

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**“Análisis y Rediseño de un Sistema de Pruebas
de Impulsos de Descargas Atmosféricas”**

POR

Ing. Esau Caro Vega

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL
GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERIA ELECTRICA**

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Victor Manuel Cabrera Morelos

CODIRECTOR DE TESIS

Dr. José Luis Hernández Ávila

ISSN: 0188-9060



RIITEC: (14)-TMCIE-2016

Torreón, Coahuila. México

Diciembre 2016

SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
Instituto Tecnológico de La Laguna

Torreón, Coah., **09/Diciembre/2016**
Dependencia: DEPI/CPCIE
Oficio: DEPI/CPCIF/211/2016
Asunto: Autorización de impresión
de tesis.

C. Esau Caro Vega
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA.
PRESENTE

Después de haber sometido a revisión su trabajo de tesis titulado:

**"Análisis y Rediseño de un Sistema de Pruebas de Impulsos de Descargas
Atmosféricas"**

Habiendo cumplido con todas las indicaciones que el jurado revisor de tesis hizo, se le comunica que se le concede la autorización con número de registro **RIITEC: (14)-TMCIE-2016**, para que proceda a la impresión del mismo.

ATENCIÓN
EDUCACIÓN TECNOLÓGICA FUENTE DE INNOVACIÓN

M.I.I. ARMANDO LONGORIA DE LA TORRE
Jefe de la División de Estudios de Posgrado e Investigación
del Instituto Tecnológico de la Laguna



SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO
DE LA LAGUNA
División de Estudios de Posgrado e
Investigación

ALT/CHSR



Bvtd. Revolución y Av. Instituto Tecnológico de La Laguna s/n Col. Centro C.P. 27000
Torreón, Coah. Tel. (01)7651311 e-mail: wmaster@itlalaguna.edu.mx
www.itlalaguna.edu.mx





Torreón, Coah., **07/Diciembre/2016**

M.II. ARMANDO LONGORIA DE LA TORRE
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Por medio de la presente, hacemos de su conocimiento que después de haber sometido a revisión el trabajo de tesis titulado:

"Análisis y Rediseño de un Sistema de Pruebas de Impulsos de Descargas Atmosféricas"

Desarrollado por el **C. Esau Caro Vega**, con número de control **M1413029** y habiendo cumplido con todas las correcciones que se le indicaron, estamos de acuerdo que se le conceda la autorización de la fecha de examen de grado para que proceda a la impresión de la misma.

ATENTAMENTE
EDUCACIÓN TECNOLÓGICA FUENTE DE INNOVACIÓN



Dr. Víctor M. Cabrera Morelos
Asesor/Director de Tesis

Dr. José Luis Hernández Ávila
Coasesor/Codirector de Tesis



Dr. Marco A. Arjona López
Comité Tutorial



Dr. Pedro Esquivel Prado
Comité Tutorial



Dedicatorias

A Dios quien me dio el regalo de estar con vida.

A mis padres,

en especial a mi madre Rosa Vega quien siempre ha estado conmigo en todo momento y me ha apoyado en cada paso de mi vida, sus enseñanzas, principios, disciplina, dirección y aliento, han sido fundamentales para cada logro que he obtenido, por eso y mucho más le agradezco inmensamente.

A mis abuelos

los cuales fueron el pilar de toda la gran familia que con su gran amor, cariño y consejos nos impulsaron a seguir adelante y conseguir nuestras metas y ser personas de bien.

Agradecimientos

A mi asesor Dr. Víctor M. Cabrera Morelos, a los doctores, Dr. José L. Hernández Avila y Dr. Marco A. Arjona López, por dirigirme aconsejarme y apoyarme en todo momento en este proyecto de tesis.

A los profesores de posgrado del Instituto Tecnológico de La Laguna que con sus enseñanzas logré, desarrollarme y crecer en el ámbito profesional.

A los compañeros de la maestría por la amistad y por la ayuda de cada uno de ellos.

A mis amigos y amigas por alentarme a alcanzar mis metas y objetivos, y por darme su apoyo y ayuda.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca que me otorgó durante mis estudios de maestría.

Resumen

Este trabajo presenta el estudio, revisión y puesta en operación de un generador para pruebas de impulsos de tensión tipo descargas atmosféricas. Se revisaron sus componentes principales para determinar cuales se encuentran en buen estado y cuales están dañados. Se determinó la falta una fuente de CD de alta tensión para alimentar al generador, por lo que se concluyó la necesidad de construir un puente rectificador y utilizar en conjunto una fuente de CA de alta tensión. Se realizaron pruebas de carga y descarga a los capacitores de cada etapa de generación para determinar si retenían la carga, una vez comprobado esto se montaron en el generador y se finalizaron otros detalles constructivos de elementos (resistencias, herrajes, etc). Se configuró con un máximo de seis etapas lo cual es la mitad del diseño original del generador. Calculado para operar hasta con un máximo de doce etapas. Se armó el circuito completo incluyendo la alimentación. Se construyó un capacitor como objeto de prueba y se procedió a realizar pruebas con el generador de impulsos de descargas atmosféricas para comprobar que es capaz de realizar nuevamente su función.

Abstract

This paper presents the study, review and made ready for operation of a lightning impulse testing generator, in which the main components were checked to determine which are in good conditions and which are damaged. It was recognized the need of a high voltage DC source, so it was decide to build up a rectifier bridge and use a source of high voltage AC together with. Charge and discharge tests were carried out to the capacitors to be used in each stage of the impulse generator to determine if they retain sufficiently the charge. After verification, they were mounted on the multistage impulse generator and were finished other accessory items to be configured up to six stages. This is half as initial impulse generator design which was created up to a twelve stages. The entire circuit is armed with the power, the generator itself and a capacitor is constructed as a test object. After all this, several tests were performed with the generator applying lightning impulses to the test object on order to assure it is capable to perform its original functioning again.

Índice General

Dedicatorias.....	i
Agradecimientos.....	ii
Resumen.....	iii
Abstract.....	iii
Índice General.....	iv
Índice de Figuras.....	vi
Índice de Tablas.....	ix
Capítulo I.....	10
Introducción.....	10
1. Introducción.....	11
1.1. Antecedentes.....	12
1.2. Justificación.....	13
1.3. Objetivo.....	13
1.4. Contenido de la Tesis.....	14
Capítulo II.....	16
Laboratorios de Pruebas y Sistemas Generador de Impulsos de Descargas Atmosféricas.....	16
2.1. Laboratorios de Pruebas de alta tensión.....	17
2.1.1. Diseño de laboratorios de Prueba de alta tensión.....	18
2.2. Formas de onda de las tensiones de impulso.....	27
2.3. Introducción al generador de Impulsos de descargas atmosféricas.....	36
2.4. Componentes principales del generador de impulsos.....	47
2.5. Generadores de impulso multietapa.....	50
2.6. Consideraciones de aspectos prácticos en la teoría.....	54
2.7.1. Consideraciones de alta tensión.....	55
Capítulo III.....	57
Resultados de Pruebas a los Elementos del Generador de Impulsos.....	57
3.1. Diagnóstico del estado de los componentes del generador de impulsos.....	58
3.1.1. Descripción del generador de impulsos.....	61
3.1.2. Capacitores de etapa.....	62

3.1.3. Resistencias de frente y cola	63
3.1.4. Resistencias de carga.....	66
3.1.5. Explosores	68
3.1.6. Otros elementos del generador.....	69
3.2. Rectificador para alimentar generador de impulsos.....	73
3.2.1. Rectificador de onda completa usando transformador con derivación central	74
3.2.2. Rectificador de onda completa en puente.....	76
3.3. Alimentación a capacitores de etapa y disparo del generador.....	78
3.3.1. Alimentación a capacitores de etapa con rectificador en derivación central	80
3.3.2. Alimentación a capacitores con puente rectificador	82
3.3.3. Pruebas de disparo del generador de impulsos de descargas	83
Capítulo IV.....	89
Simulación del Sistema Generador de Impulsos.....	89
4.1. Simulación del sistema generador de impulsos.....	90
4.2. Calculo de elementos del Generador de Impulso de Tensión.....	91
4.3. Circuito de Marx de una sola etapa diferencia de eficiencia	93
4.4. Rectificador de onda completa.....	97
4.5. Circuito generador de Impulsos Multietapa	100
4.6. Formas de onda de tensión tipo impulso	106
4.6.1. Impulso de Tensión Plena – Onda Completa.....	106
4.6.2. Impulso de Tensión Cortado - Onda Cortada en la Cola	109
Capítulo V	111
Conclusiones y Recomendaciones.....	111
5.1. Conclusiones.....	112
5.2. Recomendaciones y Trabajos Futuros.....	115
Anexos	117
A.1. Oscilogramas de Pruebas con el generador de impulsos.....	117
A.2. Problemática con elementos del sistema	123
Referencias	124

Índice de Figuras

Capítulo II

Figura 2. 1. Laboratorio de Ultra alta tensión (Alemania)	20
Figura 2. 2. Edificio y galería de estudio de un laboratorio de alta tensión	22
Figura 2. 3. Campo de ensayo para pruebas de rutina	23
Figura 2. 4. Generador de impulsos de tensión 4000 kV (KEPRI Korea).	26
Figura 2. 5. Valores característicos del impulso de tensión pleno	30
Figura 2. 6. Impulso de tensión cortado en la cola	30
Figura 2. 7. Impulso de tensión cortado en el frente.....	31
Figura 2. 8. Descarga disruptiva sobre la cola	33
Figura 2. 9. Descarga disruptiva sobre el frente.....	33
Figura 2. 10. Oscilaciones en las formas de onda tipo impulso.....	34
Figura 2. 11. Onda tipo impulso de tensión tipo rayo 1.2/50 us. Característica normalizada para pruebas de laboratorio de acuerdo a IEC 60-2 [3].....	35
Figura 2. 12. Circuitos para producir formas de onda tipo impulso.....	40
Figura 2. 13. Componentes de la forma de onda tipo impulso [1].....	44
Figura 2. 14. Generador de impulsos multietapa.....	53

Capítulo III

Figura 3. 1. Generador de Impulsos de descargas atmosféricas del ITL.....	59
Figura 3. 2. Esquema general del sistema generador de impulsos de tensión.....	60
Figura 3. 3. Capacitores de etapa del generador de impulsos	63
Figura 3. 4. Resistencias de frente y cola dañadas	65
Figura 3. 5. Resistencias de frente y cola del generador de descargas atmosféricas.....	66
Figura 3. 6. Resistencias de carga del generador de impulsos	67
Figura 3. 7. Explosores del generador de impulsos, esferas de diámetro 10 cm.....	68
Figura 3. 8. Trigatron	70
Figura 3. 9. Motor para explosores	70
Figura 3. 10. Fuente de alimentación del generador de impulsos	71
Figura 3. 11. Divisor de tensión capacitivo.....	72
Figura 3. 12. Diodo de alta tensión	73
Figura 3. 13. Arreglo de diodos para rectificador con derivación central	74
Figura 3. 14. Diagrama y Forma de onda de un rectificador con derivación central	75
Figura 3. 15. Arreglo de diodos para rectificador en puente.....	76
Figura 3. 16 Diagrama y Forma de onda de un rectificador en puente.....	77
Figura 3. 17. Esquema general de alimentación del generador de Impulsos	78
Figura 3. 18. Capacitor con placa intermedia (Objeto bajo prueba).....	79
Figura 3. 19. Alimentación a capacitores con Rectificador con derivación central.....	81

Figura 3. 20. Prueba de carga de capacitores con rectificador con derivación central	81
Figura 3. 21. Alimentación a capacitores con Rectificador en puente	82
Figura 3. 22. Medición de Impulsos con la punta atenuadora	83
Figura 3. 23. Prueba de impulso de 14 kV, dos etapas	84
Figura 3. 24. Prueba de impulso de 110 kV, con medición en placa intermedia de capacitor, seis etapas	86
Figura 3. 25. Prueba de impulso de 110 kV con escala de tiempo aumentada	86
Figura 3. 26. Disparo de los capacitores del generador de impulsos	88

Capítulo IV

Figura 4. 1. Circuitos equivalentes de generadores de impulsos	93
Figura 4. 2. Comparativa de la eficiencia de los generadores de impulsos	95
Figura 4. 3. Alimentación a generador de impulsos	97
Figura 4. 4. Corriente CA que entra al rectificador	98
Figura 4. 5. Corriente CD que sale del rectificador	99
Figura 4. 6. Tensiones de salida del rectificador y de carga de capacitores	99
Figura 4. 7. Circuito de alimentación y generador de impulsos	100
Figura 4. 8. Corriente total CD para alimentar el generador de impulsos	101
Figura 4. 9. Tensión de carga de los capacitores 1, 2, 3 del generador de impulsos.....	101
Figura 4. 10. Tensión de carga de los capacitores 4, 5, 6 del generador de impulsos.....	102
Figura 4. 11. Corriente CD de carga y descarga de los capacitores 1, 2, 3 del generador de impulsos	102
Figura 4. 12. Corriente CD de carga y descarga de los capacitores 4, 5, 6 del generador de impulsos	103
Figura 4. 13. Corriente CD que atraviesa las resistencias de carga 1, 2, 3 del generador de impulsos	104
Figura 4. 14. Corriente CD que atraviesa las resistencias de carga 4, 5, 6 del generador de impulso	104
Figura 4. 15. Tensiones por etapa del generador de impulsos.....	105
Figura 4. 16. Forma de onda resultante de Impulso de tensión tipo rayo	106
Figura 4. 17. Forma de onda resultante de Impulso de tensión tipo rayo	108
Figura 4. 18. Forma de onda resultante de Impulso de tensión cortado en cola tipo rayo ..	110
Figura 4. 19. Forma de onda resultante de Impulso de tensión cortado en cola tipo rayo ..	110

Anexos

Figura A.1. 1. Prueba de impulso de 17 kV, Utilizando dos etapas.....	117
Figura A.1. 2. Prueba de impulso de 30 kV, con placa intermedia de capacitor, Utilizando dos etapas.....	117
Figura A.1. 3. Prueba de impulso de 32 kV, con placa intermedia de capacitor, Utilizando dos etapas.....	118
Figura A.1. 4. Prueba de impulso de 38 kV, con placa intermedia de capacitor, Utilizando dos etapas.....	118
Figura A.1. 5. Prueba de impulso de 12.5 kV, Utilizando seis etapas.....	119
Figura A.1. 6. Prueba de impulso de 20 kV, Utilizando seis etapas.....	119
Figura A.1. 7. Prueba de impulso de 30 kV, con placa intermedia de capacitor, Utilizando seis etapas.....	120
Figura A.1. 8. Prueba de impulso de 35 kV, con placa intermedia de capacitor, Utilizando seis etapas.....	120
Figura A.1. 9. Prueba de impulso de 40 kV, con placa intermedia de capacitor, Utilizando seis etapas.....	121
Figura A.1. 10. Prueba de impulso de 45 kV, con placa intermedia de capacitor, Utilizando seis etapas.....	121
Figura A.1. 11. Prueba de impulso de 75 kV, con placa intermedia de capacitor, Utilizando seis etapas.....	122
Figura A.1. 12. Prueba de impulso de 90 kV, con placa intermedia de capacitor, Utilizando seis etapas.....	122

Índice de Tablas

Capítulo II

Tabla 2. 1. Sistemas de prueba para los diferentes tipos de pruebas en alta tensión	19
Tabla 2. 2. Constantes de tiempo para las diferentes formas de onda [1].	46

Capítulo III

Tabla 3. 1. Características básicas del generador de impulsos del ITL	61
Tabla 3. 2. Capacitores de etapa	62
Tabla 3. 3. Resistencias de cola	64
Tabla 3. 4. Resistencias de frente de 50, 120 y 300 Ohms	65
Tabla 3. 5. Resistencias de carga	67
Tabla 3. 6. Explosores del generador de impulsos	69
Tabla 3. 7. Valores de Tensión en las diferentes pruebas realizadas	87

Capítulo I

Introducción

1. Introducción

En febrero del 1982 se diseñó y construyó un generador de impulsos de alta tensión de 12 etapas reconfigurables de hasta 720 kV, por diversas razones, dicho generador de impulsos quedó fuera de operación. Debido al interés manifestado en el Instituto Tecnológico de La Laguna de realizar experimentos en alta tensión, y en la necesidad de llevar a cabo caracterización de materiales y equipo eléctrico sometido a esfuerzos eléctricos, se decidió ponerlo nuevamente en operación.

El generador original se concibió tanto para efectuar ensayos de dispositivos y equipo eléctrico o materiales aislantes que se encuentren en el nivel de tensión indicado, con fines académicos e investigación, además este equipo fue diseñado para que fueran fácilmente cambiadas sus características de voltaje aplicado y corriente de descarga, así como modificar rápidamente el arreglo de capacitores y resistencias.

El rediseño y funcionamiento del generador se aborda mediante simulaciones por un lado y por otra parte, se revisó el estado en el que se encuentran los componentes y elementos del equipo. Se reparan y cambian aquellos elementos que se encontraron en mal estado y se construyen algunos que hacen falta para reestablecer la operación del generador.

Se realizó un análisis de los componentes del generador considerando tanto los materiales de construcción como la disposición espacial de sus elementos. Cada componente fue ensamblado con materiales y elementos comerciales de bajo costo.

Durante el estudio inicial se detectó falta de mantenimiento y abandono total en la mayoría de los equipos y accesorios de todo el sistema, lo que implicó la desincorporación de algunas piezas y la pérdida de otras. A los componentes localizados se le realizaron mediciones eléctricas para verificar su estado de operación, entre los equipos caracterizados se encontraron fundamentalmente las capacitancias y resistencias de carga de las etapas multiplicadoras de tensión, así como los espinterómetros (esferas del interruptor de descarga spark-gaps).

1.1. Antecedentes

El Instituto Tecnológico de La Laguna (I.T.L.) cuenta con un laboratorio de alta tensión, conformado por un generador de impulso de descargas atmosféricas, un divisor de tensión capacitivo para registrar las señales del generador y un voltmetro de esferas para medir la magnitud de algunas pruebas, así como algunos tableros de control para el generador y el voltmetro de esferas, con dichos tableros de control se manejaba de manera mecánica y muy exacta la posición de los explosores para iniciar las descargas, así como la distancia entre los explosores del voltmetro de esferas. Actualmente estos tableros de control y el generador de carga de la cascada de capacitores se encuentran fuera de operación.

Estos equipos formaron parte del proyecto de auto equipamiento del laboratorio de alta tensión que en ese momento se desarrolló en el centro de graduados e investigación del I.T.L. y que tuvo como objetivo el diseño y construcción de equipo para funcionamiento del sistema de pruebas de impulso de rayo.

El laboratorio de alta tensión tiene alrededor de 30 años, con el paso del tiempo dicho laboratorio quedó falto de mantenimiento, lo que llevó a que algunos de los elementos se dañaran por falta de supervisión y en otros equipos se extraviaron algunas de sus partes.

Las causas principales de la falta de mantenimiento en el laboratorio fue la falla de la fuente principal de alimentación en CD del generador, la cual alimentaba la cascada multiplicadora de tensión. La combinación de ausencia de recursos económicos para mantenimiento y para reparación de la fuente por una parte, así como la pérdida de los recursos humanos encargados del laboratorio en ese entonces, llevó a que el equipo del laboratorio siguiera sin ser utilizado. Esto se tradujo poco a poco en abandono de materiales y equipos con que contaba el laboratorio.

1.2. Justificación.

El sistema generador de impulsos de descargas atmosféricas ha estado fuera de operación desde años atrás. Puesto que algunos componentes y materiales aún pueden ser reutilizados para realizar investigación y apoyar la docencia en el área de Sistemas Eléctricos de Potencia que dicho generador se rehabilite y entre de nuevo en operación.

El restablecimiento en operación del generador de impulsos permitirá estudiar efectos inducidos por las descargas atmosféricas presentes durante la operación y funcionamiento de equipos propios de los sistemas eléctricos de potencia. Del mismo modo, este aparato permitirá estudiar el desempeño de aislamientos y materiales ya que con él se pueden realizar trabajos de investigación sobre medios materiales dieléctricos (sólidos, líquidos y gases). Finalmente este equipo será de gran apoyo en la formación de recurso humanos, pues permitirá que se realicen prácticas de entrenamiento para los alumnos de licenciatura y de posgrado que se interesen el terreno de investigación de las técnicas de altas tensiones.

1.3. Objetivo.

El objetivo de este trabajo es restablecer la operación del sistema generador de impulsos de descargas atmosféricas del Instituto Tecnológico de La Laguna después de varios años de inactividad. Dicha puesta en operación se logrará mediante la revisión y caracterización de los componentes que lo conforman y rediseñando algunos de sus elementos. Por otro lado, la puesta en operación de dicho generador solo contempla que este dispare, la caracterización de la forma de onda del impulso, la automatización de los explosores y el mejoramiento de la fuente de alta tensión ya que por el tiempo que duren las pruebas esta sera provisional. El empleo de software EMTP-RV (ElectroMagnetic Transients Program), permitirá simular el desempeño del

generador modelando el sistema completo, a partir de las características reales en que se encuentran los componentes físicos.

El generador de impulsos es un equipo que genera intencionalmente tensiones transitorias de alto voltaje para simular sobretensiones de tipo impulso de rayo o impulso de maniobra. La finalidad de estas pruebas es verificar la capacidad que posee un determinado componente (máquina eléctrica, transformador, materiales aislantes, etc.) de soportar un esfuerzo electromagnético sin que ocurra ruptura dieléctrica de su aislamiento.

Una vez obtenidas las simulaciones con los valores reales de los componentes del generador se puede variar datos en la simulación y cambiar rápidamente la configuración, con lo que se puede apreciar su funcionamiento para después pasar a la etapa de rediseño o construcción de algunos de sus partes. Con los elementos del generador en estado operativo se procede a iniciar las pruebas reales de cargar los capacitores, verificar si la retención de la carga y efectuar el dispararlos de los capacitores.

1.4. Contenido de la Tesis.

La tesis se encuentra dividida en 5 capítulos, los cuales son descritos a continuación:

Capítulo 1: Introducción.

Se presenta una introducción general sobre el estado en que se encontró el generador de impulsos, se dan los antecedentes, objetivos y la explicación de las problemáticas del tema.

Capítulo 2: Laboratorios de Pruebas y sistema generador de impulsos de descargas atmosféricas.

Se hace una descripción de la constitución de un laboratorio de alta tensión. Se describe la teoría de funcionamiento y generación sistema generador de impulsos de descargas atmosféricas o de rayo, así como los diferentes esquemas que hay para generar impulsos.

Capítulo 3: Resultados de pruebas del generador de impulsos del ITL. Se reporta el análisis y caracterización de las diferentes partes que componen el generador de impulso en el Instituto Tecnológico de La Laguna.

El conocer el estatus en el que se encuentran los elementos constituyentes del generador y determinar cuáles de ellas están en buen estado, cuales están dañadas y cuales hay que reparar o sustituir. Haciendo uso de los componentes recuperados, se describe en el capítulo, el proceso de diseño y fabricación de un rectificador de onda completa para cargar los capacitores, y sustituir la fuente de alta tensión de corriente continua con la que se puede cargar el banco de capacitores de la cascada multiplicadora.

Capítulo 4: Simulación del sistema generador de impulsos de descargas atmosféricas del ITL. Se presentan los resultados de las simulaciones basadas en algunos esquemas de operación del generador. Y se analiza su desempeño considerando los valores reales de los elementos con los que cuenta actualmente. Además se realizan simulaciones con cambios en los elementos de operación que se podrían aplicar al equipo.

Conclusiones y Recomendaciones. El capítulo resume el análisis de resultados observados en las diferentes pruebas y simulaciones realizadas. Se ofrecen las conclusiones a las que se llegó en este trabajo y se dan recomendaciones para trabajos futuros.

Anexos: Se presenta información adicional como lo son algunas imágenes de las pruebas realizadas y problemas encontrados en el desarrollo de este trabajo.

Referencias Bibliográficas: Se enlistan los trabajos bibliográficos que fueron consultados para el desarrollo de esta tesis.

Capítulo II

Laboratorios de Pruebas y Sistemas Generador de Impulsos de Descargas Atmosféricas

2.1. Laboratorios de Pruebas de alta tensión

La implementación de un laboratorio de alta tensión deberá comenzar necesariamente por el equipamiento y la instalación en un edificio especialmente construido, cumpliendo con las condiciones técnicas y de seguridad que las normas especifican. Previo a la selección del equipamiento con que contará el laboratorio, se definen las modalidades del caso, generalmente por su utilización. Los laboratorios de alta tensión se dividen en:

- Laboratorios de investigación.
- Laboratorios de ensayos de rutina.

Los trabajos que se realizan en laboratorios de investigación varían considerablemente de un laboratorio a otro de acuerdo a las necesidades. Estos laboratorios cuentan con equipamiento para las dos posibilidades. Los ensayos de rutina se realizan en plantas de producción y son destinados a determinar la eficiencia y confiabilidad de los materiales y equipos. Los equipos de alta tensión son requeridos para el estudio de los aislamientos de los materiales y equipos en las diferentes condiciones de operación que puedan presentarse.

Fundamentalmente estos equipos están destinados, entre otras muchas aplicaciones, a:

Efectuar pruebas dieléctricas sobre materiales aislantes, aparatos y sistemas, simulando sobretensiones temporales como las que aparecen en las redes eléctricas. Alimentar aparatos de alta tensión, por ejemplo, filtros electrostáticos, instalaciones de rayos rectificadores de alta tensión, tubos de descarga de gas, etc.

Las pruebas son hechas con tensiones más elevadas que las nominales para determinar el factor de seguridad que establece que el margen de trabajo no sea demasiado bajo ni tan alto.

Las pruebas en alta tensión de uso en laboratorios pueden dividirse en tres clases:

- Pruebas de Tensión con corriente alterna.
- Pruebas de Tensión con corriente directa.
- Pruebas de Tensiones de Impulso.

2.1.1. Diseño de laboratorios de Prueba de alta tensión

Objetivo de un campo de prueba

El término "laboratorio de pruebas de Alta tensión" puede variar desde una pequeña habitación individual con prueba equipos de pocos kilovoltios de tensión nominal hasta enormes complejos, como los laboratorios de ultra alta tensión con varios campos de prueba de diferentes áreas de prueba. Una planificación óptima de un laboratorio bien adaptado al objetivo de una empresa o institución es la base para su posterior operación se observa en la tabla 2.1. Se pueden subdividirse en los siguientes grupos:

- Fabricantes y talleres de reparación de equipos para sistemas de energía.
- Empresas de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica.
- Institutos de investigación y proveedor de servicios de prueba de alta tensión.
- Instituciones de servicio de medición y calibración, laboratorios nacionales.
- Universidades y escuelas técnicas, educación y formación.

Las pruebas de alta tensión realizadas pueden subdividirse de la siguiente manera:

- Pruebas de rutina en equipo de alta tensión nuevo o reparado.
- Pruebas de tipo en equipos recién desarrollados.
- Pruebas de investigación y desarrollo de nuevos equipos de alta tensión.
- Pruebas para el desarrollo de mediciones y calibraciones en alta tensión.
- Pruebas de capacitación práctica y demostraciones.

Tabla 2. 1. Sistemas de prueba para los diferentes tipos de pruebas en alta tensión

	Sistema de Pruebas AC	Sistema de Pruebas DC	Sistema de Pruebas IR/RC/IM	Sistemas combinados de alta tensión
Pruebas de Rutina	< 1200 kV	–	< 2000 kV	–
Pruebas de tipo	< 1500 kV	< 1500 kV	< 4000 kV	–
Pruebas de desarrollo	< 1500 kV	< 1500 kV	< 4000 kV	–
Calibraciones	< 400 kV	< 400 kV	< 800 kV	–
Pruebas educativas	< 200 kV	< 300 kV	< 800 kV	–

Muchas universidades que cuentan con infraestructuras asociadas a laboratorios de alta tensión realizan investigaciones y pruebas de este tipo. Por último, si bien no menos importante, los laboratorios de alta tensión son muy atractivos y pueden apoyar la imagen de una institución notablemente. La combinación de educación e investigación encaja perfectamente [14].

Espacios y área de prueba.

El tamaño de una sala de pruebas puede definirse después de que los sistemas de alta tensión han sido seleccionados y se ha estimado el tamaño de los objetos de prueba más grandes. Las separaciones necesarias entre los objetos de prueba y cualquier estructura puesta a tierra o energizada están basadas en las recomendaciones de acuerdo a los niveles de tensión de los tipos de pruebas a realizar. Esta distancia es necesaria para evitar cualquier influencia en la distribución de voltaje en el objeto de prueba. Por el contrario, la distancia en el aire entre un

sistema de prueba de alta tensión y su entorno debe ser seleccionado de tal manera que resista no menos del 120% de la tensión del sistema de prueba.

En el rango de voltaje de prueba de hasta 600 kV (pico), el simple cálculo del aire puede realizarse en función de la demanda de tensión 5 kV/cm para la ruptura del aislamiento en aire, la figura 2.1 muestra una laboratorio de alta tensión.



Figura 2. 1. Laboratorio de Ultra alta tensión (Alemania)

Para tensiones más altas, la demanda de voltaje disminuye notablemente debido a la descarga líder. De acuerdo con la tensión de la barra positiva al plano en la Figura 2.1 se necesita una separación de unos 16m de otros objetos para una tensión de prueba de 2 MV [14].

Control, Medición y Comunicación

Los controles en un laboratorio de alta tensión no sólo deben estar relacionados con la prueba sino también con la interacción de esta y el equipo auxiliar. Se recomienda que todos los dispositivos de control y medición estén equipados con ordenadores personales industriales (IPC) que están conectados a un bus en común en el sistema.

