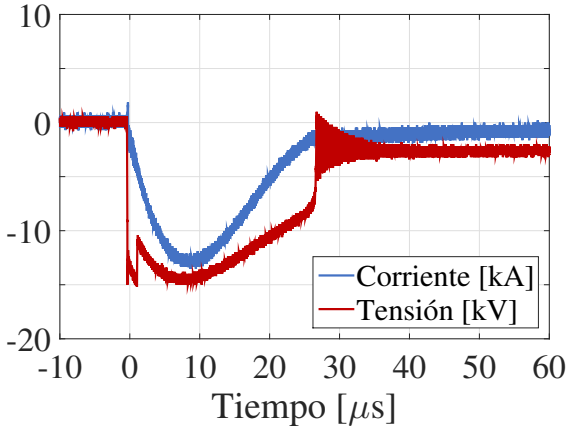
(b) *Ensayo* $5.2B$



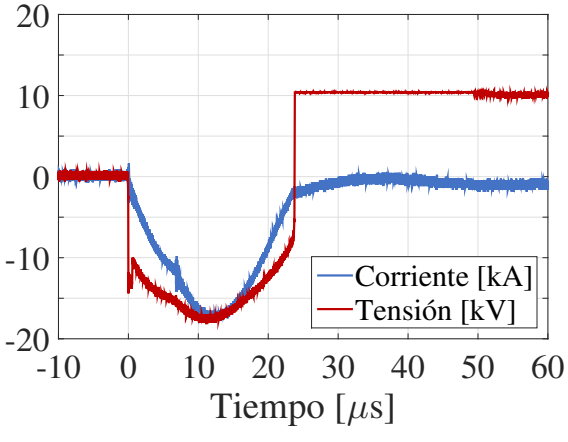
(c) *Ensayo* $5.3B$



(d) *Ensayo* $6B$



(e) *Ensayo* $7.1B$



(f) *Ensayo* $7.2B$

Figura 5.25: *Mediciones del ensayo* $5.1B$, $5.2B$, $5.3B$, $6B$, $7.1B$ *y* $7.2B$ *del prototipo final, las que se realizan al descargador de sobretensión para conocer su tensión residual medida con la punta de tensión Tektronix* $P6015A$, *se consideró una tensión de carga de* $22\ [kV]$, $33\ [kV]$ *y* $55\ [kV]$ *respectivamente. Fuente: Elaboración propia.*

Ensayo	5. 1B	5. 2B	5. 3B	6B	7. 1B	7. 2B
Tiempo Frente $[\mu s]$	$7,70$	$7,46$	$7,60$	$7,10$	$7,23$	$11,26$
Tiempo Cola $[\mu s]$	$21,6$	$20,0$	$21,9$	$20,3$	$18,8$	$21,0$
Máxima Corriente $[kA]$	$-3,846$	$-3,974$	$-3,496$	$-7,039$	$-13,518$	$-17,715$
Máxima Tensión $[kV]$	$-13,701$	$-13,240$	$-13,401$	$-15,501$	$-15,201$	-18, 201

Tabla 5.28: *Datos de las ondas resultantes para los ensayos* 5.1*B,* 5.2*B,* 5.3*B,* 6*B,* 7.1*B y* 7.2*B del prototipo final. Fuente: Elaboración propia.*

N° Ensayo	Parámetro	Antes del ensayo	Después del ensayo	Variación %
5. 1B	Inductancia $[\mu H]$	$10,82$	$10,81$	$0,09$
	Resistencia $[\Omega]$	$0,8755$	$0,8753$	$0,02$
5. 2B	Inductancia $[\mu H]$	$10,83$	$10,84$	$0,09$
	Resistencia $[\Omega]$	$0,8721$	$0,8731$	$0,11$
5. 3B	Inductancia $[\mu H]$	$10,79$	$10,72$	$0,65$
	Resistencia $[\Omega]$	$0,9034$	$0,9083$	$0,54$
6B	Inductancia $[\mu H]$	$10,82$	$11,07$	$2,31$
	Resistencia $[\Omega]$	$0,8982$	$0,8794$	$2,09$
7. 1B	Inductancia $[\mu H]$	$10,72$	$10,89$	$1,59$
	Resistencia $[\Omega]$	$0,9080$	$0,9253$	$1,91$
7. 2B	Inductancia $[\mu H]$	$10,78$	$11,59$	$7,51$
	Resistencia $[\Omega]$	$0,9024$	$0,8865$	$1,76$

Tabla 5.29: *Variación de los parámetros del circuito para tensión residual de descargador medidos a* $18,8$ $[kHz]$ *en el prototipo final para el ensayo* 5*B,* 6*B y* 7*B. Fuente: Elaboración propia.*

Basándose en el perfil gráfico de los datos, se escogen los ensayos 5.2B, 6B y 7.1B para realizar las simulaciones con los parámetros reales del circuito.

Ensayo 5.2B y simulaciones	Tiempo Frente $[\mu s]$	Máxima Corriente Directa $[kA]$	Máxima Tensión Descargador $[kV]$
Ensayo	$7,46$	$-3,974$	$-13,240$
Simulación Antes	$7,491$	$-4,453$	$-11,448$
Error relativo $\%$	$0,42$	$10,75$	$15,66$
Simulación Después	$7,493$	$-4,450$	$-11,448$
Error relativo $\%$	$0,43$	$10,70$	$15,66$

Tabla 5.30: *Datos del ensayo* 5.2*B y de las simulaciones resultantes del prototipo final con descargador MWK4. Fuente: Elaboración propia.*

Ensayo 6B y simulaciones	Tiempo Frente $[\mu s]$	Máxima Corriente Directa $[kA]$	Máxima Tensión Descargador $[kV]$
Ensayo	$7,10$	$-7,039$	$-15,501$
Simulación Antes	$7,576$	$-8,747$	$-12,143$
Error relativo $\%$	$6,29$	$19,52$	$10,36$
Simulación Después	$7,71$	$-8,754$	$-12,129$
Error relativo $\%$	$7,94$	$19,58$	$10,49$

Tabla 5.31: *Datos del ensayo* $6B$ *y de las simulaciones resultantes del prototipo final con descargador MWK4. Fuente: Elaboración propia.*

Ensayo 7.1B y simulaciones	Tiempo Frente $[\mu s]$	Máxima Corriente Directa $[kA]$	Máxima Tensión Descargador $[kV]$
Ensayo	$7,23$	$-13,518$	$-15,201$
Simulación Antes	$7,568$	$-17,506$	$-13,280$
Error relativo $\%$	$4,47$	$22,78$	$14,46$
Simulación Después	$7,616$	$-17,335$	$-13,252$
Error relativo $\%$	$5,07$	$22,02$	$14,71$

Tabla 5.32: *Datos del ensayo* $7.1B$ *y de las simulaciones resultantes del prototipo final con descargador MWK4. Fuente: Elaboración propia.*

Se observa que en estos ensayos la forma de onda de tensión no posee las oscilaciones que mostraba anteriormente, por lo que se valida la medición con la punta de prueba Tektronix.

Para el caso de las Figuras 5.25a, 5.25b, 5.25c y 5.25d, se tiene que a primera vista las formas de onda mostradas coinciden con las simuladas, sin embargo, difieren en cuanto a valores máximos de tensión y corriente.

En las Figuras 5.25e y 5.25f se aprecia un corte en la onda de tensión e incluso en el ultimo gráfico la tensión residual del descargador cambia de polaridad, este comportamiento se debe a que el equipo no estaba totalmente frío al momento de realizar las mediciones que lo sobre exigían, por lo que actúa de forma inesperada.

Se distingue que existe un cambio en la tendencia de las magnitudes del circuito en el caso de la Figura 5.25f cerca de los 7 $[\mu s]$, por lo que se infiere que dicho valor de corriente sobrepasa la capacidad de rigidez mecánica actual del recubrimiento metálico de la inductancia, entonces se deforma.

Si se analizan los valores característicos de las ondas se tiene que la diferencia entre el valor de simulación y el de los ensayos difieren en aproximadamente un $0,42$ a $0,43\,\%$ en el ensayo 5.2B, un $6,29$ a un $7,94\,\%$ en el 6B y entre un $4,47$ y $5,07\,\%$ para el caso 7.1B considerando el tiempo de frente.

Prácticamente todos los ensayos cumplen con el tiempo de frente establecido por norma, excepto el ensayo 7.2B.

Para la comparación de la corriente máxima se tiene que los errores del ensayo 5.2B ronda el $10,75\,\%$, para el caso del ensayo 6B se tiene que la discrepancia alcanza un $19,58\,\%$ y para el 7.1B un $22,78\,\%$, resultados que se encuentran bastante cercanos a lo que se esperaba.

Si se observa las diferencias de la tensión máxima del descargador se tiene que en el caso $5.\,2$B el error es de $15,66\,\%$, en 6B alcanza $10,49\,\%$ y para $7.\,1$B $14,71\,\%$. Destaca el hecho que los errores no son tan grandes como con respecto a la simulación considerando el daño que presenta la probeta.

La única pieza que resulto con daños luego de los ensayos fue el núcleo de aluminio de la bobina, lo que se aprecia en la Figura 5.26, por lo tanto se debe mejorar el sistema de soporte del núcleo, así como el soporte de la bobina la que se resentirá mecánicamente por el campo magnético ante un flujo de corriente elevado.



Figura 5.26: *Cilindro de aluminio con refuerzo de la bobina abollado luego de las ultimas pruebas. Fuente: Elaboración propia.*

Luego de terminar el prototipo se realizan ensayos a descargadores pertenecientes a una desalinizadora para comprobar su estado cuyos resultados y cáculos se encuentran en el Anexo K.

Gracias a estas últimas experiencias realizadas con un par de puntas de medición directa Tektronix $P6015A$, se pudo establecer que la forma de onda entregada cumple con el valor de norma en cuanto al tiempo de frente, sin embargo, para los valores máximos de corriente se tiene que distan de lo que se obtiene en las simulaciones. Como se comprueba que los descargadores se encuentran en buen estado se tiene que la punta de prueba de corriente debe ser corregida a $R_{sh} = 6,021[\Omega]$.

5.2.5 Observaciones generales resultados prototipo final

En resumen se tiene que el prototipo funciona con margenes de error aceptable en cuanto a tiempo de frente llegando a un valor máximo de $3,30\,\%$ en los ensayos de corto circuito y de hasta un $7,94\,\%$ para los realizados en el descargador.

Los errores presentes en el tiempo de cola para los ensayos de corto circuito ascienden a $10,57\,\%$ para el caso mas desfavorable, por lo tanto, el equipo cumple con el requisito de los tiempos establecidos por la norma si se ajustan correctamente los parámetros del circuito.

Para la corriente máxima se presentan los mayores errores llegando incluso al $28,33\,\%$ para los ensayos en corto circuito y hasta un $22,78\,\%$ con el descargador, estos errores pueden deberse al ajuste de tension de carga durante el ensayo, afortunadamente, las diferencias son manejables incluso considerando la probeta

dañada, cambiando el nivel de carga de los condensadores.

Si se aprecia la tensión residual del descargador se tiene que el error alcanzado con respecto a la simulación es $15,66\,\%$ en el peor de los casos.

Analizando los ensayos desde el punto de vista de prueba normada para el descargador, se tiene que éstas no cumplen con lo requerido ya que no alcanzan los valores nominales necesarios, debido a la consideración del banco de condensadores como ideal al momento de realizar los cálculos de la tensión de carga requerida.

A pesar de que el descargador se encontraba dañado y que los ensayos no cumplen con la norma establecida, los resultados son bastante parecidos a lo simulado asumiendo un descargador en optimas condiciones, por lo tanto se consideran exitosos.

Según a las mediciones realizadas a los descargadores pertenecientes a la desalinizadora, se concluye que el valor de la resistencia shunt debe ser corregido a $R_{sh} = 6,021[\Omega]$.

Se dejan para oportunidades futuras la contrastación del valor de resistencia shunt en un ensayo de cortocircuito del GIC, el mejoramiento del núcleo que hace variar la magnitud de la bobina para que resista corrientes elevadas de impulso ($30\ [kA]$) sin deteriorarse y construir el modelo propuesto de generador de impulsos de corrientes.

CAPÍTULO 6

LÍMITES DE OPERACIÓN

SECCIÓN 6.1

Límite de los equipos

Para que el equipo funcione correctamente se deben considerar los siguientes límites de operación:

- El nivel de tensión máximo que soporta el banco de condensadores en su configuración paralelo es $60\ [kV]$. No se considera el funcionamiento de éste en configuración serie.
- El elemento que actualmente limita la operación del generador de impulsos es el recubrimiento metálico de la bobina, ya que las fuerzas electromagnéticas desarrolladas para una corriente de más de $20\ [kA]$ con una forma de onda $8/20$ es suficiente como para deformar el cilindro incluso con reforzamiento de madera. Si se modifica este soporte, el esfuerzo se lo llevará la bobina por lo que se deberá mejorar sus cualidades mecánicas mediante algún tipo de amarra aislante, pegamento, resina u otro cilindro que tenga un tamaño adecuado previniendo la expansión de ésta.
- Si se aumenta la corriente de diseño del GIC se debe considerar la variación térmica de la resistencia de medida y la resistencia de ajuste quienes limitarán la corriente máxima.
- Ciclo de trabajo estará establecido por el equipo de carga y la probeta a utilizar ya que con la fuente de carga actual el proceso toma aproximadamente 2 minutos en realizarse, sin considerar la desenergización y las mediciones a los equipos del circuito luego de cada ensayo.
- Los equipos descargadores consideran tiempos de enfriamiento entre ensayos que se encuentran entre $45\ [min]$ a $1\ [hora]$ por lo que en el caso de que se deseen analizar se deberá disponer de tiempo o dispositivos suficientes para su análisis, comprobando minuciosamente la tensión de carga del banco de condensadores antes del ensayo y el funcionamiento de los equipos de medida.
- Vale destacar que según las simulaciones realizadas, éste equipo es capaz de realizar ensayos hasta 2 veces la corriente nominal del descargador MWK4, sin embargo, si se desea evaluar uno de clase mayor se debe considerar un banco de condensadores que soporte una tensión de carga más alta.

