



UNIVERSIDAD
DE LOS ANDES
MERIDA VENEZUELA

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

www.bdigital.ula.ve
DISEÑO Y MODELADO DE UN GENERADOR DE MARX.

Br. Johan A, Uzcátegui O.

Mérida, octubre 2019

Reconocimiento-No comercial- Compartir igual



UNIVERSIDAD
DE LOS ANDES
MERIDA VENEZUELA

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

www.bdigital.ula.ve

DISEÑO Y MODELADO DE UN GENERADOR DE MARX.

Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero
Electricista

Br. Uzcátegui Ojeda Johan Alexander
Tutor(es) Prof. María Angélica Salazar
Prof. Francisco J. Vilorio M.

Mérida, octubre 2019

Reconocimiento-No comercial- Compartir igual

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

APROBACION

DISEÑO Y MODELADO DE UN GENERADOR DE MARX.

Br. Uzcátegui Ojeda Johan Alexander

Trabajo de Grado, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos exigidos para optar al título de Ingeniero Electricista, aprobado en nombre de la Universidad de Los Andes por el siguiente Jurado.

www.bdigital.ula.ve

Prof. Francisco J. Vilorio M.

Prof. Francisco Araujo

Prof. Pedro Mora.

DEDICATORIA

Primeramente, a **DIOS** por su Grandeza y Misericordia al permitirme alcanzar una de mis grandes metas, también te doy gracias Señor por tener el privilegio de haber sido escogido por ti, para tener una excelente madre tan ejemplar de lo cual me siento sumamente orgulloso y a quien debo mi esmero y superación por ser ejemplo de lucha, amor, honestidad y trabajo.

A mis hermanas Rosmery y Gabriela por estar siempre presente

A mis abuelos y abuelas por bendecir y guiar siempre mis pasos desde el cielo

A toda mi familia y amigos este logro les pertenece en gran parte a ustedes.

JOHAN UZCATEGUI

AGRADECIMIENTO

A Dios por darnos la inteligencia y fortaleza necesaria para vencer uno a uno los obstáculos y lograr culminar hoy día...

A la ilustre Universidad de Los Andes, por ser una institución generadora de conocimientos, enfocada en la formación de profesionales altamente capacitados en las diferentes carreras que dentro de ella se imparten.

A mis tutores, Prof. María Angélica Salazar y el Prof. Francisco J. Viloría M. por brindarme su apoyo incondicional para el alcance de este logro. Prof. Maria Angélica Salazar por siempre estar pendiente durante este proceso de la elaboración de mi tesis de grado, Prof. Francisco Viloría Gracias por su paciencia y enseñanzas.

Al excelente equipo de Profesores quienes se dedicaron a darnos lo mejor de cada uno, con gran profesionalismo.

A la Sra. Judith Álvarez Quintero por ser tan especial, siempre apoyando a los estudiantes en todo momento.

A la Empresa Comercializadora Lago Andes C.A. en especial al Sr. Reinaldo Rhode por brindarme un gran apoyo al final de mi carrera y poder alcanzar este logro.

Uzcátegui Ojeda Johan Alexander. Diseño y Modelado de un generador de Marx. Universidad de Los Andes. Tutor(es): Prof. María Angélica Salazar. Prof. Francisco J. Vilorio M. Octubre de 2019.

RESUMEN

En la investigación se plantea como objetivo general diseñar el modelo de un generador de Marx, su fuente de alimentación y el sistema de medición para el Laboratorio de Alta Tensión de la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Los Andes. El estudio se desarrolló, bajo un diseño documental. Para ello se realizó una investigación sobre las fuentes de alta tensión en el laboratorio, y se diseñó un modelo de los diferentes elementos del generador y la fuente de alimentación. Se concluye con el estudio, que los valores de los componentes seleccionados para C1, C2, R1 y R2, fueron los más adecuados para el correcto funcionamiento del generador, que permitió observar los comportamientos de la onda generada como lo son el tiempo de frente de onda variando R1 y C2 que admite valores comprendidos en $1,2 \pm 30\% \mu s$ y el tiempo de cola de onda variando R2 y C1 admite valores comprendidos en $50 \pm 20\% \mu s$ de esta manera se cumple con las premisas establecidas en la norma para tensiones tipo rayo. En cuanto a la fuente de alimentación del generador se tomaron las precauciones necesarias para que sea lo más energéticamente eficiente y segura para ser manipulada por el usuario; la cual, transforma el valor eficaz de la corriente alterna de 120 V en corriente continua que es la que utilizan los componentes electrónicos que conforman dicho generador. De igual manera, se concluye que el sistema de medición juega un papel importante en el desarrollo de un generador de Marx, ya que, les brindará a los estudiantes de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Los Andes quienes realizan sus prácticas en el Laboratorio de Alta Tensión un conocimiento significativo, al poder corroborar la tensión a que serán sometidos los objetos de prueba para facilitar su estudio.

Descriptor: Generador de Marx, fuente de alimentación, sistemas de medición, laboratorio de alta tensión.

ÍNDICE GENERAL

APROBACION.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
RESUMEN.....	vi
INTRODUCCIÓN.....	1

Capítulo	pp
1 SITUACIÓN DEL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN.....	3
1.1. Planteamiento del problema.....	3
1.2. Justificación de la investigación.....	4
1.3. Objetivos de la investigación.....	5
1.3.1. Objetivos Generales.....	5
1.3.2. Objetivos Específicos.....	5
1.4. Marco metodológico.....	5
1.5. Alcance.....	6
1.6. Limitaciones.....	6
1.7. Sumario.....	6
2 FUNDAMENTOS DE LAS FUENTES DE ALTA TENSIÓN.....	7
2.1. Generadores de impulsos de tensión.....	7
2.2. Tipos de sobretensiones.....	9
2.2.1. Sobretensiones de origen atmosférico.....	9
2.2.2 Sobretensiones de funcionamientos o maniobra.....	12
2.2.3 Sobretensiones producidas por descargas electrostáticas.....	14
2.2.4. Sobretensiones de transitorios de frecuencia industrial.....	14
2.3. Diferentes formas de calcular los componentes de un generador.....	15
2.3.1. Diferentes circuitos para la obtención de ondas de impulso.....	16
2.3.2. Circuitos generadores de una etapa (control de forma de onda) [5].....	18
2.3.3. Circuitos generadores de una etapa. [6].....	20
2.3.4. Circuitos generadores de una etapa. [4].....	27
2.4. Generadores de impulsos multi-etapa.....	27
2.5. Utilización del generador de impulso tipo rayo.....	32

2.6	SOFTWARE	33
2.7.	LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN	33
3	GENERADOR DE IMPULSO.....	34
3.1.	Fuente lineal.	34
	3.1.1.Fusible.	35
	3.1.2. Transformador	35
	3.1.3. Rectificador	35
	3.1.4. Filtro	36
	3.1.5. Regulador de tensión.....	36
3.2.	Circuito de conmutacion	36
	3.2.1 Circuito de disparo	37
	3.2.2 Conmutador	37
	3.2.3. Filtro paso bajo.....	37
	3.2.4. Transformador	37
3.3.	Multiplicador.....	37
3.4.	Generador.....	38
3.5.	Circuito de medición	39
4	FUNCIONAMIENTO DEL GENERADOR DE MARX.	40
4.1.	Simulación de la fuente lineal	40
4.2	Simulación del circuito de conmutación.	41
4.3	Simulación del multiplicador	46
4.4	Generador de Marx.....	47
	4.4.1. Comparación de generadores entre los libros.	48
	4.4.2 Estudio del generador seleccionado	57
4.5.	Comparación del generador de Marx diseñado con la revista Internacional de Ética en Ingeniería y Educación de Gestión.....	59
	4.5.1. Comparación del generador diseñado y el artículo para 1 etapa.....	59
	4.5.2. Comparación entre el generador de Marx diseñado y del articulo para 8 etapas 63	
	CONCLUSIÓN.....	69
	RECOMENDACIONES.....	71

REFERENCIAS 72

www.bdigital.ula.ve

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura.	pp.
Figura 2.1 Forma general y definiciones de voltajes de impulso de rayo (I.R.). (a) I.R. completo. (b) I.R. picado en la cola. (c) I.R. picado en el frente. [5]	11
Figura 2.2 Forma general de voltajes de impulso de conmutación [5].....	13
Figura 2.3 Forma de onda de impulso y sus definiciones [6]	16
Figura 2.4 Circuitos para la producción de ondas de impulso. (a) Para generadores de modelos limitados (b) y (d). Son los empleados en generadores comerciales.....	17
Figura 2.5 Circuito para el estudio de frente y cola de onda de un generador de impulso.	18
Figura 2.6 Onda de tensión de impulso.[6]	22
Figura 2.7 Los factores de eficiencia de voltaje n dependen de la relación de capacitancia C_2 / C_1 para los impulsos de rayos T_1 / T_2. [5]	24
Figura 2.8 Circuito básico de un generador de impulsos de seis etapas. [6].....	28
Figura 2.9 Generador de impulsos multi-etapa con descarga distribuida y resistencias frontales. [5]	31
Figura 3.1 Diagrama de flujo de una fuente de alta tensión.	34
Figura 3.2 Fuente lineal	35
Figura 3.3 Circuito de Conmutación	36
Figura 3.4 Multiplicador (doblador de tensión) 10 etapas	38
Figura 3.5 Generador de Marx 8 etapas	38
Figura 3.6 Circuito de medición	39
Figura 4.1 Modelo de simulación de la fuente lineal.....	40
Figura 4.2 Salida de la fuente lineal	41
Figura 4.3 Modelo de simulación de un circuito de conmutación.	42
Figura 4.4 Forma de onda del circuito de disparo	43
Figura 4.5 Forma de onda en la bobina primaria del transformador	44
Figura 4.6 Forma de onda en la bobina secundaria del transformador	44
Figura 4.7 Forma de onda en el diodo 2.....	45
Figura 4.8 Forma de onda salida del doblador.	46
Figura 4.9 Modelo de simulación de un circuito multiplicador	46
Figura 4.10 Modelo de simulación de un doblador de tensión de diez etapas	47
Figura 4.11 Forma de Onda Doblador 10 etapas.....	47
Figura 4.12 Circuito básico de un generador de Marx.....	48
Figura 4.13 Modelo de simulación de un generador de impulso de impulso básico	49
Figura 4.14 Forma de onda de un circuito básico de un generador de Marx.	49
Figura 4.15 Modelo de simulación de un generador de impulso de tres etapas ..	50

Figura 4.16 Forma de onda de un circuito de 3 etapas de un generador de Marx.	50
Figura 4.17 Modelo de simulación de un generador de impulso de ocho etapas	51
Figura 4.18 Forma de onda de un circuito de 8 etapas de un generador de Marx.	51
Figura 4.19 Forma de onda de un circuito básico de un generador de Marx.	52
Figura 4.20 Forma de onda de un circuito de 3 etapas de un generador de Marx.	53
Figura 4,21 Forma de onda de un circuito de 8 etapas de un generador de Marx.	54
Figura 4.22 Forma de onda de un circuito básico de un generador de Marx.	55
Figura 4.23 Forma de onda de un circuito de 3 etapas de un generador de Marx.	55
Figura 4.24 Forma de onda de un circuito de 8 etapas de un generador de Marx.	55
Figura 4.25 Forma de onda de un circuito básico de un generador de Marx.	57
Figura 4.26 Forma de onda de un circuito básico de un generador de Marx.	58
Figura 4.27 Forma de onda de un circuito básico de un generador de Marx.	58
Figura 4.28 Circuito básico de un generador de Marx.....	60
Figura 4.29 Frente de onda	61
Figura 4.30 Cola de onda.....	61
Figura 4.31 Frente de onda	62
Figura 4.32 Cola de onda.....	62
Figura 4.33 Comparación de la simulación entre las dos formas de onda.	62
Figura 4.34 Generador de Marx 8 etapas	63
Figura 4.35 Frente de onda	64
Figura 4.36 Cola de onda.....	65
Figura 4.37 Simulación de un circuito 8 etapas de un generador de impulso	66
Figura 4.38 Frente de onda	66
Figura 4.39 Cola de onda.....	67
Figura 4.40 Comparación de la simulación entre las dos formas de onda	67

INDICE DE TABLAS

Tabla	pp.
2.1 Formas de Onda. [6]	26
4.1 Datos generales del generador de tensión.....	48
4.2. Datos del generador de una etapa	48
4.3 Datos del generador de tres etapas.....	49
4.4 Datos generador de ocho etapas	50
4.5 Tiempo de frente y cola encontrado del modelo simulado, con rendimiento y voltaje pico incluidos para comparar características del impulso	52
4.6 Datos generador de una etapa	52
4.7 Datos del generador de tres etapas.....	53
4.8 Datos del generador de ocho etapas.....	53
4.9 Tiempo de frente y cola encontrado del modelo simulado, con rendimiento y voltaje pico incluidos para comparar características del impulso	54
4.10 Datos generador de una etapa	54
4.11 Tiempo de frente y cola encontrado del modelo simulado, con rendimiento y voltaje pico incluidos para comparar características del impulso	56
4.12 Datos de un generador básico	57
4.13 Tiempo de frente y cola encontrado del modelo simulado, con rendimiento y voltaje pico incluidos para comprobar la utilidad del generador.....	58
4.14 Datos generales para los diseños	59
4.15 Datos del generador de una etapa	60
4.16 Tiempo de frente y cola encontrado del modelo simulado, con rendimiento y voltaje pico incluidos para comparar características del impulso del circuito básico	63
4.17 Datos generador de ocho etapas	64
4.18 Datos del generador diseñado.....	65
4.19 Tiempo de frente y cola encontrado del modelo simulado, con rendimiento y voltaje pico incluidos para comparar características del impulso de 8 etapas.	67

INTRODUCCIÓN

La práctica adecuada de cada área, en la especialidad técnica, traerá como resultado estudiante mejor preparados en sus especialidades, al igual, que profesionales fortalecidos para responder a las demandas del mundo actual. Es por ello, que, en el área de la ingeniería eléctrica, los laboratorios de alta tensión proporcionan al estudiante una formación integral de gran importancia para todo ingeniero electricista.

Dentro de estos laboratorios, los distintos equipos utilizados requieren de un manejo adecuado, para garantizar no sólo la precisión de las pruebas realizadas, sino también la seguridad de quienes los operan. Es por ello, la importancia desarrollar estrategias que no sólo determinen la precisión de un equipo, sino también su utilidad, durabilidad y uso seguro dentro de un laboratorio.

Los generadores de impulso se emplean para verificar el comportamiento de equipos y aislamientos ante sobretensiones. Las ondas de tensión de impulso tipo rayo empleadas en los ensayos son ondas completas, de evolución y duración similar a la del rayo estadístico, las cuales permiten verificar la capacidad de soporte del aislamiento ante dicha condición. En tal sentido, se muestran los parámetros fundamentales de una onda tipo rayo.

En este sentido el trabajo de investigación quedo estructurado en cuatro capítulos los cuales siguen las normas, que establece la Escuela de Ingeniería Eléctrica, de la Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, como se muestra a continuación.

Capítulo I: se plantea la problemática en el Laboratorio de Alta Tensión de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Los Andes en la cual se propone el diseño de las fuentes de impulso de tensión tipo rayo, para los laboratorios de alta tensión, al igual que los objetivos propuestos, justificación, se esboza la metodología que se utilizó para la investigación, la limitación, el alcance y el sumario que se consideró para este trabajo de grado.

Capítulo II: se orienta hacia los conceptos básicos que fueron tomados en cuenta para el desarrollo de la investigación de varios autores, quienes proporcionaron el conocimiento referente a los generadores de impulso de tensión, los tipos de sobre tensiones, haciendo énfasis en las sobre tensiones tipo rayo, ecuaciones y forma de onda. También se detalla el circuito que forma parte del presente perfil de investigación.

Capítulo III: En este apartado se presenta el diagrama de flujo del diseño de la fuente de alta tensión, la fuente lineal, los circuitos de conmutación y medición.

Capítulo IV: En este aparte de la investigación se presenta el funcionamiento del generador de Marx, de igual manera se establece la comparación de las diferentes formas de cálculo de un generador tipo Marx. Por último, se presentan conclusiones y recomendaciones del estudio, así como las referencias bibliográficas que ayudaron a establecer las bases teóricas de la investigación.

www.bdigital.ula.ve

CAPITULO 1

SITUACIÓN DEL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN

En el presente capítulo se plantea el diseño de las fuentes de impulso de tensión tipo rayo, para los laboratorios de alta tensión, de igual manera se proponen los objetivos generales y específicos, metodología utilizada para la investigación, alcances y limitaciones consideradas para este trabajo de grado.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La internacionalización de la economía, igual que, la globalización de los mercados, son factores determinantes en el crecimiento acelerado y la modernización del avance tecnológico, al dar entrada a un sin fin de equipos modernos, que demandan energía eléctrica de alto voltaje. Para dar paso a un acelerado crecimiento e innovación de los avances técnicos requeridos en la actualidad.

Los generadores de impulsos permiten realizar ensayos de aptitud de las aislaciones eléctricas, para evaluar así, su comportamiento frente a la recepción de impulsos o transitorios con frente brusco, de origen tanto atmosférico, como de maniobra. Por ello, la mayoría de los equipos de alto voltaje, tales como transformadores de potencia, disipadores de sobretensiones, interruptores de circuito, aisladores y torres de línea de transmisión de alta tensión se colocan en subestaciones de transmisión, con la finalidad de mantener la continuidad del suministro de energía.

Es de hacer notar, que estos equipos deben tolerar no solo la tensión nominal que corresponde a la tensión más alta de un sistema en particular, sino también a sobretensiones que se puedan producir en una determinada situación.

En su mayoría, la protección de los equipos de energía eléctrica depende del rendimiento de los sistemas de aislamiento en condiciones de sobretensión transitorio debido a las aplicaciones de rayos y conmutación.

En tal sentido, las sobretensiones transitorias junto con los cambios abruptos en el estado de los sistemas de potencia, para las operaciones de conmutación o descargas atmosféricas, se pueden modelar como tensiones tipo impulso.