Esto puede incluso hacerse de tal manera que un cierto circuito de alta tensión pueda ser controlados desde cualquiera de los IPCs en la sala de control.

El ingeniero de prueba debe utilizar la evaluación asistida por ordenador de la prueba y la preparación del registro de la prueba.

El sistema de control y medición de IPC permite el funcionamiento automático del sistema de prueba, lo que garantiza una mejor reproducibilidad de los parámetros, el registro directo y la evaluación de los datos medidos. Por lo tanto, puede acortar la duración de la prueba y tener la mano de obra segura. Esto es especialmente importante para los productos en masa (posiblemente en combinación con otros ensayos de alta tensión), pruebas de gran duración de y pruebas a gran escala para investigación y desarrollo [13].

Diseño de Edificios de Prueba de alta tensión

Hay muchas publicaciones sobre el diseño de los laboratorios de pruebas de alta tensión, y su estudio es siempre útil para la planificación de laboratorio. Es imposible mencionar aquí todos ellos, pero sin embargo, la siguiente sección muestra algunos de los mejores libros y publicaciones sobre el tema así como la experiencia de los autores especialmente los libros de Prinz *et al.* (1965), Hylten-Cavallius (1988) y Schwarz *et al.* (1999), así como publicaciones de Läßle (1966), Mosch *et al.* (1974), Hauschild y Fahd (1978), Krump y Haumann (2011) y Hopke y Schmidt (2011). Cada laboratorio de alta tensión debe ser diseñado de acuerdo a las pruebas y equipos a utilizar, la figura 2.2, muestra un laboratorio de alta tensión [14].

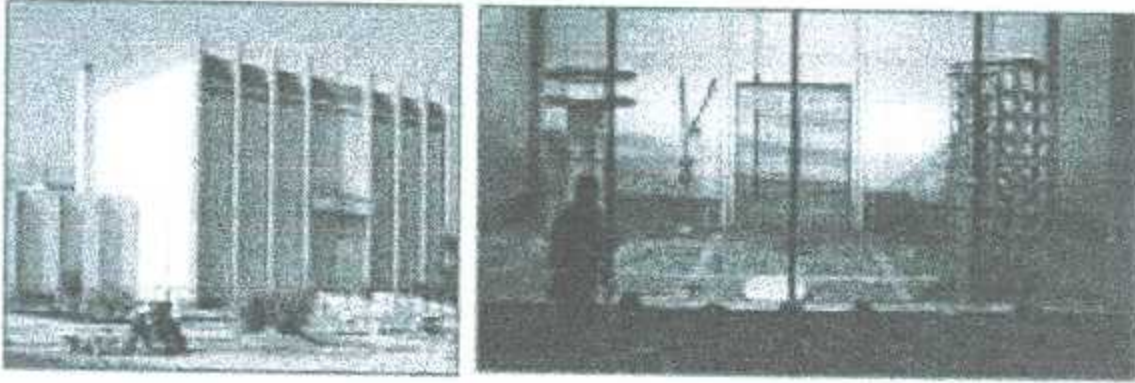


Figura 2. 2. Edificio y galería de estudio de un laboratorio de alta tensión

Salas requeridas y diseño principal

Los detalles menores en un laboratorio de alta tensión hacen que el trabajo de los ingenieros de prueba sea eficiente y fácil. Por lo tanto una buena planificación es la condición previa al funcionamiento del laboratorio, y la aplicación determina el diseño básico del laboratorio de alta tensión.

El campo de pruebas de alta tensión puede ser una sola sala de pruebas o múltiples cuartos según las necesidades del laboratorio. Las dimensiones de los objetos de prueba determinan el tamaño de la habitación. Como ejemplo, la Figura 2.3, muestra un campo de prueba bastante compacto y bien dimensionado para las pruebas de rutina y pruebas en transformadores de potencia hasta 245 kV. Incluye las instalaciones para pruebas de voltaje AC aplicadas y para pruebas de voltaje LI / SI. tal sistema de prueba de impulsos es de 2 MV, con dimensiones de L X W X H =18.3m X13.3m X 12.3 m.



Figura 2. 3. Campo de ensayo para pruebas de rutina

El campo de prueba debe estar bien adaptado no sólo a los requisitos de las pruebas sino también a la demanda de la producción y el flujo de productos. Esto incluye el tipo de transporte de los objetos de prueba por ejemplo: el cojín de aire, rieles, grúa, etc., así como los espacios necesarios para los ensayos de alta tensión y las condiciones adecuadas de un entorno industrial [14].

Puesta a tierra y blindaje

La conexión a tierra del edificio, puesta a tierra del campo de prueba, blindaje electromagnético y tierra de retorno de un circuito de prueba a menudo se mezclan, no sólo teóricamente. Los diferentes términos se definirán mediante sus descripciones:

Construcción de tierra: cada edificio de laboratorio de alta tensión debe estar conectado a tierra, principalmente para su protección contra rayos. La puesta a tierra del edificio consiste en el acero del edificio, los refuerzos, los electrodos de tierra de la

estructura y posiblemente varillas de puesta a tierra adicionales. En un complejo de edificios, las diferentes bases del edificio están conectadas.

Tierra de campo de prueba: las capas superiores del suelo están influenciadas por la tierra retorno de las máquinas y equipos de potencia eléctrica, No están libres de señales de ruido. Por lo tanto, un contacto conductor de la prueba de puesta a tierra del campo con las capas superiores del suelo y con la puesta a tierra del edificio debería ser evitado. La puesta a tierra del campo de prueba se realizará mediante varillas de puesta a tierra que sumergen algunos metros y que están aislados eléctricamente a lo largo de sus primeros metros.

Blindaje electromagnético: campo electromagnético causado por señales de ruido, el cual puede alterar las mediciones en un circuito de alta tensión. De acuerdo a la famosa observación de Faraday, no existe campo eléctrico dentro de un contenedor metálico cerrado. Por lo tanto, los laboratorios de alta tensión están protegidos contra la penetración de perturbaciones por una estructura metálica cerrada que está separada tanto del suelo como de la Puesta a tierra del edificio y sólo en un punto conectado a la puesta a tierra del campo de prueba [14].

Medidas de seguridad

Campos eléctricos de gran magnitud generados por altas tensiones entre electrodos energizados y todos los objetos conectados a tierra en las salas de pruebas de alta tensión, son muy peligrosos.

Si se excede la rigidez dieléctrica del aire circundante, las descargas eléctricas aparecen magnitudes de corrientes de hasta kiloamperios. Pero la tasa de accidentes en los laboratorios de alta tensión es baja, porque los operadores son conscientes del alto riesgo cuando el "concepto de seguridad " no se respeta adecuadamente. El

concepto de seguridad incluye todas las cuestiones relacionadas con el laboratorio de ensayo en su conjunto y relacionadas con la prueba de alta tensión simple Así como las instrucciones para el personal. Como último se incluye el comportamiento en las pruebas de alta tensión y las instrucciones para el funcionamiento del equipo de prueba.

No existe un documento especial de la IEC sobre seguridad en los laboratorios de pruebas; el IEC tiene una publicación 62061: 2005 es parcialmente aplicable a la alimentación de control y alimentación equipo. IEEE Guide 510 recomienda una práctica para la seguridad en sistemas de pruebas de alta potencia. Existe también la norma europea EN 50191 (2005) sobre el montaje y operación de sistemas de prueba eléctricos. Los consejos en esta subsección no pueden liberar a los usuarios de la aplicación de las normas aceptadas internacionalmente y normas nacionales especiales. También las instrucciones y sugerencias de los proveedores de los sistemas de pruebas de alta tensión.

La base para la seguridad de todas las pruebas es su correcta puesta a tierra y blindaje. El retomo de corriente recomendado de un circuito de prueba sólo se conecta en un sistema de puesta a tierra. El blindaje nunca se utilizará como retorno de corriente, [13] [14].

Campos de prueba de alta tensión al aire libre

Los campos de prueba al aire libre suelen estar equipados para la investigación y el desarrollo de las líneas aéreas de transmisión aérea de extra alta tensión y ultra alta tensión, incluyendo las subestaciones al aire libre relacionadas. En la mayoría de los casos, están conectados a líneas de prueba de unos cien metros de longitud para probar el diseño de torres, la disposición de los conductores o para medir pérdidas por efecto corona, la figura 2.4 muestra un laboratorio al aire libre.

Los sistemas de prueba de alta tensión se colocan sobre un área de hormigón que da también espacio para ensayos en equipos de subestaciones. Esta área puede ser aplicable para cojines de aire y deben estar bien conectados a los carriles para el transporte de los objetos de pruebas. Los trabajos de transporte y montaje deben realizarse mediante grúas móviles.

Los sistemas de prueba de alta tensión que son colocados al aire libre tienen un diseño especial para la situación climática local. A veces, las condiciones locales son la razón para tener un campo de pruebas al aire libre, un campo de pruebas al aire libre se observa en la Figura 2.4, estos sistemas a la intemperie se utilizan para pruebas en alta altitud para realizar pruebas bajo baja densidad del aire, así como pruebas de contaminación se necesita que tenga un buen diseño con un mantenimiento permanente.

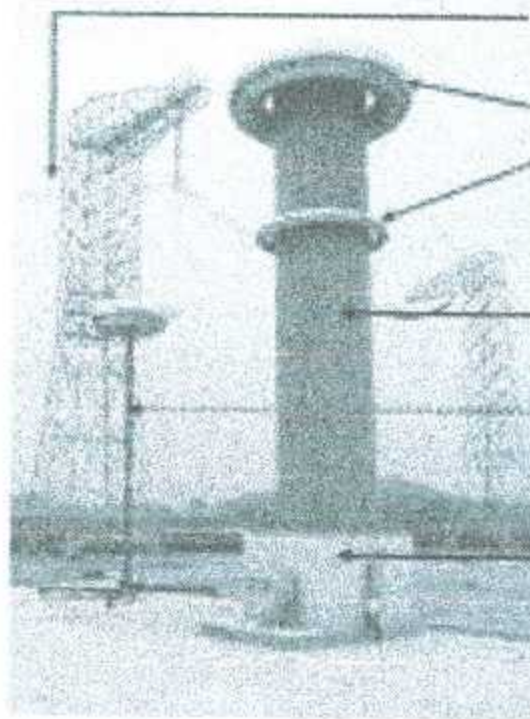


Figura 2. 4. Generador de impulsos de tensión 4000 kV (KEPRI Korea).

Para pruebas de tensión de impulso y de maniobra, los generadores de impulso de diseño más o menos para interior están dispuestos en una torre aislante para protección contra el tiempo. Las tensiones de los generadores de impulso al aire libre excede generalmente 3 MV [14].

Actualización de los sistemas de prueba de Alta tensión

La construcción de un nuevo laboratorio de alta tensión es una gran inversión. La actualización (a veces también llamada mejora o renovación) de un campo de prueba existente es a menudo una alternativa económica y técnicamente aceptable a un nuevo laboratorio de pruebas. En el caso más sencillo, está relacionado con la sustitución de los sistemas completos o el intercambio de componentes antiguos. La modernización de los laboratorios de alta tensión existentes es a menudo más difícil y costosa.

2.2. Formas de onda de las tensiones de impulso

En su cláusula del estándar IEEE-4 [4] presenta, en cuanto a impulsos de voltaje para pruebas en alta tensión, algunas definiciones más importantes las cuales son:

Descarga disruptiva: conocida a veces como "ruptura eléctrica", es una descarga que "puentea" o salta completamente por encima del aislamiento del objeto que está siendo probado. Esto puede reducir prácticamente a cero el voltaje entre los electrodos de prueba.

Aislamiento auto-restaurable: aislamiento que recupera completamente sus propiedades aislantes aunque haya ocurrido una descarga disruptiva.

Aislamiento no auto-restaurable: aislamiento que pierde sus propiedades aislantes, o no las recupera completamente, después que ha ocurrido una descarga disruptiva. Un impulso es un voltaje (o corriente) transitorio aplicado intencionalmente y el cual usualmente crece rápidamente a un valor pico y entonces cae más lentamente a cero.

Impulso de tipo atmosférico: Un impulso con una duración del frente de onda, de hasta unos pocos microsegundos. Un impulso de tipo atmosférico que no es interrumpido por ningún tipo de descarga disruptiva.

Se puede decir que un impulso pleno no se ve reducido a cero bruscamente (pues no hay descarga disruptiva) aunque eventualmente la cola del impulso llega a valer cero luego. Un impulso pleno de tipo atmosférico que tiene un tiempo virtual de frente de $1.2 \mu\text{s}$ y un tiempo virtual, al valor de mitad de cola, de $50 \mu\text{s}$.

Sobre pico (overshoot): el valor por el cual un impulso de tipo atmosférico excede el valor definido de cresta o pico.

Impulso de tipo maniobra: Un impulso con una duración del frente (de onda), de algunas decenas a miles de microsegundos. Los impulsos con duración del frente de hasta $20 \mu\text{s}$ son definidos como impulsos de tipo atmosférico. Los impulsos con frentes de duración mayor son definidos como impulsos de tipo maniobra, y además, están caracterizados por tener una duración total mucho mayor que la de los impulsos de tipo atmosférico.

Valor pico de voltajes de impulso: El máximo valor de los impulsos que son ondas de forma doble exponencial suave sin sobrepaso (ya sean de tipo atmosférico o de maniobra).

Los impulsos normalizados son de ondas ideales en las que no se observan oscilaciones ni sobrepaso en el frente de onda ni en la vecindad del valor pico ni en la cola del impulso ni durante el corte. Ondas similares no se producen en circuitos reales, salvo en situaciones donde los elementos parásitos (capacitancias respecto al local de prueba, al objeto de prueba, al medidor de voltaje de impulso, etc.) y los parámetros distribuidos se hayan reducido al mínimo (esto en la práctica es extremadamente

difícil), o donde el circuito generador produzca un impulso pero dicho impulso no sea aplicado a ningún objeto de prueba.

Las tensiones de impulso son obtenidas a través de los Generadores de Ondas tipo "Marx" o Generadores de Impulsos de Tensión, que son indispensables para el desarrollo de nuevos equipos, el diseño y la técnica de verificación del aislamiento eléctrico interno y externo de aparatos y equipos, entre los más importantes se tienen principalmente los transformadores de potencia y las máquinas con bobinados, asegurando así un elevado grado de confiabilidad de servicio y calidad del producto.

Perfiles Normalizados de Ondas de Impulsos de Tensión

En esta sección se definen los conceptos más importantes que se aplican a la generación y uso de los impulsos de tensión y corriente para pruebas de equipos eléctricos en alta tensión, de acuerdo a la norma IEC 60-2 [3].

Perfiles Normalizados de Impulsos de Tensión tipo Rayo

a). Impulso de Tensión.

Es una onda de tensión transitoria aperiódica de corto tiempo con polaridad única obtenida de una disrupción en el aire, cuya característica sin tener en cuenta las oscilaciones del rizado crece rápidamente hasta un valor máximo, y luego decrece a cero. Esta curva está definida por su valor pico, polaridad y parámetros característicos de tiempo, Figura 2.5.

1. Impulso de Tensión Plena – Onda Completa

Es un impulso de tensión que después de alcanzar el valor pico decrece lentamente y exponencialmente casi a cero, Figura 2.5.

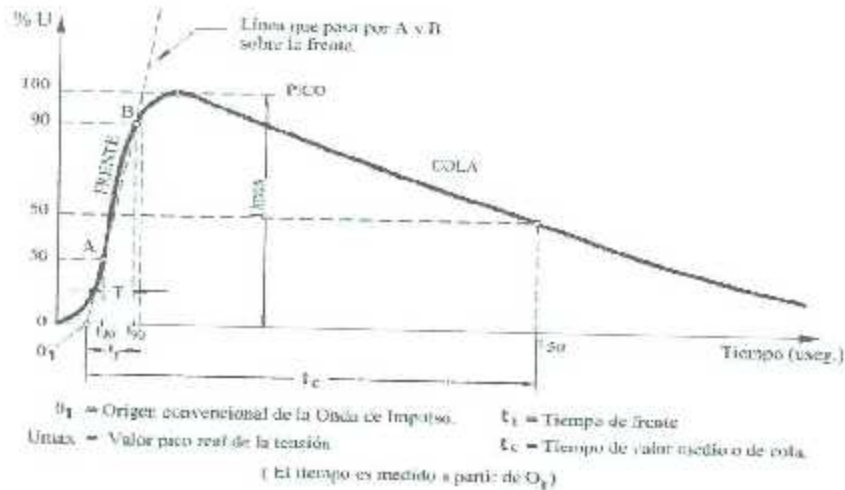
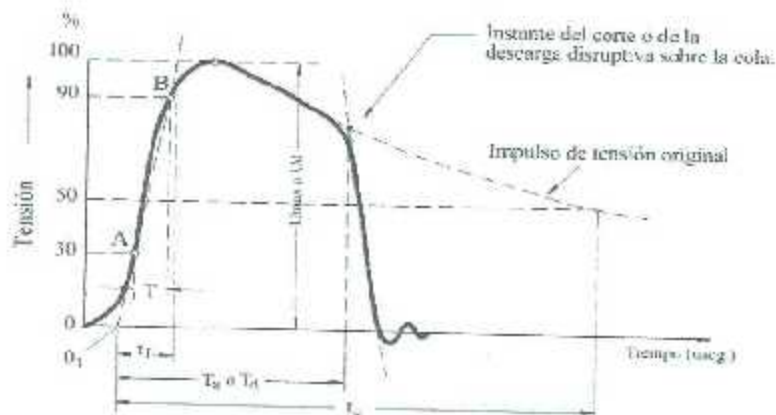


Figura 2.5. Valores característicos del impulso de tensión pleno

2. Impulso de Tensión Cortado - Onda Cortada en la Cola

Es un impulso de tensión que es cortado luego de 2 o 3 μs súbitamente por una descarga disruptiva, produciéndose una caída de tensión brusca hasta cero. El corte del impulso (corte de la onda generada) puede ser realizado o logrado por medio de un interruptor especial (chopping gap) o puede ocurrir debido a una descarga en el aislamiento interno o externo del objeto de prueba, Esto ilustrativamente es mostrado en la Figura 2.6.



T_c - Tiempo del corte en que se produce la discontinuidad inicial o la ocurrencia de la descarga disruptiva
 T_d - Instante en que ocurre la descarga disruptiva en el objeto de prueba.
 U_d - Tensión disruptiva, sobre el impulso de Tensión.

Figura 2.6. Impulso de tensión cortado en la cola

3. Impulso de Tensión tipo Cuña – Onda Cortada en el Frente

Es un impulso de tensión cuya característica crece con una pendiente aproximadamente constante hasta que es cortado sobre el frente por la aparición de una descarga disruptiva, como es mostrado en la Figura 2.7.

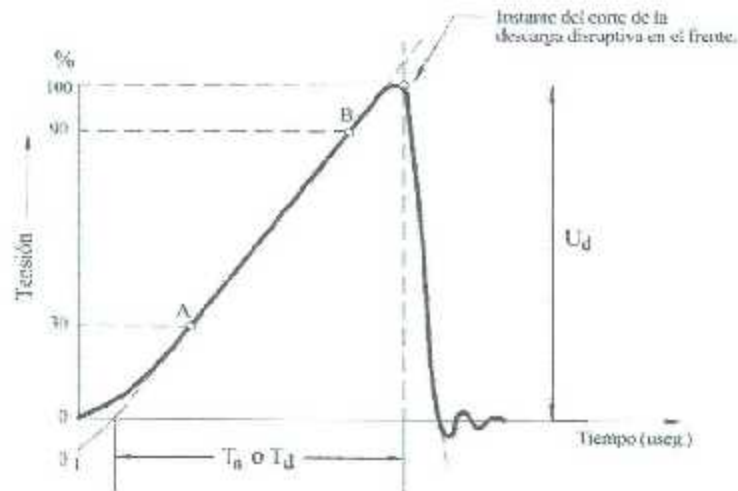


Figura 2. 7. Impulso de tensión cortado en el frente

b). Polaridad.

Las pruebas de impulso de tensión por convención se realizan con polaridad negativa con respecto a tierra, muy frecuente en las descargas atmosféricas. En cambio las sobretensiones que se presentan según el mecanismo de tensión inducida son de polaridad opuesta a la carga de la nube.

c). Tiempo de Frente t_f del Impulso de Tensión Pleno o Cortado en la Cola

Es definido como 1.67 veces el intervalo de tiempo T ($T = t_{90} - t_{30}$) durante el cual el impulso de tensión se incrementa desde 30% hasta 90% del valor pico (puntos A y B de la figura 2.5 y 2.6). Si las oscilaciones son superpuestas sobre el frente, los puntos A y B serán determinados mediante una curva media trazada a través de dichas oscilaciones. $t_f = 1.67(t_{90} - t_{30})$.

d). El origen convencional 0_1 de un Impulso de Tensión

Es el punto sobre el eje del tiempo que dista en $0.5T$ a partir del tiempo que pertenece el punto A (ver figura 2.5 y 2.6). Para nuestro caso la intersección de la línea trazada a través de los puntos A y B con el eje del tiempo es considerada a ser el origen 0_1 verificándose que $0.3t_f = 0.5 T$

e). Cola de un Impulso de Tensión

Es la parte decreciente después de alcanzar el valor máximo. Figura 2.5.

f). Tiempo de Cola o de Valor Medio t_c del Impulso de Tensión Pleno.

Es el intervalo de tiempo entre el origen 0_1 el instante sobre la cola de la onda en el cual la tensión decrece hasta la mitad o 50% del valor pico.

g). Impulso de tensión de descarga disruptiva U_d

Es el máximo valor de un impulso de tensión que ocurre en el objeto de prueba durante el ensayo originando una descarga disruptiva.

h). Tiempo T_d de la descarga disruptiva de un Impulso de tensión

Es el intervalo de tiempo entre el origen 0_1 el instante de la descarga disruptiva.

i). Instante de Corte de un Impulso de Tensión

En el caso de un impulso de tensión cortado sobre la cola, el instante de corte es la intersección del impulso de tensión original con una línea C-D trazada a través de las intersecciones del impulso cortado con 2 curvas que representan el 70% y 10% del impulso de tensión original (ver puntos F y E de la Fig. 2.8).

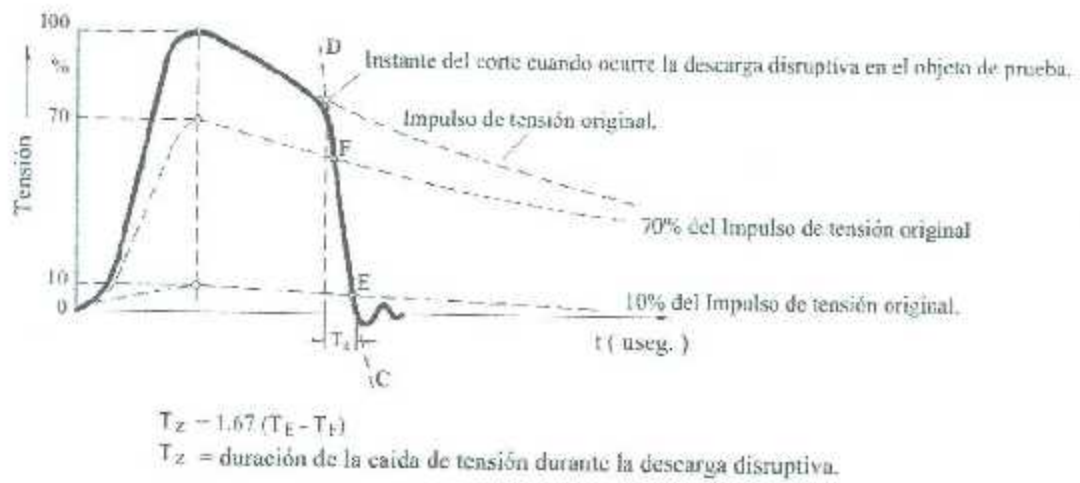


Figura 2. 8. Descarga disruptiva sobre la cola

Quando el impulso de tensión es cortado sobre el frente, el instante de corte es la intersección de una línea en paralelo al eje del tiempo que pasa a través de la máxima tensión con la línea C-D trazada mediante los puntos F y E los cuales están ubicados en la parte cortada de la curva de tensión al 70 % y 10 % del valor máximo, Figura 2.9.

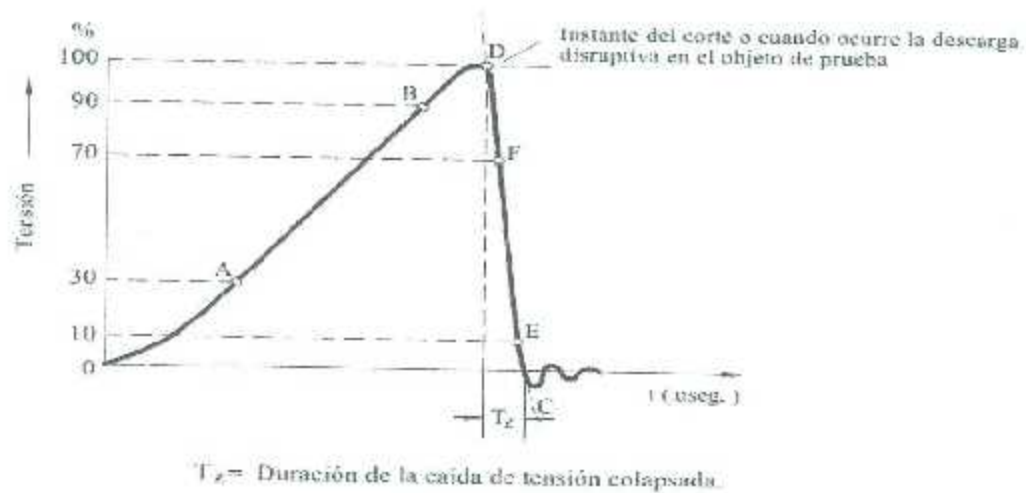
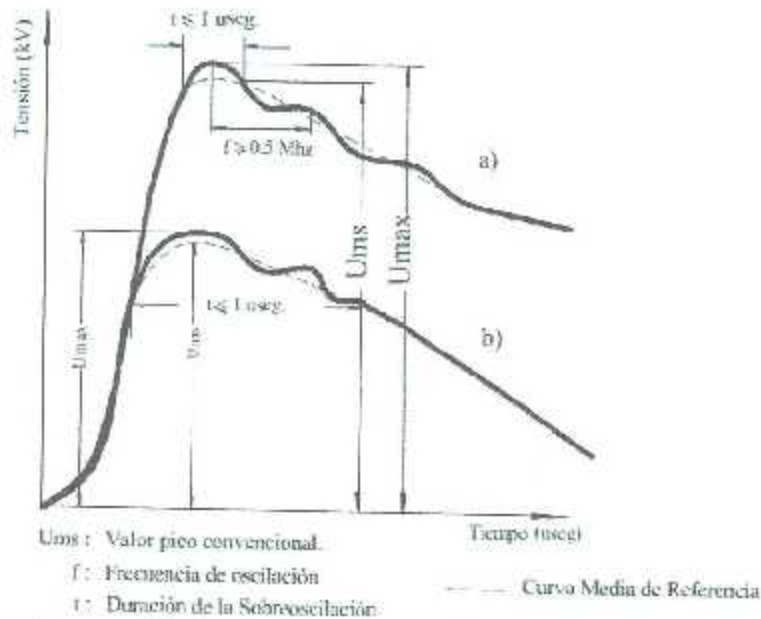


Figura 2. 9. Descarga disruptiva sobre el frente

j). El valor U_{max} de un impulso de tensión completa tipo rayo cortado sobre la cola es el máximo valor de tensión de ensayo. Si las oscilaciones son superpuestas alrededor del pico con una frecuencia no menor de 0.5 MHz o si la duración del sobre impulso es inferior a $1 \mu\text{s}$, entonces podemos determinar el valor pico convencional (U_{ms}) del impulso trazando una curva media de referencia como se representa en la figura 2.10 y la amplitud de esta característica libre de oscilaciones define el valor de la tensión de ensayo.



- a) Impulso con oscilaciones el cual la frecuencia es no menor que 0.5 MHz .
- b) Impulso con un sobreimpulso el cual la duración es no mayor que $1 \mu\text{s}$.

Figura 2. 10. Oscilaciones en las formas de onda tipo impulso.

k). Tolerancias Normalizadas del Impulso de Tensión tipo Rayo

Cuando se prueba el aislamiento del objeto de acuerdo a la tensión de sostenimiento al impulso, aplicaremos las siguientes tolerancias para valores y forma de impulso de tensión plena especificado por la norma IEC publicación 60-2 [3], Figura 2.11.