SECCIÓN 6.2

Recomendaciones de uso

Se deben ejecutar todas las simulaciones pertinentes y posibles para establecer los ajustes de GIC antes de realizar cualquier prueba, en caso de que incluya alguna probeta, se debe simular su comportamiento cuando éste sea conocido.

Si es que no se conoce el modelo equivalente de la probeta, se recomienda realizar un ajuste para la onda requerida $(8/20)$ en corto circuito y luego aumentar poco a poco la tensión de descarga del GIC, hasta que se produzca el impulso buscado.

Es recomendable realizar previamente ensayos de cortocircuito para conocer el nivel de desviación de medición de tensión utilizado, ya que la magnitud de corriente depende directamente de la tensión de carga del banco de condensadores y es sumamente sensible a este valor.

Se debe destacar que el equipo Fluke $PM6306$ es fundamental para la calibración del circuito, por lo cual se debe contar con él al momento de usar el GIC o utilizar otro sistema de medición que permita analizar en frecuencia $(18,8\ [kHz])$ y en tiempo real los parámetros del circuito.

Se recomienda realizar el siguiente procedimiento de calibración y operación del equipo:

- Apagar todo equipo de carga del banco de condensadores.
- Descargar todos los equipos con la pértiga de tierra.
- Medir entre el extremo fijo del espinterómetro de disparo y el electrodo de tierra del banco de condensadores, lo que entregará los parámetros reales del banco de condensadores en su estado actual para considerar la parte resistiva en la calibración del equipo.
- Medir entre el extremo móvil del espinterómetro de disparo y tierra, resultado que arrojará la calibración del equipo en dicho momento.
- Calibrar la inductancia variable para que cumpla con el valor deseado desplazando el núcleo de aluminio.
- Calibrar la resistencia para que cumpla con el valor deseado considerando también la resistencia interna del banco de condensadores.
- Probar el equipo realizando impulso de cortocircuito con tensión reducida pero suficiente para accionar el circuito con el espinterómetro de disparo.

Como el factor térmico de seguridad de los condensadores es $3,72$ se sugiere realizar máximo 3 ensayos seguidos sin comprobar la temperatura de estos.

CAPÍTULO 7

EVALUACIÓN DE COSTOS

SECCIÓN 7.1

Equipos constitutivos GIC

Las partes con las que conformarán el modelo propuesto son las siguientes:

1. Banco de condensadores $60[kV]$.
2. Bobina variable.
3. Resistencia variable.
4. Flejes de conexión.
5. Resistencia shunt blindada.
6. Soporte banco condensadores.
7. Espinterómetros de descarga.
8. Espinterómetros de seguridad.
9. Banco de pruebas.
10. Pértiga de descarga.
11. Fuente de carga.

Como se cuenta con equipos disponibles en el laboratorio se decidió utilizarlos para confeccionar el prototipo de pruebas.

Ya que el equipo a diseñar es para fines docentes, se asume que las uniones, espinterómetros, aislantes, pértiga y fuente de carga están disponibles dentro del laboratorio y sólo se considera el banco de condensadores para la evaluación por ser lo mas costoso.

Las especificaciones de distancias para el diseño propuesto están contenidas en el Anexo I, cuya distribución se realiza de acuerdo con el prototipo construido en el laboratorio.

Los cálculos realizados para la separación del espinterómetro de seguridad se encuentran en el Anexo H, mientras que los planos de referencia para la construcción del GIC se encuentran en el Anexo I.

SECCIÓN 7.2

Cotización de equipos

Los condensadores, debido a sus especificaciones de tensión y corriente de impulso, se cotizaron fuera de Chile en dos empresas Chinas las que entregaron las siguientes valores.

Shanghai Qiyu Optoelectronics Technology Co. Ltd.					
Tipo	Precio FOB Shanghai	Dimensión	Envío al aeropuerto	Costo total	Corriente Máxima
Oil	$1250\,USD/unit$	$143x343x660\,[mm]$	$1870\,USD$	$9370\,USD$	$7,5\,[kA]$
Dry	$2480\,USD/unit$	$-$	$1870\,USD$	$16750\,USD$	$>8\,[kA]$
Xian-Xu & Hui Electromechanical Technology Co. Ltd.					
Tipo	Precio EXW Xian	Dimensión	Envío al aeropuerto	Costo total	Corriente Máxima
Oil	$386\,USD/unit$	$122x340x543\,[mm]$	$1613\,USD$	$3833\,USD$	$4\,[kA]$
Dry	$420\,USD/unit$	$260x140x300\,[mm]$	$1613\,USD$	$4133\,USD$	$\leq 4\,[kA]$

Tabla 7.1: *Cotizaciones y especificaciones de los condensadores cotizados. Fuente: Elaboración propia con datos de Shanghai Qiyu Optoelectronics Technology Co. Ltd. y Xian-Xu & Hui Electromechanical Technology Co. Ltd.*

Observando los costos de envío al país se tiene que la alternativa mas conveniente es la de Xian-Xu & Hui, sin embargo el nivel de corriente soportado por cada condensador es menor en este caso sumado al hecho de que el envío EXW hace referencia a que el fabricante se hace responsable del producto hasta la salida de su fábrica y no del transporte de los mismos.

Si se requiere utilizar estos equipos en otro tipo de proyecto la empresa Shanghai Qiyu Optoelectronics ofrece la mejor solución ya que considera un rango mas alto de corriente.

En el caso presentado para este trabajo, se opta por la opción con mayor factor de seguridad, ya que al ser un equipo con fines docentes estará expuesto a errores de cálculo que pueden exigir el generador llegando fácilmente a $30\,[kA]$.

Los equipos que se deberán construir para el GIC son:

1. Resistencia variable.
2. Soporte del GIC.
3. Espinterómetro de seguridad.
4. Bobina variable.

Estos equipos consideran un costo despreciable comparado con la adquisición del banco de condensadores el que se encuentra entre un 5 y $10\,\%$ del costo de los condensadores.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y OBSERVACIONES GENERALES

SECCIÓN 8.1

Conclusiones

En la revisión bibliográfica se descubre que existen generadores de impulso de corriente que son utilizados para tronadura de rocas, otros que pueden generar mas de un impulso para simular la descarga de un rayo en equipos aeronáuticos, así como también existen los que generan impulsos normados para probar equipos como descargadores de sobretensión. Por lo tanto, dado que el equipo es con fines docentes, por su simpleza y robustez se escoge un impulso de corriente tipo $8/20$.

Al realizar la evaluación técnica se opta por utilizar los condensadores de $60\ [kV]$ y $1\ [\mu f]$ disponibles en el laboratorio, sabiendo esto, se calculan los parámetros del circuito, se simula su comportamiento y definen las características de los equipos para el GIC.

Al tener el prototipo terminado se descubre que no existen elementos de medida capaces de comprobar el funcionamiento del GIC, por lo cual se procede a diseñar, confeccionar y evaluar el funcionamiento de una resistencia shunt con la cual medir el comportamiento del equipo.

Se establece que el equipo puede operar hasta los $60\ [kV]$ de carga para el banco de condensadores, una corriente simulada máxima de $20\ [kA]$ y no realizar mas de 3 ensayos seguidos sin comprobar la temperatura de los equipos que componen el circuito.

Finalmente para la evaluación de costos del GIC se consideran solamente los condensadores que conforman el banco, al ser un equipo con fines docentes se prefiere la robustez eléctrica y mecánica de los equipos frente al precio por lo que la cotización asciende a un total de $16750\ USD$ para un grupo de 6 capacitores de $60\ [kV]$, $1\ [\mu F]$ y $> 8\ [kA]$ cada uno. El precio de los demás componentes del circuito son de valor despreciable frente al costo de los condensadores.

La medición de corriente se realiza mediante una resistencia shunt que no varía significativamente por efecto Joule, no sufre interferencias electromagnéticas y no genera una tensión peligrosa, mientras que la medición de tensión se realiza mediante la fuente de carga y una punta de prueba de Alta Tensión (Tektronix $P6015A$) que se conecta de forma directa al osciloscopio.

Los conductores deben poseer una sección que garantice que no se sobre calentarán ni que presentaran una resistencia elevada que evite el ajuste necesario de los parámetros del circuito, por lo tanto, considerando la limitación térmica para un impulso de corriente de $20\ [kA]$, se tiene que la sección mínima de cobre a utilizar será $1,111\ [mm^2]$ y de Nicrom 6015 será $1,408\ [mm^2]$.

Si se considera la medición equivalente del banco de condensadores con su resistencia interna en serie, se tiene que por cada impulso de $20\ [kA]$ la energía disipada internamente es $483,54\ [J]$, es decir los

condensadores cuentan con un factor térmico de seguridad de $3,72$, es decir, los condensadores disponibles en el laboratorio resisten los ciclos de trabajo y descarga intempestiva.

El modelo más adecuado para simular el comportamiento no lineal del descargador ante un impulso $8/20$ es el propuesto por la IEEE, ya que se realiza iterando y ajustando su respuesta a la que indica el fabricante para dicho impulso produciendo un $0\,\%$ de error teórico. Sin embargo, el modelo de cálculo mas rápido de confeccionar es el Pinceti-Giannettoni, ya que solo necesita de los parámetros eléctricos entregados por el fabricante, sin necesidad de realizar iteraciones presentando errores del $1,4\,\%$ según referencia [21].

Se considera un banco de condensadores ideal para calcular los parámetros del circuito, pero al realizar las simulaciones se descubrió que existía una resistencia interna en los capacitores, valor que no estaba considerado inicialmente, por lo que se mide el banco con el equipo Fluke $PM6306$ y se corrigen las simulaciones.

Para los ensayos del prototipo final realizados con una corriente teórica de $10\ [kA]$ se tiene que:

- Se presenta cierta distorsión cuando comienza la medición del impulso de corriente.
- Las mediciones presentan un $7,01$ a $8,71\,\%$ cuando se consideraba un banco de pruebas ideal. Si se consideran las mediciones del banco de condensadores estas diferencias bajan a un rango de $0,57$ a $1,95\,\%$.
- Para el tiempo de cola se obtiene un error que ronda el $10\,\%$ en ambos casos.
- En el caso de las magnitudes de corriente se tiene que el error aumenta pero resulta sumamente ajustable cambiando la tensión de carga.
- Las corrientes inversas se mantienen dentro del rango de tolerancia.
- El ajuste de la inductancia cambia levemente con relación a su valor antes de los ensayos.

Para los ensayos del prototipo final realizados con una corriente teórica de $20\ [kA]$ se tiene que:

- Los tiempos de frente y cola consiguen errores pequeños comparables a los de los ensayos de $10\ [kA]$.
- Las magnitudes de corriente en el ensayo 4 son bastante mas acertadas que las del 3, lo que se debe al ajuste de tensión de carga.
- El ajuste del núcleo de la inductancia cambió notablemente por lo que se debe ajustar nuevamente este parámetro con cada medición.

Para los ensayos del prototipo final realizados al descargador $MWK4$ de ABB se tiene que:

- Al medir la tensión del descargador con un divisor capacitivo se aprecia una gran distorsión en la medida, por lo que se decide medir la tension de manera directa con una punta de tensión Tektronix $P6015A$, cuya medición entrega una distorsión despreciable.
- El equipo en prueba no alcanzó a enfriarse al realizar el ensayo 7A, por lo que al utilizar una tensión de carga de $55\ [kV]$ para lograr teóricamente un impulso de $20\ [kA]$ se llega a un impulso de $30\ [kA]$, incluso se aprecia una corriente inversa que circula por el descargador luego del impulso.

- Prácticamente todos los ensayos B cumplen con el parámetro de tiempo de frente establecidos por norma, excepto el último (7. 2B) donde el descargador no cumple con la respuesta simulada previamente por el desgaste térmico que presenta.

Los errores máximos de los ensayos de cortocircuito son $3,30\,\%$ para el tiempo de frente, $10,57\,\%$ en el tiempo de cola y $28,33\,\%$ en la magnitud de corriente por lo que se puede concluir que la onda tiene una forma aceptable por norma en cuanto a tiempo, pero no en cuanto a magnitud.