En la actualidad, los estudiantes de la carrera de Ingeniería Eléctrica en el Laboratorios de Alta Tensión presentan dificultades para relacionar la teoría con la práctica al no tener fuentes de impulso de tensión tipo rayo y tipo maniobra que permita probar los aisladores, así como realizar los ensayos vistos en la teoría, por tanto, se propone diseñar y modelar un generador de Marx su fuente de alimentación y el sistema de medición.

1.2. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Los Laboratorios de Alta Tensión son de vital importancia en el ámbito científico, como académico de investigación, al proporcionar un amplio servicio creciente a la industria eléctrica en los niveles de tensión los cuales van desde la distribución de la energía hasta la más elevada tensión de transmisión.

Desde esta perspectiva, la trascendencia del estudio radica en lo técnico, porque este tipo de equipo son frecuentemente usados para probar aparatos que se ven expuestos a descargas eléctricas muy intensas como son los transformadores de alto voltaje, al igual, que probar aisladores de equipos eléctricos, o ensayar con líneas de transmisión eléctrica.

Por otra parte, esta investigación reviste importancia por cuanto servirá posteriormente como marco referencial para futuras investigaciones porque atiende a elementos fundamentales del modelo de un generador de Marx, para así poder obtener mejores resultados en necesidad del avance tecnológico que esta representa. Particularmente, se toma esta rama de la ingeniería eléctrica por existir inoperatividad y falta de mantenimiento en los equipos del Laboratorio de Alta Tensión en escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Los Andes en el cual los estudiantes, en virtud de la poca existencia de equipos que permitan realizar pruebas para

aislaciones eléctricas de origen atmosférico, puedan realizar sus ensayos y obtengan así un aprendizaje con significado cuando vayan al campo laboral.

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. Objetivos Generales

Diseñar el modelo de un generador de Marx, su fuente de alimentación y el sistema de medición para el Laboratorio de Alta Tensión de la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Los Andes.

1.3.2. Objetivos Específicos.

1. Estudiar el modelo adecuado para la fuente de alimentación, el generador de Marx y el sistema de medición.
2. Seleccionar el programa apropiado para modelar los diferentes elementos del generador y la fuente de alimentación.
3. Diseñar el modelo de la fuente de alimentación, el generador de Marx y el sistema de medición de acuerdo con el programa seleccionado

1.4. MARCO METODOLÓGICO

Dentro de los paradigmas de investigación prevalecen los modelos metodológicos orientados a favorecer la reflexión, valoración y puesta en práctica de acciones dirigidas a solventar la situación problemática. Por lo tanto, en la presente etapa se hace referencia a los procedimientos técnico metodológico que se utilizó en la investigación para obtener, presentar y analizar la información desarrollada. El presente estudio tomó como referencia el Laboratorio de Alta Tensión de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Los Andes, para dar resultado visible en cuanto al diseño y modelado de un generador de Marx.

El estudio se desarrolló, bajo un diseño documental, “en el que se presentaron teorías, conceptualizaciones y modelos interpretativos originales, a partir del análisis de la información y las teorías existentes”. [1]. Para ello se realizó una investigación de las fuentes de alta tensión presentes en el laboratorio, y se diseñó un modelo de los diferentes elementos del generador y la fuente de alimentación. En los modelos estudiados se utilizaron

herramientas de software que permiten estudiar este tipo de generador como lo son Matlab y Proteus.

1.5. ALCANCE

El presente estudio, ostenta alcances teóricos porque tiene como contexto diseñar y modelar un generador de Marx, su fuente de alimentación y el sistema de medición para el Laboratorio de Alta Tensión de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Los Andes.

Con esta investigación se aspira dar solución satisfactoria a los estudiantes de Ingeniería Eléctrica para que en un futuro puedan realizar ensayos de aislamiento eléctrico para simular descargas de origen atmosférico, como también sea una fuente de fácil comprensión y acceso a la hora de trabajar con la mismas.

1.6. LIMITACIONES

Se apreció como una limitante la carencia de materiales en el Laboratorio de Alta Tensión de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, así como, la poca disponibilidad económica para la adquisición de los materiales lo cual impidió la construcción del prototipo del modelo de generador de Marx lo que representaría una herramienta valiosa para los estudiantes de la carrera de ingeniería eléctrica

1.7. SUMARIO

En esta parte, se muestra la problemática de estudio el cual se destaca el diseño y modelado de un generador de Marx para el Laboratorio de Alta Tensión de la escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de los Andes, con el fin de alcanzar los objetivos planteados en el trabajo de grado

CAPITULO 2

FUNDAMENTOS DE LAS FUENTES DE ALTA TENSIÓN

Este capítulo se orienta hacia la recopilación de información de las bases teóricas referente a los generadores de impulso de tensión, los tipos de sobretensiones, haciendo énfasis en las sobretensiones tipo rayo, ecuaciones y forma de onda. También se detalla el circuito que forma parte del presente perfil de investigación.

2.1. GENERADORES DE IMPULSOS DE TENSIÓN

El generador de impulsos de tensión tipo Marx debe su nombre al ingeniero electricista Erwin Otto Marx (1893-1980), quien en 1923 presentó su circuito, el que a semejanza de otros de la década anterior, como el propuesto en 1914 y generalizado en 1919 por el físico Heinrich Greinacher (1880-1974), compartía en relación con el tipo Marx, el concepto de multiplicador de tensión en escalera o cascada, conformado por peldaños compuestos de transformadores, capacitores y rectificadores de tensión; pero se diferenciaba entre otros, en que los capacitores eran cargados desde la fuente de tensión en conexión paralelo y descargados en serie.

Desde entonces, las configuraciones de circuitos de impulso multi-etapa han sido utilizadas, para el caso de los generadores comerciales, escalan la salida en etapas típicas de 100 kV o 200 kV, alcanzando tensiones de prueba hasta del orden de MV, muy superiores a las soportadas individualmente por sus elementos componentes. Es de hacer notar, “Los generadores de impulsos de tensión como equipos necesarios para realizar ensayos a los sistemas de aislamiento eléctrico” [2]. En tal sentido, para aplicaciones en elementos con niveles básicos de aislamiento en rangos inferiores a 200 kV, los generadores multi-etapa no son la opción más apropiadas, pues por su alto costo y gran tamaño requieren de instalaciones

especiales, no obstante, en el mercado es posible encontrar generadores portátiles de menor rango. Por tanto, “los generadores de impulsos permiten realizar una prueba de aptitud de las aislaciones eléctricas, al evaluar su comportamiento frente a la recepción de impulsos o transitorios con frente brusco, de origen tanto atmosférico, como de maniobra” [2]. El esquema básico de los generadores de impulsos, constituyen en la actualidad, la manera más común degenerar impulsos de alta tensión, para realizar pruebas en las cuales el nivel requerido, es mucho más alto que el disponible en la fuente base. Es decir, consiste en un cierto grupo de capacitores que se cargan en paralelo por medio de rectificadores de alta tensión, a través de resistencias de carga. Por ello, la descarga de estos capacitores se realiza a través de espinterómetros de esferas, en un circuito serie que incluye resistencias amortiguadoras de las oscilaciones. En tal sentido, la carga de todos los capacitores, representan la tensión de salida total del generador, la cual, dependerá de la tensión sobre el rectificador y su polaridad, de la posición del mismo.

Ahora bien, el método más utilizado para provocar la descarga del generador, consiste en aplicar, por medio de una fuente auxiliar, un breve impulso de tensión al electrodo central de un espinterómetro de ignición, ubicado entre el primer y segundo grupo. Iniciada la descarga, ésta se propagará a todos los espinterómetros de la cadena. Por ello, la base para la detección de anomalías sobre una muestra bajo ensayo, realizada mediante el análisis comparativo de los registros en osciloscopios, se fundamenta en que cuando un aislamiento falla al ser sometido a impulsos de tensión, como en el caso de las pruebas a transformadores, cambiará también su impedancia.

Es de resaltar, que este cambio causará variaciones en la corriente de impulso que fluye a través del devanado, y en la tensión media a través del mismo. Debido a la complicada naturaleza del ensayo de impulso, así como, a las diferentes formas constructivas de los transformadores, lo que ha permitido a los fabricantes las más apropiadas técnicas de pruebas a través de los años.

De allí se expresa, que “el propósito de ensayar un transformador con tensión de impulso, es el de simular su uso en campo y en el ensayo, por lo tanto, se debe tener en cuenta los efectos de las líneas, cables, generadores, pararrayos. Para, determinar la clase de descarga atmosférica que va a recibir, y como está descarga tenderá a comportar en el sistema de distribución o de

transmisión”. [3]. Cabe resaltar, que en sistemas de alta tensión estos ensayos se realizan para poner a prueba los componentes o circuitos eléctricos bajo situaciones de sobretensión con el objetivo de validar su correcto funcionamiento y potencia en escenarios que ocurrirán a lo largo de su vida útil. Normalmente estos elementos sobre los que se realizan los ensayos son los aislamientos de los equipos involucrados en el transporte de energía eléctrica.

Estas sobretensiones en sistemas de alta tensión normalmente suelen ser de tres tipos: rayo, maniobra y temporal.

2.2. TIPOS DE SOBRETENSIONES

Pueden ocurrir cuatro tipos de sobretensiones que pueden afectar a las cargas, las líneas de transmisión e instalaciones eléctricas, las cuales requieran ensayos sobre elementos constructivos, para los que se necesitan generadores de impulsos para su estudio, estas sobretensiones vienen definidas a continuación. [4]

- Sobretensiones de origen atmosférico
- Sobretensiones de funcionamientos o maniobra.
- Sobretensiones producidas por descargas electromagnéticas
- Sobretensiones de transitorios de frecuencia industrial

2.2.1. Sobretensiones de origen atmosférico.

También conocidas como sobretensiones de tipo rayo, son sobretensiones de muy corta duración, pero de valor eficaz muy elevados, estos ocurren cuando una descarga atmosférica perturba el estado de una línea de transmisión, las cuales pueden haber incidido en los siguientes lugares:

- Sobre las fases de la línea de transporte.
- En las torres de apoyo.
- En los cables de tierra.
- En las inmediaciones de la línea.

Ahora bien, las perturbaciones de los sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica suelen ser causadas por dos tipos de voltajes transitorios cuyas amplitudes pueden exceder en gran medida los valores máximos de la tensión de funcionamiento normal en A.C.

Cabe resaltar, que las sobretensiones de rayos, originadas por los rayos que golpean los cables de fase de las líneas aéreas o las barras de las subestaciones exteriores, son amplitudes muy altas, generalmente del orden de 1.000 kV o más, ya que cada golpe puede inyectar corrientes de rayos hasta aproximadamente 100 kA e incluso más en la línea de transmisión. Cada golpe es seguido por ondas viajeras, cuya amplitud a menudo está limitada por la máxima resistencia de aislamiento de la línea aérea. La tasa de aumento de voltaje de tal onda viajera es en su origen directamente proporcional a la inclinación de la corriente del rayo, que puede exceder de 100 kA/ μ s, y los niveles de voltaje pueden simplemente calcularse por la corriente multiplicada por la impedancia efectiva de sobretensión de la línea.

Es decir, los niveles de voltaje demasiado alto se cortan inmediatamente por la ruptura del aislamiento y, por lo tanto, las ondas que se desplazan con frentes de onda pronunciada e incluso las colas de onda más pronunciadas pueden forzar el aislamiento de los transformadores de potencia u otros equipos de alto voltaje. Los sistemas de protección contra rayos, los descargadores de sobretensiones y los diferentes tipos de pérdidas amortiguarán y distorsionarán las ondas que se desplazan y, por lo tanto, dentro del sistema de transmisión están presentes sobretensiones de rayos con formas de onda muy diferentes.

En tal sentido, las diversas normas nacionales e internacionales definen los voltajes de impulso como un voltaje unidireccional que aumenta más o menos rápidamente a un valor máximo y luego decae relativamente lentamente hasta cero. En la correspondiente norma IEC 60, ampliamente aceptada hoy en día a través de los comités nacionales, se hace una distinción entre los impulsos tipo rayos y los impulsos de conmutación, es decir, de acuerdo con el origen de los transitorios.

En general, los voltajes de impulso con duraciones frontales que varían desde menos de uno hasta unas pocas decenas de microsegundos se consideran impulsos de tipo rayos. La Figura 2.1(a) muestra la forma de tal voltaje de impulso de tipo rayo 'completo', así como los bocetos

para el mismo voltaje cortado en la cola (Figura 2.1(b)) o en la parte delantera (Figura 2.1 (c)), es decir, interrumpido por una descarga disruptiva.

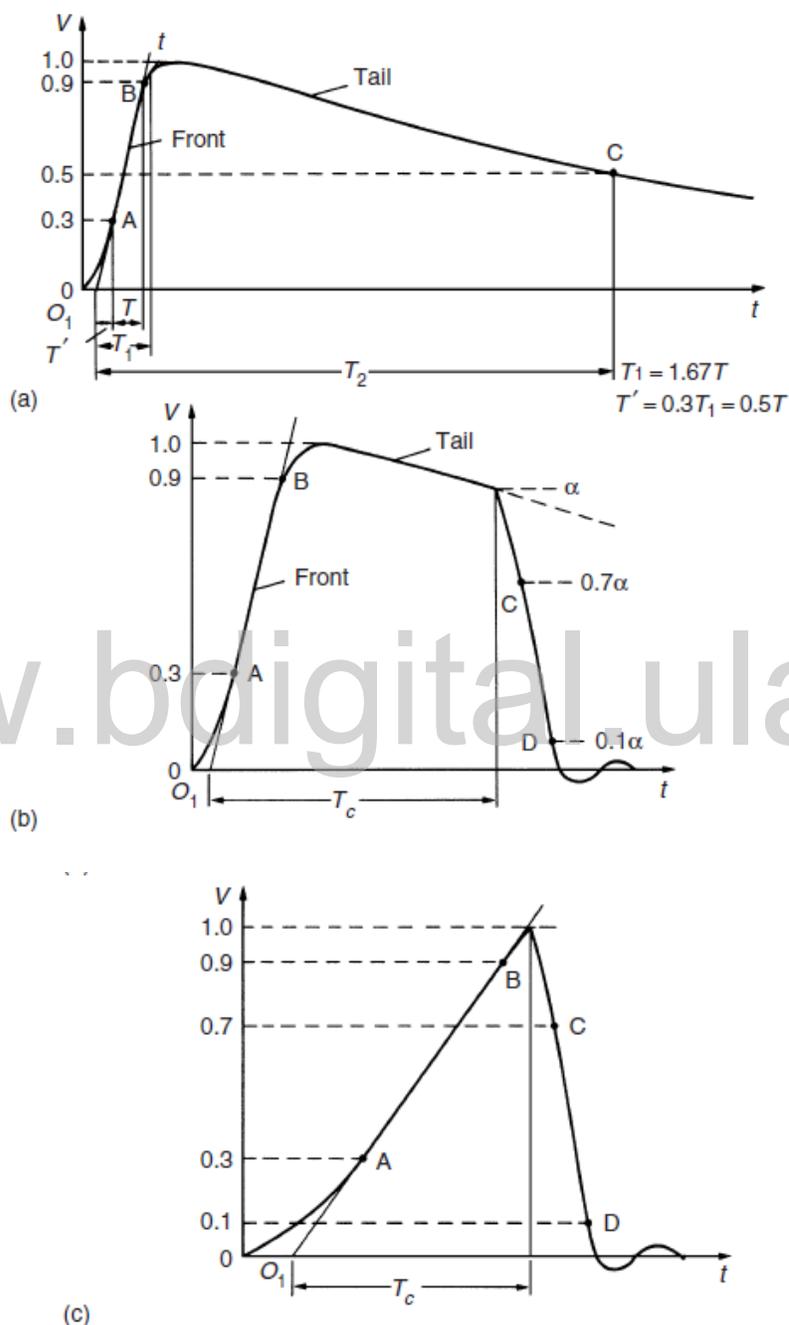


Figura 2.1 Forma general y definiciones de voltajes de impulso de rayo (I.R.).
 (a) I.R. completo. (b) I.R. picado en la cola. (c) I.R. picado en el frente. [5]

El "origen virtual" O_1 se define donde la línea AB corta el eje del tiempo. El "tiempo de frente" T_1 , genera un nuevo parámetro virtual, T entre los instantes cuando el impulso es del 30% y del 90% del valor máximo para los impulsos de rayo completos o cortados.

- T_1 : tiempo de frente.
- T_2 : tiempo a mitad de valor.
- T_C : tiempo impulso cortado.
- O_1 : origen virtual

Para los impulsos cortados al frente, el 'tiempo para cortar' T_C es aproximadamente igual a T_1 . La razón para definir el punto A al 30% del nivel de voltaje es porque es bastante difícil obtener una pendiente suave dentro del primer aumento de voltaje, ya que los sistemas de medición, así como las capacitancias y las inductancias parásitas pueden causar oscilaciones.

Por lo tanto, los impulsos de tipo rayos tienen una duración muy corta, principalmente si se cortan en el frente. Debido a errores de medición inherentes e incertidumbres en la evaluación de los 'parámetros de tiempo' T_1 , T_2 y T_C o especialmente la diferencia de tiempo entre los puntos C y D (Figura 2.1 (b) y (c)) Difícilmente se puede cuantificar con alta precisión.

2.2.2 Sobretensiones de funcionamientos o maniobra.

Las sobretensiones de tipo maniobra consisten en transitorios en los sistemas eléctricos provocados por eventos inherentes a la operación del sistema eléctrico normalmente necesarias para asegurar su estabilidad y buen comportamiento, aunque también pueden ser debidas a fallos de operación.

Generalmente están asociadas a la apertura o cierre de interruptores en distintos puntos de la red. Las principales causas de estos fenómenos son:

- Desconexión de líneas trabajando sin carga.
- Desconexión de transformadores trabajando en vacío.
- Derivación a tierra de redes aisladas.
- Desconexión de cargas inductivas en general.

La magnitud de este tipo de sobretensiones aumenta con la tensión de la línea de transporte, además de no presentar un tipo homogéneo de onda dado que pueden ser oscilatorias, aperiódicas o combinaciones de estas pues dependen del tipo de conexión/desconexión. A pesar de esto las sobretensiones que normalmente ponen en peligro los aisladores (elementos a ensayar en alta tensión normalmente) son las de polaridad única por lo que se testean con formas de onda normalizadas similares a las de tipo rayo, pero con tiempos mayores.