Valor pico (U_{max}):	$\pm 3 \%$	= $U_{max} \pm 3 \%$ kV
Tiempo de frente (t_f):	$1.2 \pm 30 \%$	= $1.2 \pm 0.36 \mu s$.
Tiempo de valor medio de la cola (t_c):	$50 \mu s \pm 20 \%$	= $50 \pm 10 \mu s$.
Sobre oscilaciones		= menor del 5 %

Las oscilaciones que están superpuestas alrededor del pico deben ser tales que la amplitud del pico de la primera alternancia sea menor de 5 % del valor pico, esto es:
 $\delta < 5 \% U_{max}$

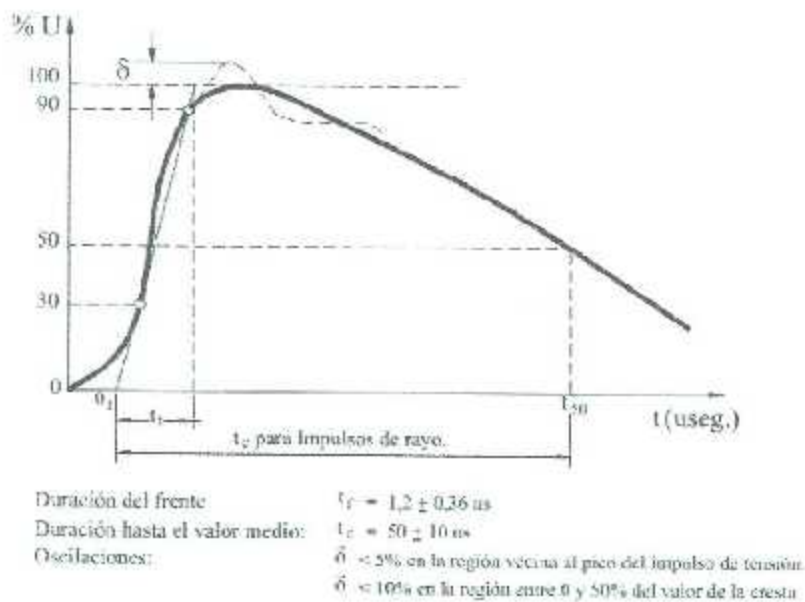


Figura 2. 11. Onda tipo impulso de tensión tipo rayo 1.2/50 us. Característica normalizada para pruebas de laboratorio de acuerdo a IEC 60-2 [3].

2.3. Introducción al generador de Impulsos de descargas atmosféricas

El generador de impulsos de descargas atmosféricas es un equipo eléctrico el cual esta principalmente compuesto por capacitores y resistencias las cuales desempeñan diversas funciones para producir o generar intencionalmente tensiones transitorias de alto voltaje para simular sobretensiones tipo atmosférico y de maniobra con la capacidad de poder modificar las características de la forma de onda producida, con la finalidad de verificar la capacidad que posee un determinado dispositivo o máquina de soportar dicho impulso sin que ocurra ruptura dieléctrica en su aislamiento.

Su aplicación principal es la realización de pruebas de aislamiento (prueba de impulso) en equipos y maquinaria eléctrica en general, además con él se pueden realizar estudios sobre medios materiales (sólidos, líquidos y gases) dieléctricos y equipo eléctrico de potencia.

Las descargas atmosféricas que producen sobretensiones siempre han representado un gran problema para los sistemas de transmisión de energía eléctrica en alta tensión, puesto que la mayoría de fallas en ausencia de contaminación, son originados por este tipo de fenómeno en donde la probabilidad de ocurrencia está asociada a los niveles isoceráunicos (número de días con tormenta al año) cada rayo que cae sobre un conductor de fase, o en una torre o simplemente la proximidad de la línea, origina directamente en ella o por inducción.

Las pruebas en alta tensión son a niveles de cientos y miles de kilo volts, que se hacen a equipos tales como: aisladores, transformadores, pararrayos, conductores, cuchillas, etc; en los cuales estos se someten a condiciones simuladas para demostrar si ellos son aptos para soportar los requisitos o características propias de cada uno, especificadas por los fabricantes según el equipo.

De esta forma se tiene una garantía de que los equipamientos podrán operar satisfactoriamente en las condiciones reales del sistema, las cuales son simuladas durante las pruebas.

Los ensayos a que cada equipamiento deberá ser sometido, están establecidos por las normas referentes a cada equipamiento. Las normas están preparadas por entidades especializadas, normalmente con la colaboración de fabricantes y usuarios, estableciendo todas las características eléctricas, métodos de ensayos y cálculo de ciclos de trabajo. Evidentemente, esta normalización tiene efecto directo en la reducción del costo de los equipamientos.

Los transitorios de tensión son manifestaciones de leyes físicas, independientes del control humano y se originan debido a cambios repentinos en la configuración de un circuito energizado, ya sea la apertura y cierre de interruptores de potencia, fallas que ocurren en el sistema, descarga de rayos y otros disturbios inesperados; los cuales generalmente ocasionan sobretensiones transitorias o impulsos de tensión de magnitudes impredecibles; que, a pesar de lo breve de su duración, pueden ser peligrosas por las amplitudes que se producen y que pueden originar ruptura o el deterioro del aislamiento del equipo.

Los estudios de las perturbaciones en los sistemas de transmisión de energía eléctrica, han demostrado que las descargas atmosféricas y las operaciones de maniobra son seguidas de ondas viajeras con un frente de onda escarpado. Cuando la tensión de esta onda alcanza el transformador de potencia, provoca una sollicitación desigualmente distribuida a lo largo del bobinado y puede producir la perforación del sistema aislante.

La tensión de impulso es unidireccional la cual crece rápidamente hasta su valor máximo y luego decae lentamente hasta el valor cero.

Al originarse un transitorio se generan tensiones y corrientes que están compuestas por señales de diversas frecuencias, las cuales se atenúan o aparecen conforme se desarrolla el transitorio, lo que significa que la composición de armónicos de las tensiones y corrientes varían con el tiempo [2].

Esto se debe a que la corriente en una inductancia no puede cambiar repentinamente y la tensión a través de un capacitor no varía instantáneamente puesto que la energía almacenada toma un tiempo determinado en redistribuirse en un circuito eléctrico.

Los fenómenos transitorios que ocurren en un sistema de potencia debido a razones expuestas anteriormente son de análisis muy complejo, ya que se requiere conocer su forma, magnitud y tiempo de duración.

El estudio de las sobretensiones, nos permitirá dar criterios sobre un adecuado diseño de equipos, sobre la operación y funcionamiento de un sistema de potencia con largas líneas de transmisión y con extensa cobertura. Muchos años de investigación han determinado que una sobretensión atmosférica se puede representar como un impulso unidireccional de tensión y obtenerse a partir de ciertos circuitos.

Características de las Sobretensiones de Impulso

Son fenómenos electromagnéticos cuyas consecuencias inmediatas pueden ser apreciados a simple vista por la presencia de arcos eléctricos. Toda onda de sobretensión está acompañada de una onda de sobre corriente que tiene la misma forma con amplitud distinta en un mismo instante.

Pueden ser observados mediante un osciloscopio o impresos con un oscilógrafo; se trata de una onda aperiódica, inicialmente con un pico elevado y después decreciente hasta anularse.

Las sobretensiones de impulso se trasladan a lo largo de una línea de transmisión en forma de ondas cuya amplitud se va amortiguando al alejarse del punto de partida, hasta que recuperan la normalidad después de múltiples reflexiones.

Las sobretensiones de impulso o de maniobras, son ondas que al ser aplicadas al aislamiento pueden ocasionar descarga disruptiva en diferentes intervalos de tiempo que están asociados a diversas partes de su perfil geométrico, ya sea en el frente, en la cresta o en la cola de la onda.

La introducción a la totalidad de las tensiones de impulso conduce a circuitos simples para la generación de las formas de onda necesarias. El aumento rápido y decaimiento lento, obviamente, se pueden generar mediante la descarga de circuitos con dos almacenamientos de energía, como la forma de onda también pueden estar compuestas por la superposición de dos funciones exponenciales. De nuevo, la carga del generador será principalmente capacitiva, como normalmente son representados y probados los sistemas de aislamiento. Por lo tanto esta carga tendrá la función de contribuir a la energía almacenada. Una segunda fuente de energía podría ser proporcionada por un capacitor adicional. La máxima energía almacenada en el capacitor, está dado por:

$$W = \frac{1}{2} C_1 (nV_0)^2 \quad (2.1)$$

La forma de onda de las sobretensiones tipo impulso puede ser representada por una doble exponencial la cual está definida por la ecuación:

$$V = V_0 [\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)] \quad (2.2)$$

Una forma de onda doble exponencial del tipo mencionado en (2.2) puede ser producida en el laboratorio con la combinación de un circuito en serie *RLC* bajo condiciones de sobre amortiguamiento o por la combinación de circuitos de *RC*. Diferentes circuitos que producen ondas de impulso se muestran en la Figura 2.12 A-D. Estos circuitos mostrados son los más usados comúnmente. La Figura 2.12 C) muestra un circuito limitado solamente a modelado de generadores y los circuitos mostrados en las figuras 2.12 A), B) y D) son los empleados comercialmente para realizar las pruebas [2].

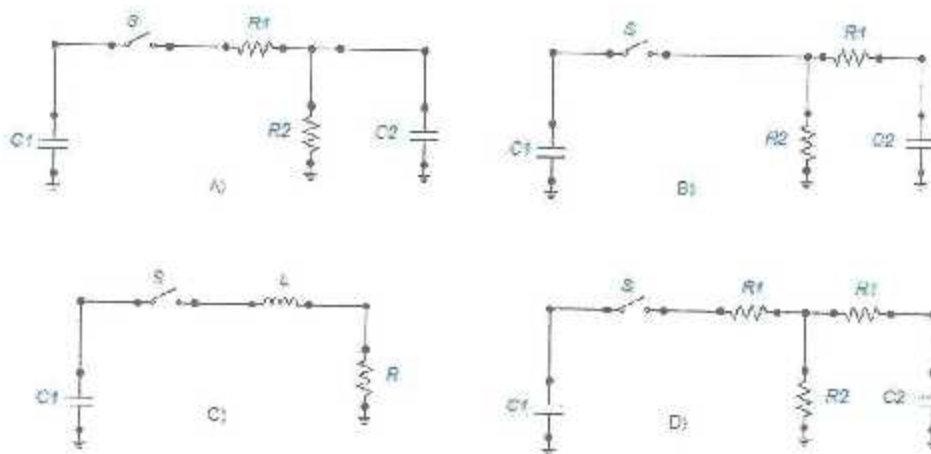


Figura 2. 12. Circuitos para producir formas de onda tipo impulso

Para la generación de las formas de onda de impulso tipo rayo, se cuenta con 4 modelos básicos principalmente con los cuales se puede realizar, considerando que se pueden obtener diferentes características con cada uno de ellos [2].

De los modelos mencionados anteriormente dos esquemas de conexión son los más utilizados, el circuito tipo "A" y tipo "B". El circuito tipo "B" es preferido por tener mayor eficiencia en la producción de un impulso. La ventaja que puede tener el "A" sobre el "B" es la mayor facilidad de cambiar o desmontar las resistencias del circuito generador, pero esto quizás, no compensa el hecho de tener menor eficiencia de circuito.

Se pueden realizar distintos tipos de análisis a los circuitos mencionados anteriormente, pero en este desarrollo solo se hará de 2 de ellos para observar algunas de sus diferencias.

Analizando el circuito de la figura 2.12 C) la corriente a través de la resistencia de carga R está dada por:

$$V = \frac{1}{C} \int_0^t i dt + Ri + L \frac{di}{dt} \quad (2.3)$$

Con condiciones iniciales a $t = 0$ siendo $I(0) = 0$ y la carga total en el circuito $i = dq/dt = 0$, y escribiendo la ecuación anterior como una ecuación con la transformada de Laplace:

$$V/s = \left(\frac{1}{C} + R + Ls \right) I(s) \quad (2.4)$$

O de la siguiente forma,

$$I(s) = \frac{V}{L} \left[\frac{1}{s^2 + \frac{Rs}{L} + \frac{1}{LC}} \right] \quad (2.5)$$

El voltaje a través de la resistencia es, $V_0(s) = I(s)R$; por lo tanto,

$$V_0(s) = V \frac{R}{L} \frac{1}{s^2 + \frac{Rs}{L} + \frac{1}{LC}} \quad (2.6)$$

Para una condición sobre amortiguada:

$$R/2L \geq \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.7)$$

Por lo tanto las raíces de la siguiente ecuación:

$$s^2 + \frac{Rs}{L} + \frac{1}{LC} \quad (2.8)$$

Son:

$$\alpha = s_1 = -\frac{R}{2L} + \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \quad (2.9)$$

$$\beta = s_2 = -\frac{R}{2L} - \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \quad (2.10)$$

$$V_c(t) = \frac{V\left(\frac{R}{2L}\right)}{\left[\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}\right]^{\frac{1}{2}}} [\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)] = V_0 [\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)] \quad (2.11)$$

$$V_0 = \frac{V\left(\frac{R}{2L}\right)}{\left[\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}\right]^{\frac{1}{2}}} = \frac{V}{\left[1 - \frac{4L}{CR^2}\right]^{\frac{1}{2}}} \quad (2.12)$$

La suma de las raíces: $(\alpha + \beta) = \frac{1}{LC}$ (2.13)

Y el producto de las raíces: $\alpha\beta = \frac{1}{LC}$ (2.14)

Para el análisis de los circuitos de la Figura 3.1 se utiliza la transformada de Laplace, la cual se simula con condiciones límite, esto es para $t \leq 0$ C_1 es cargado a V_0 y para $t > 0$. Para continuar el análisis se utilizará circuito de la Figura 2.12 A) el voltaje de salida está dado por la expresión:

$$V(s) = \frac{V_0 Z_2}{s Z_1 + Z_2} \quad (2.15)$$

Donde:

$$Z_1 = \frac{1}{C_1 s} + R_1 \quad (2.16)$$

$$Z_2 = \frac{R_2 / C_1 s}{R_3 + 1/C_1 s} + R_4 \quad (2.17)$$

Por sustitución encontramos:

$$V(s) = \frac{V_0}{k} \frac{1}{s^2 + as + b} \quad (2.18)$$

Donde:

$$a = \left(\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_1 C_2} + \frac{1}{R_2 C_2} \right) \quad (2.19)$$

$$b = \left(\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \right) \quad (2.20)$$

$$k = R_1 C_2 \quad (2.21)$$

Para el circuito de la fig. 2.12 B) se encuentra la misma expresión general (ecuación (2.18)), con las siguientes constantes; no obstante se tienen algunas diferencias en las expresiones:

$$a = \left(\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_1 C_2} + \frac{1}{R_2 C_1} \right) \quad (2.22)$$

$$b = \left(\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \right) \quad (2.23)$$

$$k = R_1 C_2 \quad (2.24)$$

Para ambos circuitos, por lo tanto, se obtiene a partir de la transformada de Laplace la misma expresión en el dominio del tiempo:

$$V(t) = \frac{V_0}{k} \frac{1}{(\alpha_2 - \alpha_1)} [\exp(-\alpha_1 t) - \exp(-\alpha_2 t)] \quad (2.25)$$

Donde α_1 y α_2 son las raíces de la ecuación $s^2 + as + b = 0$, o expresado como:

$$\alpha_2, \alpha_1 = \frac{a}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 - b} \quad (2.26)$$

Por tanto, el voltaje de salida $V(t)$ es la superposición de dos funciones exponenciales de diferentes signos. De acuerdo con (2.26), la raíz negativa conduce a una constante de tiempo mayor $1/\alpha_1$, que la positiva, que es $1/\alpha_2$. Un gráfico de la expresión (2.25), se muestra en la Fig. 2.13, además con esto se puede concluir que se pueden lograr voltajes de impulso de rayo y por maniobra [1].

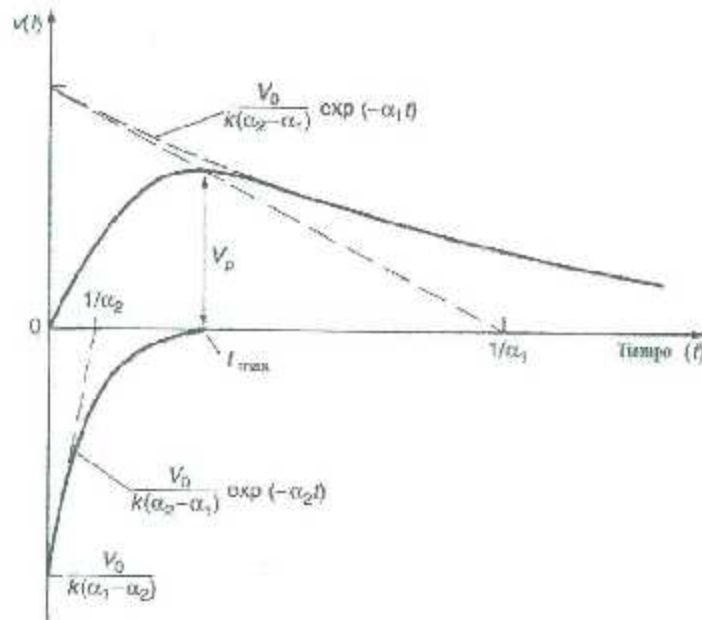


Figura 2.13. Componentes de la forma de onda tipo impulso [1].

Siguiendo con el análisis de los circuitos A) y B) de la Figura 2.12, se podría suponer que los dos circuitos son equivalentes, se puede apreciar una mayor diferencia si la eficiencia de voltaje, η_v se calcula. El circuito B) siempre tiene una mayor eficiencia ya que el voltaje de salida es no dependiente del divisor de voltaje que se crea con la conexión entre R_1 y R_2 como lo es en el circuito A) [1]. Esta eficiencia está definida como:

$$\eta = \frac{V_p}{V_0} \quad (2.27)$$

El trabajo común es encontrar los valores de las resistencias R_1 , R_2 , C_1 y C_2 son generalmente conocidos ya que normalmente se construye el generador a partir de los valores de estos. Para grandes generadores, los capacitores de descarga están siempre dimensionados para una buena eficacia dentro de un cierto rango de C_2 . Esta capacitancia de carga total se puede medir fácilmente si no se sabe por adelantado. Los valores de resistencia desconocidas pueden ser calculados usando las expresiones de $\alpha_1 \cdot \alpha_2 = b$ y $\alpha_1 + \alpha_2 = b$, y los valores del circuito dependiente de a y b , debido a las ecuaciones (2.19) hasta la (2.24) [1].

Ecuaciones para obtener las resistencias de frente y cola para el circuito de la figura 2.12 B):

$$R_1 = \frac{1}{2C_1} \left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) - \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_1 + C_2)}{\alpha_1 \alpha_2 \cdot C_2}} \right] \quad (2.28)$$

$$R_2 = \frac{1}{2(C_1 + C_2)} \left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_1 + C_2)}{\alpha_1 \alpha_2 \cdot C_2}} \right] \quad (2.29)$$

Ecuaciones para obtener las resistencias de frente y cola para el circuito de la figura 2.12 B):

$$R_1 = \frac{1}{2C_2} \left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) - \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_1 + C_2)}{\alpha_1 \alpha_2 \cdot C_1}} \right] \quad (2.30)$$

$$R_2 = \frac{1}{2(C_1 + C_2)} \left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_1 + C_2)}{\alpha_1 \alpha_2 \cdot C_1}} \right] \quad (2.31)$$

Todas estas ecuaciones contienen las constantes de tiempo $1/\alpha_1$ y $1/\alpha_2$ (algunos textos lo manejan como $1/\beta$) que dependen en la forma de onda. Sin embargo, no hay una relación simple entre estas constantes de tiempo y los tiempos T_c , T_f y T_p tal como se definen en los estándares nacionales o internacionales, esta relación se puede encontrar mediante la aplicación de las definiciones de la expresión analítica para $V(t)$ para la ecuación (2.25). La relación es irracional y debe obtenerse por una solución numérica. En la Tabla 2.2 se muestra el resultado numérico para algunas formas de onda seleccionadas [1].

Tabla 2. 2. Constantes de tiempo para las diferentes formas de onda [1].

T_f/T_c (μs)	T_p/T_c (μs)	$1/\alpha_1$ (μs)	$1/\alpha_2$ (μs)
1.2/5	-	3.48	0.80
1.2/50	-	68.2	0.405
1.2/200	-	284	0.381
250/250	-	2877	104
-	250/2500	3155	62.5

2.4. Componentes principales del generador de impulsos

Aunque existen otros circuitos que pueden generar una onda exponencial de tensión, la cual puede usarse como un impulso de voltaje de tipo atmosférico [2], el circuito más utilizado está formado por dos capacitores, dos resistencias y un interruptor. Los elementos del circuito generador son:

Capacitor auxiliar (C_e): podría o no ser necesario en paralelo con el objeto de prueba, puesto que la capacitancia del objeto de prueba o equipo a ser probado actúa como capacitor C_2 .

Capacitor Principal (C_1): es la capacitancia serie del circuito multiplicador Marx, constituye el componente más refinado y más costoso del equipo, la capacidad de estos capacitores y su tensión de servicio definen la energía (en kilojoule) de una instalación de impulsos, la capacitancia de C_1 siempre será muy mayor que la de C_2 . Es el capacitor que se conecta a una fuente de alto voltaje de DC a través de una resistencia limitadora (protectora). Luego de ser cargado C_1 se cierra un interruptor. El capacitor se descarga bruscamente y el resto del circuito recibe una energía considerable a una tensión elevada. Los elementos del circuito dan forma a la tensión de descarga del capacitor C_1 y así se obtiene un impulso de tensión en los terminales de salida.

Capacitor de Salida (C_2): es la capacitancia del objeto de prueba más un capacitor adicional. Debe ser un capacitor con menor capacidad que C_1 y que pueda soportar la tensión total de salida. En los terminales de C_2 se encuentra aplicado el impulso generado pues son los terminales de salida del circuito generador. En ocasiones C_2 está formado por la combinación en paralelo del objeto de prueba y un capacitor auxiliar C_e . En otras ocasiones el circuito generador no dispone de un elemento C_e .

Resistencia de frente de etapa (R_1): es una resistencia que es colocada en serie al capacitor C_1 y al interruptor, cuando el mismo se cierra. A través de ésta circula la corriente que va hacia el objeto de prueba (y a la resistencia R_2 , según el tipo de circuito).

Resistencia de cola de etapa (R_2): es una resistencia que queda colocada en paralelo al capacitor C_1 (o al C_2 , según el tipo de circuito) cuando se cierra el interruptor.

Resistencia de carga de etapa (R_L): las resistencias de carga limitan la corriente inicial de carga, son de valor suficientemente alto como para asegurar que ningún flujo de corriente circule por ellas durante la descarga. Una corriente típica de carga deberá estar entre 50 y 200 mA. Los resistores de carga también proporcionan una corriente que mantiene el arco vivo en el espacio del explosor, entre 5-10 amperios a través de la brecha.

Interruptor de esferas (F_s): se trata de un dispositivo que, al cerrar, completa el circuito de modo que el capacitor C_1 que ahora forma parte de la red resistiva-capacitiva compuesta por C_2 , R_1 , R_2 , se descarga. Se pueden utilizar diferentes mecanismos y sistemas para crear tal interruptor. El más utilizado en alto voltaje está formado por dos esferas metálicas separadas (sphere gap), a través de cuyo espacio salta un arco eléctrico. Dicho arco puede saltar espontáneamente al ser suficientemente elevada la tensión entre esferas o por efecto de una chispa menor que surge en una bujía (trigatrón) o en una esfera. Las esferas metálicas huecas, dispuestas en pares por cada etapa, se utilizan como el mecanismo de conmutación que permite la descarga del generador de impulsos. Una esfera del espinterómetro se instala, por etapa, en una columna rígida de baquelita mientras que la opuesta se coloca en una

columna móvil, cuyo movimiento se acciona por medio del control instalado en la mesa de comando; esto trae como consecuencia que todas las esferas están a la misma distancia respecto a las que están fijas. Al aumentar el espacio entre las esferas se permite la carga del generador y al disminuirlo se procede a la descarga de cada una de las etapas hacia el objeto de este método de inicio de la descarga es del tipo natural o espontáneo.

Trigatron: es un dispositivo que hace posible disparar correctamente al generador a una tensión de carga preseleccionada en el momento deseado, permitiendo producir a voluntad la descarga en el primer explosor arrastrando sucesivamente las descargas en todos los demás explosores de las etapas siguientes, provocando de esta manera la descarga del generador de impulso sobre el objeto de prueba.

Es decir después que los capacitores de etapa del generador han sido cargados a una tensión y el espacio entre explosores ajustado de acuerdo a la tensión requerida, se pulsa el botón de disparo del circuito de control de pulsos que es un dispositivo de precisión electrónico que genera la señal de disparo (descarga de un capacitor de disparo hacia el transformador de pulso, elevando la tensión el cual transmite el impulso de disparo hacia el electrodo de disparo del explosor de la primera etapa produciendo entonces la ionización parcial del espacio en el primer explosor, provocando el disparo y el de todas las etapas restantes), con lo cual el generador de ondas de impulsos habrá funcionado entregando a la salida la tensión.

El rango que opera el mecanismo de disparo está entre (5 -100 %) de la tensión de carga y es independiente de ella.

2.5. Generadores de impulso multietapa

Lo usual es que un generador de impulso tenga varias etapas (circuitos) como los mostrados en la figura 3.1, esto lo convierte en un circuito múltiple ordenado y se compone de un conjunto de resistencias (R_1 , R_2) que controlan la forma del frente y la cola de la onda, explosores (F_x) (son esferas acopladas con espaciamiento ajustable y se considera al explosor como un interruptor) y condensadores de impulsos (C_1). La conexión de etapas en serie permite lograr voltajes de impulso más elevados, pues los capacitores se descargan en serie. La conexión en paralelo permite lograr mayores corrientes de descarga. En todo caso, el circuito del generador equivalente representa un escalamiento de los valores de las resistencias y capacitores del generador multietapa. El voltaje y la corriente de salida del generador equivalente deben ser iguales a los del multietapa. Hay generadores multietapa [1], en Universidades o centros de investigación, de hasta 20 etapas y que producen impulsos de hasta 4 MV pico.

Las dificultades encontradas en los explosores para la conmutación de muy altos voltajes, el aumento del tamaño físico de los elementos de circuito, los esfuerzos necesarios en la obtención de altos voltajes de c.c. para cargar C_1 y, por último pero no menos importante, las dificultades de la supresión de descargas corona de la estructura durante el período de carga de un circuito de una etapa a voltajes mayores llevo en 1923 a Marx al diseño de circuitos para superar estas dificultades, sugiriendo una disposición en la que una serie de capacitores se cargan en paralelo a través altas resistencias óhmicas y luego se descarga en serie a través de explosores.

Por ejemplo el esquema de un generador de impulso, formado por cuatro etapas serie idénticas tipo "B", se muestra en la figura 3.10. El análisis de dicho generador se reduce al de un generador equivalente de una sola etapa como en la figura 3.1. Para esto, las resistencias R_1 y R_2 del generador equivalente son iguales a 4 veces el valor de la resistencia correspondiente (R_1 y R_2) de cualquiera de las 4 etapas, y el capacitor

C_1 del generador equivalente debe ser igual a $\frac{1}{4}$ del valor del capacitor correspondiente C de cualquiera etapa. El voltaje al que estará cargado el C_1 equivalente es 4 veces el voltaje del capacitor correspondiente C de cualquiera etapa. El capacitor C_2 del generador equivalente es igual al capacitor C_e del generador de 4 etapas. Las resistencias R_L del generador multietapa sirven para que los capacitores C sean cargados, en paralelo, con el elevado voltaje directo que produce la fuente AC provista de un puente rectificador.

La capacitancia total de descarga puede ser calculada como:

$$\frac{1}{C_1} = \sum \frac{1}{C_1} \quad (2.32)$$

La resistencia de frente total se calcula como:

$$R_1 = R_1 + \sum R_1 \quad (2.33)$$

En la ecuación anterior R_1 es una resistencia utilizada en ocasiones para eliminar sobre picos u oscilaciones que se presentan en las forma de onda resultantes.

La resistencia de cola total se calcula como:

$$R_2 = nR_2 = \sum R_2 \quad (2.34)$$

El circuito de la figura 3.10 se compone de 4 etapas, cada etapa soporta un Capacitor y se conecta en paralelo con el explosor F_s y las resistencias R_1 y R_2 .

Los capacitores R_L de cada etapa son cargados en paralelo a través de las resistencias de carga R_L de manera que al final del periodo de carga los puntos

indicados **A, B, C, D** estarán al potencial $+V_0$ respecto a **E, F, G, H** que están al potencial de Tierra, $V = 0$; la separación de los explosores se ajusta según la norma IEC de acuerdo a las necesidades de la tensión de salida.

Cuando el nivel de carga apropiado ha sido alcanzado (al llegar la tensión al valor de la tensión disruptiva de los explosores para la cual se ha ajustado el espacio disruptivo, se produce la conmutación serie de los condensadores C_1 , se activa la unidad del disparo de la primera etapa mediante un "pulso" disparado hacia el primer juego de explosores (F_s) de tal forma que al ionizar el aire de la brecha se produce la descarga entre esferas, siendo la carga del primer condensador C_1 transferida a la siguiente etapa a través de la resistencia R_1 . (Para nuestro caso $R_1 < R_2$).

La descarga iniciada entre los explosores **A-F**, hace que los puntos **F, G, H, I** se carguen al potencial $-V_0$ siendo sostenidas por las resistencias R_1 y R_2 .