Los errores máximos obtenidos cuando se ensayó el descargador MWK4 de ABB son $7,94\,\%$ para el tiempo de frente, el tiempo de cola es despreciable para efectos de norma así que no se considera, $22,78\,\%$ en el caso de la magnitud de corriente y $15,66\,\%$ para la tensión residual considerando incluso que el dispositivo estaba dañado.

Según a las mediciones realizadas a los descargadores pertenecientes a la desalinizadora y de los errores obtenidos para los ensayos en corto circuito, se concluye que el valor de la resistencia shunt debe ser corregido a $R_{sh} = 6,021[\Omega]$.

Se establece como límite de carga los $60\,[kV]$ que soporta el banco de condensadores, no se debe sobrepasar los $20\,[kA]$ de corriente de descarga simulada para los ensayos a realizar con el GIC porque a corrientes mayores se comienza a deteriorar el cilindro, así como tampoco se podrán realizar mas de 3 ensayos seguidos con el GIC sin comprobar la temperatura de los componentes del circuito.

SECCIÓN 8.2
Recomendaciones

Se sugiere realizar una contrastación del valor de resistencia shunt obtenida en las mediciones realizadas en la desalinizadora con un ensayo en cortocircuito del GIC.

Se recomienda mejorar el cilindro de aluminio que permite variar la inductancia de la bobina, ya que éste se deforma con facilidad por las fuerzas magnéticas ejercidas al momento del impulso de corriente.

Se recomienda mejorar el sistema de fijación del cilindro de aluminio con la bobina, ya que la magnitud del campo magnético desplaza al cilindro dentro de la bobina cambiando su inductancia.

Se recomienda fabricar una bobina específica para el generador de impulsos que tenga las características de la bobina anterior considerando fijarla mecánicamente con un baño de resina o similar para evitar que las fuerzas de repulsión del campo magnético deformen el bobinado.

Al momento de soldar las resistencias shunt para la punta de prueba blindada se debe tener especial cuidado con el tubo de PVC interno, cuidando no deformar dicho cilindro.

Será necesario confeccionar un espinterómetro de disparo con características mecánicas más resistentes, ya que la descarga, provoca pérdida de material por el impacto del rayo en las esferas actuales.

Al momento de realizar la medición de los parámetros para su ajuste se deberá mantener en lo posible los flejes y conductores conectados en el circuito de descarga para evitar que la variación de algún parámetro importante afecte la forma de onda requerida.

SECCIÓN 8.3

Observaciones Generales

En cuanto al circuito utilizado para confeccionar el GIC se tiene que:

- El generador de impulsos de corriente más sencillo y confiable es el de perfil de onda $8/20$ cuyo circuito se muestra en la Figura 3.1.
- El circuito del GIC cuenta con una configuración de carga y otra de descarga. Dada la magnitud de energía del impulso, este tipo de configuraciones deben funcionar de manera alternada.
- Se puede realizar la carga del banco de condensadores con cualquier tipo de fuente continua de Alta Tensión, incluso con un rectificador de media onda.
- Para calcular los parámetros de un circuito que cumpla con los tiempos característicos de norma $8/20$ se puede utilizar el método de Imo-Schwab.

Respecto a la onda resultante del circuito de descarga es importante mencionar que:

- Su forma de onda depende del valor de sus componentes (resistencia, capacitancia e inductancia), pudiéndose lograr con el mismo circuito señales sobre-amortiguadas, sub-amortiguadas y críticamente amortiguadas.
- La magnitud de la onda es claramente sensible a la variación de la resistencia del circuito, siendo muy poco sensible a los cambios de inductancia y capacitancia.
- La magnitud del impulso de corriente tiene una dependencia lineal [1] con respecto a la tensión de carga, siendo este el valor fundamental para su ajuste, sus variaciones no afectan a los tiempos característicos de la onda.
- El tiempo de frente y de cola se ajusta con los elementos del sistema y la magnitud del impulso de corriente con la magnitud de tensión de carga del equipo.
- El tiempo donde se produce la magnitud máxima de la onda es sobre todo sensible a las variaciones de inductancia, quedando la variación de capacitancia en el segundo lugar y la de resistencia siendo la que menos afecta, estos valores presentan menor dispersión que los referentes a la sensibilidad de la magnitud.
- Cuando se evalúa una probeta que tenga características no lineales, se requiere la ayuda de algún tipo de software para el cálculo de respuesta del circuito, en este caso se utilizó el programa ATP.

La norma que regula los impulsos de corriente es la IEC 62475, de ella se deprende que:

- Para la determinación del tiempo de frente se toma como referencia los instantes donde ocurren el 10 y $90\,\%$ de la onda antes del máximo.

[1] Comprobado mediante simulaciones en ATP

- El impulso de corriente de tipo $8/20$ es sub-amortiguado por lo que tiene un máximo de polaridad inversa el que tiene una tolerancia que depende de los tiempos de frente y cola.
- El nivel de tolerancia aceptable para los tiempos de frente y de cola son del $20\,\%$.

En la etapa de diseño para el prototipo del GIC se realizan dos conjuntos se pruebas, utilizando finalmente con el tercer modelo implementado para las mediciones finales.

Para los ensayos con el primer prototipo, utilizando 5 condensadores, se aprecian los siguientes efectos:

- Distorsión en la señal medida con resistencias shunt sin blindaje a diferencia de la medición con la resistencia blindada que entrega una forma de onda sin mayores distorsiones en corrientes menores a $10\ [kA]$.
- Al sobrepasar los $10[kA]$, se tiene que la forma de onda medida es absolutamente errática debido a la deformación del núcleo de aluminio de la bobina que estaba sujeto sólo por la fuerza elástica de la lámina curva al intentar expandirse.
- Aparentemente la resistencia shunt blindada se deterioró al realizar los primeros ensayos a corriente elevada, su valor no se comprobó antes de los ensayos, pero cuando se midió no coincidía con el valor etiquetado.

Para los ensayos del segundo prototipo, utilizando 5 condensadores, se revisa nuevamente el impulso tipo $8/20$ en cortocircuito primeramente para luego pasar a la prueba del descargador, solo se mide corriente observando que:

- El perfil de onda mostrado por el descargador al operar con el GIC es bastante parecido al simulado, considerando tiempos de ensayo que cumplen con los valores especificados en la norma de ensayos IEC62475 [14] excepto en el caso del último, en el que (a priori) si se considera el valor inicial de la resistencia shunt es del orden de los $23\ [kA]$.
- La forma de onda de corriente se distorsiona al llegar a la cresta, lo que fue ocasionado por la deformación del núcleo de aluminio, la que incluso cortó un remache por esfuerzo de cizalle.
- Se establece que el espinterómetro de disparo de proximidad funciona de manera arbitraria por lo que se diseña y construye un espinterómetro vertical de accionamiento remoto para el prototipo final.
- La resistencia de medición se deterioró pasando desde $0,031\ [\Omega]$ a $0,072\ [\Omega]$ por lo que no se puede confiar en el valor de corriente obtenido en la segunda tanda de ensayos, dado esto se considera un rango de valores posibles y se construye una resistencia que cumpla con los requisitos planteados en la sección 3.5.1.

Para el tercer y último prototipo se refuerza el núcleo de aluminio con remaches y anillos de madera, se mejora la resistencia variable pasando a tener 5 filamentos y se opta por incluir un espinterómetro de desconexión de etapa de carga, ya que la fuente puede deteriorarse al momento del impulso. Las pruebas finales utilizan el banco de condensadores con 6 capacitores conectados en paralelo para evitar descargas indeseadas dada la proximidad de los mismos en el cajón de sujeción.

BIBLIOGRAFÍA

[1] *Impulse Current Test Systems - Type SSGA - 30-200kA*, Haefely Test AG, Lehnmattstrasse 353, CH-4052 Basel, Switzerland, Dic 2003.

[2] L. Spika. (2011) Innovator and innovations. [Online]. Available: https://web.archive.org/web/20110615095831/http://www.hungarianquarterly.com/no162/020.html

[3] Energosolar. (2008) Hungarian inventors and their inventions. [Online]. Available: https://web.archive.org/web/20120322223457/http://www.institutoideal.org/conteudo_eng.php?&sys=biblioteca_eng&arquivo=1&artigo=94&ano=2008

[4] E. Marx, "Versuche über die prüfung von isolatoren mit spannungsstößen," *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1925.

[5] F. Garnacho, A. Khamlichi, and I. Trasmonte, "Instalación de ensayo multidisciplinar para generar de impulsos de corriente tipo rayo," *Energía y Computación*, vol. X, no. 2, pp. 48–54, 2001.

[6] D. Miller, A. Leux, and P. Barnes, "The effects of steep-front, short-duration impulses on power distribution conpoments," IEEE, Tech. Rep., 1990.

[7] J. Pauly, J. Woodworth, M. Kanyakumari, and L. S., "Measurement of steep impulse residual voltage on surge arrrester blocks," IEEE, Tech. Rep., 2016.

[8] C. Prasertsang, N. Triuattanapiruk, and P. Yutthagowith, "A long duration impulse current generator for testing surge arrester in distribution systems," IEEE, Tech. Rep., 2013.

[9] C. Rojo, J. F. Lordoño, and A. Vergara, "Metodología para la contrucción de un generador de impulso de corriente 8/20μs," Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Publicación.

[10] P. Tuethong, P. Yutthagowith, and S. Maneerot, "Design and construction of a variable air-core inductor for lightning impulse current test on surge arresters," in *33d International Conference on Lightning Protection*, Estoril, Portugal, Sep 2016.

[11] S. F. B., "Generación de alta corriente," Transparencias, material estudio DIE UTFSM.

[12] F. Roman, F. Amortegui, F. Bojaca, and C. A. Gomez, *Ingeniería e Investigación*, ch. Construcción de un generador de impulsos de corriente para ensayo de pararrayos y del sistema asociado de medida, pp. 30–39.

[13] I. F. Gonos, N. Lontides, F. V. Topalis, and I. Stathopulos, "Analysis and design of an impulse current generator," Departament of electrical and computer engineering, High voltage laboratory, National Technical University of Athens, Greece, Tech. Rep., 2002.

[14] "High-current test techniques-definitions and requirements for test currents and measuring systems," International Electrotechnical Commission, International Standard IEC 62475, Sep 2010.

[15] E. Kuffel, W. S. Zaengl, and J. Kuffel, *High Voltage Engineering - Fundamentals*, 2nd ed., Newnes, Ed. Butterworth-Heinemann, 2000.

[16] J. L. Dinamarca, *Técnicas de Alta Tensión*. Valparaíso, Chile: Laboratorio de Alta Tensión - Universidad Técnica Federico Santa María, 2007.

[17] Y. A. Cenguel, *Heat Transfer A Practical Approach*, 2nd ed. McGraw-Hill, 2003.

[18] "Ieee recommended practice for testing insulation resistance of electric machinery," IEEE Standards Association, International Standard IEEE 43, December 2013.

[19] A. W. Z. J. S. Johnson, "D-c testing experience on rotating machine insulation," *AIEE Transacctions (Power Apparatus and Systems)*, vol. 76, pp. 416–420, 1957.

[20] I. W. G. 3.4.11, "Modeling of metal oxide surge arresters," *Transactions on power delivery*, vol. 7, no. 1, January 1992.

[21] P. Pinceti and M. Giannettoni, "A simplified model for zinc oxide surge arresters," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no. 2, pp. 393–398, April 1999.

[22] H. A. Wheeler, "Simple inductance formulas for radio coils," *Proceedings of the Intitute of radio Engineers*, vol. 16, no. 10, pp. 1398–1340, October 1928.

[23] D. V. V. Treeck, "Fracturamiento de rocas mediante tecnología de plasma," Apuntes asignatura de Gestión de la Innovación y Vigilancia Tecnológica.

[24] "High-voltage test techniques-part 4: Application guide for measuring devices," International Electrotechnical Commission, International Standard IEC 60060-4, 1976.

[25] Berghütten, *Heiz- und Widerstandlegierungen CrFeAl und NiCr*, Berghütten, Theodor-Heuss-Ring 38-42.