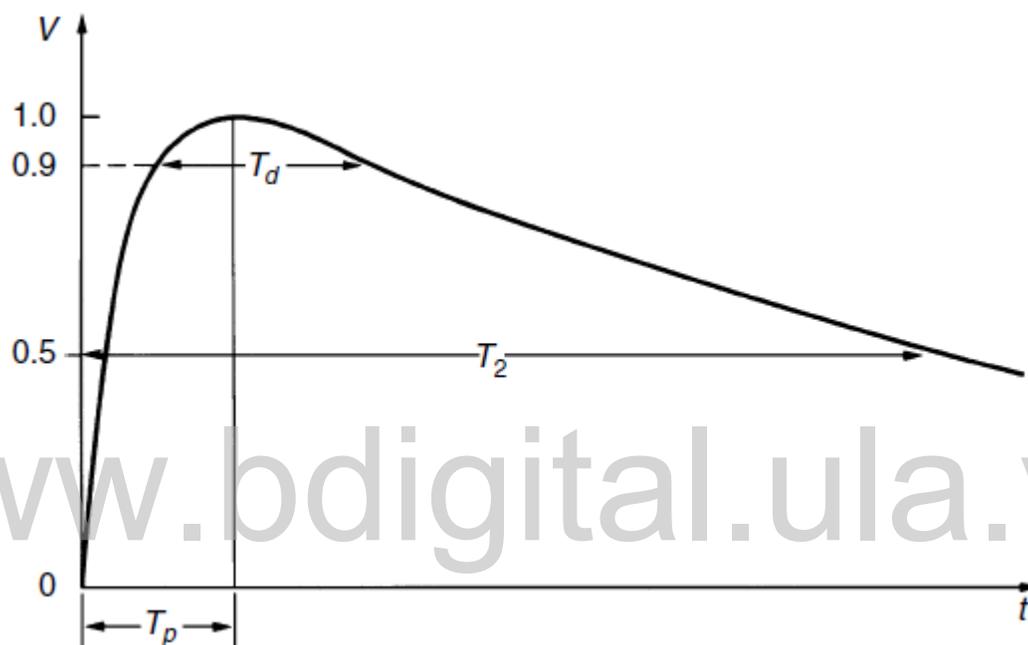


Figura 2.2 Forma general de voltajes de impulso de conmutación [5]

- T_p : tiempo para alcanzar el pico.
- T_2 : tiempo a mitad de valor.
- T_d : tiempo superior al 90 por ciento.

En cuanto a la Figura 2.2 ilustra la pendiente de un impulso de conmutación. Mientras que el tiempo hasta la mitad del valor T_2 se define de manera similar a como se hizo antes, el tiempo para alcanzar el pico T_p es el intervalo de tiempo entre el origen real y el instante en que la tensión ha alcanzado su valor máximo. Esta definición podría ser criticada, ya que es difícil establecer el valor real de la cresta con alta precisión. Un parámetro adicional es, por lo tanto, el tiempo T_d , el tiempo al 90% del valor de la cresta. Las diferentes definiciones en

comparación con los impulsos de rayos pueden entenderse si la escala de tiempo se enfatiza: el impulso de conmutación estándar tiene parámetros de tiempo (incluidas las tolerancias) de

$$T_p = 250 \mu\text{s} \pm 20\%$$

$$T_2 = 2.500 \mu\text{s} \pm 60\%$$

y por lo tanto se describe como un impulso de 250/2.500. Para investigaciones fundamentales sobre la resistencia del aislamiento de los huecos de aire largos u otros aparatos, el tiempo para alcanzar el pico debe variar entre aproximadamente 100 y 1.000 μs , ya que la resistencia a la ruptura de los sistemas de aislamiento puede ser sensible a la forma de onda del voltaje.

2.2.3 Sobretensiones producidas por descargas electrostáticas

Es un fenómeno electrostático que hace que circule una corriente eléctrica repentina y momentáneamente entre dos objetos de distinto potencial eléctrico, decir se acumulan cargas eléctricas y crean un campo electrostático muy fuerte, por ejemplo, una persona que camine sobre moqueta con suela aislante se cargará eléctricamente con una tensión de varios kilovolt, si la persona camina cerca de una estructura conductora desprenderá una descarga eléctrica de varios ampere en un periodo de tiempo de pocos nanosegundos, si la estructura contienen elementos electrónicos sensibles como un ordenador se puede destruir sus componentes o placas de circuitos.

2.2.4. Sobretensiones de transitorios de frecuencia industrial

En las instalaciones eléctricas, las líneas de la red de distribución eléctrica son muy propensas a sufrir sobretensiones ya que tienen una gran cantidad de conductores fuera de los edificios formando una maya de interconexiones entre las instalaciones. Estas sobretensiones presentan las mismas frecuencias que la red (50, 60 o 400) Hz

Sobretensiones producidas por defectos de aislamiento de fase/masa o fase/tierra en una red con un neutro aislado, o por el defecto del conductor neutro. Cuando ocurre esto, los dispositivos de fase única recibirán una alimentación de 400 V en lugar de 230 V, o en una tensión media: $U_s \times e = U_s \times 1,7$.

Sobretensiones debidas a un defecto en el cable. Por ejemplo, un cable de media tensión que cae en una línea de baja tensión [4]

2.3. Diferentes formas de calcular los componentes de un generador.

Existen diferentes formas de calcular los componentes de un generador de alta tensión para su elaboración, lo cual ayudaría a la realización de ensayos de impulso de tensión en transformadores, conductores, aparatos eléctricos y descargadores. Los sistemas de ensayos generan impulsos de tensión de tipo rayo (1,2/50 μ s), impulsos de tensión tipo rayo cortado (corte en la parte frontal, en la cresta o en la parte posterior) e impulso de tensión de conmutación (250/2.500 μ s), mostrados en la Figura 2.1 y Figura 2.2.

En general las sobretensiones transitorias debido a los rayos y a las sobrecargas de conmutación causan una fuerte acumulación de tensión en líneas de transmisión y otros aparatos eléctricos. Investigaciones experimentales han mostrado que estas ondas tienen un tiempo de subida de (0.5 a 10) μ s y un tiempo de descomposición al 50% del valor máximo en el orden de los (30 a 200) μ s. Las formas de onda son arbitrarias, pero en su mayoría unidireccional. Se muestra que la onda de sobretensión del rayo puede ser representada como doble onda exponencial definida por la ecuación.

$$V_{c2}(t) = V_o \cdot K \cdot (e^{-\alpha} - e^{-\beta t}) \quad (2.1)$$

Donde α y β son constantes de valores de microsegundos.

Por tanto, la ecuación anterior representa una onda unidireccional que generalmente tiene un rápido aumento del valor máximo y cae lentamente hasta el valor cero. La forma de onda general se da en la Figura 2.1(a), pero para un estudio más detallado se hace referencia a la Figura 2.3. Se conoce que las ondas de impulso se especifican definiendo su aumento o tiempo de frente, tiempo de caída o cola hasta el 50% del valor del voltaje máximo.

Por ello, al referirse a la forma de onda en la Figura 2.3, el valor pico A es fijo y se lo denomina valor del 100%. Los puntos correspondientes al 10% y al 90% de los valores

máximos están ubicados en la parte delantera (puntos C y D). La línea que une estos puntos se extiende para cortar el eje de tiempo en O_1

O_1 Se toma como el origen virtual. Que es 1,25 veces el intervalo entre los tiempos t_1 y t_2 correspondiente a los puntos C y D (proyecciones en el eje del tiempo)

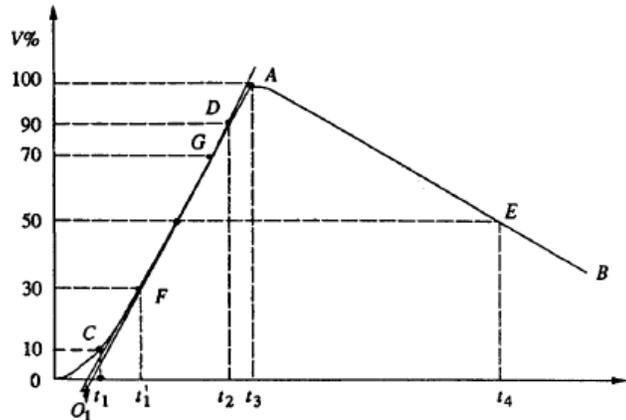


Figura 2.3 Forma de onda de impulso y sus definiciones [6]

“Se define como el tiempo anterior, es decir, $1.25 (O_1 \cdot t_2 - O_1 \cdot t_1)$. El punto E está ubicado en la cola de la onda correspondiente al 50% del valor máximo, y su proyección en el eje del tiempo es t_4 . $(O_4 \cdot t_4)$ Se define como el tiempo de caída o cola.

En caso de que el punto C no esté claro o falte en el registro de forma de onda, se toma el punto correspondiente al 30% del valor pico F y su proyección t_1'' se ubica en el eje del tiempo.

El tiempo de frente de onda en ese caso se definirá como $1.67 (O_1 \cdot t_3 - O_1 \cdot t_1'')$. Las tolerancias que se pueden permitir en los tiempos de frente y de cola son respectivamente de $\pm 30\%$ y $\pm 20\%$. Las especificaciones estándar definen que la onda de (1,2/50) us es el impulso estándar. La tolerancia permitida en el valor máximo es de $\pm 3\%$.”. [6]

2.3.1. Diferentes circuitos para la obtención de ondas de impulso.

Una forma de onda exponencial doble del tipo mencionado en la ecuación (2.1) se puede producir en el laboratorio de alta tensión por medio de circuitos de tipo RC o circuitos RLC,

estos diferentes circuitos equivalentes que producen ondas de impulso se presentan a continuación.

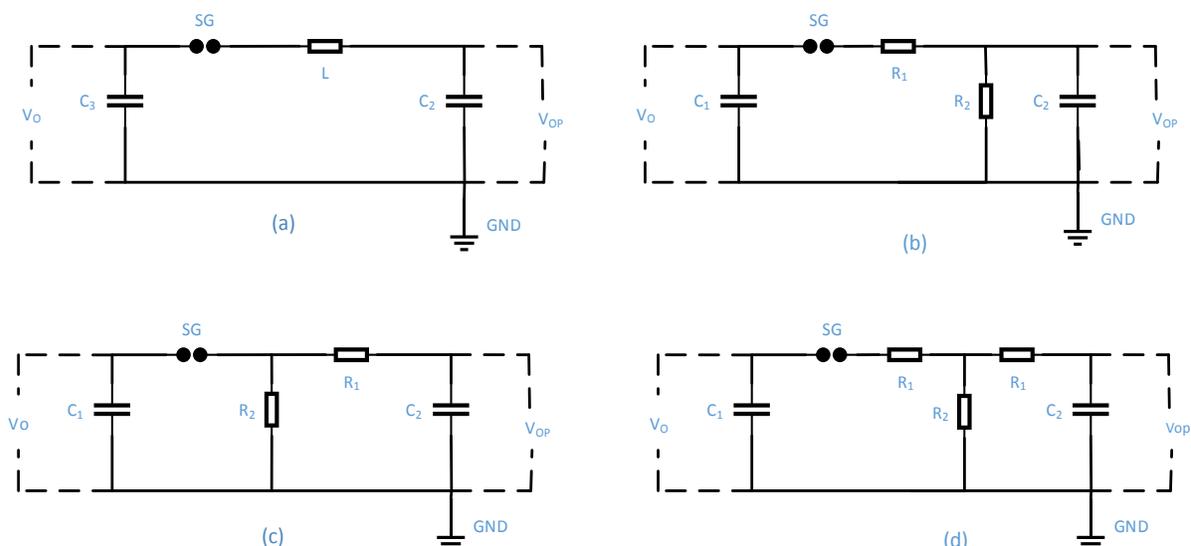


Figura 2.4 Circuitos para la producción de ondas de impulso. (a) Para generadores de modelos limitados (b) y (d). Son los empleados en generadores comerciales.

La configuración utilizada para el desarrollo del generador de impulso es la mostrada en la Figura 2.4(c). La ventaja de este tipo de circuito es que el tiempo de frente de onda y de cola de onda se controla de forma independiente cambiando R_1 o R_2 por separado. En segundo lugar, los objetos de prueba que son principalmente de naturaleza capacitiva forman parte de C_2 .

Para la configuración que se muestra en la Figura 2.4(c) la tensión de salida a través de C_2 viene dada por

$$V_o(t) = \frac{V \cdot C_1 \cdot R_2 \cdot \alpha \cdot \beta}{(\alpha - \beta)} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (2.2)$$

Donde α y β son las raíces de la ecuación (2.3). Los valores aproximados de α y β dados por la ecuación (2.4).

$$\alpha + \beta = - \left[\frac{1}{C_1 \cdot R_1} + \frac{1}{C_2 \cdot R_2} + \frac{1}{C_2 \cdot R_1} \right] \quad (2.3)$$

$$\alpha = \frac{1}{R_1 \cdot C_2} \quad \beta = \frac{1}{R_2 \cdot C_1} \quad (2.4)$$

2.3.2. Circuitos generadores de una etapa (control de forma de onda) [5]

En general, para un generador de impulsos dado de la Figura 2.4 (c), la capacitancia del generador C_1 y la capacitancia de carga C_2 se fijarán según el diseño del generador y el objeto de prueba. Por lo tanto, la forma de onda deseada se obtiene controlando R_1 y R_2 . El siguiente análisis aproximado se usa para calcular el frente de onda y los tiempos de cola de onda.

La resistencia R_2 será grande, por lo tanto, el circuito simplificado que se muestra en la Figura 2.5, se usa para el cálculo del tiempo de frente de onda. Al tomar la inductancia del circuito como despreciable durante la carga, C_1 carga la capacidad de carga C_2 a R_1 . Entonces, el tiempo de carga es aproximadamente tres veces la constante de tiempo del circuito y viene dado por

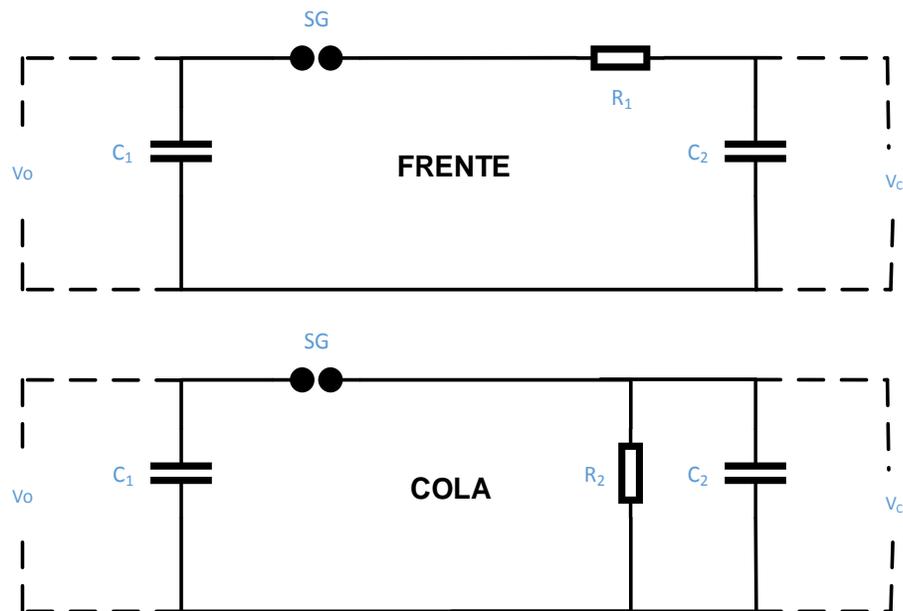


Figura 2.5 Circuito para el estudio de frente y cola de onda de un generador de impulso.

Tiempo de frente

$$t_1 = 3 \cdot R_1 \cdot \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = 3 \cdot R_1 \cdot C_e \quad (2.5)$$

$$t_1 = (1,2 \pm 30\%) us$$

$$(0,8 \leq t_1 \leq 1,6) us$$

Si R_1 se da en ohmios y C_e en microfaradios, T_1 se obtiene en microsegundos.

$$C_e = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \quad (2.6)$$

Para el tiempo de descarga o cola, las capacitancias C_1 y C_2 pueden considerarse en paralelo y la descarga se realiza a través de R_1 y R_2 . Por lo tanto, el tiempo de descarga del 50% viene dado aproximadamente por

Tiempo de cola

$$t_2 = 0,7 \cdot (R_1 + R_2) \cdot (C_1 + C_2) \quad (2.7)$$

$$t_2 = (50 \pm 20\%) us$$

$$(40 \leq t_2 \leq 60) us$$

Rendimiento

$$t_2 \gg t_1$$

$$n = \frac{v'}{V_0} \quad (2.8)$$

$$C_1 \approx 20 \cdot C_2 \quad (2.9)$$

$$n \approx \frac{C_1}{C_1 + C_2} = \frac{1}{1 + \frac{C_2}{C_1}} C_e \quad (2.10)$$

2.3.3. Circuitos generadores de una etapa. [6]

El condensador C_1 se carga lentamente desde una fuente D.C. hasta que la chispa G se descompone, esta chispa actúa como un interruptor limitador de voltaje y sensible a voltaje, cuyo tiempo de ignición (tiempo de ruptura de voltaje) es muy corto en comparación con T_1 . Como tales generadores de una sola etapa se pueden usar para cargar voltajes desde 1 kV hasta aproximadamente 1 MV. Las resistencias R_1 , R_2 y la capacitancia C_2 forman la red de conformación de ondas. R_1 amortiguará principalmente el circuito y controlará el tiempo T_1 frontal. R_2 descargará los condensadores y, por lo tanto, controlará la cola de onda.

La capacitancia C_2 representa la carga completa, es decir, el objeto a prueba, así como todos los demás elementos capacitivos que están en paralelo al objeto de prueba (dispositivos de medición; capacitor de carga adicional para evitar grandes variaciones de T_1/T_2 , si se cambian los objetos de prueba). Al comenzar el análisis, debemos mencionar el parámetro más significativo de los generadores de impulsos. Esta es la máxima energía almacenada.

$$W = \frac{1}{2} C_1 (V_{o_{max}})^2 \quad (2.11)$$

Como C_1 siempre es mucho más grande que C_2 , esta cifra determina principalmente el costo de un generador.