En ese instante el punto **B** que continúa en $+V_0$ sostenida por resistencia de carga R_L , produce en el explosor **B-G** una tensión $(-V_0) - (-V_0) = -2V_0$ que inmediatamente produce la descarga entre sus esferas del explosor poniendo en serie los dos C_1 (de la primera y de la segunda etapa), transfiriendo la carga a la tercera etapa; en dicho instante el punto **C** continúa al potencial $+V_0$ sostenido por R_L , mientras que los puntos **G, H, I** estarán cargados al potencial $-2V_0$, estableciéndose entre los Explosores **C-H** un potencial $(-V_0) - (-2V_0) = -3V_0$ produciéndose de ese modo, en las etapas siguientes la suma de las tensiones a las cuales los condensadores C_1 fueron cargados, con lo que se consigue multiplicar (por el número de etapas) la tensión de carga, obteniendo a la salida del Generador de Impulsos en este caso, una Tensión "4" veces la Tensión de Carga, Figura 3.10

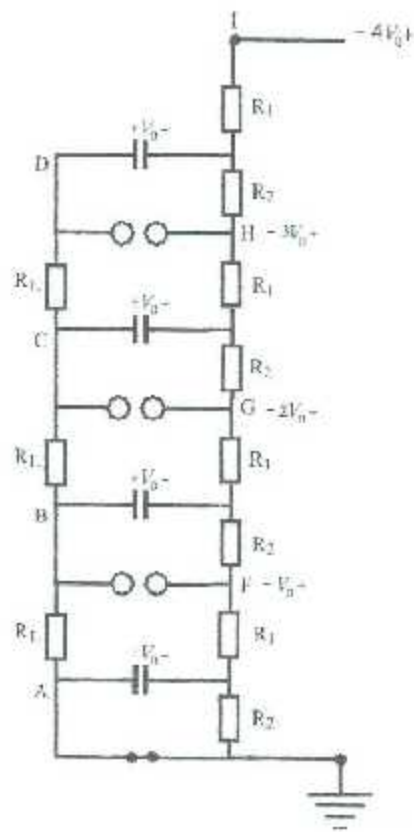


Figura 2. 14. Generador de impulsos multietapa

Constructivamente el área del generador debe tener una buena red de puesta a tierra en el piso, paredes y techo con jaula de Faraday para evitar que las interferencias externas perturben las mediciones, así como para evitar descargas en las instalaciones adyacentes. Se requiere mucho espacio para tener las distancias de aislamiento en el aire.

2.6. Consideraciones de aspectos prácticos en la teoría

Unas de las fuentes de interferencia que más llaman la atención son las imperfecciones en los componentes pasivos. La ausencia en ellos de ganancia de potencia induce a pensar que tienen muy poco que ver con el problema EMI (Electromagnetic Interference). Sin embargo, el examen detenido de las especificaciones de los fabricantes muestra claramente que todos estos componentes se comportan no sólo de una forma que dista de la ideal, sino que en ocasiones de forma opuesta a la deseada, y siendo esta la causa de los problemas.

La discrepancia entre comportamiento real y comportamiento ideal se pone de manifiesto en particular a altas frecuencias, lo que significa que es grave no sólo en los circuitos digitales rápidos y de radiofrecuencia, sino también precisamente cuando se trata de suprimir transitorios, que son un problema habitual en EMC (Electromagnetic Compatibility).

La resistencia eléctrica de un material o componente se define como el cociente entre la tensión continua aplicada y la intensidad de corriente que circula por ella, si la tensión aplicada es alterna, se define entonces como la parte real del cociente (complejo) entre tensión y corriente. El primer hecho importante es que, en general, la resistencia en corriente continua difiere de la resistencia en corriente alterna. Esta última crece al aumentar la frecuencia debido al efecto pelicular. En cualquier caso, la resistencia eléctrica de un material o componente determina la parte de energía eléctrica que se convierte en energía térmica al circular por él una corriente eléctrica. La resistencia es una propiedad intrínseca a los materiales, pero no es una constante. Por lo tanto, la resistencia está en función de las dimensiones y del estado cristalino o físico del material y de sus impurezas. Además, depende de la frecuencia, intensidad de la corriente y tensión aplicada. Puede variar también con la temperatura, humedad, presión, iluminación y campos magnéticos externos. Algunas de estas dependencias se emplean en la protección de transitorios, otras son el fundamento de diversos transductores. Pero el comportamiento por frecuencia, en particular, puede ser una

fuentes de sorpresas y hace que, en la práctica, no se tengan componentes puramente resistivos, sino que las resistencias presentan, además de la resistencia propiamente dicha, inductancia y capacitancia.

Para caracterizar el comportamiento real de un componente pasivo se suele emplear un circuito equivalente de parámetros concentrados que presente un comportamiento similar al que se obtiene al medir la impedancia del componente en cuestión. Dicho circuito está formado por componentes ideales pero cuyo valor puede que tenga que cambiarse de unas a otras frecuencias para poder obtener una descripción correcta de la impedancia real. El circuito equivalente más adecuado depende del material y del tipo de resistencia.

2.7.1. Consideraciones de alta tensión

Se deben tener muy presentes las condiciones ambientales, así como los correctos aislamientos y las distancias mínimas de seguridad, todo esto para soportar las altas tensiones producidas por el generador de impulsos.

Dada la peligrosidad de trabajar con alta tensión, hay que seguir unas pautas de seguridad a la hora de la construcción y prueba del generador:

Se guardaran distancias suficientes entre conductores a diferente tensión para evitar fallos de aislamiento. La mayoría de los cables tienen aislamiento plástico de 1000 V. En el secundario del TP y a la salida del rectificador se tiene una diferencia de potencial de alrededor de 30 kV. El aire seco tiene una tensión de ruptura de 3000 V/mm, por lo que con una distancia mayor de 10mm entre conductores no aislados o superficies sería suficiente, aunque por seguridad los conductores están separados un mínimo de 30 cm.

Tras la carga del capacitor y si por algún motivo estos no son disparados por los explosores pueden quedar cargados, por lo que es necesario cortocircuitarlos o ponerles una resistencia para descargarlos antes de manipularlos. Para la descarga

se plantea utilizar una pértiga aislada cuya punta está puesta a tierra y guantes aislantes.

Durante el funcionamiento del generador de impulsos se apartarán del radio de acción todo tipo de aparatos ya que pueden ser dañados por tensiones o corrientes inducidas. Se tiene una jaula de Faraday que cubre toda el área del generador de impulsos, excepto el área superior con lo que se puede garantizar que las descargas que se produzcan queden dentro de esa zona sin dañar el exterior.

Las descargas eléctricas ionizan el oxígeno del aire produciendo ozono, el cual es tóxico. Es conveniente esperar un tiempo antes de acceder a la zona de descargas tras el apagado del aparato y no tenerlo mucho tiempo en funcionamiento.

Capítulo III

Resultados de Pruebas a los Elementos del Generador de Impulsos

3.1. Diagnóstico del estado de los componentes del generador de impulsos

El diagnóstico del generador de impulsos y sus componentes asociados comienza por la recolección de todos los datos necesarios que conduzcan a un análisis y posterior evaluación del sistema en su conjunto. En este orden de ideas, es necesario comprobar el funcionamiento (mediante medición y observación) de los diferentes elementos que conforman el aparato.

Los elementos del generador de impulsos que se revisaron fueron los capacitores por medio de medición y observación, las resistencias de frente, cola y de carga por medición y observación y el estado de los explosores solo por observación, el estado de estos elementos se evalúa por medición y observación ya que tienen valores definidos por diseño algunos de ellos, si estos valores medidos no concuerdan con los valores de diseño es señal de que se encuentran en mal estado, por observación se comprueba si presentan algún daño físico que pueda ocasionar algún mal funcionamiento durante las pruebas, como es el caso de las abolladuras de los explosores que ocasionan problemas al momento de realizar pruebas con el generador.

A continuación se presenta el diagnóstico de los elementos más importantes que conforman el sistema de pruebas de impulso de frente de onda y descenso $1,2/50 \mu s$ del Instituto Tecnológico de La Laguna (ITL).

Visualmente el generador de impulsos presenta falta de mantenimiento en sus partes externas; encontrando gran cantidad de polvo, aceite, grasa y óxido en las columnas de soporte, condensadores de etapa, explosores, láminas conectoras, puentes y cables de unión. Como es conocido, este tipo de contaminación afecta el correcto desempeño de cualquier equipo eléctrico, siendo más críticos los efectos en un aparato de alta tensión. Durante los primeros años de operación del generador de impulsos de tensión del ITL, se utilizó para realizar pruebas de impulso a transformadores y cadenas de aisladores así como diversos tipos de aislamientos.

La figura 3.1 muestra dos imágenes comparativas del generador de impulso durante sus primeros años de operación y la segunda su estado actual, a simple vista no se observa mucha diferencia entre los elementos que lo conforman aun cuando entre ellas existen más de dos décadas de diferencia, por ello es importante verificar el estado de los componentes del generador y determinar si estos conservan las características y valores con los que fueron diseñados.

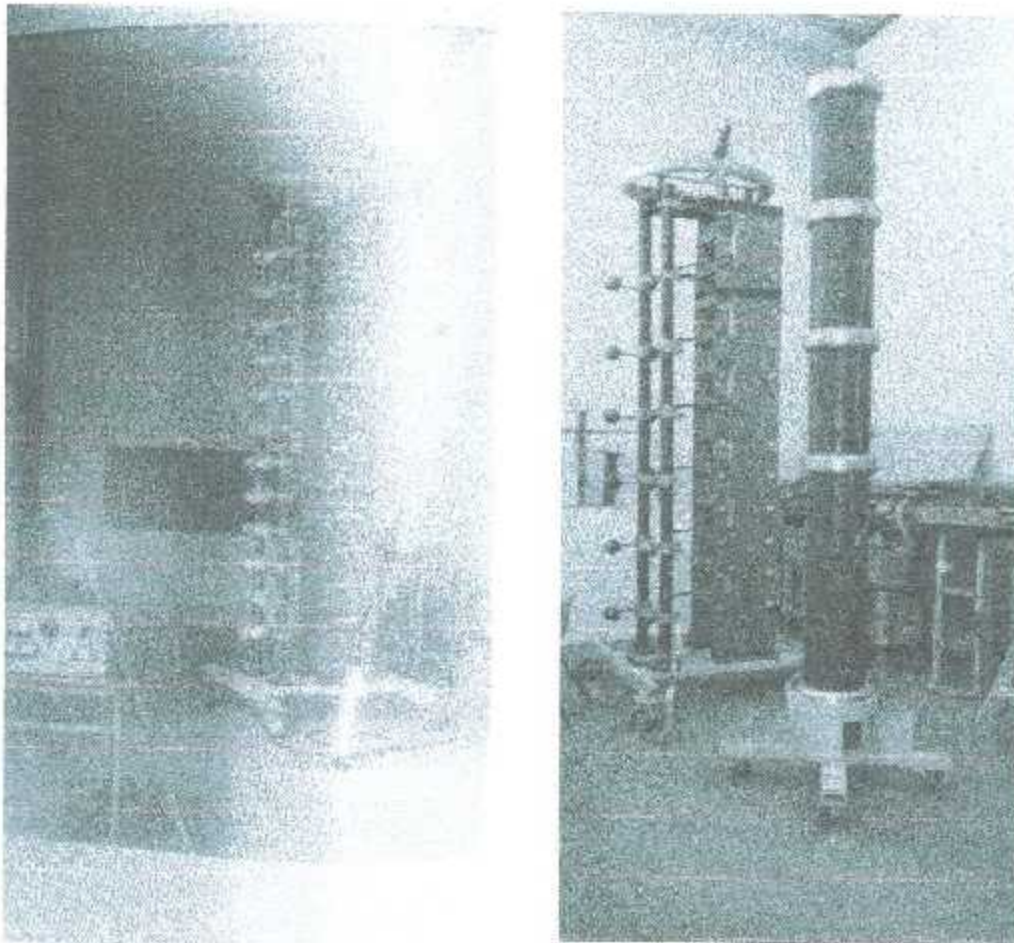


Figura 3. 1. Generador de Impulsos de descargas atmosféricas del ITI

a) Estado de operación primero años

b) Estado actual fuera de operación

Las dimensiones físicas aproximadas del generador son cuatro metros de altura desde la base hasta el toroidal unificador de campo eléctrico y aproximadamente medio metro entre cada una de las columnas aislantes que soportan a los capacitores de etapa.

La figura 3.2 muestra la disposición de los distintos equipos que conforman el laboratorio de alta tensión, los equipos el divisor de tensión capacitivo, para medir y observar los impulsos producidos por el generador y el voltmetro de esferas con el que se puede medir la magnitud del impulso de tensión tipo rayo, estos equipos constituyen el sistema de prueba de impulsos.

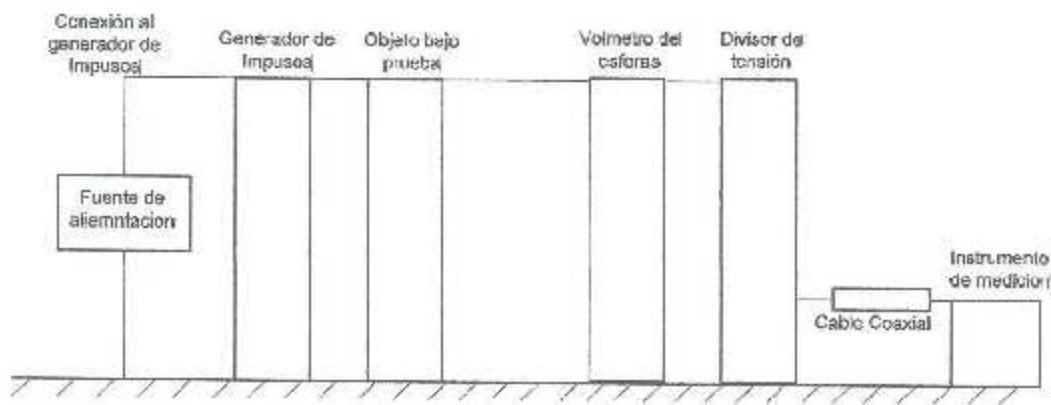


Figura 3. 2. Esquema general del sistema generador de impulsos de tensión

El objeto bajo prueba es el equipo, instrumento o aislamiento que se desea probar con el generador de impulsos, de este objeto dependerán los valores de los impulsos de tensión tipo rayo que se le aplicaran así como también las formas de onda que se le aplicarán ya sean plenas o cortadas.

La mesa de control del generador se ubica fuera de la jaula de Faraday para evitar cualquier interferencia, desde dicha mesa controlaba el movimiento de los explosores del generador así como la distancia de separación entre los explosores del voltmetro de esferas.

3.1.1. Descripción del generador de impulsos

Los datos nominales de diseño original del generador de impulsos del Instituto Tecnológico de La Laguna se observan en la Tabla 3.1.

Tabla 3. 1. Características básicas del generador de impulsos del ITL

<i>Descripción</i>	<i>Valores</i>
Forma de onda de impulso de rayo:	1.2/50 μ s
Voltaje de alimentación:	120 V
Tensión nominal Vn: voltaje teórico máximo de carga:	720 kV
Energía nominal U: energía teórica máxima disponible:	U \approx 1 kJ
14 Capacitores de carga: valores nominales c/u:	C1=45 nF @ Vn=60 kV
Número de etapas: Considerando a cada capacitor como una etapa, el número posible a configurar en el generador de impulsos es n=12.	

Para el trabajo de recuperación del aparato se configurarán solo seis etapas, afin de realizar pruebas de caracterización. Cabe mencionar que el diseño original con el que se planeó el aparato a largo plazo, es utilizar todas las etapas de este ya que está diseñado para ser un generador de doce etapas, por tanto dos de los catorce capacitores son de respaldo.

En la etapa de inspección del equipo se procedió a la limpieza parcial del generador empleando como solvente alcohol isopropílico.

La fuente para alimentar el generador de impulsos está dañada y siendo esto la principal causa de que este quedara fuera de operación, con el pasar del tiempo la falta de mantenimiento ocasiono el deterioro de los demás elementos que conforman el generador de impulsos.

3.1.2. Capacitores de etapa

Después de realizar la limpieza de las superficies, el estado físico externo de cada uno de los capacitores se mostró "satisfactorio", no se presentaron cambios estructurales y/o signos visibles de deterioro o ruptura en el chasis y terminales de cada dispositivo. Sabiendo que los valores de diseño de los capacitores fue 45 nF y para tener una certeza de cuánto se habían alejado las propiedades eléctricas de cada condensador, se realizaron las mediciones de la capacitancia nominal a cada uno de estos. Los resultados se indican en la Tabla 3.2.

Tabla 3. 2. Capacitores de etapa

Capacitores de etapa	
#	C_{med} [nF]
1	43.85
2	44.01
3	43.98
4	43.71
5	43.79
6	43.94
7	44.3
8	44.73
9	43.99
10	45.04
11	43.8
12	43.94
13	44.36
14	43.54

Se debe mencionar que al capacitor N° 3 no se le pudo efectuar las mediciones esto debido a las condiciones inseguras de trabajo, ya que no se puede extraer del generador sin desmontar toda la estructura, lo cual provoca un inconveniente, ya que cuenta con partes muy frágiles, por lo tanto solo se tomaron los valores con un

multímetro básico, coincidiendo los resultados con los valores de los demás capacitadores por lo que se considera su buen estado, cabe mencionar que el instrumento que se utilizó para tomar las mediciones fue un medidor RLC.

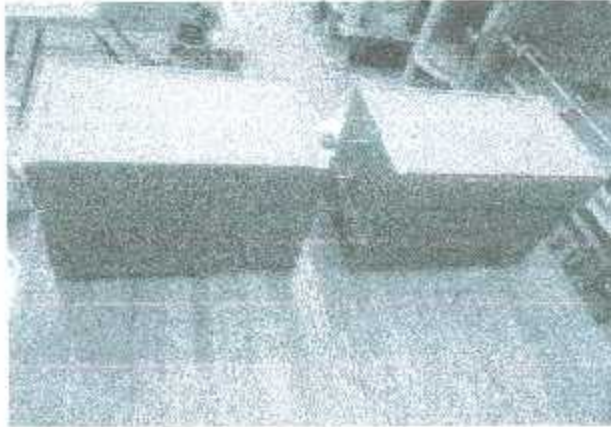


Figura 3. 3. Capacitores de etapa del generador de impulsos.

3.1.3. Resistencias de frente y cola

Para verificar el estado operativo de las resistencias se procedió a identificar, limpiar y revisar exteriormente así como medir sus características eléctricas. Se construyeron junto al generador 12 resistencias de cola con un valor ohmico de 1500Ω y 36 resistencias de frente, de las cuales 12 son de 50Ω , 12 de 120Ω y 12 de 300Ω , estas resistencias están construidas con alambre de Nicromo ya que es un material que resiste altas temperaturas y mantiene su resistencia con cambios de temperatura. En general, la mayoría se encuentran en buen estado aunque algunas presentan desgaste sobre el hilo del devanado resistivo, otras muestran oxidación en los extremos de conexión y signos de quemaduras. Las tablas 3.3 y 3.4 indican los valores obtenidos de las mediciones efectuadas al inventario con el que cuenta el laboratorio de alta tensión al inventario conseguido en el laboratorio de alta tensión, con las siguientes condiciones de prueba: temperatura ambiente: 27°C y resistencia de las puntas de prueba: 0.262Ω .

Tabla 3. 3. Resistencias de cola

Resistencias de cola	
#	$R_{med} \text{ k}\Omega$
1	Dañada
2	1.51
3	Dañada
4	1.486
5	1.53
6	1.478
7	1.47
8	Dañada
9	1.529
10	1.5
11	1.51
12	1.53

Las resistencias de frente tienen un bobinado Ayrton-Perry, es un tipo de bobinado bifilar. Su ventaja es que la bobina resultante de alambre tiene bajos valores de inductancia parásita y capacitancia parásita. La razón de esto es que en el frente de onda del impulso tipo rayo se crean oscilaciones cuando se tienen inductancias parásitas en los elementos que conforman el generador, en el caso de las resistencias de cola la inductancia parásita no tiene influencia en la forma de onda por lo que el bobinado de estas resistencias es normal.

El bobinado Ayrton-Perry se hace de dos alambres separados enrollados en direcciones opuestas a lo largo de una forma aislante y conectada en paralelo en los extremos. Puesto que hay el mismo número de vueltas del alambre en cualquier dirección, los campos magnéticos de los dos alambres se cancelan entre ellos, así que la bobina tiene poca inductancia; y puesto que las vueltas adyacentes de los dos alambres están aproximadamente a la misma tensión, hay poca capacitancia parasitaria entre las espiras.

Tabla 3. 4. Resistencias de frente de 50, 120 y 300 Ohms

Resistencias de frente					
Resistencia	$R_{med} \Omega$	Resistencia	$R_{med} \Omega$	Resistencia	$R_{med} \Omega$
1	51.6	18	118	29	308
2	49	19	116	30	295
3	47.3	20	115	31	331
4	50	21	117	32	300
5	49.8	22	115	33	305
6	51	23	119	34	300
7	51.6	24	122	35	296
8	50.9	25	117	36	306
9	49.4	26	113	37	298
10	52	27	118	38	315
11	50	28	115	39	560
12				40	398

Los valores de resistencia medida difieren alrededor del 5% al 10% respecto a los datos nominales con que fueron diseñadas los cuales son 50, 120 y 300 Ω , siendo aceptable su uso en pruebas, en la Figura 3.5 se muestra el conjunto de las resistencias y la Figura 3.4 muestra algunos de los daños que presentan las resistencias.



Figura 3. 4. Resistencias de frente y cola dañadas

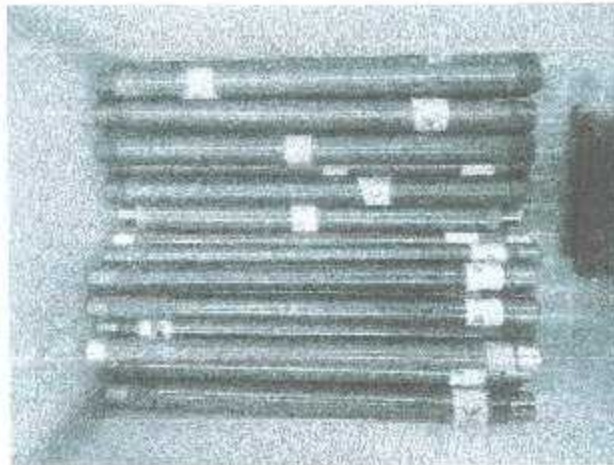


Figura 3. 5. Resistencias de frente y cola del generador de descargas atmosféricas

3.1.4. Resistencias de carga

Para efectuar pruebas de impulso considerando más de una etapa se encontraron únicamente once resistencias limitadoras, de valor resistivo muy alto nominal de 45 k Ω . Además, debido al prolongado tiempo que estuvieron montadas en el aparato y a la falta de mantenimiento, las terminales presentaban corrosión, hecho que ocasionaba una mala continuidad en el circuito del generador. Después de un proceso de lijado y pulido de terminales se logró obtener un buen contacto en las conexiones de la instalación. Se encontraron solo tres resistencias dañadas para ser utilizadas en las pruebas, del resto se observó que sus valores medidos no se encontraban muy alejados del valor nominal.

La Tabla 3.5 presenta los resultados obtenidos a cada resistencia limitadora de carga. La Figura 3.6 se muestran físicamente algunas de estas resistencias.

Tabla 3. 5. Resistencias de carga

Resistencias de carga	
#	$R_{res} \text{ k}\Omega$
1	42.9
2	43.1
3	Dañada
4	43.7
5	43.9
6	Dañada
7	Dañada
8	45
9	44
10	42.2
11	44.3

Al igual que las resistencias de cola el bobinado de estas resistencias es normal ya que la inductancia parásita no tiene impacto en la forma de onda del impulso de tensión tipo rayo.

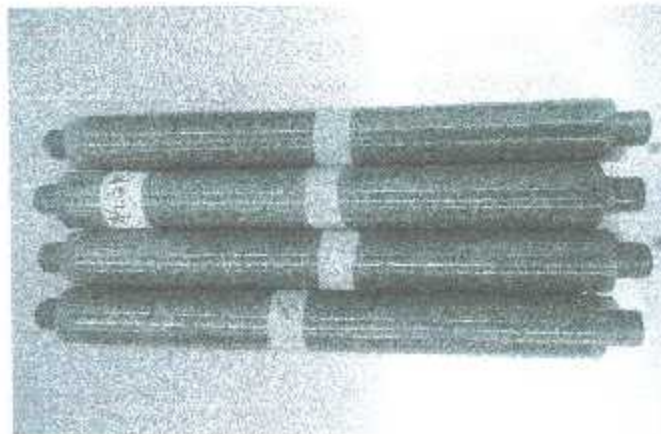


Figura 3. 6. Resistencias de carga del generador de impulsos

3.1.5. Explosores

Los Explosores son esferas de cobre montadas estructuralmente y eléctricamente aisladas sobre dos columnas, una fija y otra móvil, la dimensión de las esferas es de un diámetro $D=10$ cm ya que existen tablas normalizadas con los valores y tamaños que deben tener las esferas, éstas presentaban abolladuras y erosión en su superficie, lo cual se puede apreciar en la Figura 3.7. Estas abolladuras se produjeron por la forma en que hacían contacto las esferas, ya que al ser operadas para producir un disparo de los capacitores de carga a través de ellas, se hacían chocar mecánicamente y de manera brusca lo que dio lugar a abolladuras, con el tiempo la erosión y el óxido fue acumulándose por falta del mantenimiento.

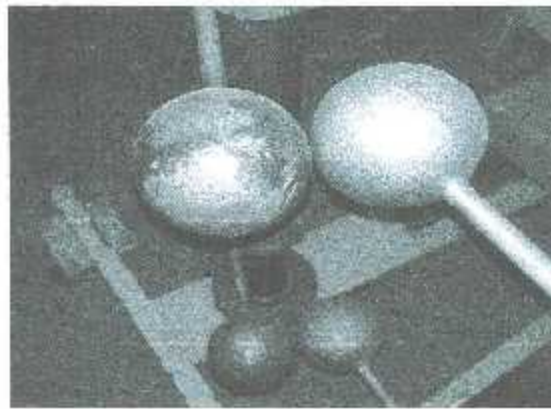


Figura 3.7. Explosores del generador de impulsos, esferas de diámetro 10 cm

Las esferas con más daños se enviaron a rectificar, con lo cual se procuró asegurar una mejor respuesta de operación durante los disparos de descarga de capacitores. Los explosores en mejores condiciones de superficie se colocaron en las primeras etapas del generador ya que con estos se produce una mejor distribución del campo eléctrico evitando efectos corona indeseados. Para las etapas superiores no se necesitan tantos cuidados ya que el disparo de los explosores está casi asegurado por la multiplicación de la tensión en estas secciones.

Tabla 3. 6. Explosores del generador de impulsos

Explosores		
Pares de Explosores	D med [cm]	Observaciones
1	10.82	Signos de erosión, pequeñas abolladuras y óxido
2	10.8	Signos de erosión, pequeñas abolladuras y óxido
3	10.85	Signos de erosión, pequeñas abolladuras y óxido
4	10.89	Signos de erosión, pequeñas abolladuras y óxido
5	10.83	Signos de erosión, pequeñas abolladuras y virutas
6	10.85	Signos de erosión, pequeñas abolladuras y virutas
7	10.79	Signos de erosión, pequeñas abolladuras y óxido
9	10.76	Signos de erosión, pequeñas abolladuras y óxido
11	10.8	Signos de erosión, pequeñas abolladuras y virutas
12	10.84	Signos de erosión, pequeñas abolladuras y óxido

3.1.6. Otros elementos del generador

Además de las partes mencionadas anteriormente, el generador cuenta con otros elementos que no se encuentran en condiciones adecuadas para su funcionamiento. Entre estos elementos están, el motor para mover los explosores (Figura 3.9), al igual que el trigatrón (Figura 3.8). Este último elemento se coloca en la primera etapa del generador y está constituido por una esfera y una semiesfera (ambas huecas), dentro de ésta última se instala un electrodo eléctricamente aislado (aproximadamente de un milímetro de diámetro) que tiene como función iniciar "la chispa" entre las esferas del espinterómetro y dar inicio a la descarga de los capacitores de las etapas siguientes.

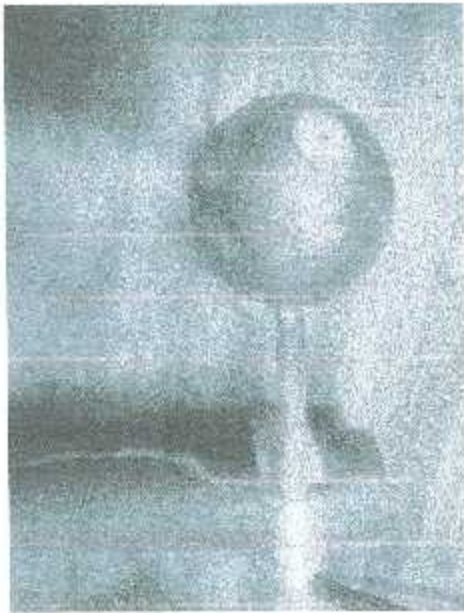


Figura 3. 8. Trigatren

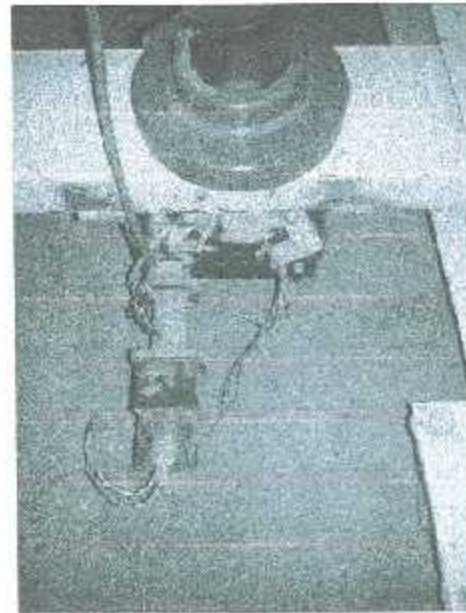


Figura 3. 9. Motor para explosores

La fuente de alimentación de CD anteriormente utilizada es de 80 kV nominales de salida para cargar los capacitores del generador de impulsos, dicha fuente tiene una capacidad de suministro de 2 kVA monofásica con una tensión de alimentación de 110 o 220 V, con esta capacidad es suficiente para la capacitancia total del generador de impulsos correspondiente a doce capacitores en paralelo, la fuente es mostrada en las figuras 3.10.