[26] Heating conductors and resistance alloys in nicr. Berghütten. [Online]. Available: https://berghuetten-gmbh.de/en/products/heating-conductors-and-resistance-alloys/nicr/

[27] 6015 nicr60/15 nicromio cable secador de manos. Hangzhou Ualloy Material Co., Ltd. [Online]. Available: https://es.made-in-china.com/co_ualloy/product_Nichrome-6015-Nicr60-15-Wire-for-Hand-Dryer_eosgngeyg.html

[28] Nicr 6015 alambre de nicrom. Shangai Phoenix Alloy Co., Ltd. [Online]. Available: https://spanish.alibaba.com/product-detail/nicr-6015-nichrome-wire-1321259866.html?spm=a2700.8699010.normalList.20.1f0a28771n4qCu

[29] Cobre. Elektrisola enamelled copper wire. [Online]. Available: https://www.elektrisola.com/es/materiales-conductores/cobre.html

[30] Copper, cu; cold-worked. Matweb Material Property Data. [Online]. Available: http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=ca486cc7cefa44d98ee67d2f5eb7d21f&ckck=1

[31] Alambres esmatados - redondos general. Madeco. [Online]. Available: http://www.egelect.cl/iconos/Fichas/ESMALTADOS.pdf

[32] Overview of materials pvc, extruded. Matweb Material Property Data. [Online]. Available: http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=bb6e739c553d4a34b199f0185e92f6f7

PARTE II

ANEXOS

CAPÍTULO A

CÁLCULO SOLUCIONES EDO SEGUNDO ORDEN

La ecuación diferencial de segundo orden que rige el comportamiento de un circuito RLC en serie es la siguiente:

$$V_0 = R_t \cdot i_d(t) + L_t \cdot \frac{di_d(t)}{dt} + \frac{1}{C_t} \cdot \int_0^t i_d(t)t \tag{A.1}$$

Para resolver esta ecuación se debe diferenciar la misma y así obtener:

$$L_t \cdot \frac{d^2 i_d(t)}{dt^2} + R_t \cdot \frac{di_d(t)}{dt} + \frac{1}{C_t} \cdot i_d(t) = 0 \tag{A.2}$$

Se acomodan los términos quedando:

$$\frac{d^2 i_d(t)}{dt^2} + \frac{R_t}{L_t} \cdot \frac{di_d(t)}{dt} + \frac{1}{L_t C_t} \cdot i_d(t) = 0 \tag{A.3}$$

Asumiendo que la solución es del tipo $i(t) = Ae^{st}$, se tiene que:

$$As^2 e^{st} + Ase^{st} \cdot \frac{R_t}{L_t} + Ae^{st} \cdot \frac{1}{L_t C_t} = 0 \tag{A.4}$$

Factorizando,

$$Ae^{st}\left(s^2 + s \cdot \frac{R_t}{L_t} + \frac{1}{L_t C_t}\right) = 0 \tag{A.5}$$

Resolviendo para s

$$s = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} \tag{A.6}$$

Con

$$\alpha = \frac{R_t}{2L_t} \qquad ; \qquad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_t C_t}} \tag{A.7}$$

Por lo que se tienen tres tipos de soluciones.

SECCIÓN A.1
Solución sobre-amortiguada

Cuando $\alpha > \omega$ se dice que la solución es sobre-amortiguada y tiene que la forma:

$$i_d(t) = A_1 e^{s_1 t} + A_2 e^{s_2 t} \tag{A.8}$$

Reemplazando los valores iniciales del circuito para encontrar las constantes se tiene que:

$$i_d(0) = 0[A] \Rightarrow A_1 = -A_2 \tag{A.9}$$

$$v_{Ld}(0) = V_f[V] \Rightarrow A_1 = \frac{V_f}{2\omega_d L_t}[A] \tag{A.10}$$

Entonces:

$$i_d(t) = \frac{V_f}{2\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} L_t}\left[e^{(-\alpha+\sqrt{\alpha^2-\omega_0^2})t} - e^{(-\alpha-\sqrt{\alpha^2-\omega_0^2})t}\right] \tag{A.11}$$

Reemplazando los términos ω_0 y α se tiene:

$$i_d(t) = \frac{V_f}{Z}\left[e^{\frac{Z-R_t}{2L_t}t} - e^{\frac{-(Z+R_t)}{2L_t}t}\right][A] \tag{A.12}$$

Donde:

$$Z = \sqrt{R_t^2 - \frac{4L_t}{C_t}} \tag{A.13}$$

SECCIÓN A.2

Solución sub-amortiguada

Cuando $\alpha < \omega_0$ se dice que la solución es sub-amortiguada y tiene la forma:

$$i_d(t) = B_1 e^{-\alpha t}\cos(\omega_d t) + B_2 e^{-\alpha t}\,\mathrm{sen}(\omega_d t) \tag{A.14}$$

Con:

$$\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} \tag{A.15}$$

Evaluando en las condiciones iniciales se tiene:

$$i_d(0) = 0[A] \Rightarrow B_1 = 0[A] \tag{A.16}$$

$$v_{Ld}(0) = V_f[V] \Rightarrow B_2 = \frac{V_f}{\omega_d L_t} \tag{A.17}$$

Entonces:

$$i_d(t) = \frac{V_f}{\omega_d L_t} e^{-\alpha t}\,\mathrm{sen}(\omega_d t) \tag{A.18}$$

Reemplanzando los términos ω_d y α:

$$i_d(t) = \frac{V_f}{Y} e^{-\frac{R_t}{2L_t}t}\,\mathrm{sen}\left(\frac{Y}{L_t}t\right)[A] \tag{A.19}$$

Donde:

$$Y = \omega_d L_t = \sqrt{\frac{L_t}{C_t} - \frac{R_t^2}{4}} \tag{A.20}$$

SECCIÓN A.3

Solución críticamente amortiguada

Y en el caso de que $\alpha = \omega_0$ se dice que la solución es críticamente amortiguada por lo que queda:

$$i_d(t) = D_1 t e^{-\alpha t} + D_2 e^{-\alpha t} \tag{A.21}$$

Evaluando en las condiciones inicialees se tiene que:

$$i_d(0) = 0[A] \Rightarrow D_2 = 0 \tag{A.22}$$

$$v_{Ld}(0) = V_f[V] \Rightarrow D_1 = \frac{V_f}{L_t} \tag{A.23}$$

Entonces:

$$i_d(t) = \frac{V_f}{L_t} t e^{-\frac{R_t}{2L_t}t}[A] \tag{A.24}$$

CAPÍTULO B

PARÁMETROS DE CIRCUITO

Los parámetros obtenidos utilizando el método de cálculo de Imo-Schwab reemplazando estos en la ecuación 3.21 para cumplir con el valor de corriente deseado son los cuadros B.1 y B.2

Capacitancia $[\mu F]$	Inductancia $[\mu H]$	Resistencia $[\Omega]$	Tensión $[kV]$
1	64, 78	5, 394	124, 62
2	32, 39	2, 697	62, 31
3	21, 59	1, 798	41, 54
4	16, 20	1, 349	31, 15
5	12, 96	1, 079	24, 92
6	10, 80	0, 899	20, 77
7	9, 25	0, 771	17, 80
8	8, 10	0, 674	15, 58
9	7, 20	0, 599	13, 85
10	6, 48	0, 539	12, 46

Tabla B.1: *Parámetros del circuito para que su forma de onda sea normada para un impulso de corriente de* $10\ [kA]$. *Fuente: Elaboración propia.*

Capacitancia $[\mu F]$	Inductancia $[\mu H]$	Resistencia $[\Omega]$	Tensión $[kV]$
1	64, 78	5, 394	249, 24
2	32, 39	2, 697	124, 62
3	21, 59	1, 798	83, 08
4	16, 20	1, 349	62, 31
5	12, 96	1, 079	49, 85
6	10, 80	0, 900	41, 53
7	9, 25	0, 771	35, 61
8	8, 10	0, 674	31, 15
9	7, 20	0, 599	27, 69
10	6, 48	0, 539	24, 92

Tabla B.2: *Parámetros del circuito para que su forma de onda sea normada para un impulso de corriente de* $20\ [kA]$. *Fuente: Elaboración propia.*

CAPÍTULO C

CÁLCULO SIMULACIÓN DESCARGADOR MWK4

Las características eléctricas del descargador extraídos de la hoja de datos se tabulan en C.1 mientras que los datos mecánicos relevantes se encuentran en C.2

U_c $[kV_{rms}]$	U_r $[kV_{rms}]$	Tensión Residual al Impulso Especificado (máximo valor) $[kV_{peak}]$									
		Impulso Rápido de corriente $1/..[\mu s]$		Impulso tipo Rayo $8/20$ $[\mu s]$					Impulso de Maniobra $30/60$ $[\mu s]$		
		5 $[kA]$	10 $[kA]$	1 $[kA]$	$2,5$ $[kA]$	5 $[kA]$	$I_n = 10$ $[kA]$	20 $[kA]$	125 $[A]$	250 $[A]$	500 $[A]$
4	$5,0$	$12,7$	$13,5$	$10,5$	$11,1$	$11,7$	$12,3$	$14,1$	$9,2$	$9,5$	$9,9$

Tabla C.1: *Características eléctricas del descargador de sobretensión MWK4. Fuente: Data Sheet ABB Surge Arrester MWK.*

Parámetro	Valor
Altura descargador $[m]$	$0,187$
Número Columnas en paralelo	1

Tabla C.2: *Características mecánicas necesarias para el calculo de parámetros al realizar las simulaciones. Fuente: Data Sheet ABB Surge Arrester MWK.*

Los datos correspondientes a los modelos para la simulación del descargador, se muestran en las siguientes secciones.

SECCIÓN C.1

Modelo IEEE

Utilizando los datos disponibles en C.1 considerando el factor $1,6$ de escalamiento del gráfico y C.2, bajo el modelo propuesto por IEEE se tiene el siguiente cálculo de parámetros:

Parámetro	Valor
$C \quad [pf]$	$534,759$
$L_0 \quad [\mu H]$	$0,0374$
$R_0 \quad [\Omega]$	1
$L_1 \quad [\mu H]$	$2,805$
$R_1 \quad [\Omega]$	$12,155$

Tabla C.3: *Valores de los parámetros lineales iniciales para realizar la simulación según el método IEEE. Fuente: Elaboración propia.*

Corriente $[kA]$	A_0 $[pu]$	A_0 $[kV]$	A_1 $[pu]$	A_1 $[kV]$
$0,01$	$1,40$	$10,763$	$-$	$-$
$0,1$	$1,54$	$11,839$	$1,23$	$9,456$
1	$1,68$	$12,915$	$1,36$	$10,455$
2	$1,74$	$13,376$	$1,43$	$10,993$
4	$1,80$	$13,939$	$1,48$	$11,378$
6	$1,82$	$13,991$	$1,50$	$11,531$
8	$1,87$	$14,376$	$1,53$	$11,762$
10	$1,90$	$14,606$	$1,55$	$11,916$
12	$1,93$	$14,837$	$1,56$	$11,993$
14	$1,97$	$15,144$	$1,58$	$12,146$
16	$2,00$	$15,375$	$1,59$	$12,223$
18	$2,05$	$15,759$	$1,60$	$12,300$
20	$2,10$	$16,144$	$1,61$	$12,377$

Tabla C.4: *Valores de los parámetros no lineales iniciales para realizar la simulación según el método IEEE, donde se toma como tensión base la que ocurre en el impulso a los* 10 $[kA]$ *en una forma de onda* $8/20$ $[\mu s]$ *considerando el factor* $1,6$ *del gráfico. Fuente: Elaboración propia.*

Al contrastar el valor de impulso de maniobra con la simulación, se descubrió que éstos presentaban cierto grado de error, por lo que se modifica el valor de la tensión de referencia, para lograr un mejor ajuste de la simulación a los datos de fábrica.

Factor Tensión	Errores Amplitud Impulsos Maniobra$[\%]$		
	125 $[A]$	250 $[A]$	500 $[A]$
1	$2,978$	$1,203$	$0,0687$
$0,9$	$7,314$	$8,917$	10
$0,98$	$0,929$	$0,818$	$2,064$
$0,99$	$1,95$	$0,186$	$1,072$

Tabla C.5: *Errores de las magnitudes máximas de tensión al variar la magnitud de la tensión base para el cálculo de los parámetros no lineales del método IEEE. Fuente: Elaboración propia.*

Se escoge finalmente el factor $0,99$ para escalar la tensión de base con lo que se tiene que los valores de los

parámetros no lineales finales presentados en el cuadro C.6.

Corriente $[kA]$	A_0 $[pu]$	A_0 $[kV]$	A_1 $[pu]$	A_1 $[kV]$
$0,01$	$1,40$	$10,655$	$-$	$-$
$0,1$	$1,54$	$11,720$	$1,23$	$9,361$
1	$1,68$	$12,786$	$1,36$	$10,350$
2	$1,74$	$13,242$	$1,43$	$10,883$
4	$1,80$	$13,699$	$1,48$	$11,264$
6	$1,82$	$13,851$	$1,50$	$11,416$
8	$1,87$	$14,232$	$1,53$	$11,644$
10	$1,90$	$14,460$	$1,55$	$11,796$
12	$1,93$	$14,689$	$1,56$	$11,873$
14	$1,97$	$14,993$	$1,58$	$12,025$
16	$2,00$	$15,221$	$1,59$	$12,101$
18	$2,05$	$15,602$	$1,60$	$12,177$
20	$2,10$	$15,982$	$1,61$	$12,253$

Tabla C.6: *Valores de los parámetros no lineales finales para realizar la simulación según el método IEEE, donde se toma como tensión base la que ocurre en el impulso a los* 10 $[kA]$ *en una forma de onda* $8/20$ $[\mu s]$ *considerando el factor* $1,6$ *del gráfico y el factor de ajuste* $0,99$ *del error de impulso de operación. Fuente: Elaboración propia.*

Con los datos definitivos de los parámetros no lineales, se procede a comprobar la magnitud de L_1 comparando la magnitud de tensión del modelo con una onda $8/20$ con los datos entregados por el fabricante.

Se ajusta el parámetro L_1 realizando las siguientes iteraciones mostradas en el cuadro C.7.