Para el análisis, podemos utilizar el circuito de transformación de Laplace que se muestra en la Figura 2.1 donde la tensión de salida viene dada por la expresión.

$$V_{(s)} = \frac{V_o}{S} \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (2.12)$$

Donde;

$$Z_1 = \frac{1}{C_1 \cdot S} + R_1 \quad (2.13)$$

$$Z_2 = \frac{R_2/C_2 \cdot S}{R_2 + 1/C_2 \cdot S} \quad (2.14)$$

Por sustitución encontramos.

$$V_{(s)} = \frac{V_o}{k} \frac{1}{s^2 + a \cdot s + b} \quad (2.15)$$

Donde;

$$a = \left(\frac{1}{C_1 \cdot R_1} + \frac{1}{C_2 \cdot R_1} + \frac{1}{C_1 \cdot R_{21}} \right) \quad (2.16)$$

$$b = \left(\frac{1}{R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2} \right) \quad (2.17)$$

$$k = R_1 \cdot C_2 \quad (2.18)$$

Por lo tanto, obtenemos de las tablas de transformación la misma expresión en el dominio de tiempo

$$V_{(t)} = \frac{V_o}{k} \frac{1}{(\alpha_2 - \alpha_1)} [e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}] \quad (2.19)$$

Donde α_1 y α_2 son las raíces de la ecuación $s^2 + a \cdot s + b = 0$,

$$\alpha_1, \alpha_2 = \frac{a}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 - b} \quad (2.20)$$

La tensión de salida $V(t)$ es, por lo tanto, la superposición de dos funciones exponenciales de diferentes signos. De acuerdo con la ecuación (2.17) la raíz negativa conduce a una constante de tiempo $1/\alpha_1$ mayor que la positiva, que es $1/\alpha_2$. En la Figura 2.6 se muestra un gráfico de la expresión ecuación (2.16), y una comparación con las Figura 2.1 y Figura 2.2 demuestra la posibilidad de generar ambos tipos de voltajes de impulso con estos circuitos.

En la Figura 2.6 se muestra la forma de onda de voltaje de impulso y sus componentes de acuerdo con los circuitos en la Figura 2.5.

Aunque uno podría asumir que ambos circuitos son equivalentes, se puede producir una diferencia mayor si se calcula la eficiencia de voltaje, n . Esta eficiencia se define como

$$n = \frac{V_p}{V_o} \quad (2.21)$$

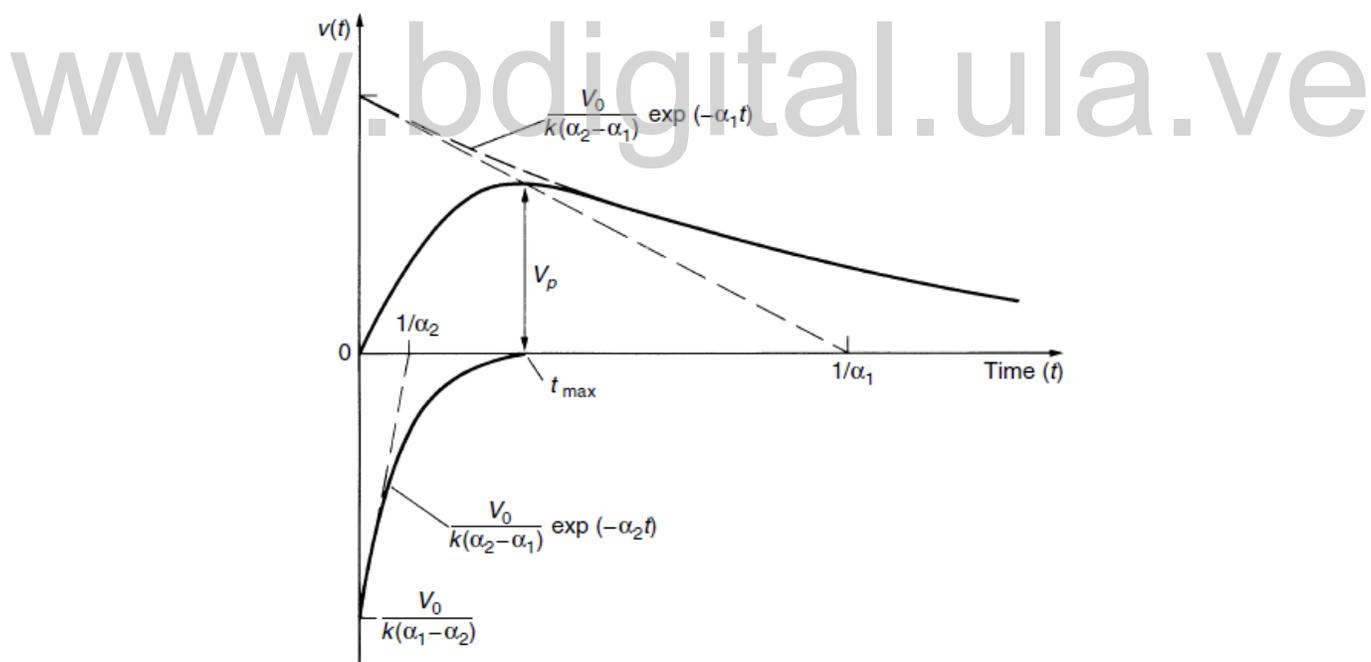


Figura 2.6 Onda de tensión de impulso.[6]

El valor máximo de la tensión de salida, se indica por “ V_p ” en la Figura 2.6. Obviamente, este valor siempre es menor que 1 o 100 por ciento. Se puede calcular

Encontrando t_{max} de $dV(t)/dt = 0$; este tiempo para que el voltaje $V(t)$ aumente a su valor máximo está dado por

$$t_{max} = \frac{Ln(\alpha_2/\alpha_1)}{(\alpha_2 - \alpha_1)} \quad (2.22)$$

Sustituyendo esta ecuación en la ecuación (2.22), uno puede encontrar

$$n = \frac{(\alpha_2/\alpha_1)^{[\alpha_1/(\alpha_1-\alpha_2)]} - (\alpha_2/\alpha_1)^{[\alpha_2/(\alpha_1-\alpha_2)]}}{k(\alpha_2 - \alpha_1)} \quad (2.23)$$

Para una forma de impulso dada T_1/T_2 o T_p/T_2 de los voltajes de impulso, los valores de α_1 y α_2 deben ser iguales. Las diferencias en la eficiencia n solo pueden deberse, por lo tanto, a las diferencias en el valor de $k = R_1 \cdot C_2$ para ambos circuitos.

Primero podemos calcular este término para el circuito de la Figura 2.4 (c), que siempre tiene una mayor eficiencia para una relación dada de C_2/C_1 , ya que durante la descarga las resistencias R_1 y R_2 no forman un sistema de división de voltaje. El producto $R_1 \cdot C_2$ se encuentra por ecuación (2.20) formando

$$\alpha_1 \cdot \alpha_2 = b \quad (2.24)$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 = a \quad (2.25)$$

y por la sustitución de a y b de las ecuaciones (2.16) (2.17) (2.18) Entonces obtenemos

$$k = R_1 \cdot C_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_2 + \alpha_1}{\alpha_2 \alpha_1} \right) \left[1 - \sqrt{1 - 4 \frac{\alpha_2 \alpha_1}{(\alpha_2 + \alpha_1)^2} \left(1 + \frac{C_2}{C_1} \right)} \right] \quad (2-26)$$

Para $C_2 < C_1$, que se cumple en todos los circuitos prácticos, y con $\alpha_2 > \alpha_1$ para todas las formas de onda normalizadas, se puede simplificar esta ecuación para

$$k \cong \frac{1 + C_2/C_1}{(\alpha_2 + \alpha_1)} \quad (2.27)$$

La sustitución de esta expresión en ecuación (2.23) finalmente resulta en

$$n = \frac{C_1}{(C_1 + C_2)} = \frac{1}{1 + C_2/C_1} \quad (2.28)$$

Si de nuevo se toma en cuenta la desigualdad $\alpha_2 > \alpha_1$. Por lo tanto, la eficiencia de voltaje para este circuito aumentará continuamente si (C_2/C_1) disminuye a cero. La ecuación (2.28) indica la razón por la cual la capacitancia de descarga C_1 debe ser mucho mayor que la carga C_2 .

Los divisores se colocan en paralelo al objeto de prueba, su valor de resistencia puede contribuir a descargar los circuitos. La resistencia frontal R_1 a menudo se subdivide, principalmente en generadores de varias etapas tratados más adelante. Sin embargo, la dependencia de los factores de eficiencia de voltaje n se muestra en la Figura 2.7 para el voltaje de impulso de rayo estándar 1,2 / 50 μs , así como para algunas otras formas de onda.

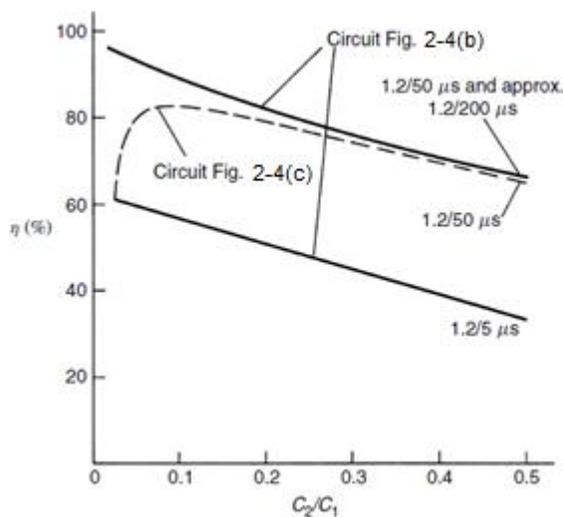


Figura 2.7 Los factores de eficiencia de voltaje n dependen de la relación de capacitancia C_2 / C_1 para los impulsos de rayos T_1 / T_2 . [5]

En los generadores de tensión, los condensadores de descarga siempre están dados y dimensionados para una buena eficiencia (consulte las ecuaciones (2.28) dentro de un cierto rango de C_2 .

Esta capacidad de carga total se puede medir fácilmente si no se conoce de antemano. Los valores de resistencia desconocidos se pueden calcular utilizando ecuaciones (2.24) (2.25) y los valores dependientes del circuito para a y b debido a ecuaciones (2.16) (2.17) (2.18) El resultado será para:

Circuito de la Figura 2.4(c)

$$R_1 = \frac{1}{2 \cdot C_2} \left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) - \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_1 + C_2)}{\alpha_1 \alpha_2 C_1}} \right] \quad (2.29)$$

$$R_2 = \frac{1}{2(C_1 + C_2)} \left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_1 + C_2)}{\alpha_1 \alpha_2 C_1}} \right] \quad (2.30)$$

Todas estas ecuaciones contienen las constantes de tiempo $1/\alpha_1$ y $1/\alpha_2$, que dependen de la forma de onda. Sin embargo, no existe una relación simple entre estas constantes de tiempo y los tiempos T_1 , T_2 y T_P , tal como se definen en las recomendaciones nacionales o internacionales, es decir, en las Figura 2.1 y Figura 2.2. Esta relación se puede encontrar aplicando las definiciones a la expresión analítica para $V_{(t)}$, esto significa a ecuación (2.20).

Los valores nominales estandarizados de T_1 y T_2 son difíciles de lograr en la práctica, ya que incluso para valores fijos de C_1 , la carga C_2 variará y los valores exactos para R_1 y R_2 según las ecuaciones (2.29) y (2.30) en general no están disponibles.

Estas resistencias deben dimensionarse para la alta tensión nominal del generador y, por lo tanto, son caras.

La relación es irracional y debe ser computada numéricamente. La siguiente tabla muestra el resultado para algunas formas de onda seleccionadas:

Tabla 2.1 Formas de Onda. [6]

T_1/T_2 (μs)	T_P/T_2 (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
250/2.500	-	2.877	104
-	250/2.500	3.155	62,5

Las tolerancias permisibles para T_1 y T_2 son, por lo tanto, necesarias y se utilizan para graduar los valores de resistencia. Además, será necesario un registro del voltaje de salida real $V(t)$ si se debe certificar la forma de impulso admisible.

Otra razón para dicha medición está relacionada con el valor del voltaje de prueba tal como se define en las recomendaciones. Esta magnitud corresponde al valor de la cresta, si la forma del impulso del rayo es suave. Sin embargo, pueden ocurrir oscilaciones o un exceso en la cresta del impulso. Si la frecuencia de tales oscilaciones no es inferior a 0,5 MHz o la duración del rebasamiento no es superior a $1\mu\text{s}$, se debe dibujar una "curva media" a través de la curva.

La amplitud máxima de esta "curva media" define el valor del voltaje de prueba. Dicha corrección solo se tolera, siempre que su amplitud máxima única no sea superior al 5% del valor de la cresta. Las oscilaciones en el frente del impulso (por debajo del 50 por ciento del valor de cresta) son toleradas, siempre que su amplitud máxima única no exceda el 25 por ciento del valor de cresta. Se debe enfatizar que estas tolerancias constituyen las diferencias permitidas entre los valores especificados y los realmente registrados por las mediciones. Debido a los errores de medición, los valores reales y los registrados pueden ser algo diferentes

2.3.4. Circuitos generadores de una etapa. [4]

Se conoce que la tensión de impulso en C_2 de la Figura 2.4(c) viene dada por la ecuación (2.1), en donde los valores de R_1 y R_2 se podrían calcular de una manera más aproximada de la siguiente forma;

$$T_1 = R_1 \cdot C_2 \quad (2.31)$$

Donde

$$C_1 \gg C_2$$

Indica que la duración del frente de onda de tensión en el C_2 es directamente proporcional a la resistencia de frente R_1 y a la capacidad de objeto de prueba y R_2 viene dada por la ecuación;

$$T_2 = R_2 \cdot C_1 \quad (2.32)$$

2.4. Generadores de impulsos multi-etapa.

Las dificultades encontradas con las brechas de chispa para la conmutación de voltajes muy altos, el aumento del tamaño físico de los elementos del circuito, los voltajes para cargar C_1 y, por último, pero no menos importante, las dificultades para suprimir las descargas de corona de la estructura y los cables durante el período de carga hacen que el circuito de una etapa sea inconveniente para voltajes más altos

Para superar estas dificultades, en 1923, Marx sugirió una disposición en la que varios condensadores se cargan en paralelo a través de altas resistencias óhmicas y luego se

descargan en serie a través de brechas de chispa. Hay muchos circuitos multi-etapa diferentes, aunque siempre similares en uso. Para demostrar el principio de operación, se presenta un circuito típico en la Figura 2.8 que muestra las conexiones de un generador de seis etapas. El voltaje D.C. carga los condensadores C_1 de igual etapa en paralelo a través de las resistencias de carga R_p de alto valor, así como a través de la descarga (y también la carga).

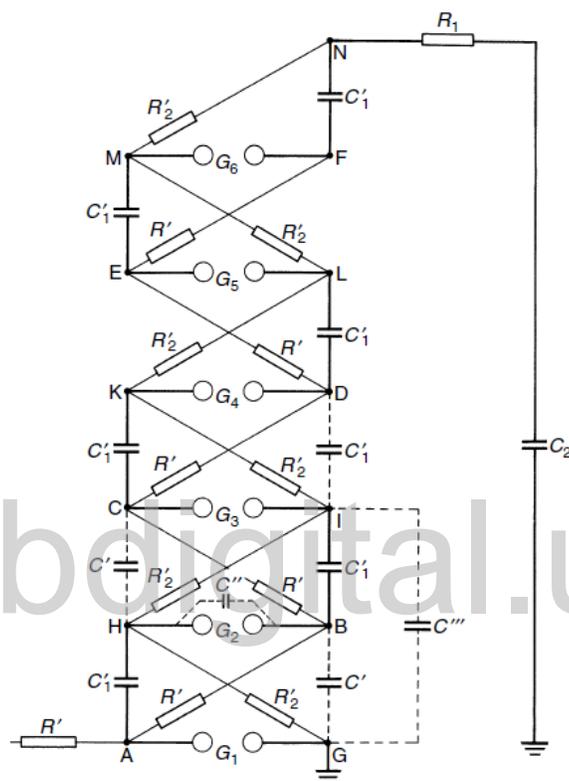


Figura 2.8 Circuito básico de un generador de impulsos de seis etapas. [6]

Las resistencias R'_2 , que son mucho más pequeñas que las resistencias R' y son comparables con R_2 en la Figura 2.4. Al final del período de carga relativamente largo (por lo general, varios segundos hasta 1 minuto), los puntos A, B, ..., F estará en el potencial de la fuente D.C., por ejemplo $-V$ con respecto a la tierra, y los puntos G, H, ..., N permanecerá en el potencial de tierra, ya que la caída de tensión durante la carga a través de las resistencias R'_2 es despreciable

La descarga o activación del generador se inicia con la descomposición de la brecha más baja G_1 , seguida de una ruptura casi simultánea de todas las brechas restantes

De acuerdo con la teoría tradicional, que no tiene en cuenta las capacitancias parásitas indicadas por las líneas de puntos, esta rápida ruptura sería causada por altas sobretensiones en la segunda y otras brechas: cuando se dispara la primera brecha, el potencial en el punto A cambia rápidamente de $-V$ a cero, y así el punto H aumenta su potencial a $+V$. Como el punto B aún permanecería en el potencial de carga, $-V$, por lo tanto, aparecerá un voltaje de $2V$ en G_2 .

Por lo tanto, esta alta sobretensión causaría que esta brecha se descomponga y el potencial en el punto I aumentaría a $+2V$, creando una diferencia de potencial de $3V$ a través de la brecha G_3 , si de nuevo el potencial en el punto C permaneciera en el potencial de carga. Esta interpretación tradicional, sin embargo, es errónea, ya que los potenciales B y C puede - descuidar las capacitancias parásitas - también sigue los potenciales adyacentes de los puntos A y B, ya que las resistencias R' están entre ellas. Solo podemos ver hasta ahora que este circuito dará una tensión de salida con una polaridad opuesta a la de la tensión de carga.