La fuente de alta tensión mostrada en la Figura 3.10 contaba con la capacidad de tener control sobre la tensión de salida con un rango de 0-80 kV, dicha fuente además tenía su unidad de control, la cual resultó dañada en una prueba, lo que ocasionó que la fuente de alta tensión no pueda operar dando como resultado la inutilización de toda la fuente de alimentación, la parte de alta tensión de la fuente se encuentra aislada en aceite y actualmente se aprecia como tiene fugas, lo que es indicio que tanto la unidad de control como la parte de potencia de la fuente están dañadas, cabe mencionar que la reparación de la fuente de alta tensión tiene un costo demasiado elevado. Los niveles de tensión y corrientes requeridos para energizar los capacitores, no pueden

ser logrados por una fuente normal de alta tensión ya que se necesita que la fuente tenga cierta potencia para lograrlo, por lo que la mejor solución del problema es, diseñar y construir una nueva fuente para el generador de impulsos.

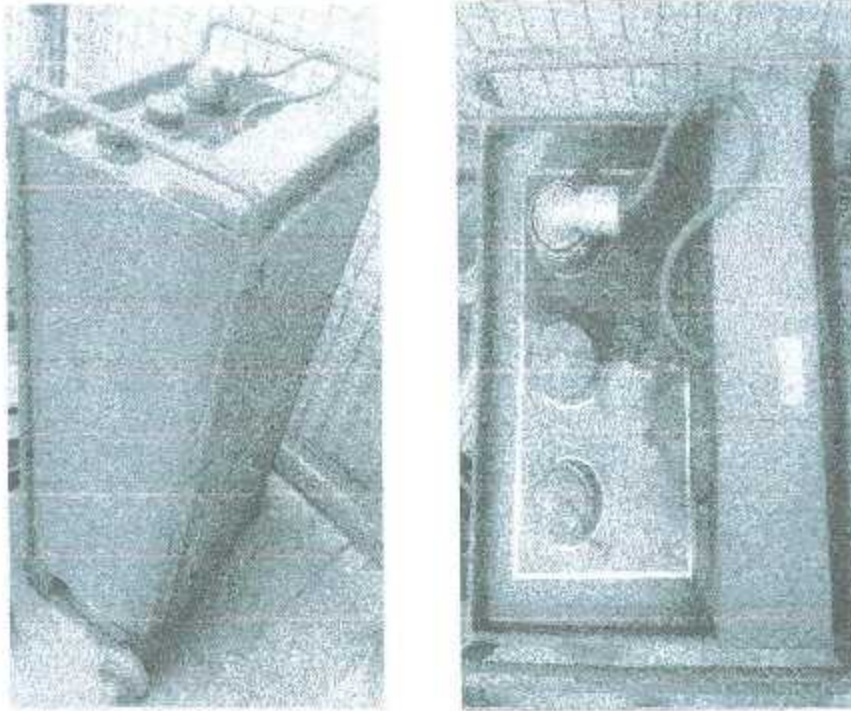


Figura 3. 10. Fuente de alimentación del generador de impulsos

El divisor de tensión es un equipo eléctrico que se utiliza para transferir información de niveles altos de tensión a niveles de baja tensión, la información que proporciona es: la magnitud de la tensión, tensión de corte, tiempo de corte, tiempo de frente así como también la forma de onda.

En los laboratorios de alta tensión los divisores son utilizados para la medición y registro de las ondas de alta tensión de impulso de rayo e impulso por maniobra, así como para tensiones de baja frecuencia que son aplicadas a objetos de prueba ya que los instrumentos para medición y registro no soportan señales muy grandes, el divisor del Instituto Tecnológico de La Laguna se muestra en la Figura 3.11, está diseñado

con una relación de entrada de 1200 a 1 y de 2000 a 1, el divisor está compuesto por cuatro unidades, tres de 150 kV y una de 300 kV en donde sus extremos son las terminales de entrada y salida del voltaje que se va a medir, estas cuatro unidades están montadas encima de la otra y conectadas en serie.



Figura 3. 11. Divisor de tensión capacitivo

Al divisor de tensión capacitiva que se encuentra en el laboratorio de alta tensión del ITL no se le realizaron pruebas o diagnóstico del estado actual en el que se encuentra ya que no forma parte del alcance de este trabajo, pero a futuro se planea ponerlo en operación para que en el momento en el que el generador de impulsos opere a tensiones mucho más altas poder tomar las mediciones correspondientes, por lo que a futuro se pondrá operativo también el divisor de tensión capacitivo.

3.2. Rectificador para alimentar generador de impulsos

La elaboración del puente rectificador surge de la necesidad de energizar los capacitores de carga de cada etapa en la cascada de multiplicación, debido al daño e inhabilitación de la fuente de alta tensión de corriente directa y, además, por las condiciones físicas de fabricación del aparato, resulta una reparación extremadamente costosa por lo que resulta más conveniente comprar una nueva fuente dados los avances tecnológicos actuales. En el laboratorio se cuentan con otras fuentes de alta tensión de corriente directa y corriente alterna, sin embargo estas no poseen la potencia necesaria para llevar a cabo la carga de capacitores. Por tal motivo se decidió diseñar y construir un puente rectificador de alta tensión, el cual será utilizado con en conjunto con transformadores de potencial los cuales tienen una mayor potencia que las fuentes de AC disponibles en el laboratorio de alta tensión.

Para la construcción del puente rectificador se emplearon diodos de alta tensión con voltajes 40 kV y 1 A, [Tesla Ham 2CL40KV/1A] que se muestran en la figura 3.12. Por seguridad y para evitar daño en los diodos se adaptó al arreglo del rectificador un conjunto de fusibles de accionamiento rápido, los cuales operan a 750 mA con lo que se tiene una cierta seguridad de que por alguna falla no se dañen los diodos si se sobrepasa el amperaje al que están diseñados.



Figura 3. 12. Diodo de alta tensión

3.2.1. Rectificador de onda completa usando transformador con derivación central

La fuente de alta tensión que se utilizará provisionalmente para alimentar el generador de impulso son dos transformadores de potencial, donde el secundario se utilizará como primario y el primario como secundario para obtener alta tensión a la salida de estos, como son dos equipos iguales el lado de alta se conectara en serie y como salida tendremos la suma de la tensión de cada transformador de potencia, dicho esto al tener dos equipos iguales se puede usar el arreglo de rectificador de onda completa con transformador con derivación central ya que donde se conectan en serie los TP puede ser usado como derivación central, con este arreglo solo se necesitan dos diodos rectificadores, esto es conveniente porque en ese momento solo se tenían disponibles tres diodos rectificadores, cuando se realizaron mediciones para observar la forma de onda a la salida del rectificador se tuvo un incidente el cual provoco el daño en uno de los diodos, gracias a este arreglo se pudieron continuar las pruebas en los capacitores, en la Figura 3.13 se puede observar el montaje físico de los diodos cuando se tiene esta configuración.

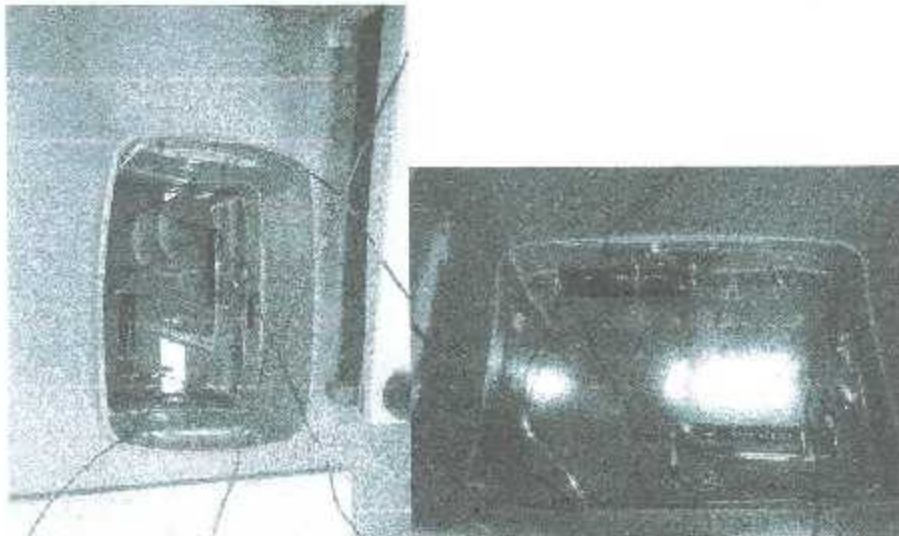


Figura 3. 13. Arreglo de diodos para rectificador con derivación central

Funcionamiento

Este circuito consta de dos diodos y en cada semiciclo cada uno de los diodos conduce. En este caso el transformador tiene derivación central y se conecta a un extremo de la carga, el diagrama de conexión y la forma de onda del rectificador son mostradas en la Figura 3.14.

Durante el semiciclo positivo del secundario, el diodo D_1 conduce por estar polarizado directamente. El diodo D_2 en cambio no conduce por estar polarizado en inversa. El sentido convencional de la corriente para este primer semiciclo es el positivo de la parte superior del secundario a través del diodo y de la carga, para regresar por la parte de arriba de la derivación y para cerrar el ciclo por el secundario del transformador (parte superior).

En el semiciclo negativo del secundario del transformador, el ánodo de D_2 está conectado al positivo del secundario (parte inferior), por lo que conduce y D_1 esta polarizado en inversa y no conduce. Al circular en el semiciclo negativo, la corriente va de la parte inferior del secundario, a través de D_2 y hasta el nodo frente a D_1 . Hacia D_1 no circula corriente por haber quedado polarizada inversamente; la corriente fluirá entonces a través de la carga, para regresar por la parte inferior de la derivación y cerrando el ciclo a través la segunda bobina del secundario del transformador.

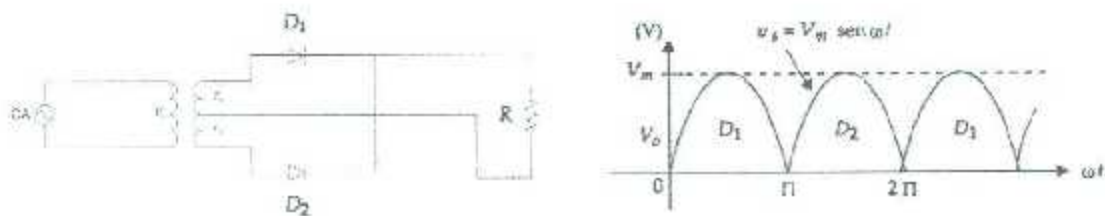


Figura 3.14. Diagrama y Forma de onda de un rectificador con derivación central

3.2.2. Rectificador de onda completa en puente

Al comienzo de las pruebas se tenía contemplado utilizar las fuentes de alta tensión de CA con las que cuenta el laboratorio para alimentar y probar el estado de los capacitores, por esta razón se decidió utilizar un puente rectificador de onda completa en puente con dichas fuentes, al comenzar las pruebas y conectar el puente rectificador a la fuente de AC dichas fuentes no tenían la potencia necesaria para cargar los capacitores, por esta razón las fuentes se protegían y se desconectaban.

Estas fuentes se descartaron para alimentar al generador y como ya se mencionó en el punto anterior se utilizarán provisionalmente los transformadores de potencial para alimentar el generador de impulsos, esta configuración de rectificador de onda completa en puente fue la primera que se utilizó para las pruebas con los capacitores, en la figura 3.15 se puede observar el montaje físico de los diodos cuando se tiene esta configuración.

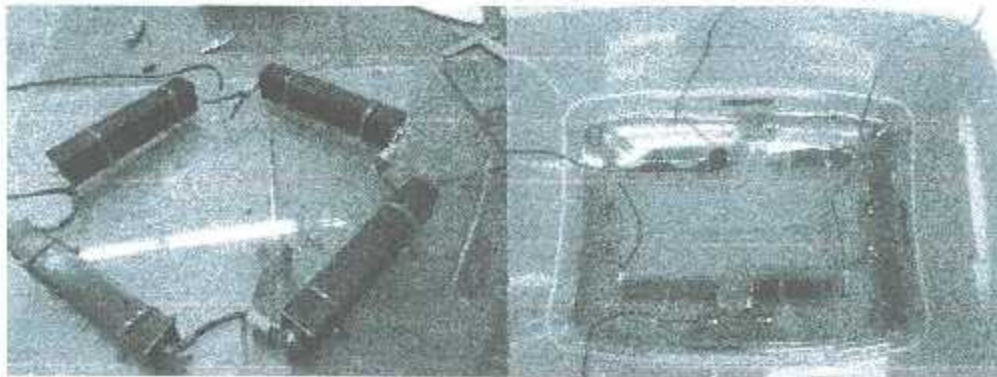


Figura 3. 15. Arreglo de diodos para rectificador en puente

Funcionamiento

Durante el semiciclo positivo del secundario y tomando la parte superior como más positiva, el diodo D_1 queda polarizado en forma directa. Al conducir este, esa corriente circula a través de la carga por el diodo D_3 , que también queda polarizado directamente, cerrando el circuito por la parte inferior del secundario; los diodos D_2 y D_4 no conducen por estar en polarización inversa.

Durante el semiciclo negativo, la corriente circulará por el diodo D_2 , la cual conduce por la carga. D_4 también conduce y cierra por la parte de arriba del secundario. El diodo D_3 no conduce por que el cátodo está al potencial positivo de la parte inferior del secundario, como tampoco conduce D_1 , porque la parte superior del secundario está conectada al ánodo, el diagrama de conexión y la forma de onda del rectificador son mostradas en la Figura 3.16.

Las ventajas de este rectificador consisten en que no se requiere derivación secundaria, siendo el voltaje máximo el que existe entre los extremos del secundario y el voltaje de salida el doble del voltaje de salida del rectificador de onda completa con derivación. Es conveniente que se distinga la diferencia entre ambos rectificadores, ya que los dos son de onda completa.

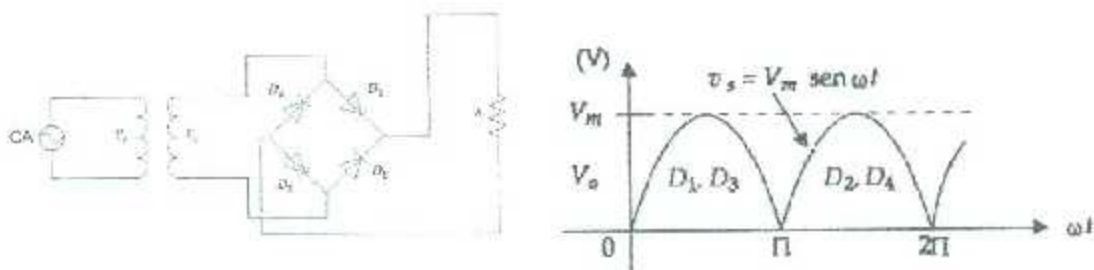


Figura 3. 16 Diagrama y Forma de onda de un rectificador en puente

3.3. Alimentación a capacitores de etapa y disparo del generador

En la presente sección se describen los cambios realizados al Generador de Impulso de Tensión para su puesta en operación. La puesta en operación del generador consiste únicamente en obtener el disparo de impulso. La calibración de la forma de onda del impulso, la implementación de un motor para mover los explosores y la construcción de una fuente apropiada para alimentar el generador de impulso se realizará a futuro.

Primero se procedió a la determinación del número de etapas que se pueden configurar en el generador, con los elementos que se encuentran en buen estado. En segundo lugar se desarrolló una fuente de alimentación para cargar los capacitores. Para ello se puede emplear una fuente de alta tensión de corriente directa o una fuente de corriente alterna utilizando un rectificador. Finalmente se hicieron algunas pruebas de disparo de los capacitores a través del arreglo de explosores.

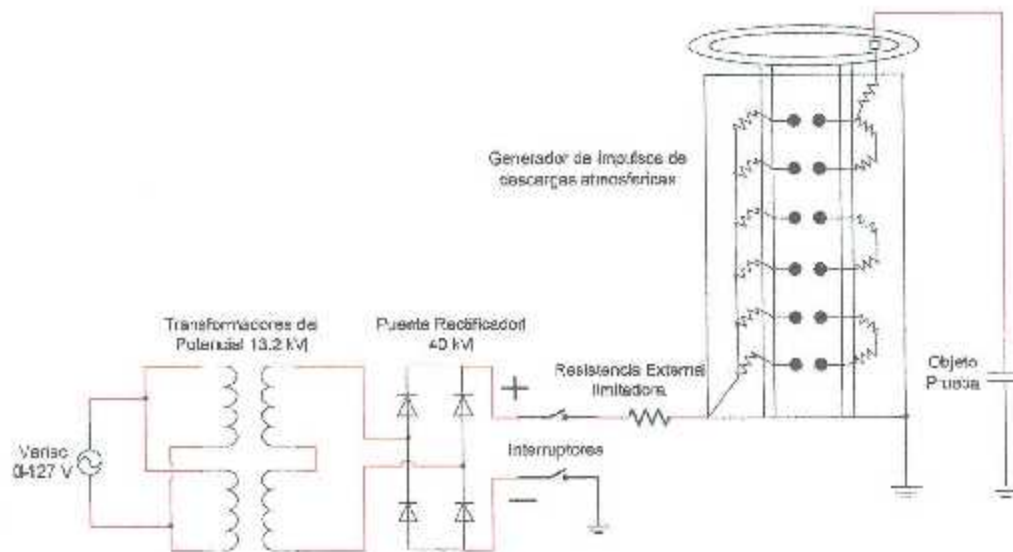


Figura 3. 17. Esquema general de alimentación del generador de impulsos

Un paso importante para realizar las pruebas con el generador de impulsos es tener un objeto de prueba, por esta razón se construyó un capacitor capaz de soportar tensiones de 200 kV, para usarlo como objeto de prueba el cual tiene como principal característica una placa intermedia con la cual se puede tener una relación de tensión entre el valor de entrada del impulso y el valor que se mide en la placa intermedia la cual tiene una relación cercana de 10 a 1 . esto nos indica que si se le aplica un impulso de 100 kV el valor medido en la placa intermedia será de 10 kV con esto se pueden lograr mediciones de impulsos mayores sin estar limitados por la capacidad de la punta atenuadora que es de solo 40 kV para las mediciones.

En la Figura 3.18 se muestra el capacitor que se construyó para realizar las pruebas de impulso, además se observa cómo sale un cable de la parte media el cual está conectado a la placa intermedia con la que se tiene la relación de 10 a 1 para tomar las mediciones del impulso de mayor tensión que no puede soportar directamente la punta atenuadora.

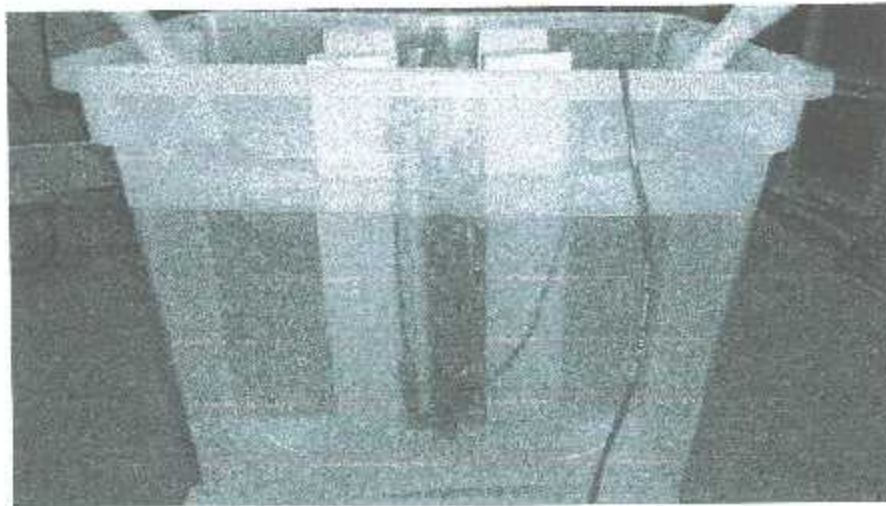


Figura 3. 18. Capacitor con placa intermedia (Objeto bajo prueba)

3.3.1. Alimentación a capacitores de etapa con rectificador en derivación central

Para la alimentación de los capacitores se utilizó este arreglo, porque en ese momento solo se contaba con dos diodos rectificadores y dado que se tienen dos transformadores de potencia era posible realizarlo, en primer instancia se alimentaron los capacitores a una tensión de 13 kV rms, con este arreglo se probaron todos los capacitores, energizándolos por periodos de tiempo de alrededor de cinco minutos para después descargarlos rápidamente, con esto se puede observar si almacenan la energía y cuál es su constante de tiempo, ya que por bastantes años estuvieron sin uso y su resistencia de fuga pudo haber cambiado lo que daría lugar a que estos perdieran rápidamente su carga, se observó que dichos capacitores retienen gran parte de su carga por alrededor de un minuto, el inconveniente con este arreglo es que a la salida del rectificador solo se tiene la mitad de la tensión de entrada por lo que la máxima tensión de carga de los capacitores fue de alrededor de 13 kV y dichos capacitores están diseñados hasta para 60 kV, con esto se comprobó el buen estado de los capacitores.

Las figuras 3.19 y 3.20 muestran respectivamente la conexión de los transformadores de potencial al puente rectificador con derivación central y la carga de los capacitores limitando la corriente de carga con un banco de resistencias y observando la tensión en el capacitor con la punta atenuadora.

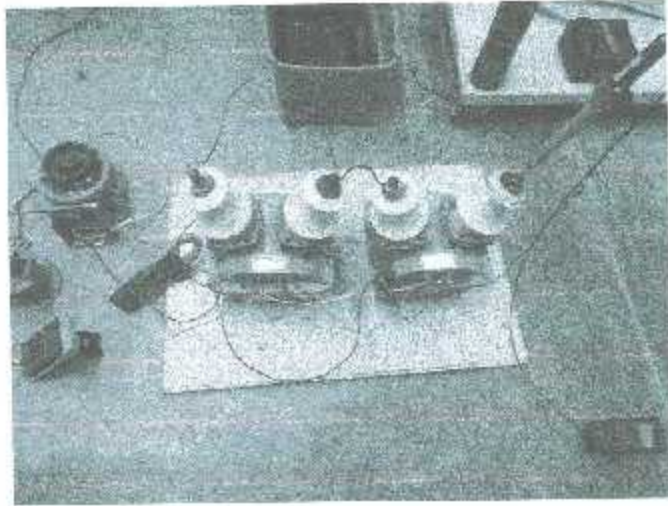


Figura 3. 19. Alimentación a capacitores con Rectificador con derivación central

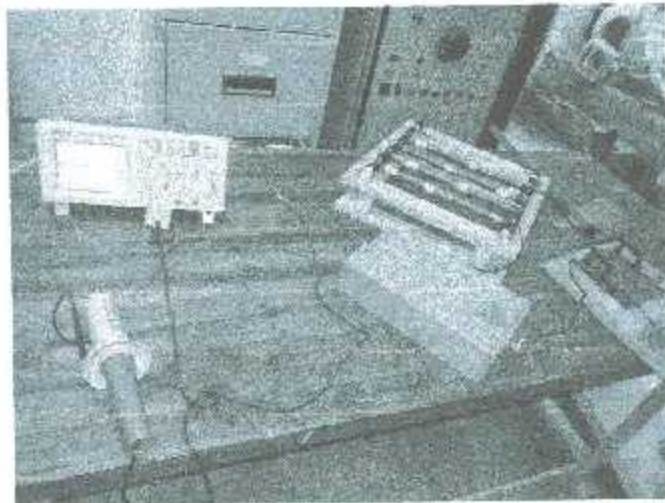


Figura 3. 20. Prueba de carga de capacitores con rectificador con derivación central

3.3.2. Alimentación a capacitores con puente rectificador

Las pruebas con el puente rectificador se efectuaron para conocer la tensión máxima que se puede obtener con el arreglo en serie de los transformadores de potencial (TP). Se encontró que a pesar de que dichos TP son de características de operación similares suministran diferente tensión de salida, una diferencia de potencia de 2 kV entre ellos a su valor máximo de operación, es decir, si la salida del primero era 12 kV el otro entregaba 14 kV. Se notó, sin embargo, que en cierto punto de ajuste de tensión, ambos transformadores de potencial entregan el mismo valor de potencial. Fue así que se fijó el máximo valor de salida de ambos transformadores en 11 kV.

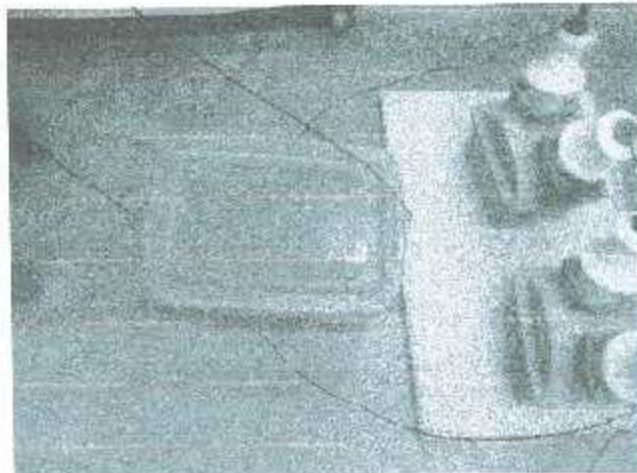


Figura 3. 21. Alimentación a capacitores con Rectificador en puente

Dadas las limitaciones técnicas de los equipos rescatados y reutilizados, los capacitores se pueden cargar a la tensión máxima de 30 kV por etapa, que es el máximo valor que entrega el puente rectificador. Con estas restricciones se preparó todo el sistema para alimentar la cascada del generador de impulsos y efectuar el disparo (el disparo de los capacitores se realiza manualmente como medio provisional ya que a futuro se automatizará el disparo de los capacitores por medio de un motor que mueva los explosores) del generador de impulsos y se obtuvieron los resultados de mediciones que se presentan en la sección siguiente.

3.3.3. Pruebas de disparo del generador de impulsos de descargas

Una vez listos todos los elementos y conexiones del generador, así como también el capacitor de prueba, se comenzó la carga de los capacitores en dos etapas, para empezar manejando valores de tensión bajos, por precaución y seguridad. Para asegurar que las mediciones fueran tomadas correctamente, se emplea la relación de tensión de entrada aplicada al transformador de tensión variable y se determina la tensión medida del impulso.

La punta atenuadora (con una relación de 1000 a 1) conectada a la entrada del capacitor o bien a la placa intermedia del mismo nos permite ver en el osciloscopio la forma de onda del impulso, obteniendo la magnitud de este mediante el osciloscopio y calculando la relación que existe entre la tensión aplicada con el transformador de tensión variable podemos comprobar si son correctos los valores que muestran los oscilogramas, esto se observa en la Figura 3.22.

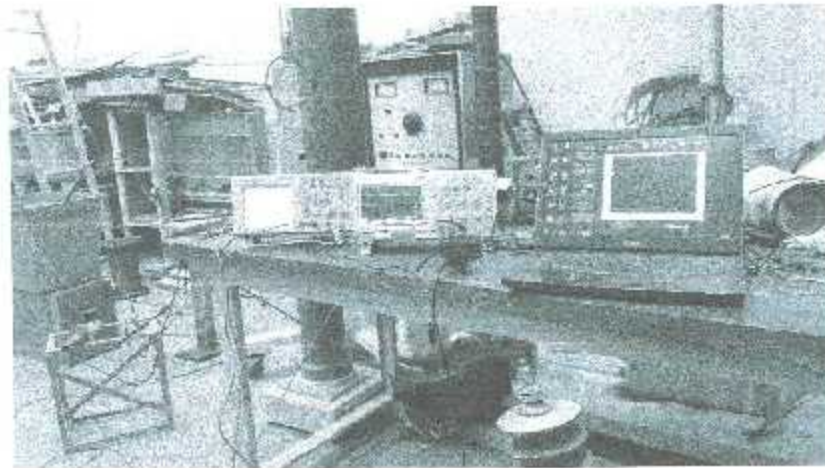


Figura 3. 22. Medición de Impulsos con la punta atenuadora

Al no contar con algún barómetro para medir la presión atmosférica, no se llevó a cabo una adecuada corrección por factores ambientales en la determinación de las tensiones. Aun así, se consideraron como valores de ajuste, una temperatura de 29 °C , típica en condiciones de prueba dentro del laboratorio y se consideró una presión atmosférica para una altura de 1120 m.s.n.m. de valor de 768 Torr. En las imágenes de los oscilogramas que se presentaran en el como resultado de las pruebas los valores de tensión se presentan sin estar ajustadas por factores ambientales.

El oscilograma de la Figura 3.23 muestra el impulso de tensión tipo rayo aplicado al objeto de prueba con una valor pico de 14 kV utilizando solo dos de las etapas del generador, el cual es un valor esperado ya que se calculó por medio de la tensión aplicada por transformador de tensión variable y la relación de transformación que se tiene con los transformadores de potencial, se tiene un impulso de tensión de 14.14 kV, la forma de onda del impulso es similar a la de las normas de la IEEE y la IEC pero ya que el capacitor que se utiliza como objeto de prueba no es de 1 nF , el cual es el valor para el que está diseñado todo el generador de impulsos. La forma de onda resultante no entra en los valores ya normalizados, la señal más pequeña que se observa es el impulso de corriente el cual para el estudio de tensiones de impulso tipo rayo no es de importancia.