Valor Actual L_1 $[\mu H]$	Error Tensión $[\%]$	Siguiente Valor L_1 $[\mu H]$
$2,80500$	$10,439$	$1,40250$
$1,40250$	$5,951$	$0,70125$
$0,70125$	$0,472$	$0,35063$
$0,35063$	$2,526$	$0,52594$
$0,52594$	$1,146$	$0,61359$
$0,61359$	$0,415$	$0,65742$
$0,65742$	$0,065$	$-$

Tabla C.7: *Iteraciones realizadas para ajustar* L_1 *a un valor adecuado según el modelo IEEE. Fuente: Elaboración propia.*

Se tiene por lo tanto que el valor final de L_1 es $0,65742$ $[\mu H]$.

SECCIÓN C.2

Modelo Pinceti-Giannettoni

Para el modelo propuesto por Pinceti y Giannettoni se tiene que al utilizar los datos de C.1 los parámetros no lineales son los siguientes:

Corriente $[kA]$	A_0 $[pu]$	A_0 $[kV]$	A_1 $[pu]$	A_1 $[kV]$
$2 \cdot 10^{-6}$	$0,81$	$9,963$	$0,623$	$7,6629$
$0,1$	$0,974$	$11,9802$	$0,778$	$9,5694$
1	$1,052$	$12,9396$	$0,866$	$10,6518$
3	$1,108$	$13,6284$	$0,922$	$11,3406$
10	$1,195$	$14,6985$	$1,009$	$12,4107$
20	$1,277$	$15,7071$	$1,091$	$13,4193$

Tabla C.8: *Valores de los parámetros no lineales para realizar la simulación según el método de Pinceti y Giannettoni, donde se toma como tensión base la que ocurre en el impulso a los* 10 $[kA]$ *en una forma de onda* $8/20$ $[\mu s]$. *Fuente: Elaboración propia.*

CAPÍTULO D

INTEGRAL CORRIENTE ONDA NORMADA

Como se desea conocer el valor que toma la integral de la corriente al cuadrado, se tiene que al utilizar los parámetros presentes en el Anexo B para un banco de condensadores de $5\ [\mu F]$:

$$\int_0^\infty I^2(t)dt = \int_0^\infty \left[\frac{V_0}{Y} \cdot e^{-\frac{R}{2L}t} \cdot sen\left(\frac{Y}{L} \cdot t\right)\right]^2 dt \tag{D.1}$$

$$= \left[\frac{V_0}{Y}\right]^2 \int_0^\infty \left[e^{-\frac{R}{2L}t} \cdot sen\left(\frac{Y}{L} \cdot t\right)\right]^2 dt \tag{D.2}$$

$$\vdots$$

$$= \frac{2V_0^2 L}{R(4Y^2 + R^2)} \tag{D.3}$$

Recordando que:

$$Y = \sqrt{\frac{L}{C} - \frac{R^2}{4}} \tag{D.4}$$

Entonces considerando que la forma de onda de corriente tiene un máximo de $20\ [kA]$ se tiene que el resultado de la integral es:

$$\int_0^\infty I^2(t)dt = 7425,4\ \left[\frac{J}{\Omega}\right] \tag{D.5}$$

CAPÍTULO E

MEDICIONES ENSAYO ABSORCIÓN

Para realizar el ensayo de absorción se utilizó el megóhmetro AEMC 5060 el que inyectó corriente al condensador en ensayo con una tensión de $5\ [kV]$ aproximadamente.

Como los datos arrojados por el megóhmetro presentan cierta oscilación, se opto por tomar el conjunto de datos en la vecindad del tiempo en estudio, confeccionar una línea de tendencia y luego evaluar la ecuación resultante en el tiempo requerido.

En primera instancia, se realizó el ensayo a tres condensadores. Como no se consideró la oscilación que producían los datos en la primera medición, al analizarlos, surgieron contradicciones en el resultado del primer condensador por lo que no se consideran dichos resultados.

Los valores de la Tabla E.1 corresponden al tiempo evaluado en la linea de tendencia de la nube de datos obtenida en la medición.

Condensador	$I_1\ [\mu A]$	$I_{3,16}\ [\mu A]$	$I_{10}\ [\mu A]$	$I_g\ [nA]$
C_1	$4,140$	$1,590$	$0,710$	$246,084$
C_2	$3,904$	$1,520$	$0,628$	$94,263$

Tabla E.1: *Corrientes correspondientes a la medición de los condensadores prorrateados según línea de tendencia y el valor de la corriente de absorción para cada caso. Fuente: Elaboración propia.*

En este ensayo se utilizó una tensión de carga de $5096\ [V]$, por lo que las resistencias internas de los condensadores son respectivamente:

Condensador	$R_g\ [G\Omega]$
C_1	$20,708$
C_2	$54,061$

Tabla E.2: *Resistencias de conducción de los condensadores estudiados. Fuente: Elaboración propia.*

CAPÍTULO F

CÁLCULO ENERGÍA DISIPADA EN CONDENSADORES

Si se utiliza la ecuación 3.37 y 3.38 se tiene entonces:

$$\Delta E = \int_0^\infty \frac{1}{R_g}\left(L_t \cdot \frac{dI(t)}{dt} + R_t \cdot I(t)\right)^2 dt \tag{F.1}$$

$$= \frac{1}{R_g}\int_0^\infty \left\{\frac{V_0 \cdot e^{-\frac{R_t \cdot t}{2L_t}}}{Y}\left[Y cos\left(\frac{Y \cdot t}{L_t}\right) - \frac{R_t}{2} sen\left(\frac{Y \cdot t}{L_t}\right) + R_t sen\left(\frac{Y \cdot t}{L_t}\right)\right]\right\}^2 dt \tag{F.2}$$

$$= \frac{V_0^2}{R_g \cdot Y^2}\int_0^\infty \left\{e^{-\frac{R_t \cdot t}{2L_t}}\left[Y cos\left(\frac{Y \cdot t}{L_t}\right) + \frac{R_t}{2} sen\left(\frac{Y \cdot t}{L_t}\right)\right]\right\}^2 dt \tag{F.3}$$

$$\vdots$$

$$= \frac{V_0^2}{R_g \cdot Y^2} \cdot \frac{L_t(10R_t^2Y^2 + 8Y^4)}{4R_t \cdot (R_t^2 + 4Y^2)} \tag{F.4}$$

$$\tag{F.5}$$

Si se reemplazan los valores para la forma de onda normada de $20\ [kA]$ se tiene que:

$$\Delta E = 1,04 \cdot 10^{-6}\ [J] \tag{F.6}$$

CAPÍTULO G

CÁLCULO RESISTENCIA SHUNT

Para confeccionar la resistencia shunt de medición de corriente se consideró lo mencionado en el marco teórico en la sección 3.5.1, por lo tanto, la resistencia shunt debe cumplir entonces con:

- Soportar corrientes solicitadas sin recalentarse ni cambiar su valor de resistencia.
- Generar una tension no peligrosa $< 600\ [V]$.

Ya que sistema de alojamiento de la resistencia shunt es blindado, no se considera el aspecto de blindaje de la misma.

Se espera que el generador de impulsos de corriente opere a un nivel de corriente de $20\ [kA]$.

Las dimensiones físicas de la resistencia a diseñar fueron obtenidas desde una probeta anterior, por lo que se conoce que la distancia del conductor sera $40\ [mm]$.

Como la mayoría de las puntas de tension soportan $200\ [V]$ se opta por confeccionar una resistencia que cumpla con este requerimiento.

Como se disponía de alambre de aleación Nicrom 6015 se considera dicho material para confeccionar la resistencia shunt, posee una resistencia de $2,19\ \left[\frac{\Omega}{m}\right]$.

Se debe considerar que según [27] cuenta con el factor de resistividad tabulado en G.1.

Temperatura Nicrom $[^{\circ}C]$	Factor de Resistividad
20	1
100	1,011
200	1,024
300	1,038
400	1,052
500	1,064
600	1,069
700	1,073
800	1,078
900	1,088
1000	1,095
1100	1,109

Tabla G.1: *Factor de resistividad eléctrica por el cual se debe multiplicar la resistencia del nicrom* 6015 *al calentarse. Fuente: Datos de [27].*

Por lo tanto la resistencia de un filamento será:

$$R_{1f} = \rho_{NiCr} \cdot l = 2,19 \cdot 0,04 = 0,0876[\Omega] \tag{G.1}$$

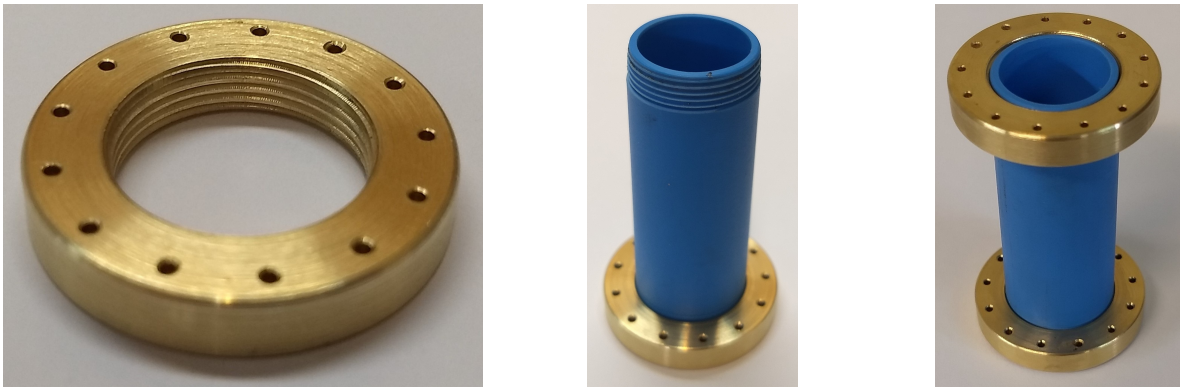
Se consideran que los filamentos quedarán en serie y todos tendrán el mismo largo.

La tensión máxima de la resistencia se calcula considerando la corriente máxima y la resistencia equivalente del conjunto. Si se consideran desde 10 a 15 filamentos se tiene:

Cantidad filamentos	10	11	12	13	14	15
Resistencia Conjunto $[m\Omega]$	$8,760$	$7,963$	$7,300$	$6,738$	$6,257$	$5,840$
Tensión con 20 $[kA]$ $[V]$	$175,2$	$159,3$	$146,0$	$134,8$	$125,1$	$116,8$
ΔT Filamentos $[°C]$	$82,53$	$68,21$	$57,31$	$48,83$	$42,11$	$36,68$
Error $\%$ Calentamiento	$0,76$	$0,61$	$0,50$	$0,42$	$0,35$	$0,30$

Tabla G.2: *Datos del diseño de la resistencia shunt. Fuente: Elaboración propia.*

Se encarga la confección de bujes de bronce y el mecanizado de un tubo de PVC, como se aprecia en la Figura G.1 para armar la resistencia.



(a) *Buje bronce* ***(b)*** *Tubo PVC* ***(c)*** *Resistencia sin filamentos*

Figura G.1: *Resistencia shunt en su proceso de construcción sin filamentos. Fuente: Elaboración propia.*

Como se requiere que la tensión no sea tan baja, se opta por confeccionar la resistencia con 13 filamentos, ya que tampoco se ha considerado la resistencia de unión del alambre con los bujes de bronce.

La resistencia confeccionada con 13 filamentos queda con un valor empírico de $8,581$ $[m\Omega]$ medido con el equipo Megger $MTO210$.

CAPÍTULO H

CÁLCULO ESPINTERÓMETRO DE BARRAS

Para dimensionar el espinterómetro de barras se utiliza la ecuación H.1 de la referencia [15].

$$V = \delta(A + B \cdot S)\sqrt[4]{5,1 \cdot 10^{-2}(h + 8,65)} \ [kV] \tag{H.1}$$

Donde:

S = Separación de los electrodos en $[cm]$
δ = Densidad relativa del aire
h = Humedad absoluta $[g/cm^3]$
$A = 20\ [kV]$ para polaridad positiva y $15\ [kV]$ para polaridad negativa
$B = 5,1\ [kV/cm]$ para polaridad positiva y $5,45\ [kV/cm]$ para polaridad negativa

Sabiendo que:

$$\delta = \frac{p}{p_0}\frac{273 + t_0}{273 + t} \tag{H.2}$$

Donde:

p = Presión atmosférica en condiciones de prueba
p_0 = Presión atmosférica en condiciones de laboratorio $760\ [mm\ Hg]$
t = Temperatura en condiciones de prueba
t_0 = Temperatura en condiciones de laboratorio $20\ [°C]$

Si se consideran las condiciones del laboratorio de alta tensión se tiene que:

Dato	Símbolo	Valor
Tensión Ruptura	V	$63\ [kV]$
Presión atmosférica	p	$760,5\ [mm\ Hg]$
Temperatura	t	$20\ [°C]$
Humedad Absoluta	h	$11,43\ [g/cm^3]$

Tabla H.1: *Datos necesarios para el diseño del espinterómetro de seguridad de barras. Fuente: Elaboración propia.*