En la práctica, se ha observado que la separación G_2 debe establecerse en una distancia de separación solo ligeramente mayor que aquella en la que se descompone G_1 ; De lo contrario no funciona. Según Edwards, Husbands y Perry [7], para una explicación adecuada, uno puede asumir las capacidades parásitas C' , C'' y C''' dentro del circuito. Las capacitancias C' están formadas por el campo eléctrico entre etapas adyacentes; C''' tiene un significado similar en dos etapas. C'' es la capacitancia de las brechas de chispa.

Si asumimos ahora las resistencias como circuitos abiertos, podemos ver fácilmente que el potencial en el punto B está más o menos fijo por las magnitudes relativas de las capacidades parásitas. Si se descuida C' entre los puntos H y C y se tiene en cuenta que los condensadores de descarga C_1 son grandes en comparación con las capacitancias parásitas, el punto B se puede asumir como el punto medio de un divisor de voltaje de capacitor formado por C'' y C' / C''' . Por lo tanto, el aumento de voltaje del punto A de $-V$ a cero hará que el potencial B aumente de $-V$ a un voltaje de

$$V_B = -V + V \left(\frac{C''}{C' + C'' + C'''} \right) = -V \left(\frac{C' + C'''}{C' + C'' + C'''} \right) \quad (2.33)$$

Por lo tanto, la diferencia de potencial a través de G_2 se convierte en

$$V_{G2} = +V - (-V_B) = V \left(1 + \frac{C' + C'''}{C' + C'' + C'''} \right) \quad (2.34)$$

Si C' es igual a cero, la tensión en G_2 alcanzará su valor máximo de 2 V. Esta brecha de capacitancia, sin embargo, no se puede evitar. Si las capacitancias de la etapa C' y C''' son cero, V_{G2} será igual a V, y no sería posible una chispa de G_2 . Es evidente, por lo tanto, que estas capacitancias parásitas mejoran las condiciones favorables para el funcionamiento del generador.

En realidad, las condiciones establecidas por las ecuaciones anteriores son solo aproximadas y, por supuesto, son transitorias, ya que las capacitancias parásitas comienzan a descargar a través de las resistencias. Como los valores de C' a C''' son normalmente del orden de 10 pf solamente, las constantes de tiempo para esta descarga pueden ser tan bajas como 10^{-7} a 10^{-8} s.

Por lo tanto, la tensión en G_2 aparece por un corto tiempo y conduce a una ruptura dentro de varias decenas de nanosegundos. Las sobretensiones transitorias aparecen en las brechas adicionales, mejoradas también por el hecho de que el terminal de salida N permanece principalmente en potencial cero y, por lo tanto, se generan voltajes adicionales a través de la resistencia R'_2 . Entonces, la ruptura continúa y finalmente el terminal N alcanza un voltaje de +6 V, o nV, si n etapas están presentes

Es decir, los procesos asociados con la activación de tales generadores son aún más sofisticados. han sido analizados e investigados a fondo.

En la práctica, para una operación consistente, es necesario establecer la distancia para el primer espacio G_1 solo ligeramente por debajo del segundo y otros espacios para el primer desglose. También es necesario tener los ejes de las brechas en un plano vertical para que la iluminación ultravioleta de la chispa en la primera brecha irradie las otras brechas. Esto asegura un suministro de electrones liberados desde la brecha para iniciar la descomposición durante el corto período en que las brechas se someten a la sobretensión.

Si la primera brecha no se dispara electrónicamente, la consistencia de su disparo y la estabilidad de la ruptura y, por lo tanto, la tensión de salida se mejora al proporcionar iluminación ultravioleta para la primera brecha. Estas observaciones indican solo una pequeña parte de los problemas relacionados con la construcción de brechas de chispa y la disposición del generador. Antes de tratar algunos de estos problemas adicionales, trataremos los circuitos de Marx más realistas como se usan para las explicaciones hasta ahora

En la Figura 2.8 la resistencia de control de frente de onda R_1 se coloca solo entre el generador y la carga. Sin embargo, una sola resistencia delantera "externa" tiene que soportar por un corto tiempo la tensión nominal total y, por lo tanto, es inconveniente o puede ocupar mucho espacio.

Esta desventaja se puede evitar si una parte de esta resistencia está distribuida o si está completamente distribuida dentro del generador. Dicha disposición se ilustra en la Figura 2.9, en la que además la conexión en serie de los condensadores C_1 y los huecos (como propuso originalmente Goodlet) se cambia a una disposición equivalente para la cual la polaridad de la tensión de salida es la misma, como la tensión de carga. Las resistencias de carga R' son siempre grandes en comparación con las resistencias distribuidas R'_1 y R'_2 , y R'_2 se hace tan pequeña como sea necesario para dar el tiempo requerido para reducir a la mitad el valor T_2 . Agregar la resistencia frontal externa R''_1 ayuda a amortiguar las oscilaciones de lo contrario

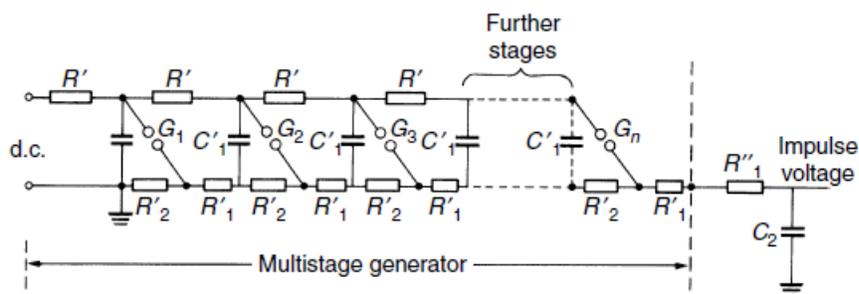


Figura 2.9 Generador de impulsos multi-etapa con descarga distribuida y resistencias frontales.

[5]

- R'_2 : resistencias de descarga.
- R'_1 : resistencias frontales internas.
- R''_1 : resistencia frontal externa

Para el desarrollo de los generadores multi-etapas es necesario conocer estas resistencias como también C' , para así poder lograr conseguir la tensión de salida a la cual se va a someter el objeto de prueba, las cuales son;

Tensión de salida

$$V_o = n \cdot V_{c2} \quad (2.35)$$

n = número de etapas

Capacitancia de carga por etapas

$$C' = n \cdot C_1 \quad (2.36)$$

Para el cálculo de las resistencias de carga viene dado por las siguientes ecuaciones

$$R'_1 = R_1/n \quad (2.37)$$

$$R'_2 = R_2/n \quad (2.38)$$

2.5. Utilización del generador de impulso tipo rayo

Este tipo de generador se utiliza para:

- Generador de grandes proporciones se utiliza para probar líneas de transmisión eléctrica.
- Se usan para simular los efectos de un rayo sobre equipos o aparatos eléctricos y de aviación que se ven expuestos a descargas eléctricas muy intensas.
- Experimentos de física de alta energía
- Realizar pruebas para aislaciones eléctricas de origen atmosférico o de maniobra.
- Transformadores de alto voltaje
- Para rayos.

2.6 SOFTWARE

Un software de simulación es el que ayuda a predecir el comportamiento de un sistema. El cual se puede utilizar para evaluar un diseño nuevo, diagnosticar problemas de un diseño existente y probar un sistema en condiciones que son difíciles de reproducir.

En este caso se utilizó el software de simulación Matlab para simular el generador de impulso tipo rayo, el multiplicador de tensión y el sistema de medición, en cuanto a las etapas electrónicas que son la fuente lineal, el circuito de disparo y circuito de conmutación se tuvo que utilizar otro software que permitiera simular las etapas electrónicas del diseño ya que Matlab no lo permite, para ello se recurrió al software de simulación Proteus que es una aplicación para la ejecución de proyectos de construcción de equipos electrónicos en todas sus etapas: diseño del esquema electrónico, programación del software, construcción de la placa de circuito impreso, simulación de todo el conjunto, depuración de errores, documentación y construcción.

2.7. LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN

El objetivo de los laboratorios de alta tensión es permitir a los estudiantes y profesionales en el área de ingeniería eléctrica realizar pruebas que en cualquier instalación de energía eléctrica cuya tensión nominal sea mayor a los 1.000 V. Estos equipos utilizan materiales aislantes, por lo que un laboratorio de alta tensión debe poseer equipos de pruebas que generen un conjunto de tensiones normalizadas para verificar su estabilidad y calidad del equipo.

CAPITULO 3

GENERADOR DE IMPULSO.

A continuación, se presenta el diagrama de flujo del diseño de la fuente de alta tensión

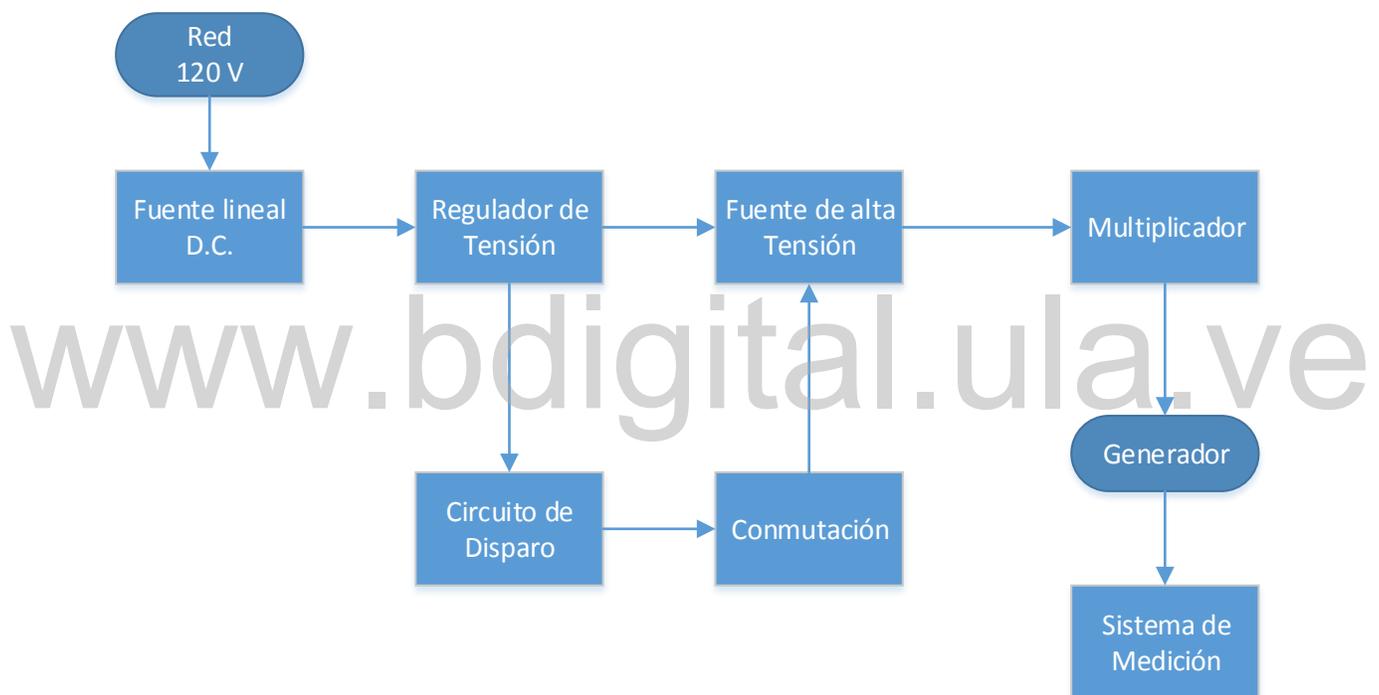


Figura 3.1 Diagrama de flujo de una fuente de alta tensión.

3.1. FUENTE LINEAL.

La fuente de alimentación lineal es un dispositivo que suministra energía a todo el circuito, la cual está compuesta básicamente por 5 elementos, un transformador, un rectificador, un filtro, un fusible y un regulador de tensión. [8]

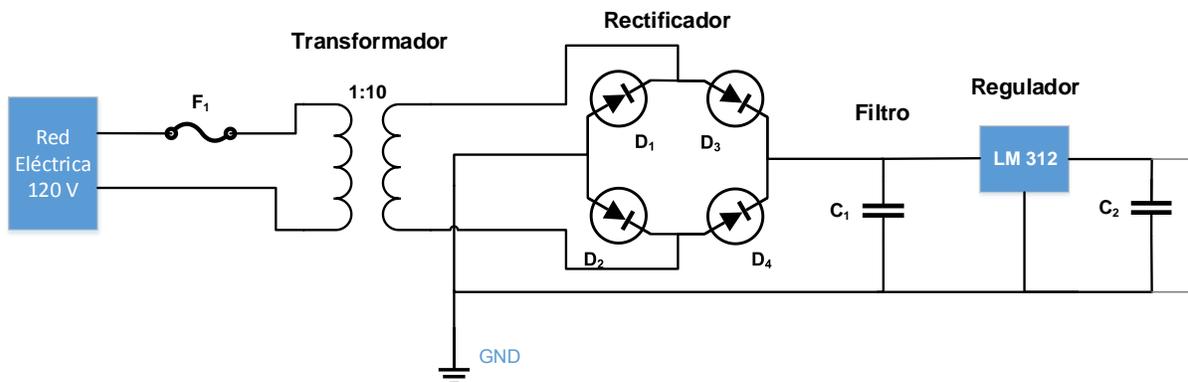


Figura 3.2 Fuente lineal

3.1.1. Fusible.

Es un dispositivo utilizado para proteger el generador y para la seguridad del operador, el cual permite el paso de la corriente mientras esta no supere un valor establecido, si por cualquier razón esta corriente comienza a aumentar y llegara a entrar al circuito con un valor demasiado alto arruinaría el funcionamiento del generador por ello se coloca el fusible antes de que la corriente ingrese al circuito. [9]

$$1,45 \cdot I_{nominal}$$

(3.1)

3.1.2. Transformador

Es el encargado de adaptar los niveles de tensión entre el primario y el secundario, además de proporcionar aislamiento galvánico entre las dos zonas. Se utilizó para la simulación en Matlab y Proteus un transformador reductor.

3.1.3. Rectificador

Está compuesta por 4 diodos los cuales pueden ir separados o encapsulados en un mismo elemento, la función de este rectificador es la de convertir la corriente alterna que sale del transformador en una corriente pulsante.

Se utilizarán 4 diodos 1N4001 con tensión inversa de 50 V, corriente 1 A.

3.1.4. Filtro

Está constituido por un condensador polarizado cuya función es la de suavizar el rizado de la señal que sale del rectificador, quedando una señal prácticamente continua.

Se utilizaron condensadores electrolíticos de 2.200 μf , tensión 50 V.

3.1.5. Regulador de tensión

Es un dispositivo electrónico que protege aparatos eléctricos y electrónicos sensibles a variaciones de diferencia de potencial o voltaje y ruidos existentes en la corriente alterna de la distribución eléctrica. [10]

Se utilizó un regulador LM312 con la finalidad de tener una tensión estable que no supere una variación del 3%.

3.2. CIRCUITO DE CONMUTACION

Es un circuito electrónico que transforma la energía eléctrica mediante transistores en conmutación, tiene dos ventajas fundamentales la primera es que tiene menos pérdidas energéticas por ende son más eficientes y la segunda es que para generar mayor potencia son más compactas que las fuentes lineales.

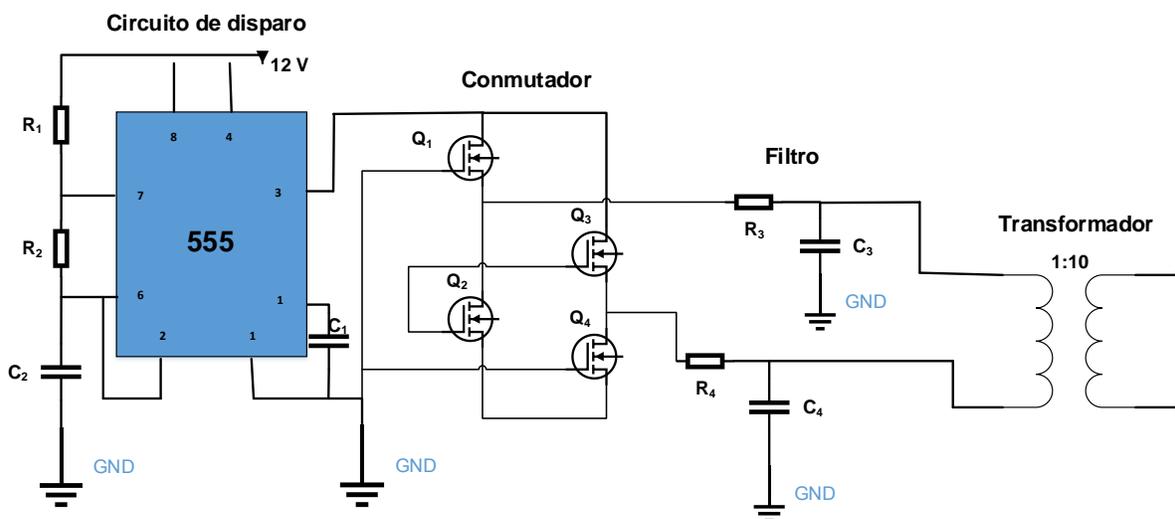


Figura 3.3 Circuito de Conmutación

3.2.1 Circuito de disparo

Está conformado por un LM555 que es un circuito integrado que se utiliza para generar una serie de pulsos que serán integrador en un circuito de conmutación.

3.2.2 Conmutador

El conmutador estará compuesto por 4 transistores Mosfet tipo N, estos transistores trabajan en corte saturación, es decir, trabajan como un interruptor normal para dejar pasar la señal para ser filtrada.

Son más eficientes y transfieren mayor energía al circuito.

Los transistores utilizados para el desarrollo del circuito de conmutación fueron los 2N7269, 200 V y 26 A.

3.2.3. Filtro paso bajo.

Un filtro de paso bajo es un filtro que pasa señales de baja frecuencia e impide el paso de señales de alta frecuencia.

Se utilizaron filtros paso bajo de tipo RC con resistencia de $2,2 \Omega$ y capacitores de $560 \mu\text{f}$

3.2.4. Transformador

Es el encargado de aislar galvánicamente las dos partes del circuito, para el circuito de conmutación se utilizó un transformador elevador de relación 1:10.