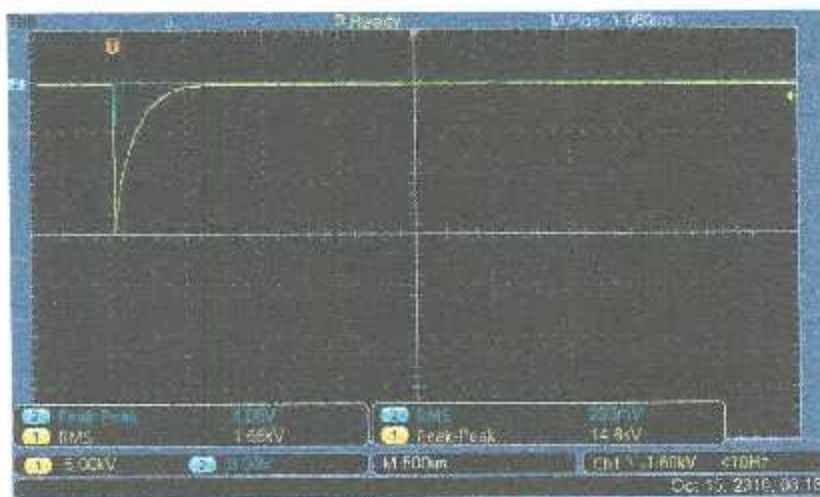


Figura 3. 23. Prueba de impulso de 14 kV, dos etapas

Se realizaron una serie de pruebas a diferentes niveles de tensión de entrada al generador de impulsos de las cuales se obtuvieron sus oscilogramas, la medición de estos se realizó con la punta atenuadora y dependiendo del nivel de tensión de la prueba, la punta para medición se coloca ya sea en la terminal de alta tensión del capacitor para valores de tensiones bajos o en la placa intermedia para mediciones con tensiones mayores a las que soporta la punta atenuadora, esto se puede apreciar en los oscilogramas por la escala en la que se muestra la forma de onda, como ejemplo para un impulso de 35 kV en la parte de alta se mostrará una escala de 35 kV y en la placa intermedia se mostrará un valor de 3.5 kV, estos oscilogramas se pueden observar en el anexo A.1 del presente trabajo, las primeras pruebas que se realizaron fueron con solo 2 etapas y un osciloscopio normal, una vez que se tiene la certeza de los valores del impulso, se procede a realizar pruebas con las seis etapas a las que está configurado el generador así como también la utilización de un osciloscopio para medir señales transitorias.

Las últimas pruebas en las que se tomó medición fue con un impulso cercano a un valor de 108 kV el cual se muestra en la Figura 3.24, y tomando la medición con la placa intermedia del capacitor ya que con la relación que tiene cercana a 10 a 1 se puede observar como los valores mostrados en el osciloscopio corresponden a lo esperado en el impulso.

Por razones de seguridad, la punta de medición del osciloscopio fue retirada ya que si llega a fallar el aislamiento del capacitor, la punta de medición recibiría un impulso mayor al que está diseñada, con esto dañando la propia punta y el osciloscopio conectado a esta, las pruebas siguientes se realizaron con valores de tensión mayores pero sin ningún método de medición, solo se estimaron los valores del impulso de acuerdo a la tensión de entrada al generador ya que con las mediciones anteriores se comprobó que los impulsos a la salida del generador eran de la magnitud esperada según la tensión de entrada aplicada en baja tensión.

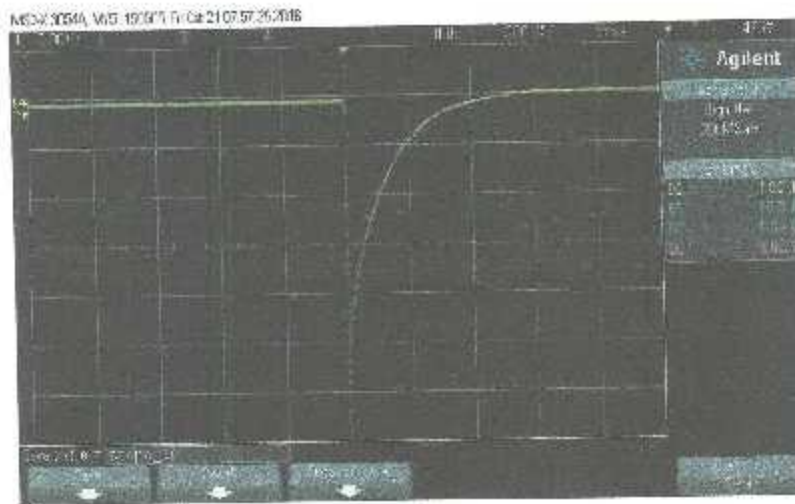


Figura 3. 24. Prueba de impulso de 110 kV, con medición en placa intermedia de capacitor, seis etapas

La forma de onda que se muestra en el oscilograma de la Figura 3.25 está cerca de cumplir los valores ya normalizados para los impulsos de tensión tipo rayo, pero ya que el capacitor que se utilizó como objeto de prueba no es de 1 nF, el tiempo de frente como el tiempo de cola de las formas de onda resultantes de todas las pruebas realizadas no cumple con los tiempos normalizados que son de 1,2 μ s de frente y 50 μ s de cola al 50 % del valor pico del impulso, aun con las tolerancias permitidas los tiempos de frente y cola están fuera de los valores permitidos.

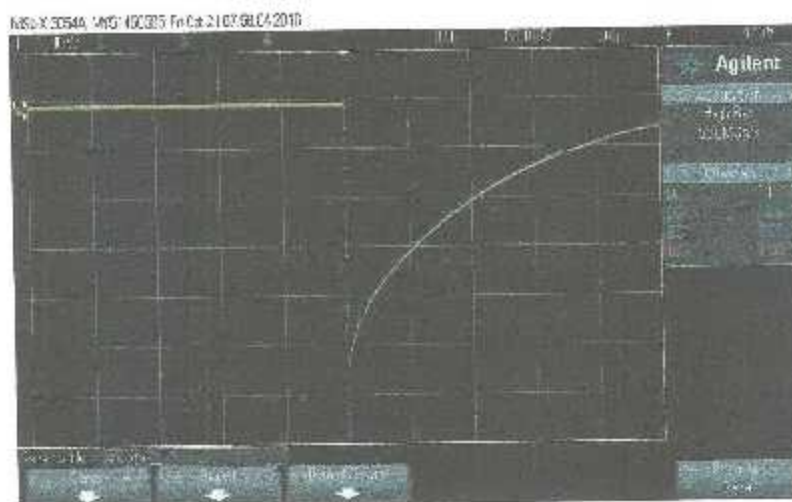


Figura 3. 25. Prueba de impulso de 110 kV con escala de tiempo aumentada

Los valores mostrados en la tabla 3.7 son los valores de tensión utilizados en las pruebas, en las cuales se tomó medición, los valores del impulso son iguales a los observados en los oscilogramas obtenidos de cada una de las pruebas realizadas los cuales se muestran en el Anexo A.1, la tabla 3.7 nos muestra el valor de entrada al sistema proporcionado por el al transformador de tensión variable con un rango de 0-127 V, la tensión de salida de los transformadores de potencial conectados en serie, la tensión a la salida del rectificador y el impulso de tensión producido por el generador.

Tabla 3. 7. Valores de Tensión en las diferentes pruebas realizadas

Tensión en Variac	Tensión de Salida en Transformadores de potencial	Tensión de salida en Rectificador	Tensión de Impulso
16 V	1.4 kV	2 kV	12.5 kV
19 V	2.5 kV	3.5 kV	20 kV
25 V	3.5 kV	5 kV	30 kV
31 V	4.3 kV	6 kV	35 kV
34 V	4.6 kV	6.5 kV	40 kV
39 V	5.3 kV	7.5 kV	45 kV
51 V	8.8 kV	12.5 kV	75 kV
69 V	12.8 kV	18.1 kV	108 kV

Además de las pruebas registradas en la tabla 3.7 y en los oscilogramas del Anexo A.1 se llevaron a cabo pruebas a valores de tensiones más altos pero para no correr riesgos de dañar equipo por fallas del aislamiento del capacitor no se tomaron mediciones pero si se calcularon los valores que tendrán los impulsos siendo el más alto de 186 kV, se podría aplicar un impulso mayor pero ya que el capacitor está calculado para 200 kV y se pretende seguir utilizándolo para más pruebas a futuro se corre el riesgo de dañarlo si se aplican impulsos mayores.

Para realizar pruebas a mayores tensiones se quitara el capacitor que se construyó como objeto de prueba para no dañarlo y simplemente dejar un espacio de aire entre la terminal del generador y una punta conectada a tierra para ver la chispa cuando se rompa el dieléctrico del aire.

En la Figura 3.26 se muestra la operación del generador de impulsos de descargas atmosféricas donde al accionar los explosores ya que estos funcionan como interruptores se observa la descarga de los capacitores de cada una de las etapas del generador, en este caso seis, ya que es la configuración que tiene actualmente, la tensión de cada etapa se va sumando a la siguiente ya que los capacitores se descargan en serie y al final el impulso es llevado al objeto de prueba donde se tomara la medición de la magnitud y la forma de onda.

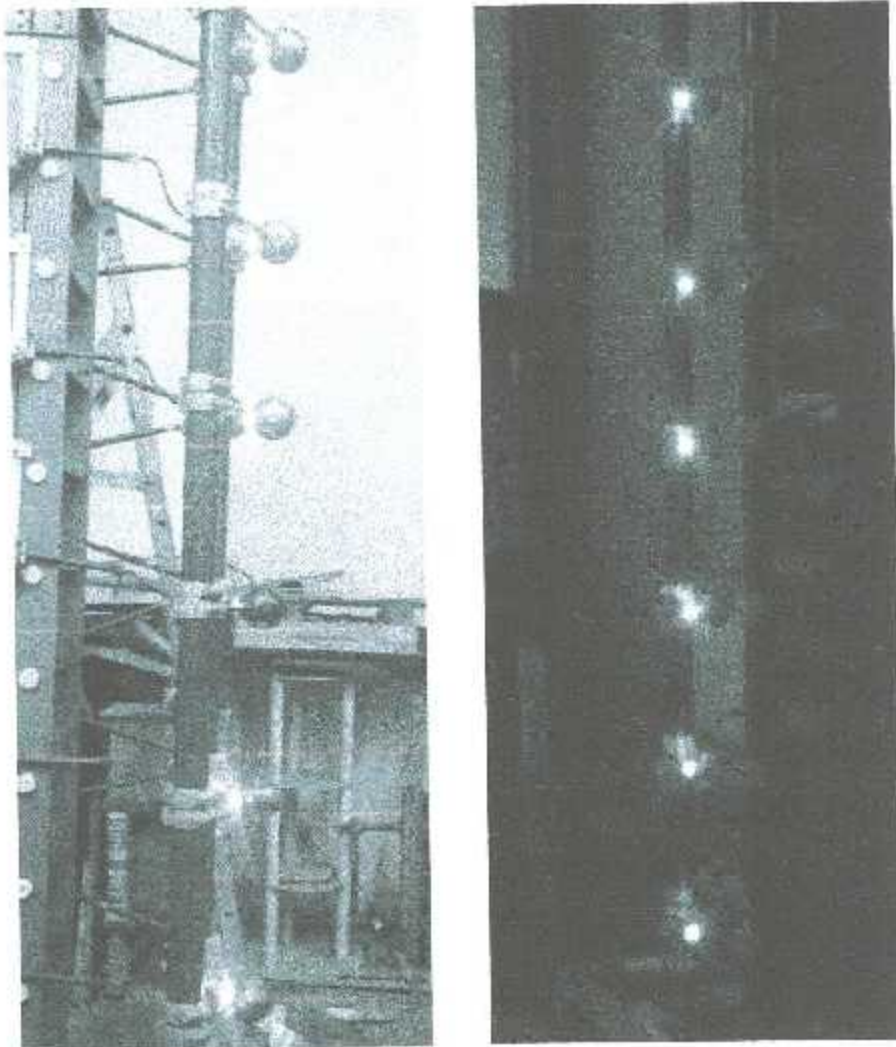


Figura 3. 26. Disparo de los capacitores del generador de impulsos

Capítulo IV

Simulación del Sistema Generador de Impulsos

4.1. Simulación del sistema generador de impulsos

Empleando el paquete computacional EMTP-VR (ElectroMagnetic Transients Program) se realizó un conjunto de simulaciones, a partir del circuito equivalente del arreglo entre capacitancias y de resistencias de frente y de cola. Se efectúan simulaciones para una etapa y posteriormente para seis etapas del generador de impulso. El voltaje de carga DC del capacitor de cada etapa (C_1, C_2, \dots) se introduce como un dato al programa y como respuesta se obtiene el voltaje de impulso que se obtiene en los bornes o terminales del capacitor C_2 . (En la mayoría de la literatura sobre los generadores de impulsos al objeto bajo prueba se le conoce como C_2)

En las secciones siguientes se describe el diseño del circuito eléctrico que permite modelar el generador de impulso bajo estudio. La modelación del circuito incluye la operación así como los diferentes cambios que se pueden realizar en sus conexiones (cambiar conexiones para invertir polaridad del impulso) y en sus elementos (variar las etapas del generador conectando en paralelo los capacitores, con esto podemos controlar el voltaje de salida del impulso y la capacitancia del generador ya que algunos objetos de prueba necesitan alto voltaje y baja capacitancia y otros elementos bajo voltaje y alta capacitancia, variando también los valores de las resistencias podemos controlar la forma de onda del impulso para obtener las formas de onda normalizadas) para su posterior implementación.

Primeramente se procederá a la determinación de los elementos del circuito equivalente del generador tipo Marx de 6 etapas usando capacitores de impulso de alta tensión, enseguida obtener la forma de onda en función del tiempo con los parámetros del modelo definido según las recomendaciones IEC-60 [3]. Finalmente observar las formas de onda obtenidas del circuito de impulso diseñado basado en las ecuaciones aproximadas para el tiempo de frente y de cola con los cálculos teóricos estudiados en el capítulo II.

El problema de establecer los parámetros del circuito equivalente de un generador de impulso está orientado a predecir y verificar las forma de onda resultante que normalmente son conseguidos a través de un modelo. Primero seleccionaremos el esquema equivalente del generador de impulso, segundo determinaremos los valores de los parámetros a escala del circuito equivalente a través de cálculos sin tener en cuenta los acoplamientos electromagnéticos, asumiendo que la inductancia y capacitancias parasitas son muy pequeñas al grado de poder despreciarlas.

4.2. Calculo de elementos del Generador de Impulso de Tensión

El generador de impulsos de tensión tipo rayo fue diseñado inicialmente con capacitores de etapa C_1 con valor de 45 nF y el objeto de prueba C_2 con valor de 1 nF, diseñado para operar hasta con 12 etapas, pero con la revisión del estado de los elementos como las resistencias se observó que en su estado actual por falta de resistencias solo puede operar con 6 etapas, por lo que se decidió dejarlo solo con las 6 etapas por esto se recalcularan los valores de las resistencias de frente y de cola para los valores de C_1 y C_2 con las ecuaciones 2.30 y 2.31 para el circuito b) de la Figura 3.1, ya que es el esquema al que está conectado el generador además los valores de los capacitores siguen siendo los mismos.

Para obtener los valores de las resistencias de frente y cola que se necesitan para producir el impulso de tensión, se realiza con el modelo equivalente o reducido del generador de impulsos, el cual tiene por datos:

El circuito reducido del generador a simular en EMTP-VR está formado por:

$$C_1=15 \text{ nF}$$

$$C_2=1 \text{ nF}$$

El valor de C_1 es el equivalente de las seis etapas en serie, ya que como se tienen conectados en paralelo 2 capacitores se reduce el generador de tener 12 etapas a solo

tener 6 con un valor de $C_1 = 90 \text{ nF}$, aplicando la fórmula 2.32, se obtiene el valor del capacitor del modelo reducido.

Para obtener el valor de las resistencias de frente y cola del generador de impulsos una vez que se tiene el valor de C_1 se aplican las ecuaciones 2.30 y 2.31 ya que estas son las que corresponden al modelo que se está utilizando, los valores de las resistencias de frente y cola para el modelo reducido son:

$$R_1 = 432 \Omega$$

$$R_2 = 4260 \Omega$$

Con los valores de las resistencias de frente y cola del modelo reducido, se aplican a dichos valores las ecuaciones 2.33 (de esta ecuación se utiliza una variante que no contempla una resistencia contra sobre picos y oscilaciones) y 2.34 lo que nos da como resultado el valor de las resistencias por etapa del generador de impulsos, sus valores son:

$$R_1 = 72 \Omega \text{ y } R_2 = 710 \Omega.$$

Los valores de los capacitores y los que se obtuvieron para las resistencias son los que se utilizarán en las simulaciones del modelo, en ocasiones cuando se utilizan los pares de fórmulas (2.28 y 2.29 para circuito A) y 2.30 y 2.31 para circuito B) de la Figura 2.1) para obtener los valores de las resistencias estas arrojan valores con parte imaginaria para los distintos valores que pueden tener C_1 y C_2 , es por esta razón que en ocasiones solo se puede utilizar un modelo equivalente del generador.

Los valores por etapa para los elementos del generador de impulsos se toman de los valores de los elementos del modelo equivalente del generador.

4.3. Circuito de Marx de una sola etapa diferencia de eficiencia

Los circuitos que se muestran a continuación son los modelos más utilizados para la construcción de generadores de impulso y de los que se harán las simulaciones para observar su eficiencia ya que el generador de impulso que se está estudiando está construido en base al circuito B) de la Figura 4.1.

Los parámetros del generador para estos arreglos son los siguientes:

Datos para circuito A)	Datos para circuito B)
$C_1 = 15 \text{ nF}$	$C_1 = 15 \text{ nF}$
$C_2 = 1 \text{ nF}$	$C_2 = 1 \text{ nF}$
$R_1 = 479 \Omega$	$R_1 = 432 \Omega$
$R_2 = 3838 \Omega$	$R_2 = 4260 \Omega$

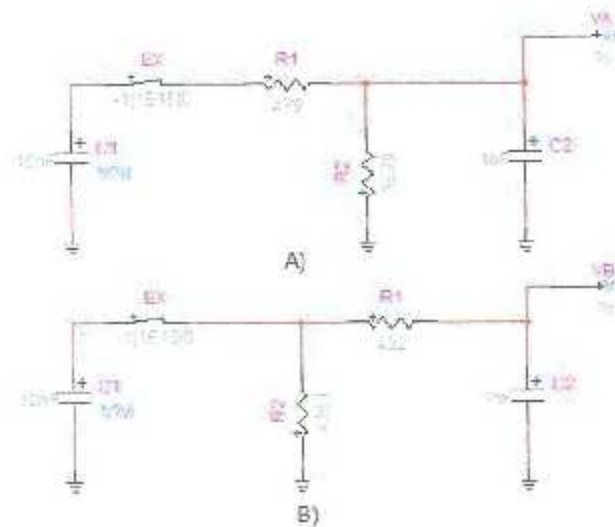


Figura 4. 1. Circuitos equivalentes de generadores de impulsos

Se realizaron las simulaciones de los circuitos mostrados en la Figura 4.1, en los cuales se observa la diferencia que existe entre ambos, en la eficiencia por el divisor de voltaje que se crea en el circuito A) por lo que la mayoría del tiempo se elige el modelo del circuito B) para el diseño y construcción de los generadores de impulso.

A continuación se realizan las mediciones en la forma de onda del impulso de tensión tipo rayo para los circuitos mencionados anteriormente, donde podremos ver sus diferencias.

Para los tiempos del frente tenemos los siguientes resultados:

$$\text{Circuito A) } t_f = 1.67(t_{90} - t_{30}) = 1.67(0.86 - 0.14) = 1.202 \mu\text{s}$$

$$\text{Circuito B) } t_f = 1.67(t_{90} - t_{30}) = 1.67(0.86 - 0.14) = 1.203 \mu\text{s}$$

Ambos tiempos son muy similares, se puede decir que son prácticamente los mismos, para los tiempos de cola el resultado es muy similar y tienen valores muy cercanos entre sí.

$$\text{Circuito A) } t_c = 50\% \text{ valor pico en } 50 \mu\text{s} = 49.71 \mu\text{s}$$

$$\text{Circuito B) } t_c = 50\% \text{ valor pico en } 50 \mu\text{s} = 49.79 \mu\text{s}$$

En el voltaje pico se puede apreciar la diferencia que existe entre esos dos circuitos ya que en los valores de los resultados se aprecia una diferencia entre el circuito A) y B) de la Figura 4.1.

$$\text{Circuito A) } U_{max} = 147.5 \text{ kV}$$

$$\text{Circuito B) } U_{max} = 163.5 \text{ kV}$$

Como se observó la diferencia entre los voltajes pico del impulso de tensión nos muestra la diferencia que tienen los circuitos en cuanto a la eficiencia, esto lleva a que en la mayoría de los generadores que se llegan a construir estén en base al circuito B) ya que se necesita la mayor de tensión que se pueda lograr con circuito.

$$\text{Circuito A) } \eta = \frac{V_p}{V_0} = \frac{147.5}{180} = 0.819 = 81.2\%$$

$$\text{Circuito B) } \eta = \frac{V_p}{V_0} = \frac{163.5}{180} = 0.908 = 90.8\%$$

Los datos que se mostraron anteriormente pueden ser observados en la gráfica de la Figura 4.2 donde se pueden apreciar las formas de onda de impulso de tensión tipo

rayo, estas formas de onda cumplen con la normalización que recomiendan los estándares de la IEC y la IEEE, además se puede apreciar la diferencia que existe en la eficiencia que tienen los circuitos donde con la misma tensión de entrada, la salida de tensión del circuito A) es de alrededor del 80% y el circuito B) del 90%, la caída en la tensión es producida inevitable por las propias resistencias del generador.

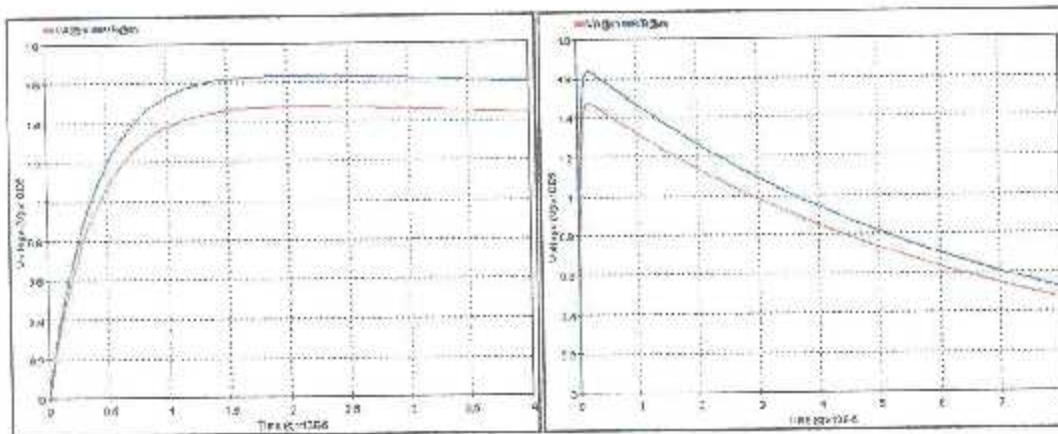


Figura 4. 2. Comparativa de la eficiencia de los generadores de impulsos

El generador de impulsos que se está estudiando está construido en base al circuito B) de la Figura 3.1, las simulaciones echas en base a este generador tienen como finalidad comprender el comportamiento de este, así como también realizar las diferentes configuraciones de conexión en las que se puede poner, por si se llega a cometer algún error prevenir daños físicos en él, además que se pueden usar valores que se dificultaría utilizarlos físicamente. Por lo que primero se realizarán las simulaciones del generador y después se implementarán físicamente.

Los graficas de las formas de onda presentadas a continuación como resultado de las diferentes simulaciones echas, están divididas en dos intervalos de tiempo, esto para observar el comportamiento que tienen las señales medidas ya que para fenómenos transitorios, el tiempo que tardan en cargarse los capacitores casi a un 100% con las resistencias de carga limitando la corriente que entra en ellos es un tiempo muy grande.

Por lo que de la misma grafica se presenta la parte inicial de las corrientes o tensiones y en la otra parte de la gráfica se presenta la parte final, lo que nos permite observar el comportamiento de las señales de corriente y tensión.

4.4. Rectificador de onda completa

La simulación del rectificador se realizó para observar su comportamiento cuando este está suministrando la tensión en corriente directa a los capacitores ya que antes de realizar las pruebas físicas se requiere conocer si al disparar los capacitores, tendrán alguna repercusión en los diodos, por ejemplo algún transitorio que logre atravesar las resistencias de carga.

Con las simulación del rectificador conectado al generador se pudo apreciar que si existen transitorios de corriente que atraviesan las resistencias pero estos no llegan hasta el rectificador, con lo que se tiene más seguridad al realizar las pruebas físicas, así como también permite tener una noción del valor de la corriente y tensión que se manejaran, así como de sus formas de onda, es mostrado en la figura 4.3.

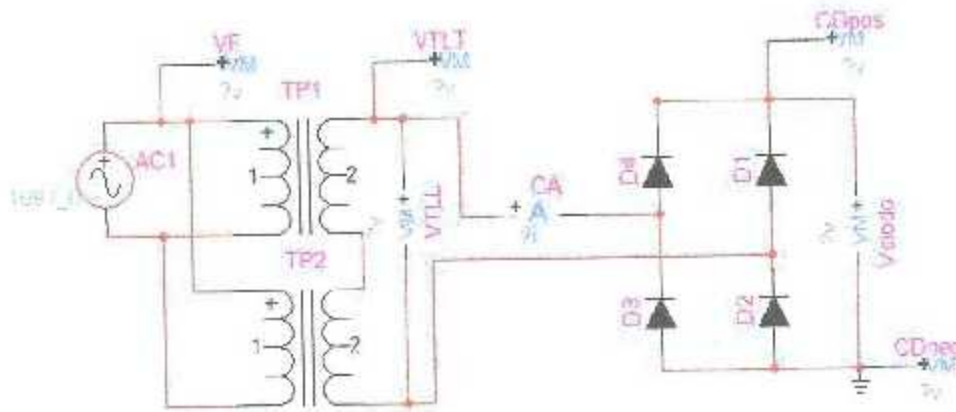


Figura 4.3. Alimentación a generador de impulsos

EL circuito completo para alimentar el generador de impulsos consta de un transformador variable (VARIAC) de 0-130V, dos transformadores de potencial de 13.2 kV utilizados para aumentar el nivel de tensión de 120V a 30kV (utilizados al contrario para elevar la ten tensión en lugar de reducirla, conectados en serie) y cuatro diodos rectificadores de 40 kV a 1A para formar el puente rectificador ya que los capacitores son alimentados en corriente directa.

La Figura 4.4 muestra la corriente que entrega el TP y entra al rectificador, como ya se ha mencionado anteriormente, la corriente empieza con valores altos mientras están cargándose los capacitores y una vez cargados, dicha corriente llega a valores cercanos a cero, se aprecia que la corriente que entra al rectificador no es totalmente senoidal ya que en ciertos tiempos entre los semiciclos positivos y negativos mantiene un valor de cero, una vez disparados los capacitores y dejando los explosores cerrados se aprecia como la corriente que entra al rectificador efectivamente es senoidal ya que esta corriente está siendo drenada a tierra, esa es la razón por la que alrededor de los 1.5 segundos la corriente aumenta nuevamente a valores un poco mayores, que cuando se están cargando los capacitores.

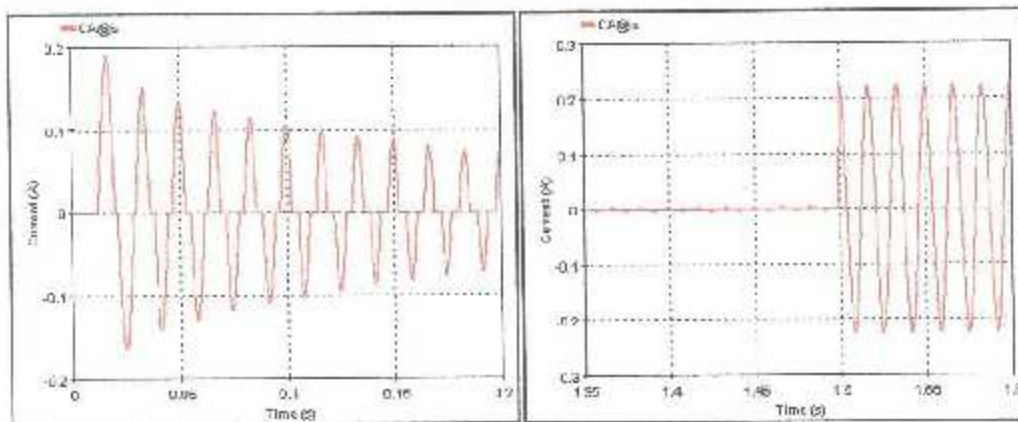


Figura 4. 4. Corriente CA que entra al rectificador

En la gráfica de la Figura 4.5 se observa la corriente directa pulsante que sale del rectificador y alimentará al generador de impulsos, en dicha gráfica se aprecia como la carga de los capacitores inicia con valores de corriente altos para terminar alrededor de 1.5 segundos con un valor en la corriente cercano a cero, a los 1.5 segundos de carga se disparan los capacitores y como estos son interruptores se quedan cerrados, se aprecia como aumenta la corriente nuevamente ya que esta se está fugando a tierra.