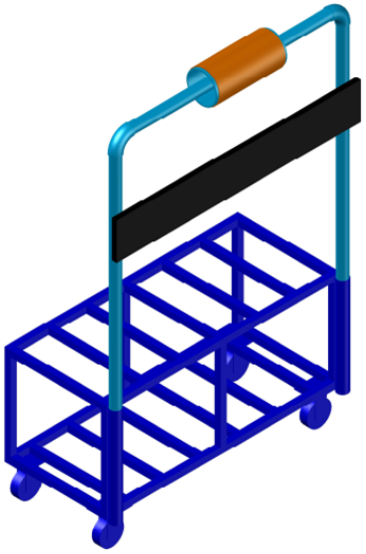
Por lo tanto la distancia de separacion de los electrodos debera ser:

$$S = 8,73\ [cm] \tag{H.3}$$

CAPÍTULO I

PLANOS CONSTRUCTIVOS MODELO GENERADOR DE IMPULSOS DE CORRIENTE

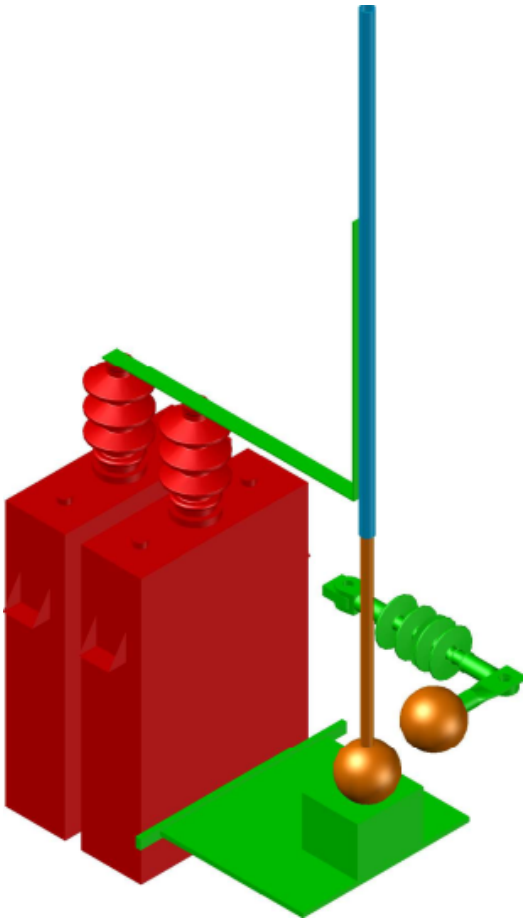
A continuación se presentan los planos constructivos del Generador de Impulsos de Corriente propuesto.



(a) *Estructura, Bobina variable y Resistencia variavble*



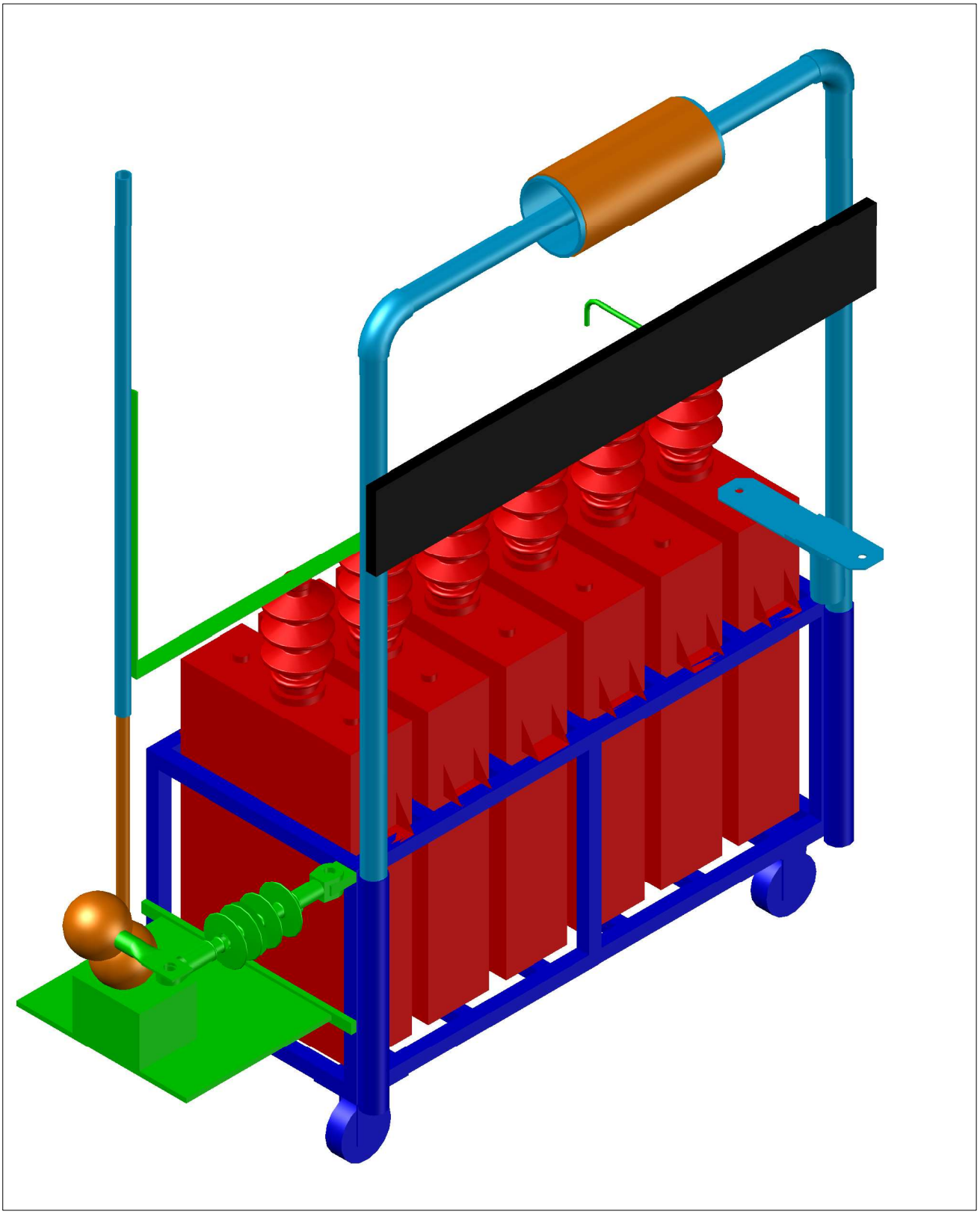
(b) *Condensador, Espinterómetro de barras y Resistencia Shunt*



(c) *Condensadores y Espinterómetro de distancia*

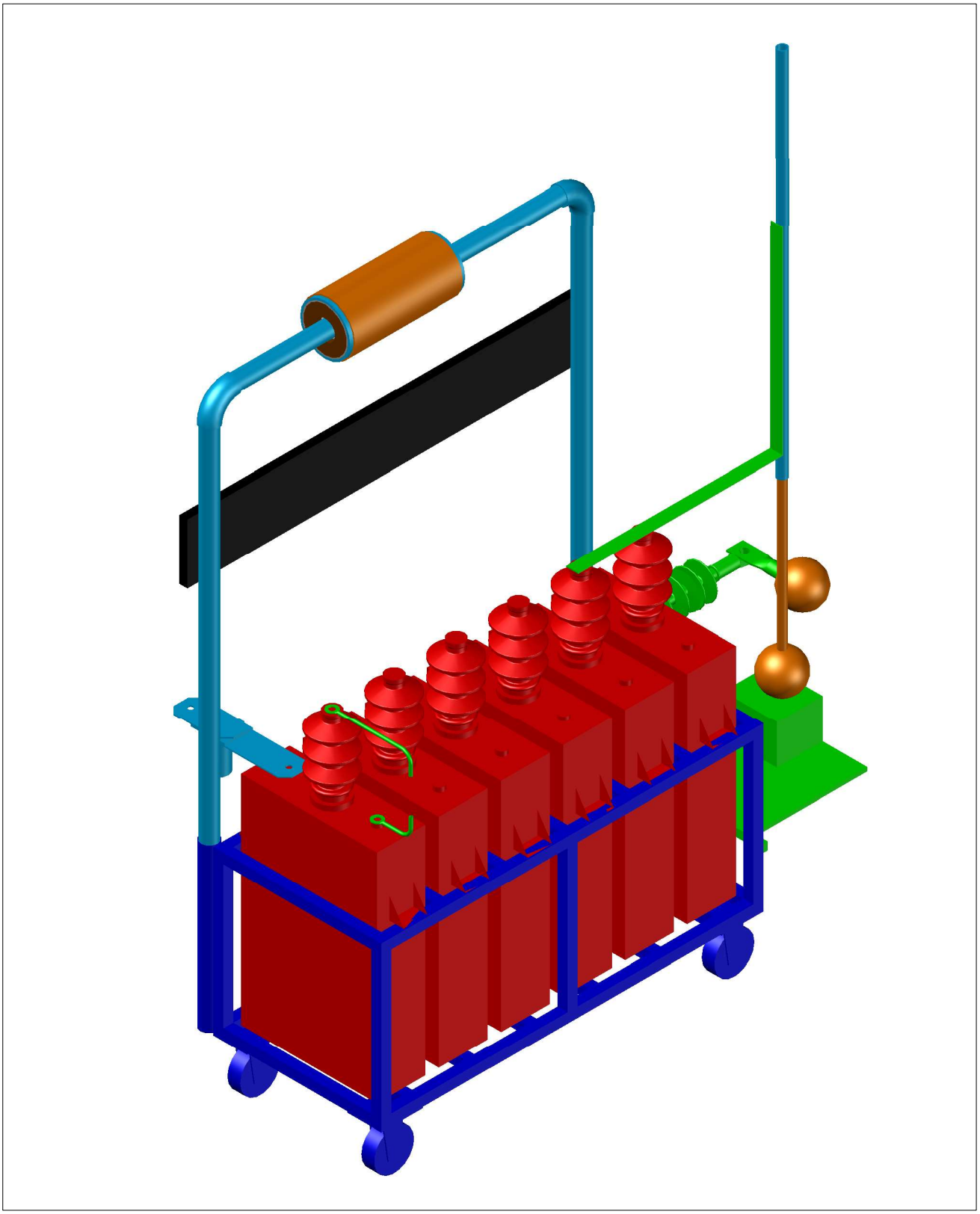
Figura I.1: *Despiece de modelo propuesto del GIC. Fuente: Elaboración propia.*

Vista Isométrica 1



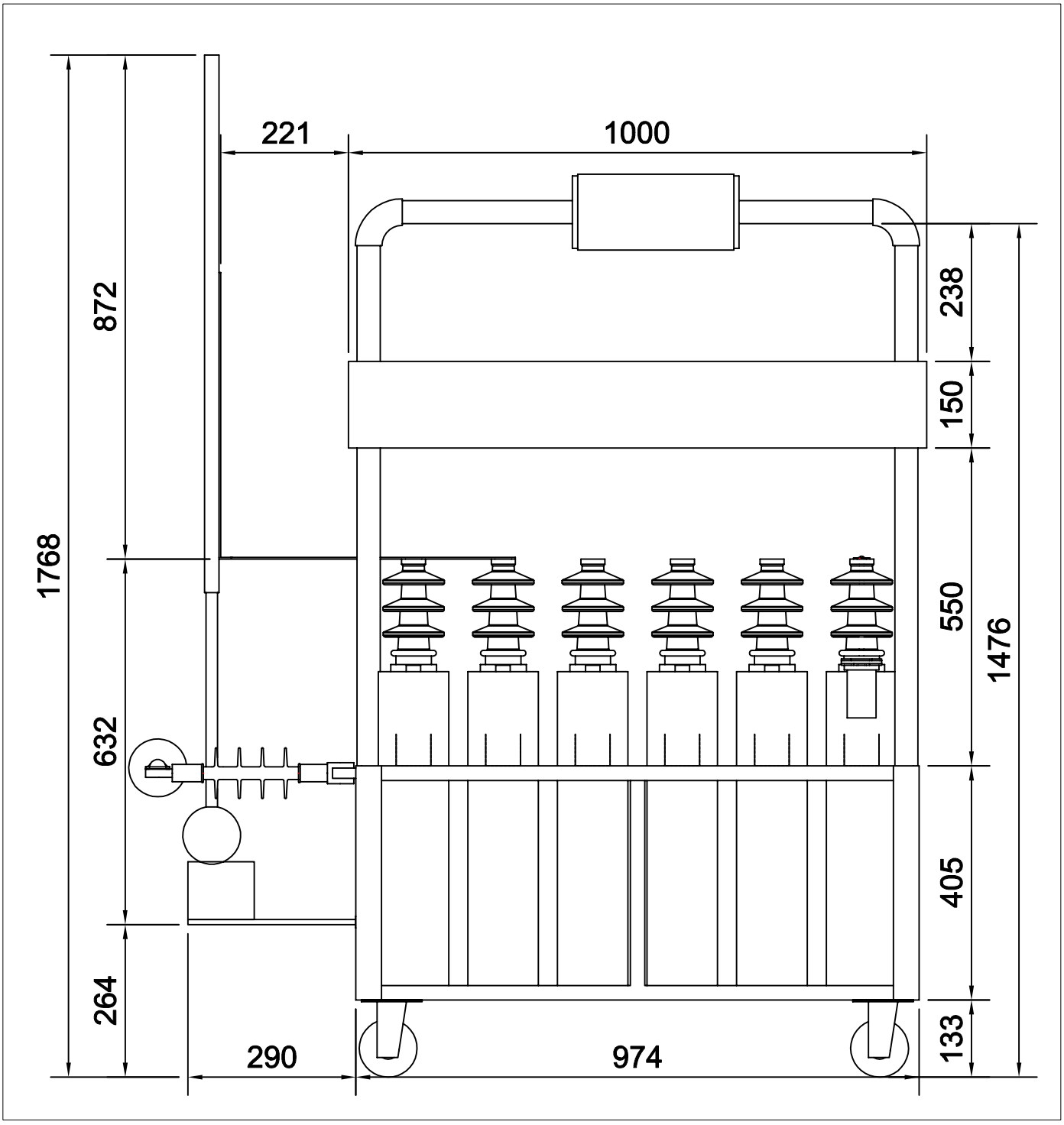
Departamento de Ingeniería Eléctrica UTFSM	Generador de Impulsos de Corriente Plano General	UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
Proyectista: Oscar Barra	Fecha:04-01-2019	
Escala: 1:8	Lámina: 1 de 6	