3.3. MULTIPLICADOR

Un circuito multiplicador de voltaje es un arreglo de capacitores y diodos rectificadores para generar altos voltajes de corriente directa.

El voltaje se eleva mediante etapas de diodos y capacitores. En la Figura 3.4 tenemos el diagrama de un doblador de tensión de 10 etapas, el cual está compuesto por 20 capacitores de 22 nf y 20 diodos con un voltaje de entrada de 120 V para tener a la salida 2.400 V . [11]

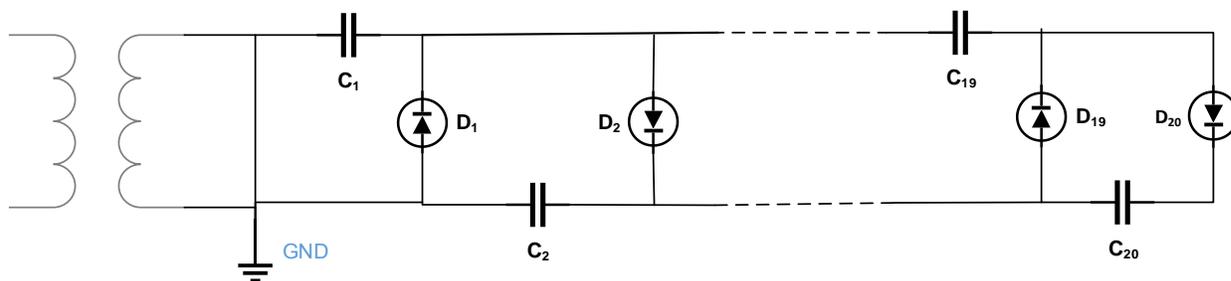


Figura 3.4 Multiplicador (doblador de tensión) 10 etapas

3.4. GENERADOR

Un generador de Marx es un circuito diseñado para generar un impulso de alta tensión a partir de una fuente de corriente continua de baja tensión, el cual está constituido por 8 etapas, cada etapa consta de 1 capacitor de 0,16 μf , $R'_1=531,721\Omega$, $R'_2=4.058,31\Omega$, $R_c=1\text{ M}\Omega$ y un capacitor de carga de 0,1 nf , para producir un impulso de 19.200 V.

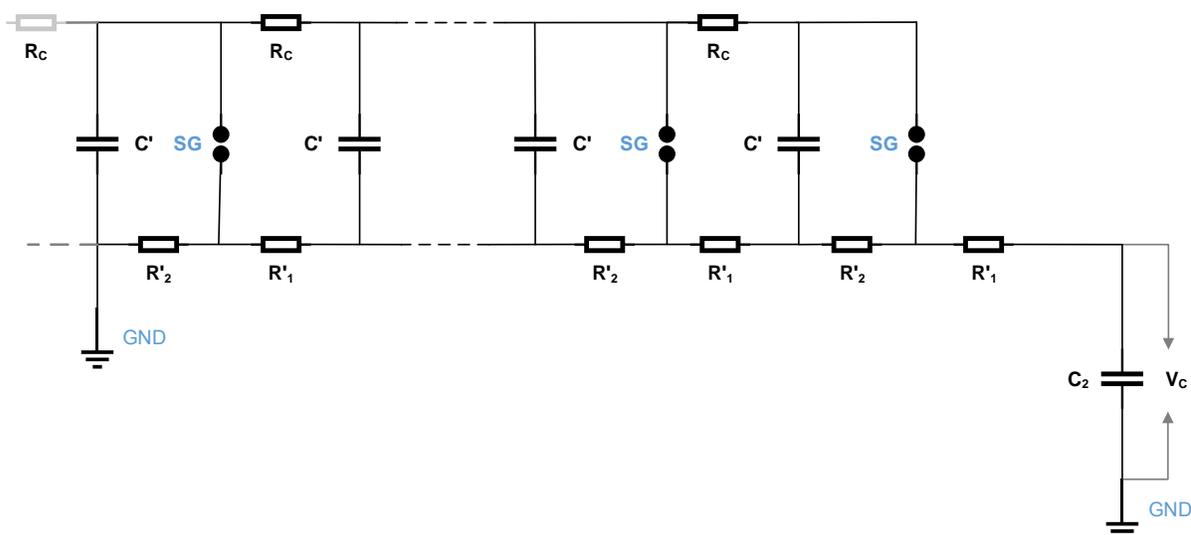


Figura 3.5 Generador de Marx 8 etapas

3.5. CIRCUITO DE MEDICIÓN

El circuito de medición está formado por un divisor de tensión el cual reparte la tensión eléctrica del generador entre un capacitor y una resistencia conectadas en serie, como se muestra en la siguiente Figura 3.6 con el fin de conocer el voltaje a la salida del generador ya que no hay un equipo para medir dicho voltaje.

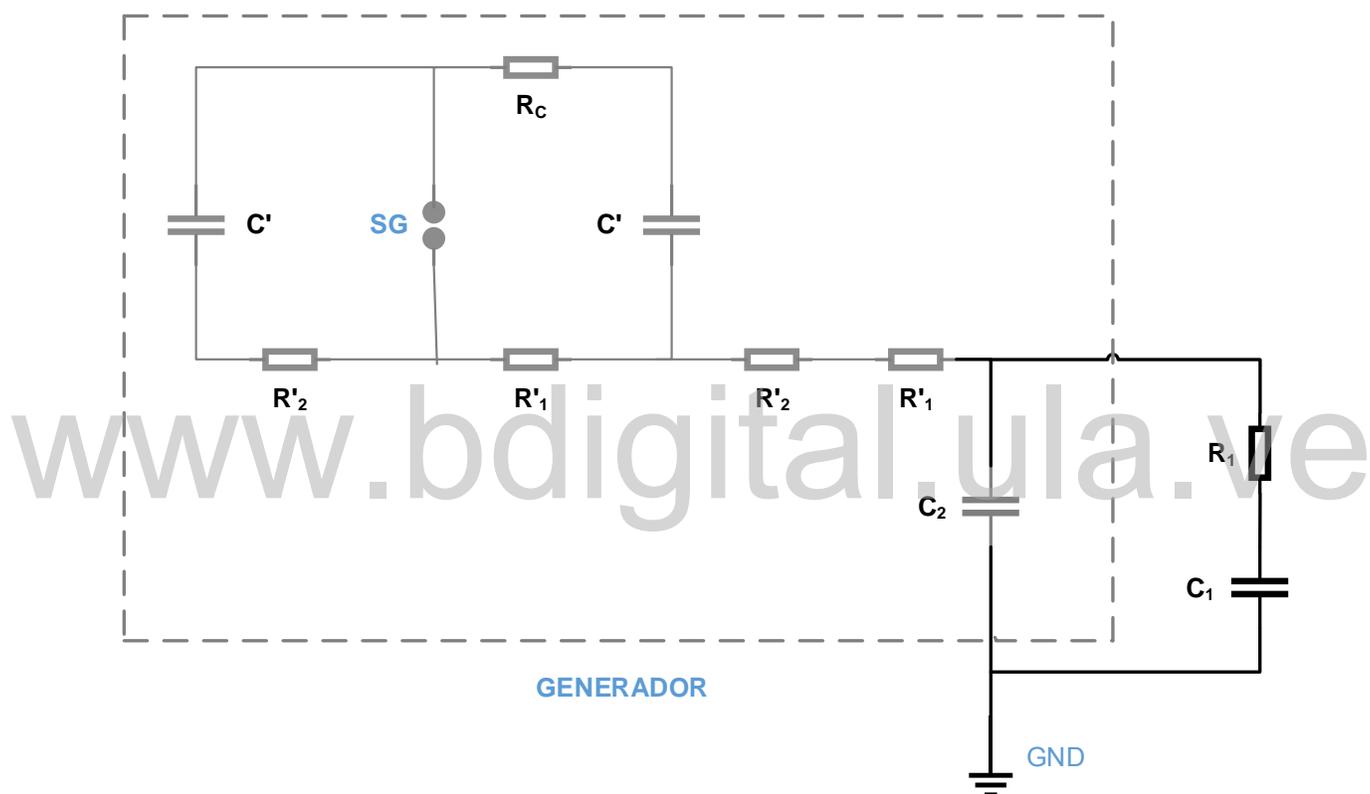


Figura 3.6 Circuito de medición

CAPITULO 4

FUNCIONAMIENTO DEL GENERADOR DE MARX.

En este aparte de la investigación se presenta el funcionamiento del generador de Marx, de igual manera se establece la comparación de las diferentes formas de cálculo de un generador tipo Marx.

4.1. SIMULACIÓN DE LA FUENTE LINEAL

La simulación que se presenta a continuación en la figura 4.1 es la correspondiente al diseño de la fuente lineal mostrada en la Figura 3.2, del capítulo 3.

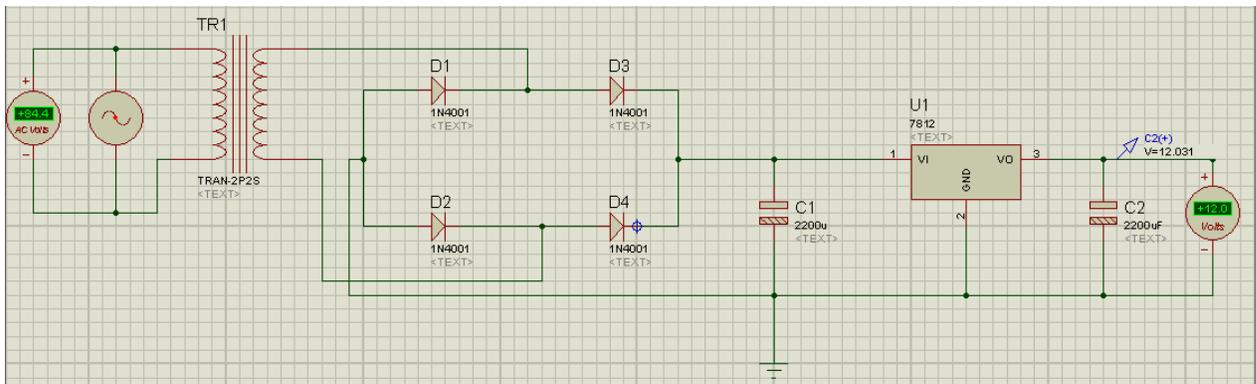


Figura 4.1 Modelo de simulación de la fuente lineal

La fuente que se muestra en la Figura 4.1 va conectada a la red de 120 V, 60 Hz para obtener a la salida 12 V DC.

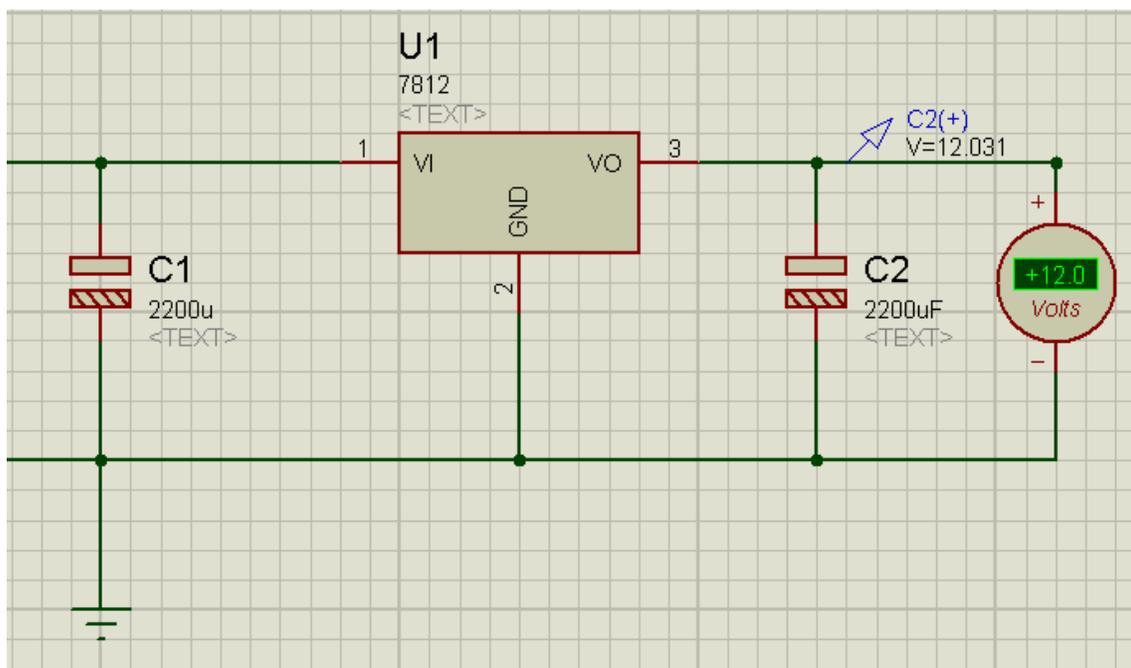


Figura 4.2 Salida de la fuente lineal

En la figura 4.2 se muestra a detalle la salida de la fuente lineal que se presentó en el modelo de simulación de la fuente lineal de la figura 4.1.

4.2 SIMULACIÓN DEL CIRCUITO DE CONMUTACIÓN.

A continuación, se presenta la simulación del circuito de conmutación donde se reemplaza el integrado LM555. del circuito de disparo de la figura 3.3 por dos generadores de pulso, los cuales van a realizar la misma función.

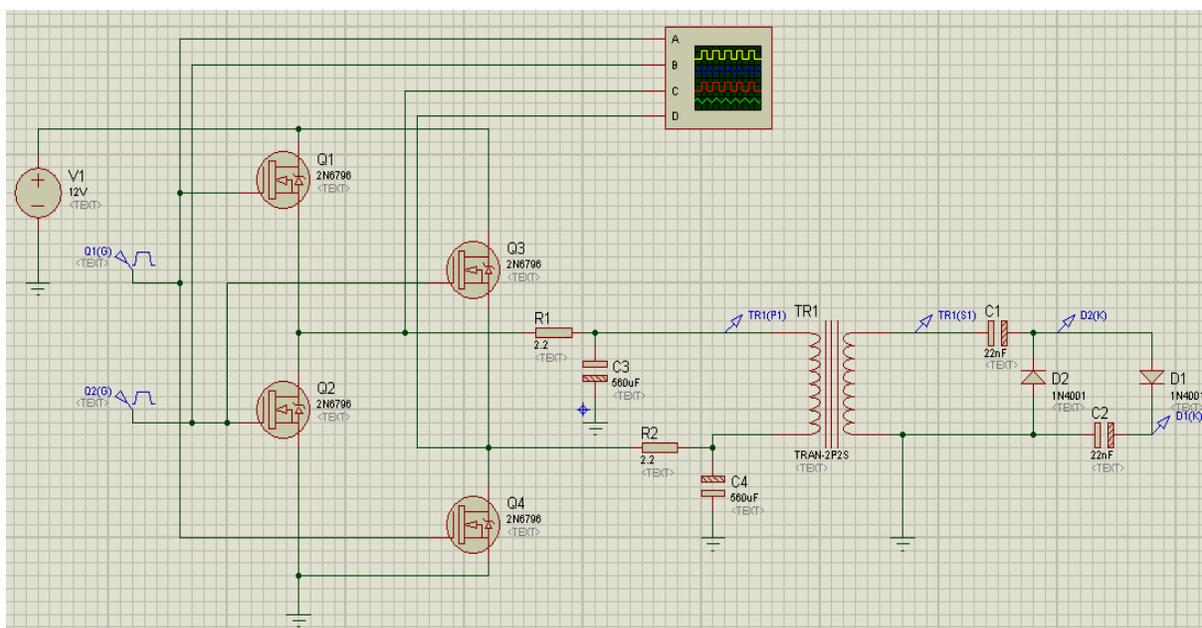


Figura 4.3 Modelo de simulación de un circuito de conmutación.

El circuito de conmutación va conectado a una etapa del doblador de tensión con el fin de comprobar el correcto funcionamiento de dicho circuito, consiguiendo a la salida del transformador el voltaje deseado, lo cual se muestra en la Figura 4.7 y Figura 4.8.

La Figura 4.4 corresponde a los impulsos del integrado LM555 de 12 cada uno (Señal roja y señal azul). La señal violeta a la salida del conmutador, está compuesta por 4 transistores MOSFET tipo N modelo 2N7269.

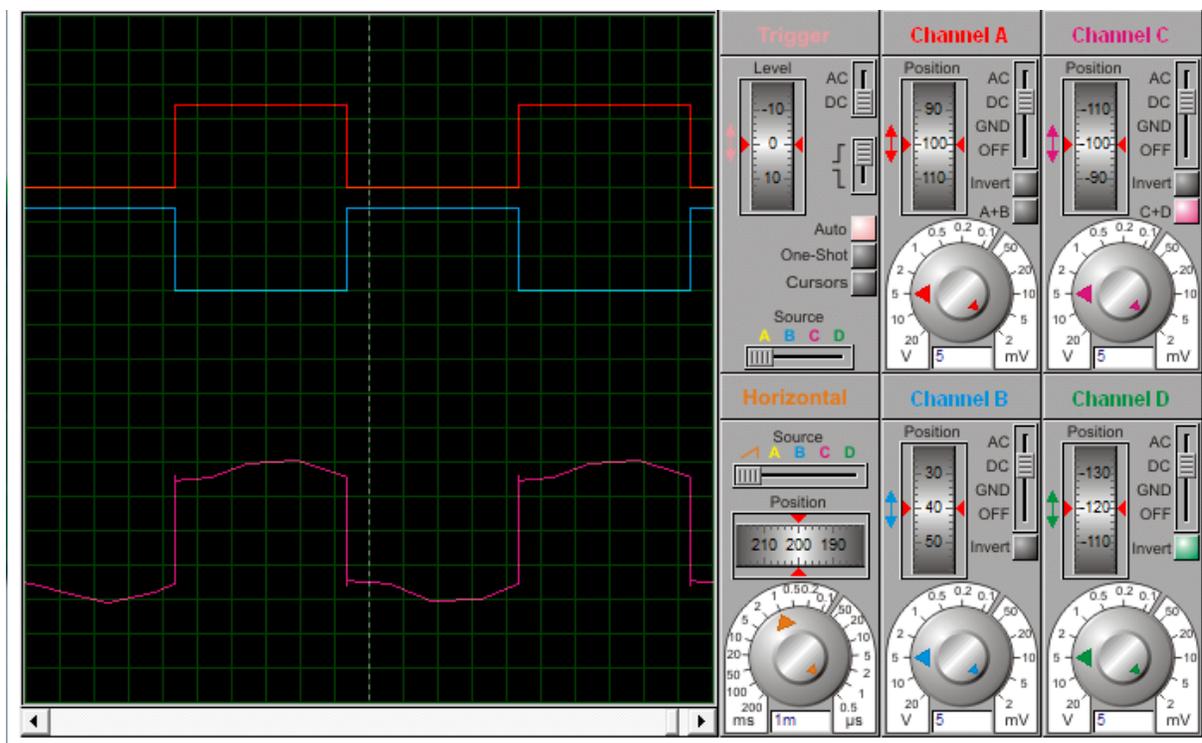


Figura 4.4 Forma de onda del circuito de disparo

la señal roja y azul es del integrado Lm555 el cual es sustituido en el software de simulación proteus por dos componentes generadores de impulso que cumplen más misma función que el integrado LM555.