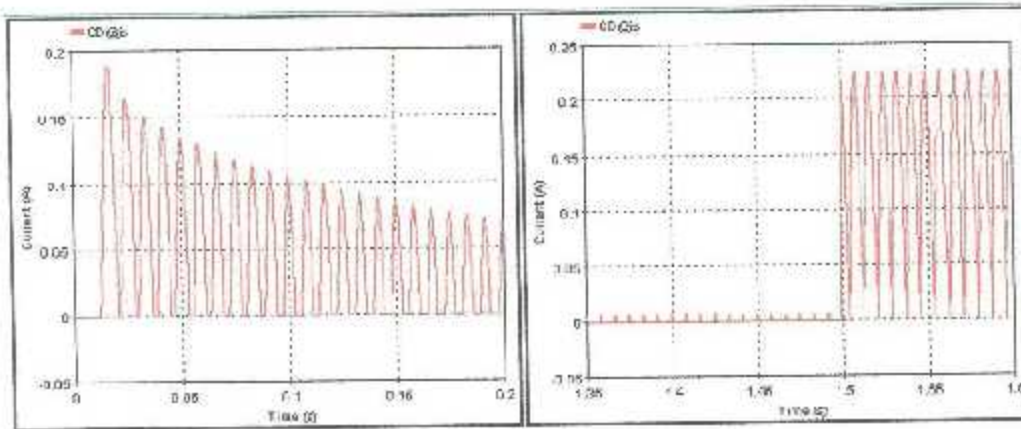


Figura 4. 5. Corriente CD que sale del rectificador

Las formas de onda mostradas en la Figura 4.6 son la tensión de salida de los transformadores de potencial referenciado a tierra (color azul), muestra su comportamiento en los primeros ciclos y se observa una deformación provocada por el funcionamiento de los diodos, la deformación se pierde cuando se disparan los capacitores, la forma de onda color rojo es la tensión de salida del rectificador en la cual se aprecia como inicia en cero y en forma pulsante, además también conforme al paso del tiempo esta incrementa su valor hasta que se observa un voltaje de corriente directa a los valores de carga del capacitor con pequeños pulsos, una vez disparados los capacitores el voltaje de salida del TP y del rectificador son prácticamente iguales.

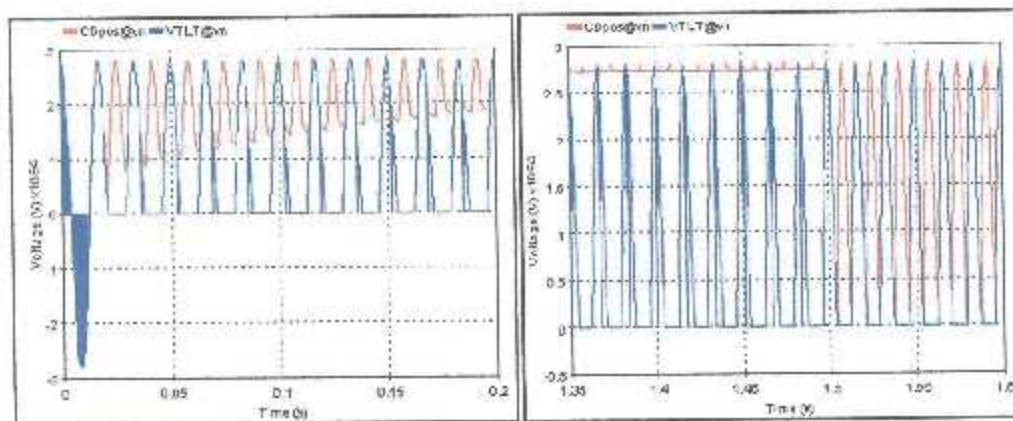


Figura 4. 6. Tensiones de salida del rectificador y de carga de capacitores

4.5. Circuito generador de Impulsos Multietapa

El circuito mostrado en la figura 4.7 corresponde al esquema completo que tiene el generador de impulsos el cual consta de la alimentación en baja tensión, transformadores de potencial para elevar la tensión, un puente rectificador de alta tensión para alimentar los capacitores del generador de impulsos con corriente directa.

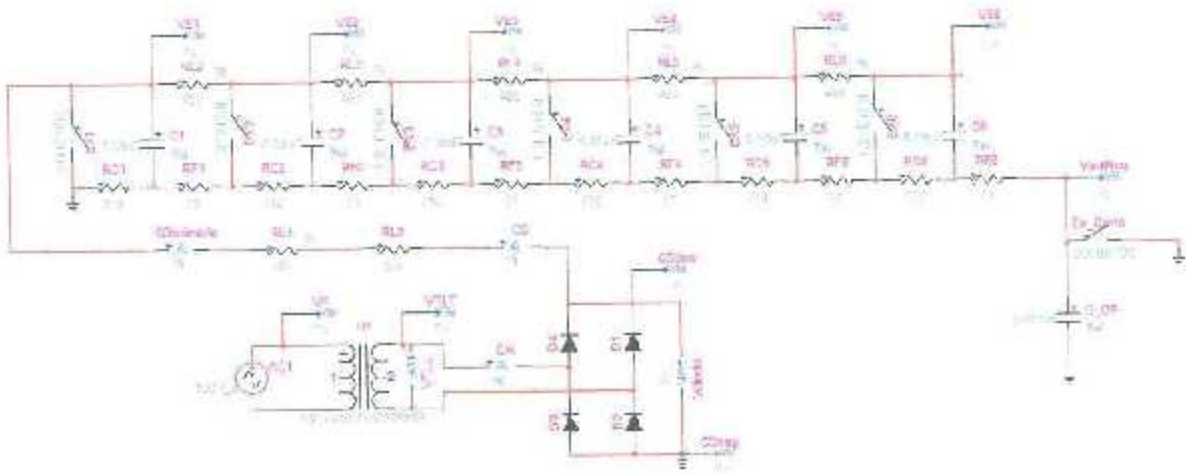


Figura 4. 7. Circuito de alimentación y generador de impulsos

La Figura 4.8 muestra la corriente total que se necesita para cargar los capacitores a la tensión deseada, se aprecia que dicha corriente decrece conforme los capacitores se cargan hasta que llega a valores cercanos a cero una vez cargados los capacitores, el tiempo de carga es muy grande por la poca corriente que entra en ellos por las resistencias de carga, sin estas resistencias la corriente sería de alrededor de 30 amperes lo cual involucraría mucha potencia, en cierto instante alrededor de los 1.5 segundos tiene un incremento cuando se disparan los capacitores ya que la corriente se fuga a tierra.

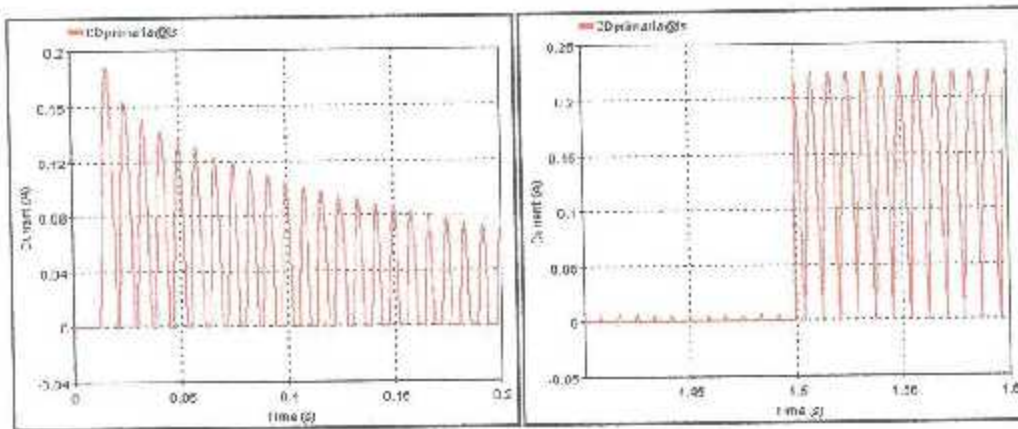


Figura 4. 8. Corriente total CD para alimentar el generador de impulsos

Las gráficas mostradas en las Figuras 4.9 y 4.10 muestran la tensión a la que se cargan los capacitores así como también el tiempo que tardan en hacerlo, se puede apreciar como la forma de onda de la tensión en los primeros capacitores oscila conforme va aumentando su valor y se puede apreciar que conforme se cargan los capacitores de las etapas superiores.

La oscilación en la forma de onda del voltaje se suaviza hasta que llega a su valor de carga, al final del tiempo de carga de los capacitores y cuando estos se disparan se puede observar como el voltaje de todos los capacitores tiende a cero en un tiempo extremadamente rápido.

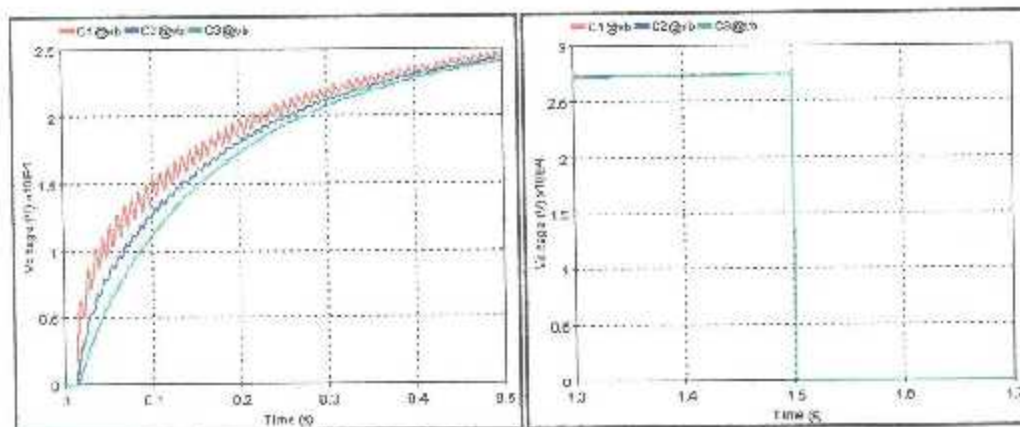


Figura 4. 9. Tensión de carga de los capacitores 1, 2, 3 del generador de impulsos

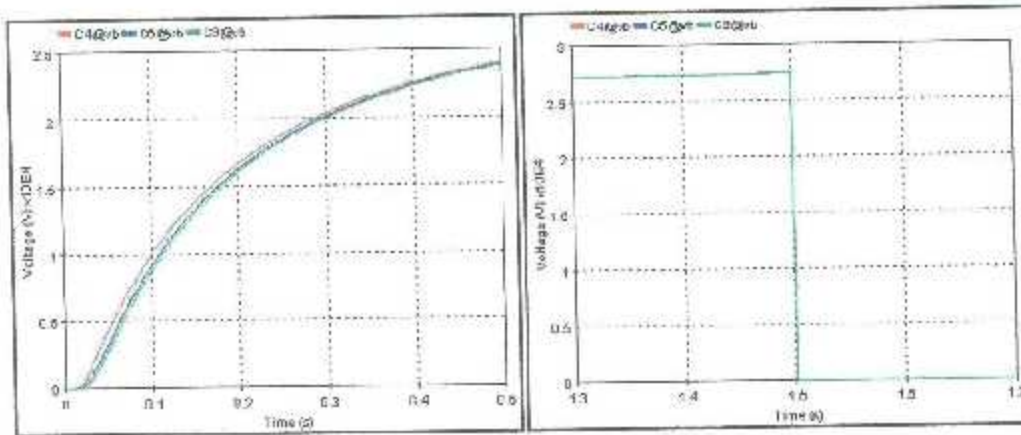


Figura 4. 10. Tensión de carga de los capacitores 4, 5, 6 del generador de impulsos

Las gráficas de las figuras 4.11 y 4.12 muestran la corriente que absorbe cada uno de los capacitores de etapa, como se observó en las tensiones de carga, la corriente también presenta una oscilación en su forma de onda, esto es por la corriente que está saliendo del rectificador es corriente directa pulsante como la que se observa en la figura 4.5, toma cargar a los capacitores alrededor de un segundo y medio, ya que la corriente que entra al último es muy pequeña debido a las resistencias de carga, además en las gráficas también se observa la corriente en el instante en que se disparan los capacitores, lo que nos arroja valores de cientos de amperes a la salida del impulso.

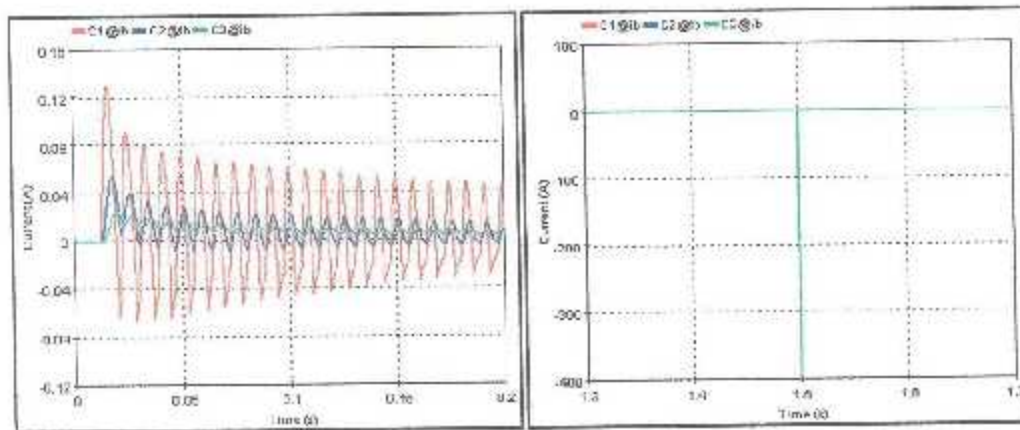


Figura 4. 11. Corriente CD de carga y descarga de los capacitores 1, 2, 3 del generador de impulsos

Se aprecia como las corrientes que absorbe el capacitor comienzan con valores altos (sin resistencias de carga los valores de la corriente tienden a cientos de amperes de corriente de carga) y en el punto de donde el capacitor se carga casi totalmente la corriente tiende a cero.

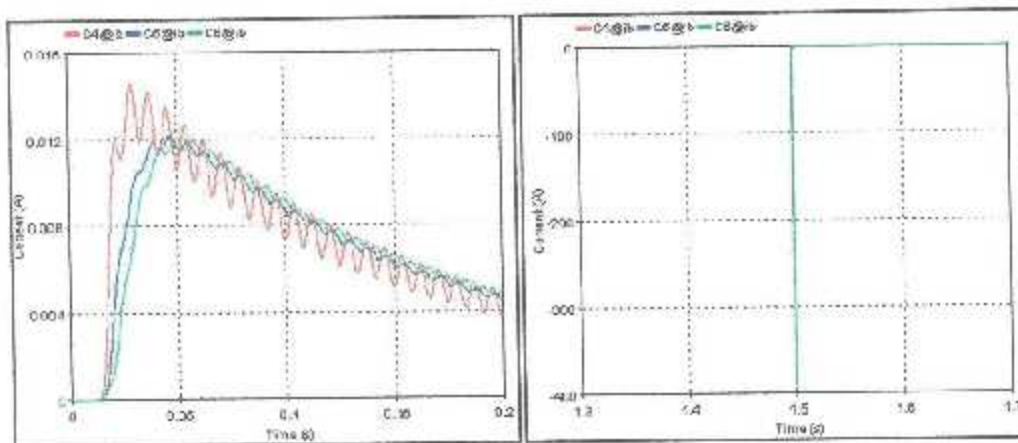


Figura 4. 12. Corriente CD de carga y descarga de los capacitores 4, 5, 6 del generador de impulsos

Las gráficas de las Figuras 4.13 y 4.14 muestran las corrientes que atraviesan a cada una de las resistencias de carga, donde se logra apreciar como la corriente va disminuyendo conforme atraviesa dichas resistencias, los valores que se observan están dentro de las recomendaciones que dan la IEC y la IEEE, las cuales mencionan que los valores de la corriente que entra al generador de impulsos debe de estar dentro de un rango de 50-200 mA, y los valores que se obtuvieron en las simulaciones son alrededor de 170-190 mA.

En dichas graficas también se observa que una vez que se realiza el disparo de los capacitores de etapa se produce un impulso de corriente de alrededor de 0.5 A que logra atravesar la resistencia de carga a pesar de tener valores muy altos, como dicho impulso es muy rápido y la corriente es poca, no tiene impacto en la forma de onda producida por el generador o en los elementos de este, ya que lo más peligroso sería

que dicho impulso llegara a los diodos del rectificador y los dañara, esto no ocurre ya que se logra disipar la energía de dicho transitorio en las propias resistencias.

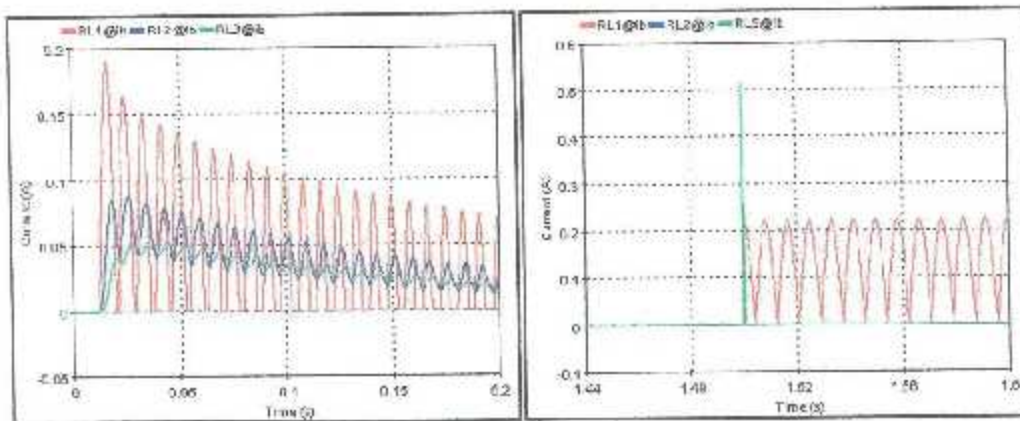


Figura 4. 13. Corriente CD que atraviesa las resistencias de carga 1, 2, 3 del generador de impulsos

En la gráfica de la Figura 4.13 también se observa como si se dejan accionados los explosores circula una corriente a tierra ya que es como si se quedara en cortocircuito, pero como tenemos resistencias de carga muy grandes para limitar la corriente de entrada al generador de impulsos, la corriente que se fuga a tierra no es muy grande y ronda los valores de 200 mA.

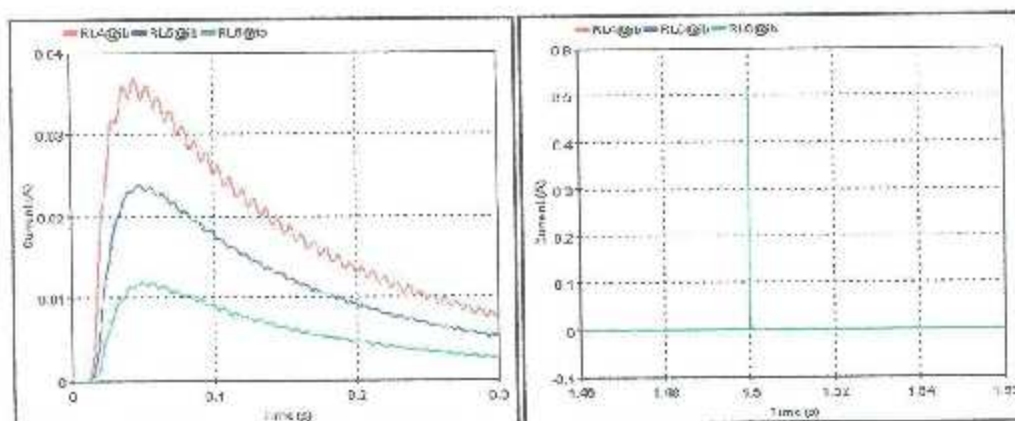


Figura 4. 14. Corriente CD que atraviesa las resistencias de carga 4, 5, 6 del generador de impulso

En la Figura 4.15 se aprecia la sumatoria de tensiones por cada etapa del generador, así como su forma de onda es similar en cada etapa, con la diferencia del nivel de tensión ya que cada etapa lleva la suma de la tensión anterior, todas estas formas de onda cumplen con los valores estándares normalizados como los son el tiempo de frente y el tiempo de cola para el estándar de 1.2/50 μ s para impulsos de tensión tipo rayo.

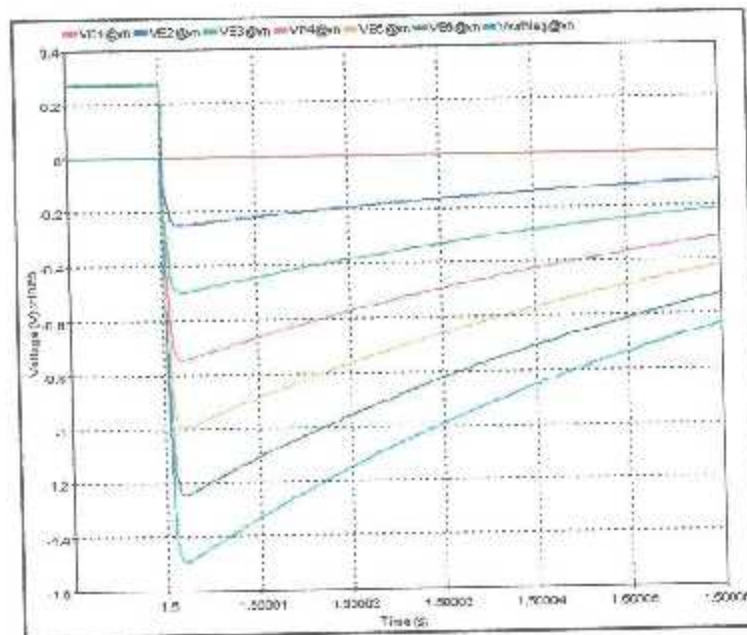


Figura 4. 15. Tensiones por etapa del generador de impulsos

Si existiera o se percibiera cualquier cambio en alguna de las formas de onda podemos saber que existe algún problema en dicha etapa, como alguna mala conexión entre elementos o si esta puesta una resistencia con valor que no es el correcto para dicha configuración, esto en simulación es fácil, en la práctica no se acostumbra hacerlo y solo se toma medición a la entrada al generador y en la salida del impulso de tensión tipo rayo al objeto de prueba.

4.6. Formas de onda de tensión tipo impulso

Las formas de onda de los impulsos de tensión tipo rayo tiene bien definidas sus características por lo que si la forma de onda resultante de las simulaciones y las pruebas no las cumplen, no están normalizadas, por lo que no se puede utilizar para realizar las diferentes pruebas que se pueden llevar acabo en los equipos de alta tensión, aislamientos, y medios materiales, el generador solo podría usarse como modelo educativo o práctico, en las simulaciones realizadas en el EMTP-VR se buscan obtener las formas de onda estandarizadas según la IEC y la IEEE.

4.6.1. Impulso de Tensión Plena – Onda Completa

Por la configuración en la que está conectado el generador de impulsos, esta invierte la polaridad de la tensión con la que es alimentado por lo que la tensión de salida es negativa, razón por la que se ve con polaridad negativa el impulso, figura 4.16.

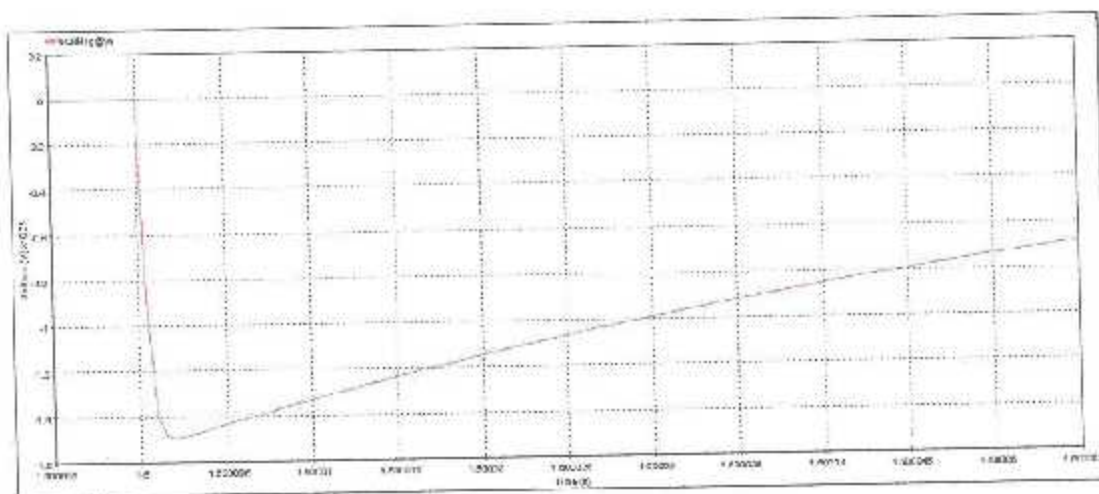


Figura 4. 16. Forma de onda resultante de impulso de tensión tipo rayo

Con la gráfica 4.16 resultante de la simulación se calculan los valores para determinar si la forma de onda del impulso tipo rayo está dentro de los estándares ya bien establecidos, por lo que se tomarán las mediciones del tiempo de frente, el tiempo de cola, no se ve presente un sobre pico ya que no se está considerando que el objeto de prueba tenga parte inductiva.

El tiempo de frente de onda está dentro de los rangos permitidos ya que se tienen un 30% de tolerancia el cual representa $0.36 \mu\text{s}$ hacia arriba o abajo en la forma de onda, en los resultados tenemos $1.252 \mu\text{s}$ lo cual representa un 4.5% de error.

$$t_f = 1.67(t_{90} - t_3) = 1.67(0.88 - 0.13) = 1.252 \mu\text{s}$$

En el tiempo de cola se tiene un rango de tolerancia del 20% lo que representa $10 \mu\text{s}$ de tolerancia para obtener el 50% del valor pico, en la gráfica se tiene $45.5 \mu\text{s}$ lo que representa un 9.8% de error.

$$t_c = 50\% \text{ valor pico en } 50 \mu\text{s} = 45.4 \mu\text{s}$$

Para el valor de la tensión en el impulso de salida se tiene una disminución comparándolo con el circuito B) de la Figura 4.1 el cual a pesar de solo tener una etapa representa el circuito de 6 etapas del generador, la diferencia en los valores está dada

por la propia construcción del generador ya que se puede decir que el de una etapa es de parámetros concentrados y el de 6 etapas es de parámetros distribuidos.

$$U_{\max} = 149 \text{ kV}$$

Por lo que si se calcula la eficiencia que tiene el circuito comparada contra el modelo reducido de una etapa se aprecia como baja la eficiencia de este, aunque todavía se encuentra a niveles aceptables para lograr los impulsos deseados.

$$\eta = \frac{V_p}{V_0} = \frac{149}{180} = 0.827 = 82.7\%$$

En la figura 4.17 se precia el tiempo de cola del impulso donde este cumple con tener el 50 % del valor pico a los 50 μs .

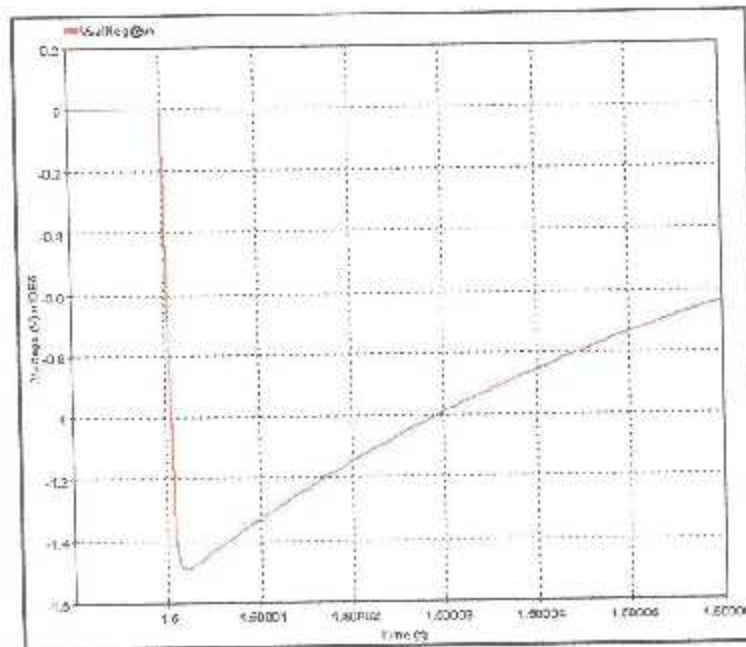


Figura 4. 17. Forma de onda resultante de impulso de tensión tipo rayo

Con los valores calculados y las formas de onda obtenidas en las Figuras 4.16 y 4.17 se comprueba que la simulación esta correcta y se espera que en la parte experimental del presente trabajo se obtenga algo similar, la diferencia consistirá en los elementos parásitos que existen en los elementos del propio generador, la corrección en la forma de onda en la parte experimental se realiza con muchas pruebas ya que se observa la forma de onda resultante y se trata de corregir según sea el caso, en la parte de las simulaciones muchos de estos elementos no se consideran y se descartan por la magnitud de su valor y solo se llegan a tomar en cuenta cuando se simula un generador patrón para calibrar otros generadores o equipos.

5.6.2. Impulso de Tensión Cortado - Onda Cortada en la Cola

Algunos equipos también requieren pruebas de impulso de tensión con cola cortada por lo que se dispone a simularla con los mismos parámetros que la onda de impulso de tensión plena de la que se habló anteriormente, el tiempo de corte en la cola depende del objeto a probar ya que distintos tiempos de corte corresponderán a distintos objetos de prueba según los estándares y normas establecidas así como de los fabricantes.