Vista Isométrica 2



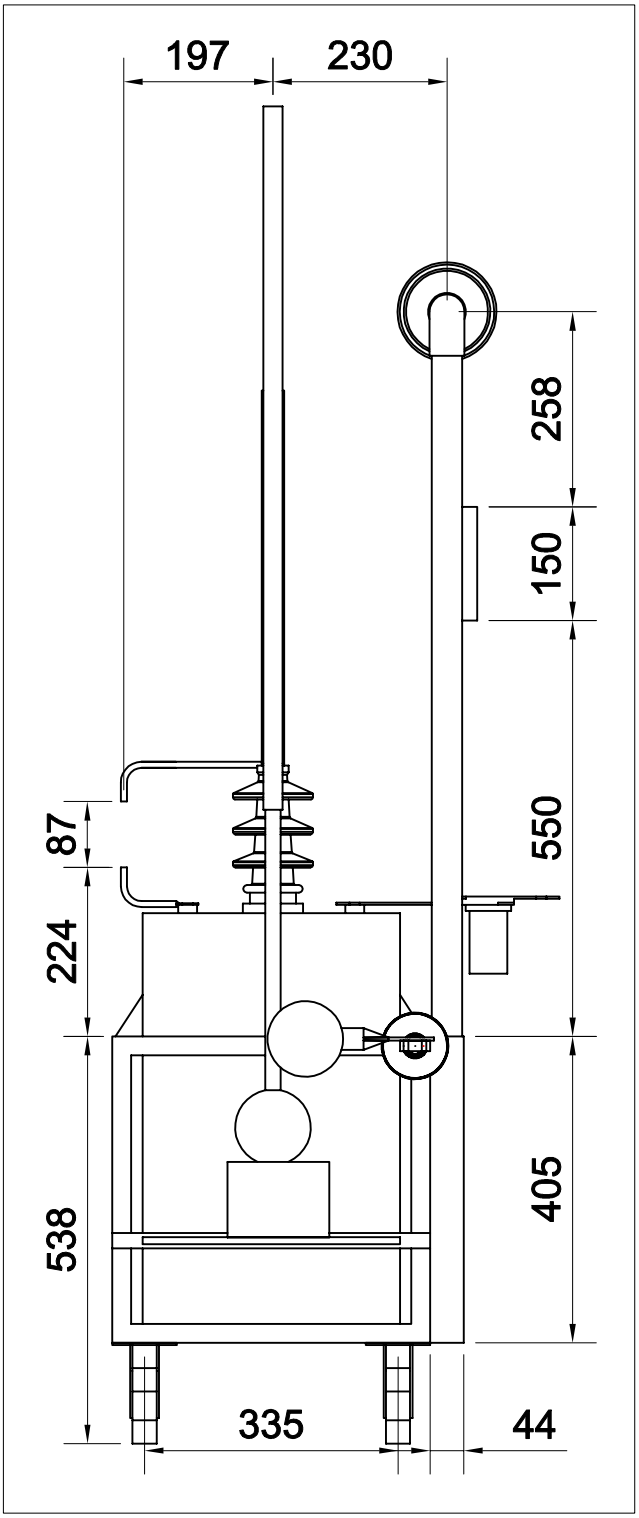
Departamento de Ingeniería Eléctrica UTFSM	Generador de Impulsos de Corriente Plano General	UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
	Proyectista: Oscar Barra	Fecha:04-01-2019
	Escala: 1:10	Lámina: 2 de 6

Vista Frontal

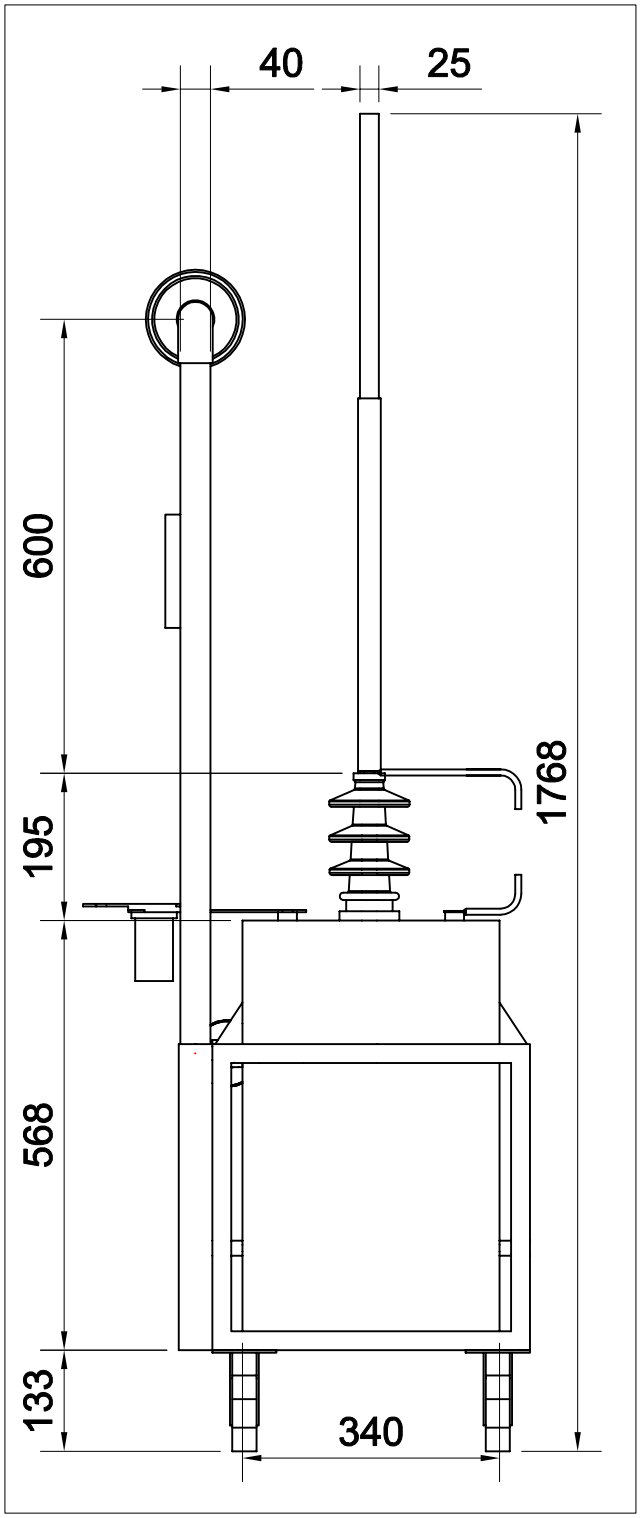


Departamento de Ingeniería Eléctrica UTFSM	Generador de Impulsos de Corriente Plano General	UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
	Proyectista: Oscar Barra	Fecha:04-01-2019
	Escala: 1:10	Lámina: 3 de 6

Vista Lateral Izquierda

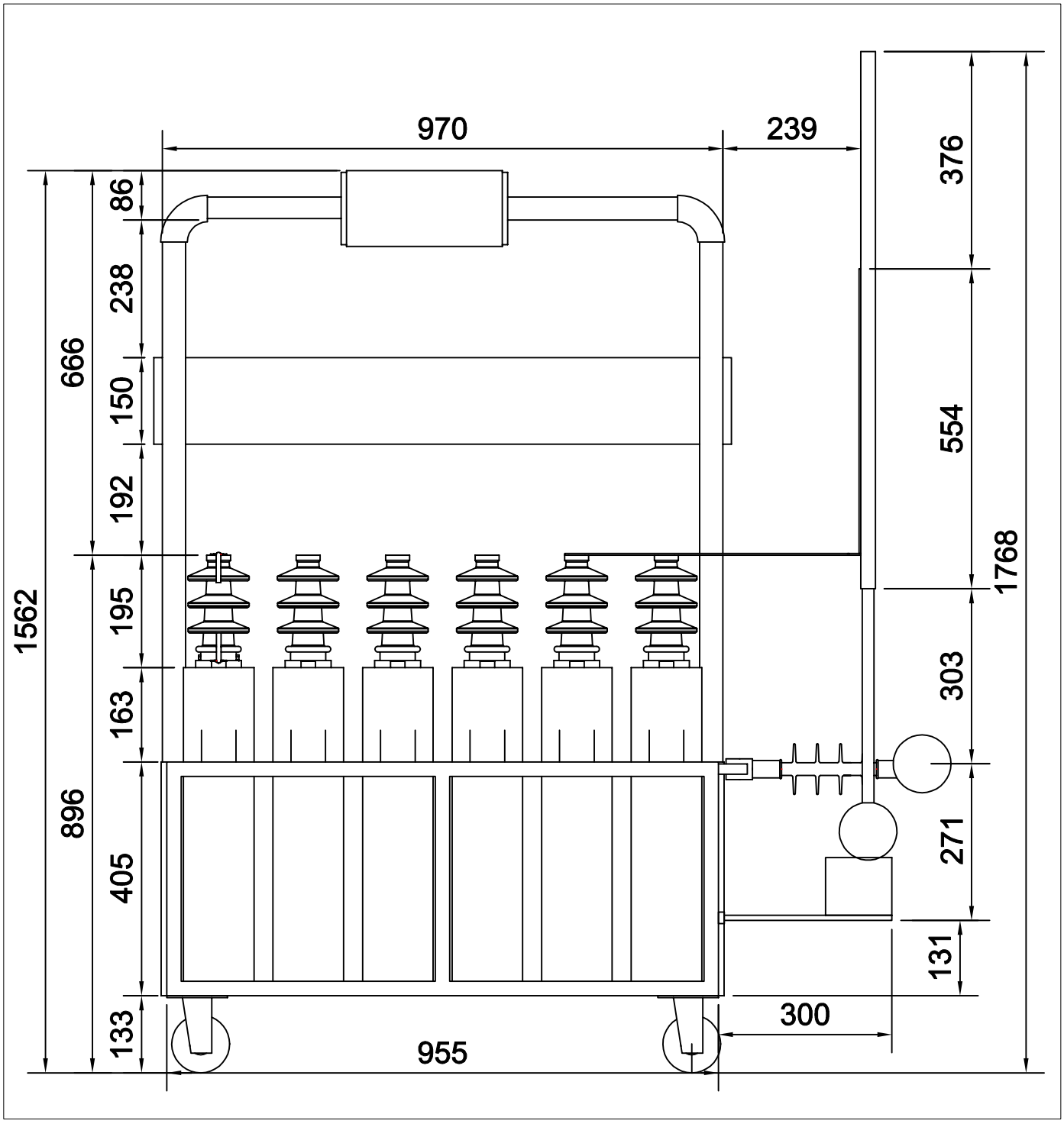


Vista Lateral Derecha



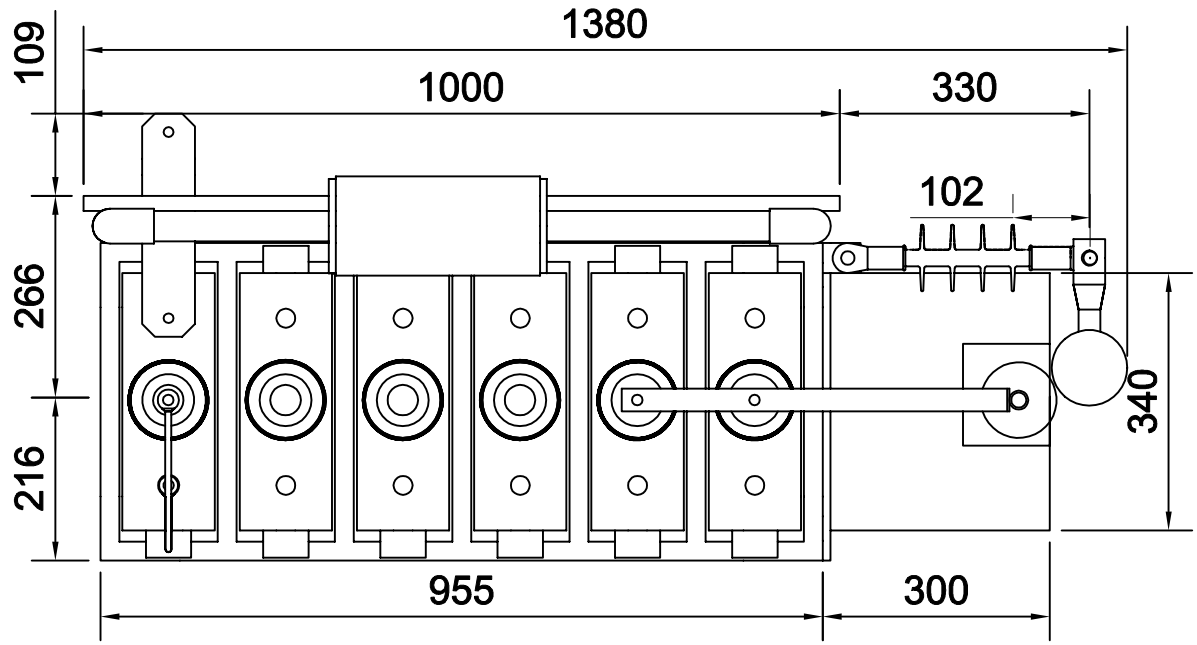
Departamento de Ingeniería Eléctrica UTFSM	Generador de Impulsos de Corriente Plano General	UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
Proyectista: Oscar Barra	Fecha:04-01-2019	
Escala: 1:10	Lámina: 4 de 6	