En el primario del transformador llega una tensión de 12 V senoidal para conseguir a la salida de dicho transformador 120 V. los cuales se muestran en la Figura 4.5 y Figura 4.6 respectivamente

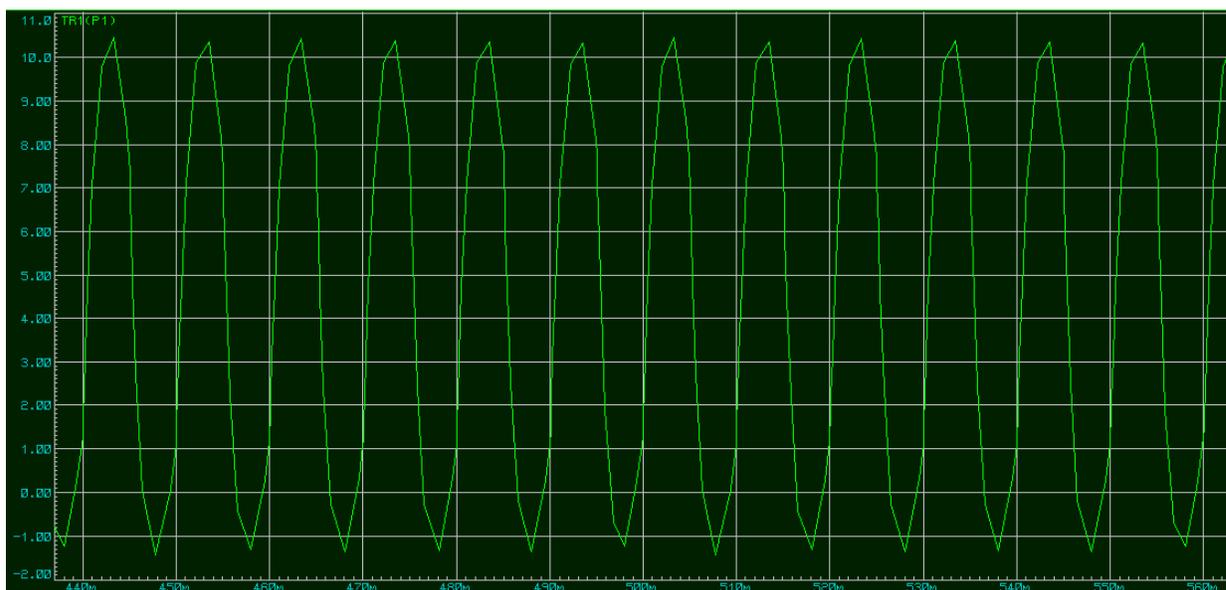


Figura 4.5 Forma de onda en la bobina primaria del transformador

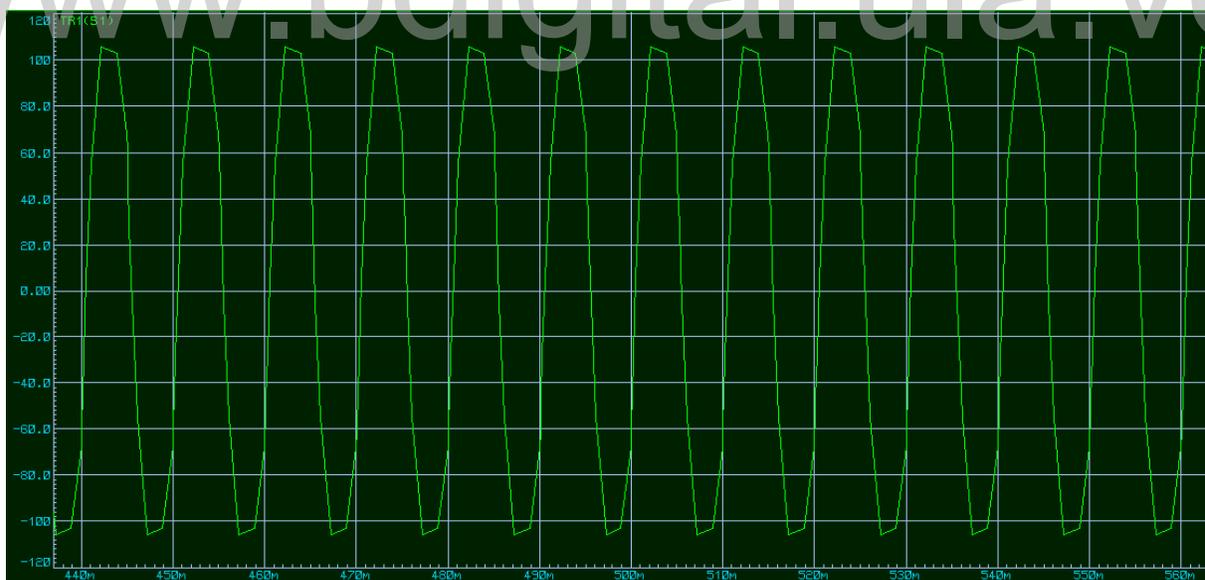


Figura 4.6 Forma de onda en la bobina secundaria del transformador

En la Figura 4.7 se muestra el correcto funcionamiento del diodo 2 del multiplicador de tensión, teniendo a su salida la forma de onda esperada en su etapas

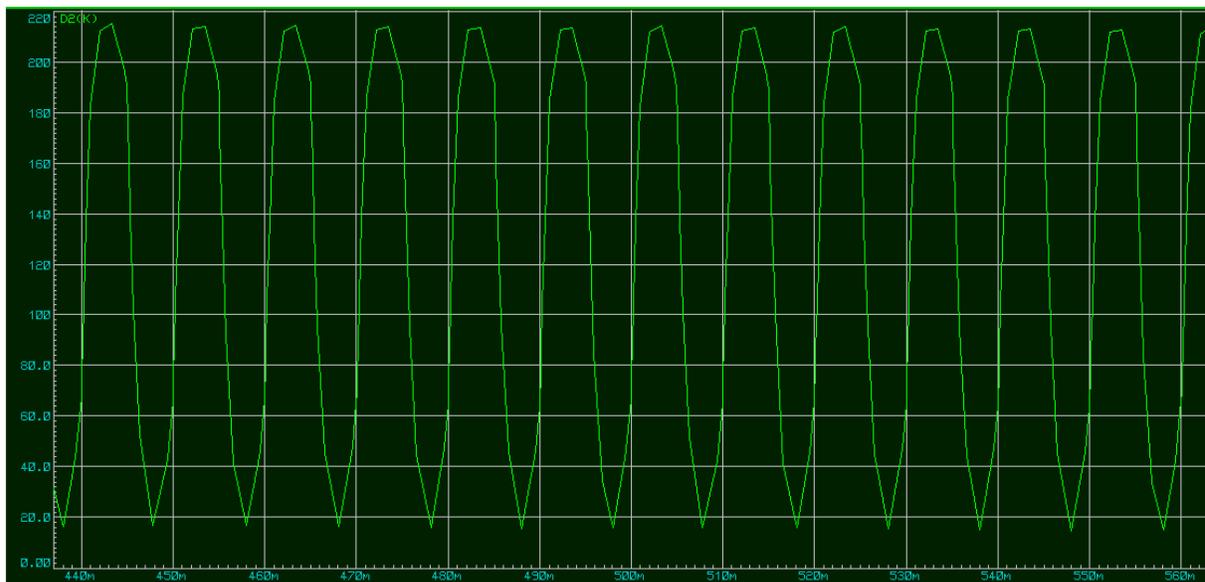


Figura 4.7 Forma de onda en el diodo 2.

En la Figura 4.8 Se utilizó solo una etapa del multiplicador para demostrar el correcto funcionamiento del transformador de alta tensión teniendo en su salida de 240V correspondientes a una etapa del multiplicador

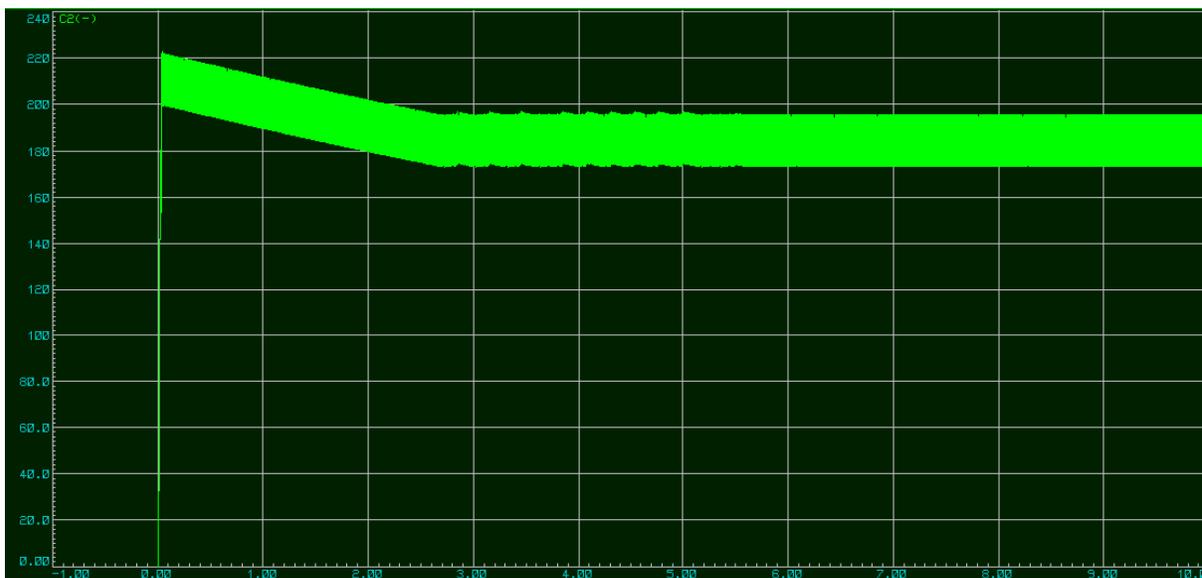


Figura 4.8 Forma de onda salida del doblador.

4.3 SIMULACIÓN DEL MULTIPLICADOR

Las simulaciones correspondientes al multiplicador se realizaron en Matlab, en la siguiente figura se muestra el circuito simulado y su forma de onda.

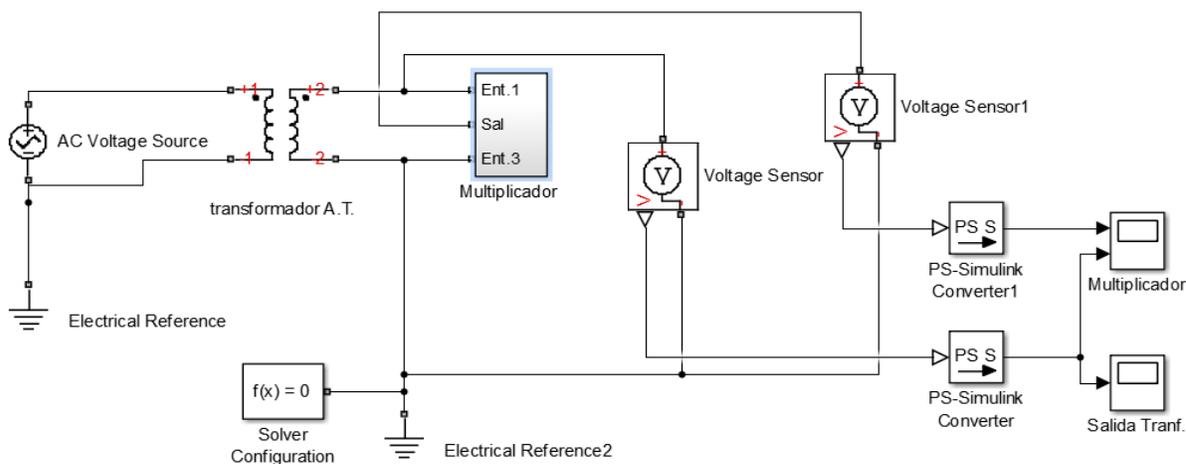


Figura 4.9 Modelo de simulación de un circuito multiplicador

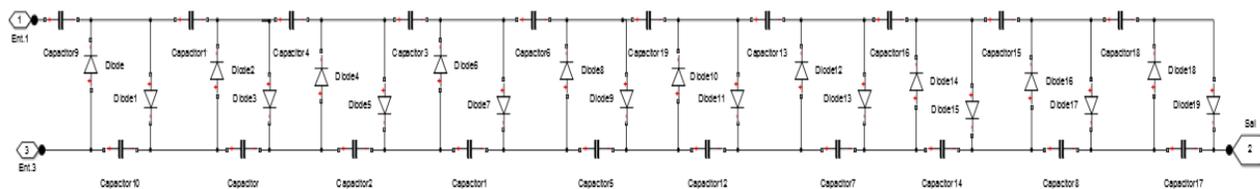


Figura 4.10 Modelo de simulación de un doblador de tensión de diez etapas

Ala entrada del multiplicador llegan 120 V, para conseguir a la salida 2.400 V, mostrado en la Figura 4.10

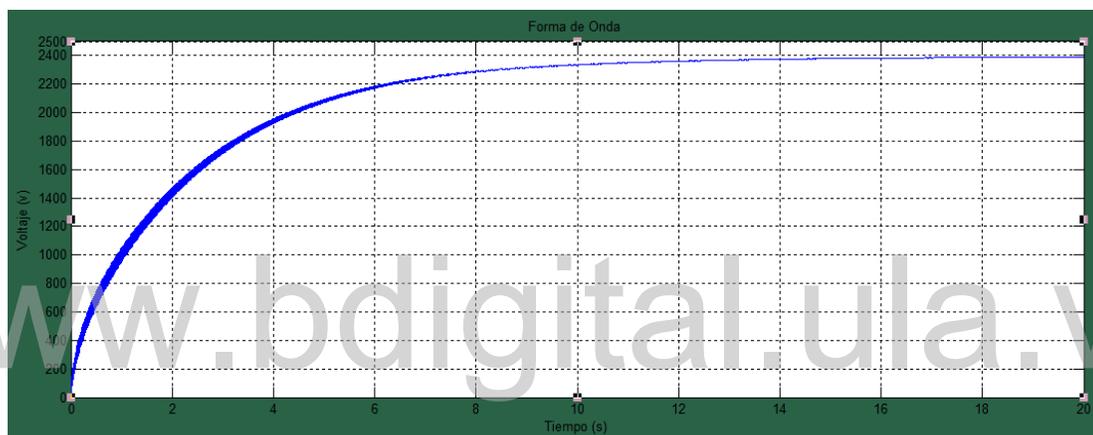


Figura 4.11 Forma de Onda Doblador 10 etapas

4.4 Generador de Marx.

Durante el desarrollo de la investigación, se tomó como fuentes de consulta dos textos de ingeniería cuyo tema es alta tensión y un artículo de técnica de Generadores de impulso, los cuales sirvieron de base para el diseño del generador de Marx, a través de los cuales se estableció una comparación con un generador ya diseñado y el generador en diseño, para de esa manera, comprobar su funcionamiento, al estudiar los tiempos de frente y cola de onda, de igual manera, se apreció su rendimiento para diferentes etapas, partiendo de un valor de capacitancia seleccionado previamente, con el fin de distinguir las ecuaciones más exactas para el diseño del Generador

4.4.1. Comparación de generadores entre los libros.

Tabla 4.1. Datos generales del generador de tensión

DATOS GENERALES
TENSION DE CARGA 2,400 kV
FORMA DE ONDA 1,2/50 μ s
CAPACITANCIA DE OBJETO DE PRUEBA 0,1 η f

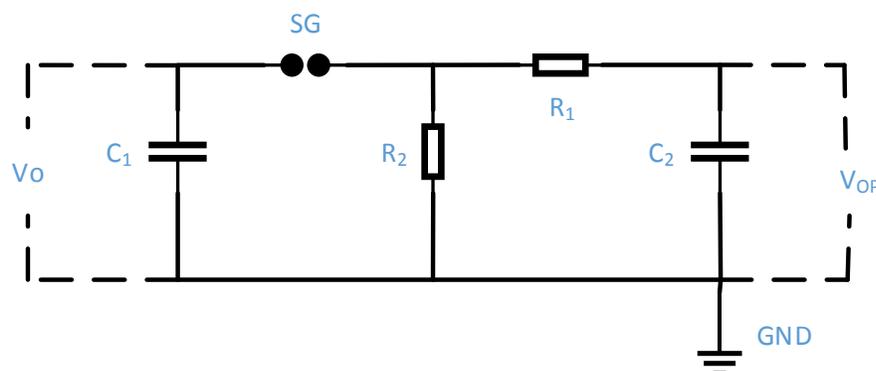


Figura 4.12 Circuito básico de un generador de Marx.

Partiendo del modelo seleccionado de un generador de impulso y su capacitancia de objeto de prueba se procedió a calcular sus valores de resistencia, capacitancia, tiempo de frente, tiempo de cola y rendimiento para 1, 3 y 8 etapas, para comparar el mejor rendimiento entre los autores ya mencionados anteriormente.