Como en la simulación del impulso de tensión pleno se tiene el mismo valor del impulso ya que son los mismos valores en los parámetros por lo que se tiene:

$$U_{\max} = 149 \text{ kV}$$

Otro de los parámetros a determinar es la duración de la tensión cuando se produce el corte en cola, la cual se obtiene con:

$$t_2 = 1.67(t_{10} - t_7) = 1.67(4.33 - 4.24) = 0.1503 \mu\text{s}$$

Para los tiempos de frente y tensión pico se tienen las mismas tolerancias que el impulso de tensión pleno, las figuras 4.18 y 4.18 muestran las formas de onda obtenidas.

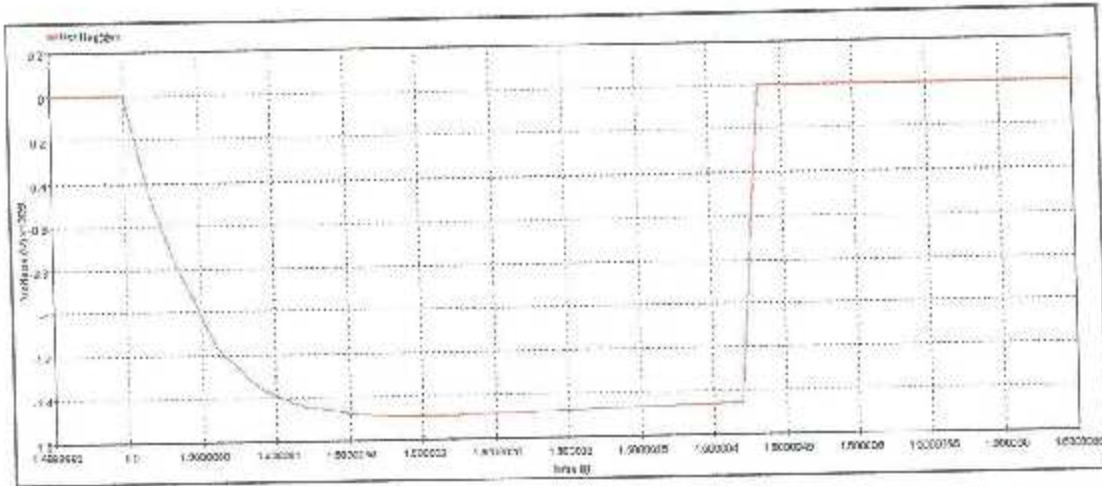


Figura 4. 18. Forma de onda resultante de Impulso de tensión cortado en cola tipo rayo

Al igual que en la simulación del impulso de tensión pleno, los valores obtenidos en esta simulación, están dentro de los valores establecidos y recomendados en los estándares de la IEC y la IEEE, el corte de la onda se logra con un explosor especial localizado a la salida del impulso y en paralelo al objeto de prueba, los cortes en la onda también se producen cuando el aislamiento de lo que se está probando no resiste la tensión y se produce una descarga disruptiva, si la tensión de prueba es menor a la que está diseñado el objeto y ocurre la descarga, el equipo en cuestión está dañado o no cumple con sus especificaciones.

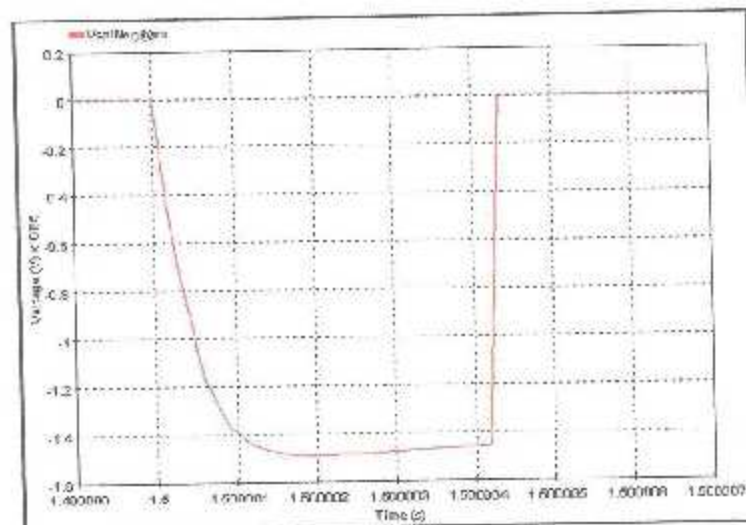


Figura 4. 19. Forma de onda resultante de Impulso de tensión cortado en cola tipo rayo

Capítulo V

Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

Las características del generador de impulsos de tensión del ITL han sido estudiadas, así como también su funcionamiento dentro del sistema de prueba de impulso atmosférico 1,2/50 μ s. El diagnóstico integral se ha focalizado en las principales características eléctricas y mecánicas del mismo y de los demás componentes que forman parte de la prueba y se observaron aquellos equipos e instrumentos que se encuentran dañados y/o en mal funcionamiento (por ejemplo, fuentes AC, cables coaxiales, conductores, etcétera).

Del análisis cualitativo del estudio se evidenció la falta de mantenimiento preventivo del sistema y la ausencia de algunos equipos complementarios (por ejemplo, el trigatrón) necesarios para una ejecución de la prueba de impulso con mejor certidumbre en los resultados. Asimismo, la carencia de instrumentos de medición (voltímetros para diferentes rangos) y la descalibración de otros sistemas (espinterómetro vertical, divisor de tensión, etc.) contribuye al incremento de esta incertidumbre, por lo que es indispensable el cambio o repotenciación de los mismos. Por lo tanto, se requiere implementar rutinas de mantenimiento (limpieza externa periódica, correcta ubicación de los inventarios de esferas, conectores y uniones en los armarios y sitios alejados de la humedad, polvo y contaminación en general) para evitar el progresivo deterioro de los mismos.

Un aspecto fundamental fue la implementación de las simulaciones en un software computacional en para la predeterminación de las resistencias de frente y cola, condensadores de carga y número de etapas, facilitando así un ahorro de tiempo considerable desde el punto de vista de instalación, ajuste y calibración del sistema de impulso.

Finalmente, se recomienda un estudio más exhaustivo sobre las técnicas más actuales relacionadas a los generadores de impulsos así como también los equipos necesarios

para las mediciones de las tensiones en el objeto de prueba y evitar la interferencia electromagnética en el recinto de pruebas ajustando resistencia de la malla metálica del recinto de pruebas, así como también la adquisición de nuevos equipos.

La simulación de la operación del generador de impulso se basó en la representación aproximada del funcionamiento de un conjunto de elementos de circuitos eléctricos pasivos y lineales, que por diseño están dimensionados para soportar las magnitudes de voltajes y corrientes al ocurrir dichos impulsos de tipo atmosférico. Valerse del simulador reduce la necesidad de usar el generador para ilustrar o aclarar los conceptos acerca de lo que es una onda exponencial y que es un impulso atmosférico de tipo impulso. Esto alarga la vida útil del generador y reduce la posibilidad de accidentes y/o maltratos. Además, en el software se pueden hacer simulaciones con ciertos valores de voltajes, corrientes, resistencias, que no serían posibles o convenientes de hacer físicamente en el generador.

No se pretendió la simulación exacta de todos los fenómenos que ocurren al producirse un impulso, puesto que algunos parámetros son muy difíciles de estimar numéricamente o dependen de variables que son muy difíciles de medir (por ejemplo: la resistencia del arco eléctrico entre las esferas va cambiando en función de una potencia fraccionaria de la corriente del propio arco. Tampoco se puede medir el radio del canal plasmático formado por el arco ni la temperatura del arco) o se carece en el laboratorio de los equipos para medir ciertas variables. Sin embargo, las simulaciones realizables, a partir del circuito equivalente del generador, se acercan mucho a lo que se espera que ocurra en la práctica.

Los tiempos virtuales de la onda exponencial de impulso son proporcionales a los valores de las resistencias y capacitancias de etapa del generador, así que lo más razonable es para mejorar la precisión de las simulaciones es incluir la resistencia de arco en las simulaciones lo cual es difícil ya que es complicado calcular dichos valores aunque eso es mayormente utilizado en los generadores patrón o para calibrar otros generadores.

Las capacitancias "parásitas" del generador se despreciaron en las simulaciones puesto que en la mayoría de las investigaciones de generadores son despreciadas solo en algunos casos especiales se toman en cuenta, los valores comúnmente que se obtienen son menores en varios ordenes de magnitud (≈ 3000 veces) en comparación con los valores de capacitores principales o de etapas. En cuanto a la medición de las resistencias, inductancias y capacitancias del generador se pudo observar que los resultados obtenidos varían solo un poco, debido a las características de los instrumentos de medición empleados.

Dichas mediciones se hicieron con el mayor cuidado posible, y por diversos métodos, y con esto se tiene una buena idea del margen o rango probable de valores que tendrá cada elemento del circuito. Es importante indicar aquí que las simulaciones se hicieron tomando los valores promedio de las resistencias, inductancias y capacitancias del generador. Si se hubiesen hecho con otros valores (por ejemplo, los máximos o los mínimos) de tales elementos, las formas de onda quizás se asemejarían más a las que se ven observan cuando se realizan pruebas físicas.

Como gran parte del tiempo para las pruebas del generador se invirtió en el diseño, y construcción del rectificador de onda completa es de gran interés, que el diseño de este sea mejorado así como también aumentar el nivel de tensión que puede soportar ya que actualmente los diodos del rectificador solo pueden soportar una tensión máxima de 40kV y dado que los capacitores de etapa están diseñados para una tensión máxima de 60kV en corriente directa se puede decir que con el diseño actual del rectificador no se utiliza el generador de impulsos de descargas atmosféricas a su valor nominal, si se aumenta el nivel de la tensión del rectificador se pueden realizar pruebas a equipos que requieran mayores niveles de tensión.

5.2. Recomendaciones y Trabajos Futuros

Dado que este trabajo implicó medir las resistencias, capacitancias, e inductancias de un equipo (generador) que maneja potencia, se recomienda a la institución que haga una revisión y ajuste de la resistencia de la malla de tierras y la puesta a tierra de la malla metálica que tiene el recinto donde está localizado el generador ya que esto también puede mejorar el funcionamiento a la hora de descargar el generador.

Una de las cosas que pueden ocasionar problemas son los equipos, fuentes y elementos que se encuentran dentro del recinto del generador de impulsos, esto es porque los arcos eléctricos o descargas del generador cuando se utilice a más altas tensiones podrían caer o irse sobre algunos de ellos, por eso se recomienda liberar espacio para no tener el riesgo de que la descargas produzcan daño en el equipo o el personal que lo utilice. En cuanto a futuras investigaciones y pruebas sobre el tema, se recomienda que, para el análisis de los oscilogramas de las ondas obtenidas, se aplique filtrado digital y las diferentes técnicas actuales que se utilizan en las ondas de impulso. El procesamiento básico de señales es una herramienta útil para el área de la ingeniería eléctrica.

Algunos de los trabajos a futuro que se contemplan para el generador de impulsos es volver a poner operativo un trigatron para los disparos de los capacitores, motorizar el movimiento de los explosores con algún motor a pasos, implementando estas dos adecuaciones se pueden tener una mejor operación y precisión de los disparos del generador ya que se puede controlar más eficientemente los voltajes a los cuales se quiere disparar con menor riesgo de disparos accidentales por rompimiento del dieléctrico del aire.

Se recomienda la construcción de una resistencia de carga externa, esta resistencia se requiere entre la fuente de cd y el generador, estando conectada a la terminal de

entrada de la primera etapa. Ayuda a limitar la corriente de carga de cortocircuito cuando se dispara el generador. limita la velocidad de subida de la tensión de carga. Además, ayuda a evitar un impulso no deseado y protege la fuente contra las sobretensiones.

Además algunas de las resistencias que se utilizan para obtener la forma de onda tipo impulso están dañadas por lo que ya no se pueden utilizar, es necesario remplazar o construir estas resistencias a futuro por si se desea cambiar el número de etapas al generador ya que por ejemplo si se necesita configurarlo para 12 etapas esto no es posible ya que no se cuenta con las suficientes resistencias de carga, así también se necesitan más resistencias de frente y cola ya que una vez que este operativo completamente el generador se necesitara amortiguar y lograr la forma de onda resultante del generador a los valores ya establecidos en las normas.

En la mayoría de pruebas realizadas la medición del impulso se realizó tomando la lectura en la placa intermedia del capacitor que se construyó y esta como objeto bajo prueba, el cual tiene una relación atenuación cercana de 10 a 1 del valor de entrada de tensión al capacitor, es por esta razón la diferencia en escalas que se muestran en las figuras de los oscilogramas. Lo dicho anteriormente se puede observar en las figuras A1.1 y A1.2, donde en la primera el valor medido no es en la placa intermedia del capacitor por lo que la señal mostrada no tiene atenuación y muestra directamente los 17 kV del impulso, en cambio en la siguiente figura la medición fue en la placa intermedia y se observa la atenuación ya que el impulso de tensión es de 30 kV y el valor mostrado en el oscilograma es de 3 kV.

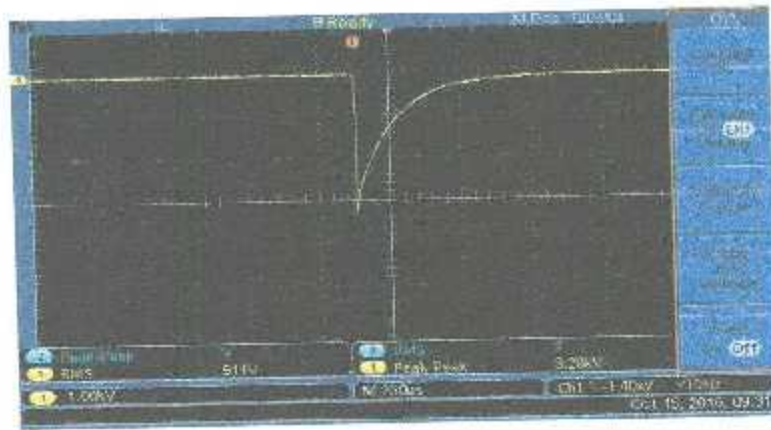


Figura A.1.3. Prueba de impulso de 32 kV, con placa intermedia de capacitor, Utilizando dos etapas

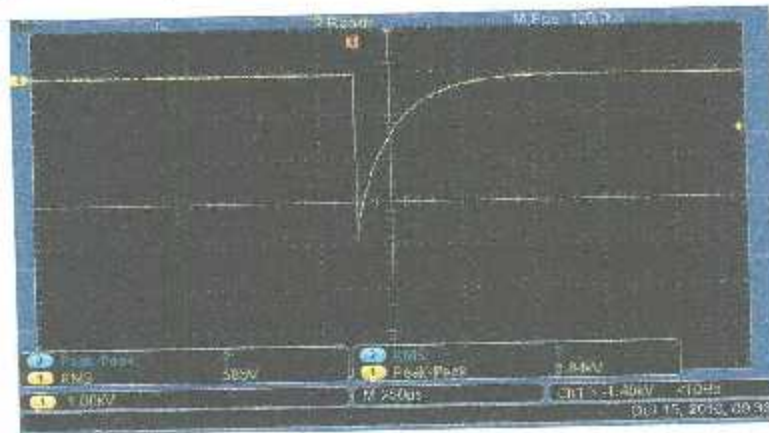


Figura A.1.4. Prueba de impulso de 38 kV, con placa intermedia de capacitor, Utilizando dos etapas

Las figuras A.1.5 y A.1.6 de los oscilogramas mostradas a continuación son de las pruebas de disparo del generador utilizando las seis etapas a las que está configurado, las imágenes son diferentes a las primeras pruebas ya que se utilizó un osciloscopio para registrar fenómenos transitorios, es por esto que las señales medidas tiene mejor resolución.

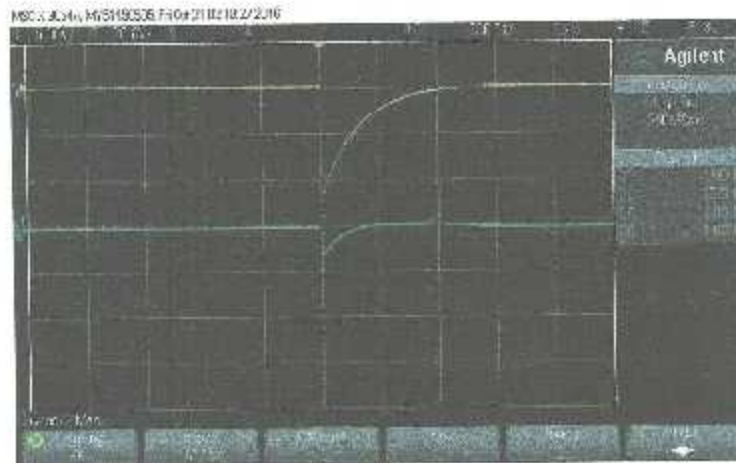


Figura A.1. 5. Prueba de impulso de 12.5 kV, Utilizando seis etapas

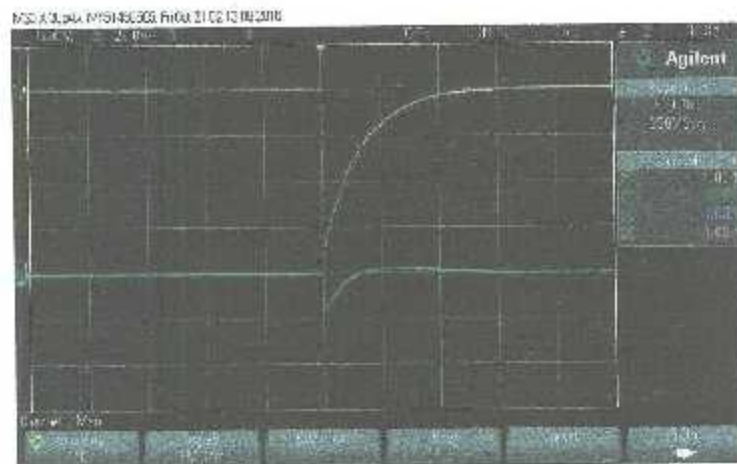


Figura A.1. 6. Prueba de impulso de 20 kV, Utilizando seis etapas

Al igual que las pruebas con dos etapas, en las pruebas con seis etapas se utilizó la placa intermedia del capacitor para tomar las mediciones por los que en los siguientes oscilogramas, figura A.1.7 y A.1.8 se aprecia el cambio de escala conforme se aumenta la tensión en las pruebas y se cambia el punto donde se toma la medición.

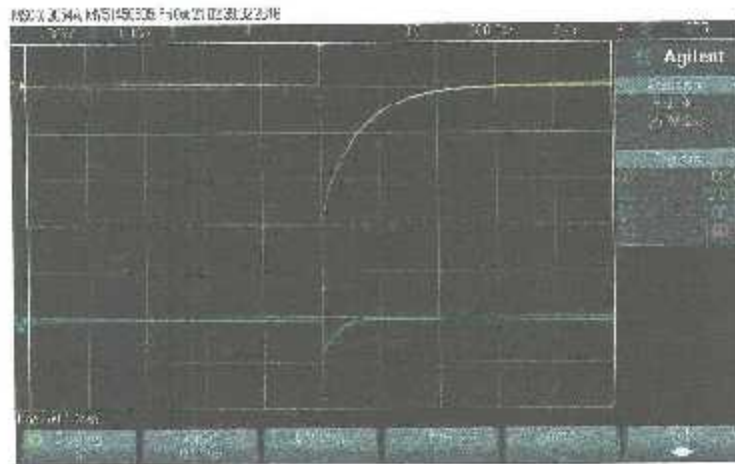


Figura A.1. 7. Prueba de impulso de 30 kV, sin placa intermedia de capacitor, Utilizando seis etapas

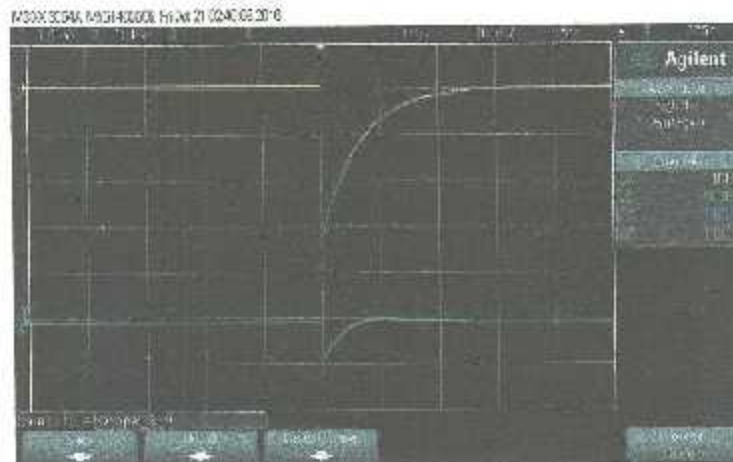


Figura A.1. 8. Prueba de impulso de 35 kV, con placa intermedia de capacitor, Utilizando seis etapas

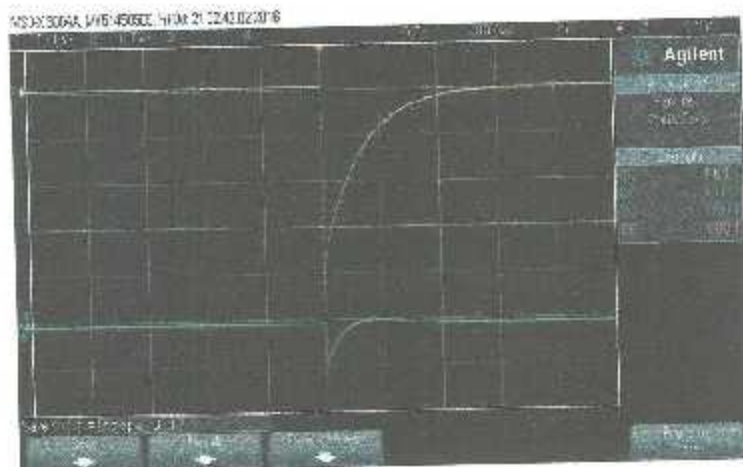


Figura A.1. 9. Prueba de impulso de 40 kV, con placa intermedia de capacitor, Utilizando seis etapas

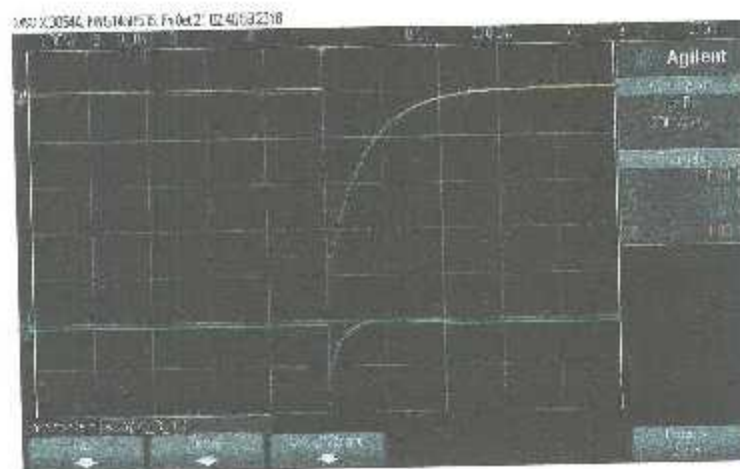


Figura A.1. 10. Prueba de impulso de 45 kV, con placa intermedia do capacitor, Utilizando seis etapas

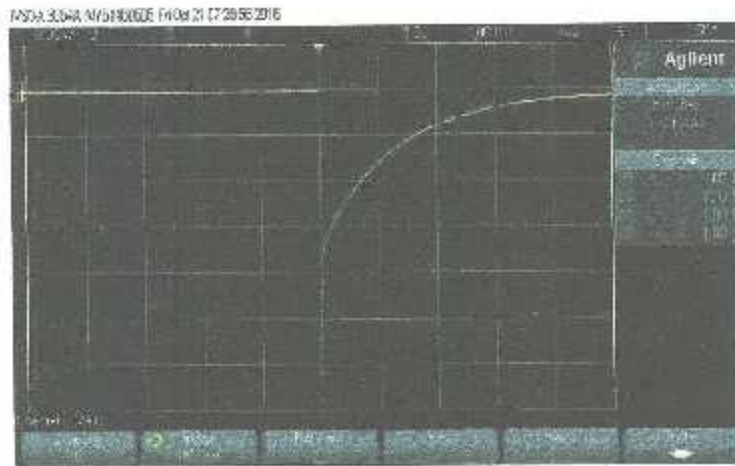


Figura A.1. 11. Prueba de impulso de 75 kV, con placa intermedia de capacitor, Utilizando seis etapas

Como ya se mencionó anteriormente, la forma de onda del impulso de tensión tipo rayo de todas estas pruebas se asemeja a los valores de los estándares, pero ya que el capacitor bajo prueba está lejos del valor de 1 nF, el cual es el valor al que están diseñados los elementos del generador, las pruebas por el momento solo sirven como demostrativas ya que se tiene que calibrar el generador para que dichas pruebas tengan validez.



Figura A.1. 12. Prueba de impulso de 90 kV, con placa intermedia de capacitor, Utilizando seis etapas

A.2. Problemática con elementos del sistema

Se describen brevemente algunos de los problemas presentados durante la puesta en operación del generador de impulsos, los cuales en su mayoría ocurrieron durante las pruebas de carga de los capacitores y con el rectificador monofásico de onda completa.

Efectos corona en elementos para energizar el los capacitores

Al comenzar a probar las partes que se utilizarían para realizar las pruebas, en algunas de ellas como el interruptor se produjo efecto corona a tal grado que fundieron una masilla que contenía la placa del interruptor, esto era un problema que ocasionaba el aumento de corriente lo cual puede dañar los diodos rectificadores.

Transitorios de corriente presentes en la carga de los capacitores al subir el nivel de tensión

Uno de los problemas al comienzo de las pruebas de carga de los capacitores fueron los transitorios de corriente que se presentan cuando se incrementa el voltaje con el variac, estos transitorios dañaron uno de los diodos rectificadores, mediante simulación se determinó que dichos transitorios podían adquirir valores de hasta 20 amperes y los diodos son de 1 amper, por lo que para mitigarlos se colocó una resistencia en serie con lo cual se solucionó este problema.

Aislamientos inadecuados y Distancias de seguridad para los niveles de tensión manejados

Los cables utilizados para la conexión de los elementos para energizar el generador tienen aislamientos para baja tensión, es por esto que a partir de 600 volts en adelante es como si estos cables fueran desnudos por lo que se debe tener precaución de no tener contacto con ellos así como mantener una distancia de seguridad mínima en todo momento cuando esta energizado el generador ya que pueden ocurrir descargas a los objetos cercanos.

Referencias

- [1]. E. Kuffel, W. S. Zaengl and J. Kuffel, "HIGH VOLTAGE ENGINEERING: FUNDAMENTALS", Newnes Press, 2000.
- [2]. M.S. Naidu, "HIGH VOLTAGE ENGINEERING", Mc Graw Hill, 1996
- [3]. IEC 60060-2: High - Voltage Test Techniques, Part 2: Measuring Systems
- [4]. IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques, IEEE Std 4™-2013 (Revision of IEEE Std 4-1995)
- [5]. M. Khalifa "High-Voltage Engineering, theory and practice" 1983.
- [4]. C.L. Wadhwa "HIGH VOLTAGE ENGINEERING", NEW AGE INTERNATIONAL (P) LIMITED, PUBLISHERS, 2007
- [5]. Carrus, A, Comparison of methods suggested for conveniently reproducing lightning overvoltages, IEEE, Properties and Applications of Dielectric Materials, Vol. 2, 1988
- [6]. Edwards, F.S. ; Husbands, A.S. ; Perry, F.R. The development and design of high-voltage impulse generators, Proceedings of the IEEE - Part I: General Vol. 98, 2010
- [7]. Victor M. Cabrera M. ; Modification of a Marx Generator. Institute of High Voltage Research, Uppsala University, ISSN 0349:8352 April 1990
- [8]. MacGregor, S.J. ; Tuema, F.A. ; Harrower, J. The repetitive operation of a spark gap column, Pulsed Power Conference, 1997. Digest of Technical Papers, Vol. 2, 1997

- [9]. Vasquez, J.A.; Non-destructive examination of impulse generator pulses, Pulsed Power Conference, 1997, Digest of Technical Papers. 1997 11th IEEE International Vol. 2, 1997
- [10]. McCuistian, B.T.; Noise reduction of Marx generator, Pulsed Power Conference, 1997. Digest of Technical Papers. 1997 11th IEEE International Vol. 2, 1997
- [11]. Heilbronner, F.W.; Firing and Voltage Shape of Multistage Impulse Generators, Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on Vol. PAS-90, 2007
- [12]. T. Mc Comb, J. Lagnese , "Calculating the Parameters of Full Lightning Impulses using Model-based Curve Fitting", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol 6, Oct. 1991, p. 1386-93
- [13]. Dieter Kind - An Introduction to High-Voltage Experimental Technique 1978
- [14]. W Hauschild -High-Voltage Test and Measuring Techniques-Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014
- [15]. Alberto Torresi; Mediciones en alta tension" , new library 2004
- [16]. Firing and voltage shape of multistage impulse generators F. W. Heilbronner Hochspannungsinstitut, Technical University, Munich, Germany, 1971
- [17]. Shaping circuits for high voltage impulses, F.C. Creed and M.M.C. Collins National Research Council of Canada Radio and Electrical Engineering Division Ottawa, Canada, 1971
- [18]. Criteria for the elimination of high frequency oscillations in steep front hv impulse generator, C. MAZZETTI. IEEE Transactions on Pover Apparatus and Systems, Vol. PAS-96, no. 1, January/February 1977
- [19]. Resistance of Spark Channels, Raúl Montañó, IEEE Transactions on plasma science, vol. 34, no. 5, october 2006