Vista Posterior

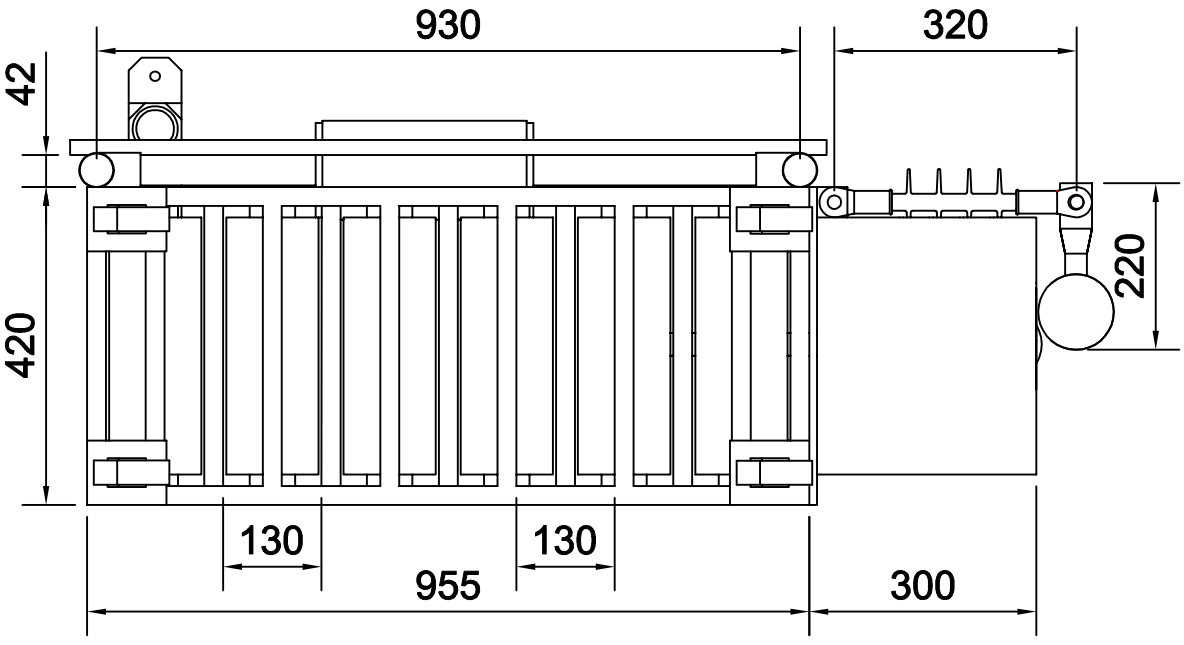


Departamento de Ingeniería Eléctrica UTFSM	Generador de Impulsos de Corriente Plano General	UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
Proyectista: Oscar Barra	Fecha:04-01-2019	
Escala: 1:10	Lámina: 5 de 6	

Vista Superior



Vista Inferior



Departamento de Ingeniería Eléctrica UTFSM	Generador de Impulsos de Corriente Plano General	UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
Proyectista: Oscar Barra	Fecha:04-01-2019	
Escala: 1:10	Lámina: 6 de 6	

CAPÍTULO J

CÁLCULO RESISTENCIA VARIABLE

Se considera que la resistencia debe soportar los impulsos de $20\ [kA]$, se debe tener en consideración que la resistencia no debe variar su valor de forma considerable y debe ser de un largo adecuado para su construcción en un espacio reducido como será el GIC.

Debido a la longitud de la resistencia, se opta por construirla con una distribución de zig-zag con una cantidad de segmentos par para anular dentro de lo posible el efecto inductivo de la misma.

En la Tabla G.1 se muestran el error producido por calentamiento en la resistencia.

En la Tabla J.1 se muestran la cantidad de filamentos, el largo total del conjunto de filamentos para lograr un valor total de $1\ [\Omega]$ y el error asociado a cada uno de ellos.

N° Filamentos	Largo para lograr $1\ [\Omega]$	Error para impulso de $20\ [kA]$
3	$1,37\ [m]$	$9,37\,\%$
4	$1,83\ [m]$	$6,25\,\%$
5	$2,28\ [m]$	$3,08\,\%$
6	$2,74\ [m]$	$2,04\,\%$
7	$3,20\ [m]$	$1,43\,\%$
8	$3,65\ [m]$	$1,03\,\%$

Tabla J.1: *Errores por calentamiento de resistencia variable en funcion de la cantidad de filamentos utilizando Nicrom* 6015 *para un impulso de corriente máxima de* $20\ [kA]$. ***Fuente: Elaboración propia.***

Al analizar los datos de la Tabla J.1 se decide optar por construir la resistencia con 5 filamentos, ya que dicha cantidad produce un error suficientemente bajo $(< 5\,\%)$.

Si se considera el largo de la resistencia, esta debe tener al rededor de $4\ [m]$ de largo, lo que permite un rango aceptable de regulación para la resistencia.

CAPÍTULO K

MEDICIONES DESCARGADORES DE SOBRETENSIÓN DESALINIZADORA

En marzo del 2019 se realizaron ensayos a tres descargadores de sobretensión pertenecientes a una planta desalinizadora para comprobar su estado.

Los descargadores analizados son del tipo VARSIL $HE - S$ 06 cuyos datos de placa se muestran en la siguiente Tabla K.1.

U_c $[kV_{rms}]$	U_r $[kV_{rms}]$	Tensión Residual al Impulso Especificado (máximo valor) $[kV_{peak}]$				
		Impulso Rápido de corriente $1/2,5$ $[\mu s]$	Impulso tipo Rayo $8/20$ $[\mu s]$			Impulso de Maniobra $30/80$ $[\mu s]$
		10 $[kA]$	5 $[kA]$	10 $[kA]$	20 $[kA]$	500 $[A]$
$5,1$	6	$17,7$	$15,4$	$16,4$	$18,1$	13

Tabla K.1: *Características eléctricas del descargador de sobretensión Varisil $HE - S$ 06. Fuente: Data Sheet Ensto Varisil $HE - S$ 06.*

En la simulación de los descargadores, se utiliza el modelo de Pinceti-Giannettoni ya que requiere solo datos eléctricos.

Los datos de las resistencias no lineales se muestran en la Tabla K.2.

Corriente $[kA]$	A_0 $[pu]$	A_0 $[kV]$	A_1 $[pu]$	A_1 $[kV]$
$2 \cdot 10^{-6}$	$0,81$	$13,2840$	$0,623$	$10,2172$
$0,1$	$0,974$	$15,9736$	$0,778$	$12,7592$
1	$1,052$	$17,2528$	$0,866$	$14,2024$
3	$1,108$	$18,1712$	$0,922$	$15,1208$
10	$1,195$	$19,5980$	$1,009$	$16,5476$
20	$1,277$	$20,9428$	$1,091$	$17,8924$

Tabla K.2: *Valores de los parámetros no lineales para los descargadores desalinizadora según el modelo de Pinceti y Giannettoni, donde se toma como tensión base la que ocurre en el impulso a los 10 $[kA]$ en una forma de onda $8/20$ $[\mu s]$. Fuente: Elaboración propia.*

Los parámetros lineales se muestran en la Tabla K.3

Parámetro	Valor
$R \quad [M\Omega]$	1
$L_0 \quad [\mu H]$	$0,03368902$
$L_1 \quad [\mu H]$	$0,10106707$

Tabla K.3: *Valores de los parámetros lineales para realizar la simulación según el método de Pinceti y Giannettoni en los descargadores de la desalinizadora. Fuente: Elaboración propia.*

Las mediciones obtenidas mantienen un perfil como el de la Figura K.1

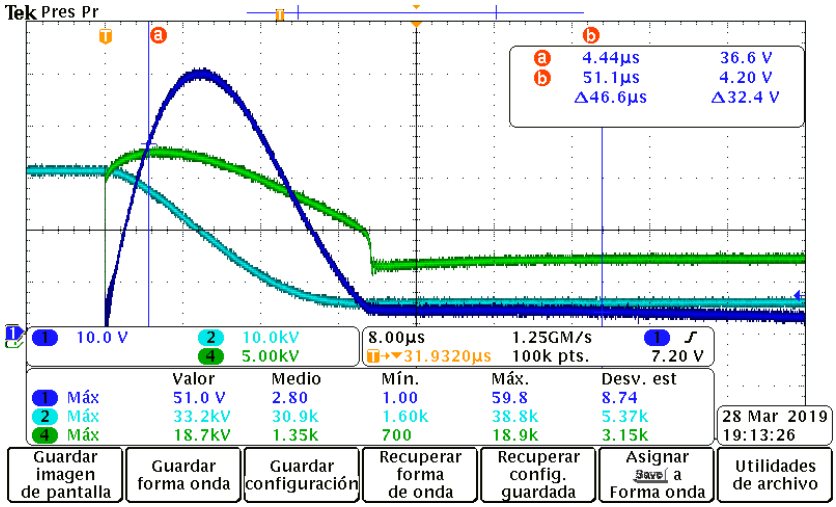


Figura K.1: *Medición tipo de descargador perteneciente al ensayo realizado al segundo dispositivo analizado con una tensión de carga de $\approx 33\ [kA]$ donde la onda azul corresponde a la corriente por el descargador, la verde a la tensión residual del descargador y la celeste a la tensión en el banco de condensadores. Fuente: Elaboración propia.*

En estas mediciones se pudo comprobar que el prototipo final cumple con el objetivo de generar un impulso de corriente del tipo $8/20$, sin embargo, las mediciones de magnitud máxima de corriente no cumplen con lo esperado según lo simulado en el software ATP.

Los errores entre las magnitudes máximos de corriente medida y simulada se listan en la Tabla K.4, utilizando la Ecuación K.1.

$$Error\ \% = \left| \frac{Simulado - Medido}{Simulado} \right| \cdot 100 \quad [\%] \tag{K.1}$$

Descargador	Ensayo 1 ($\approx 33[kV]$)	Ensayo 2 ($\approx 37[kV]$)
1	$31,34\,\%$	$32,08\,\%$
2	$28,35\,\%$	$29,15\,\%$
3	$28,48\,\%$	$29,58\,\%$

Tabla K.4: *Errores de corriente máxima medida y simulada con Pinceti-Giannettoni considerando una resistencia shunt de medición de $8,581\ [m\Omega]$. Fuente: Elaboración propia.*

Como la resistencia shunt se determinó utilizando como alimentación una fuente continua, no se consideró el comportamiento dinámico de la misma, por lo que, con estas mediciones, se observa que la aproximación inicial esta lejos de cumplir con el valor real.

Se decide realizar un ajuste matemático entre la tensión medida y la corriente simulada así obtener un estimado representativo del valor real de la resistencia Shunt.

Los valores de resistencia por cada descargador y ensayo se presentan en la Tabla K.5.

Descargador	Ensayo 1 ($\approx 33[kV]$)	Ensayo 2 ($\approx 37[kV]$)
1	$5,892\ [m\Omega]$	$5,828\ [m\Omega]$
2	$6,148\ [m\Omega]$	$6,079\ [m\Omega]$
3	$6,137\ [m\Omega]$	$6,043\ [m\Omega]$

Tabla K.5: *Valores ajustados de la resistencia shunt considerando la tensión medida y la corriente simulada para cada caso usando el modelo de Pinceti-Giannettoni. Fuente: Elaboración propia.*

Se procede a tomar un valor promedio como referencia de la resistencia shunt, es decir, la queda con valor de $R_{sh} = 6,021\ [m\Omega]$.

Entonces los errores quedan como se muestra en la Tabla K.6.

Descargador	Ensayo 1 ($\approx 33[kV]$)	Ensayo 2 ($\approx 37[kV]$)
1	$2,14\,\%$	$3,20\,\%$
2	$2,11\,\%$	$0,97\,\%$
3	$1,92\,\%$	$0,36\,\%$

Tabla K.6: *Errores de corriente máxima medida y simulada con Pinceti-Giannettoni considerando una resistencia shunt de medición de* $6,021\ [m\Omega]$. *Fuente: Elaboración propia.*