A. Los siguientes cálculos son obtenidos de la referencia [6]

Estos cálculos se realizaron por medio de las ecuaciones explicadas en el capítulo 2 para cada referencia

- CALCULOS PARA 1 ETAPA

Tabla 4.2. Datos del generador de una etapa

VALORES CONOCIDOS	VALORES CALCULADOS
$C_2=0,1 \eta$ f	$R_1=4,200 \text{ k}\Omega$
$T_1=1,2 \text{ us}$	$R_2=29,813 \text{ k}\Omega$
$T_2=50 \text{ us}$	$C_1=2 \eta$ f

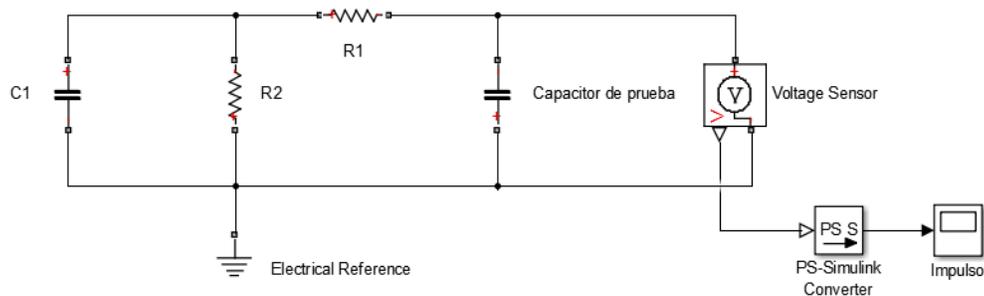


Figura 4.13 Modelo de simulación de un generador de impulso de impulso básico

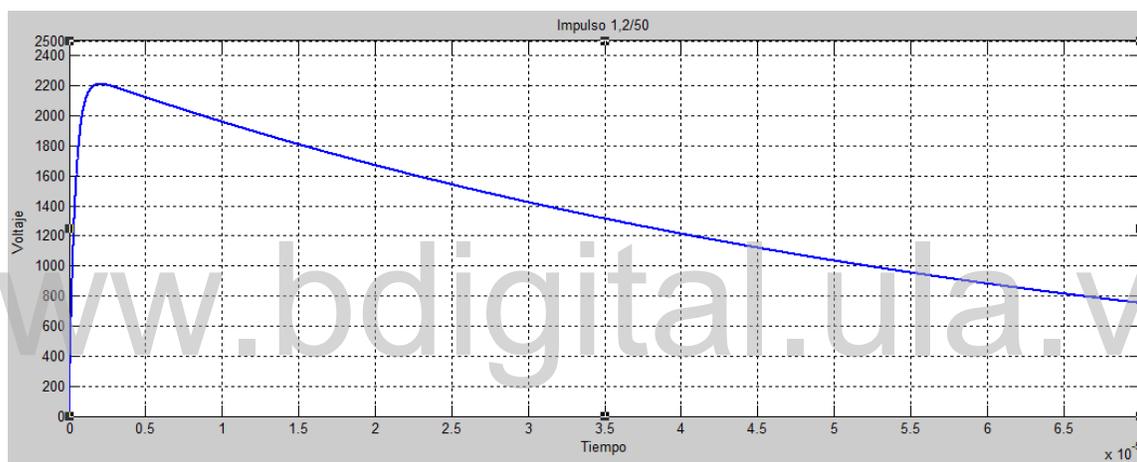


Figura 4.14 Forma de onda de un circuito básico de un generador de Marx.

- CALCULOS PARA 3 ETAPA

Tabla 4.3 Datos del generador de tres etapas

VALORES CONOCIDOS	VALORES CALCULADOS
$C2=0,1 \text{ nF}$	$R'1=1,400 \text{ k}\Omega$
$T1=1,2 \text{ }\mu\text{s}$	$R'2=9,937 \text{ k}\Omega$
$T2=50 \text{ }\mu\text{s}$	$C'1=0,006 \text{ }\mu\text{f}$

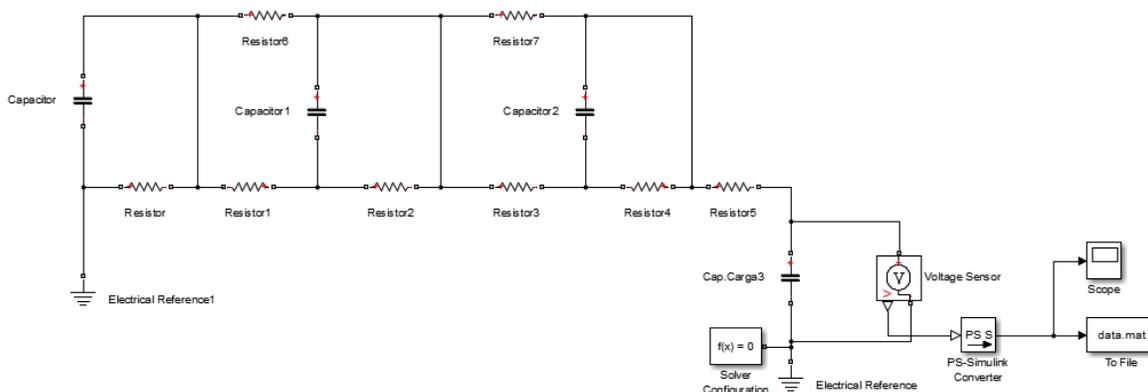


Figura 4.15 Modelo de simulación de un generador de impulso de tres etapas

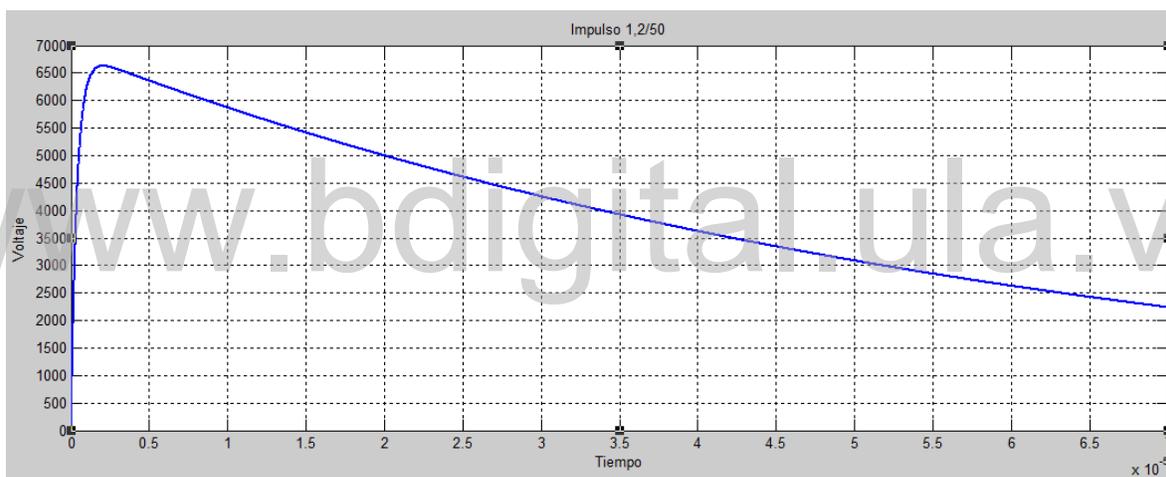


Figura 4.16 Forma de onda de un circuito de 3 etapas de un generador de Marx.

- CALCULOS PARA 8 ETAPA

Tabla 4.4 Datos generador de ocho etapas

VALORES CONOCIDOS	VALORES CALCULADOS
$C_2=0,1 \text{ nf}$	$R'_1=525 \Omega$
$T_1=1,2 \mu\text{s}$	$R'_2=3,726 \text{ k}\Omega$
$T_2=50 \mu\text{s}$	$C'_1=0,016 \mu\text{f}$

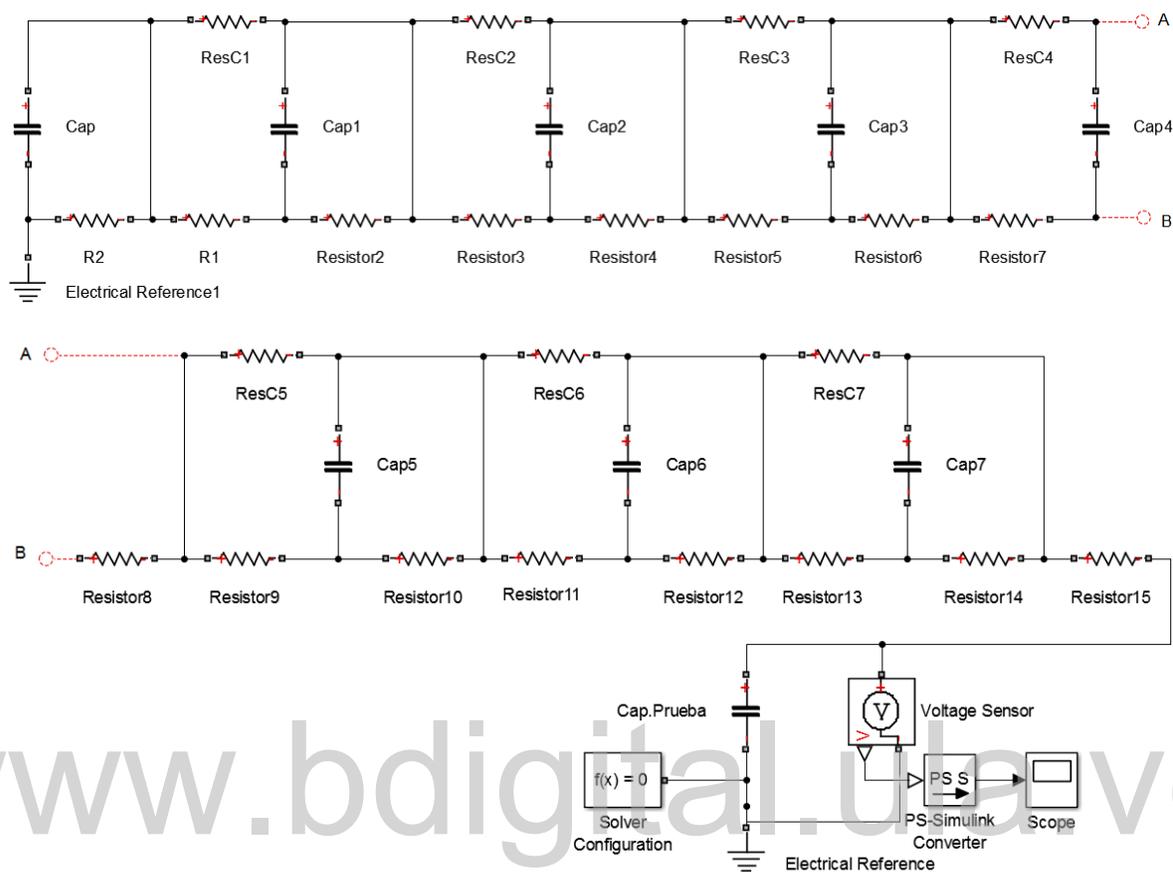


Figura 4.17 Modelo de simulación de un generador de impulso de ocho etapas

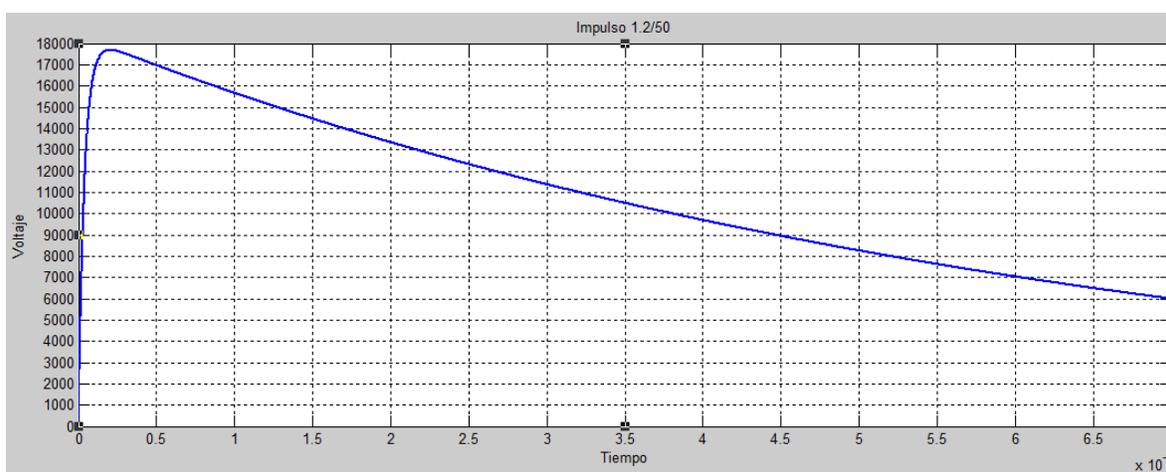


Figura 4.18 Forma de onda de un circuito de 8 etapas de un generador de Marx.

Tabla 4.5 Tiempo de frente y cola encontrado del modelo simulado, con rendimiento y voltaje pico incluidos para comparar características del impulso

Eta.	V _P (kV)	T.90 % (μs)	T.30 % (μs)	D.T (μs).	T.Frente (μs)	T.Cola (μs)	0,9V _p (kV)	0,3V _p (kV)	0,5V _p (kV)
1	2,212	0,843	0,137	0,706	1,179	45,850	1,990	0,663	1,106
3	6,630	0,844	0,137	0,707	1,180	45,550	5,967	1,989	3,315
8	17,690	0,843	0,137	0,706	1,179	45,690	15,921	5,307	8,845

B. Los siguientes calculos corresponden la referencia [5]

- CALCULOS PARA 1 ETAPA

Tabla 4.6 Datos generador de una etapa

VALORES CONOCIDOS	VALORES CALCULADOS
C ₂ =0,1 nf	R ₁ =4,253 kΩ
T ₁ =1,2 μs	R ₂ =32,466 kΩ
T ₂ =50 μs	C ₁ =2 nf

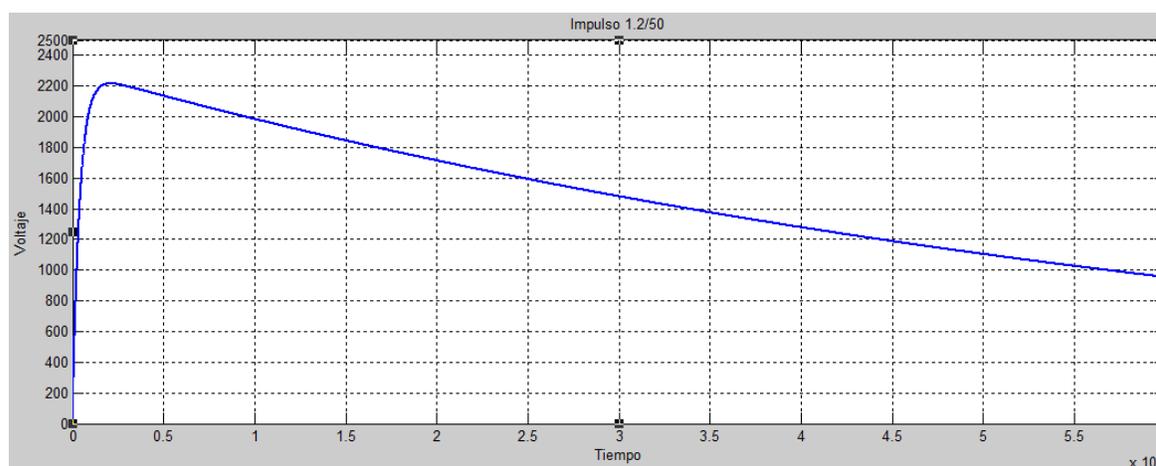


Figura 4.19 Forma de onda de un circuito básico de un generador de Marx.

- CALCULOS PARA 3 ETAPA

Tabla 4.7 Datos del generador de tres etapas

VALORES CONOCIDOS	VALORES CALCULADOS
$C_2=0,1 \text{ nf}$	$R'_1=1,417 \text{ k}\Omega$
$T_1=1,2 \text{ }\mu\text{s}$	$R'_2=10,822 \text{ k}\Omega$
$T_2=50 \text{ }\mu\text{s}$	$C'_1=0,006 \text{ }\mu\text{f}$

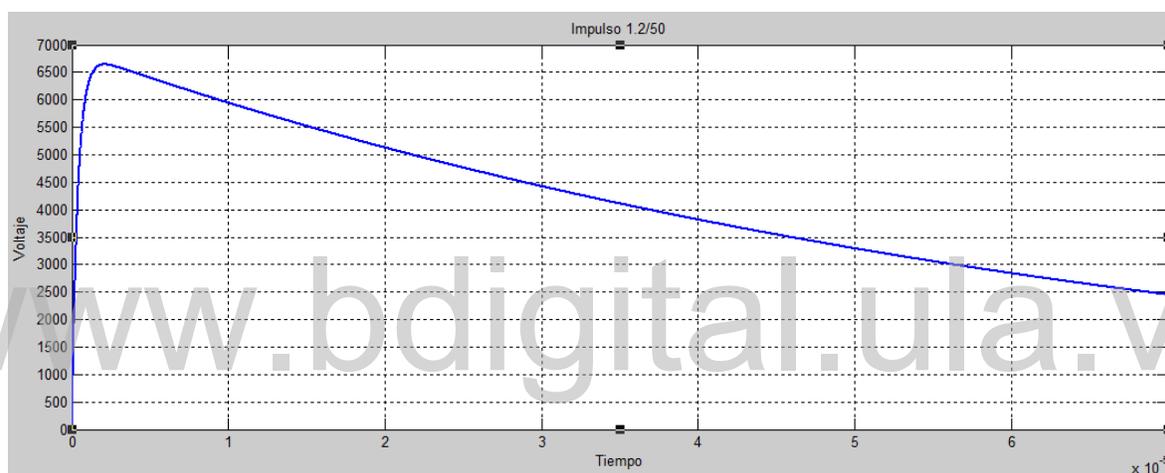


Figura 4.20 Forma de onda de un circuito de 3 etapas de un generador de Marx.

- CALCULOS PARA 8 ETAPA

Tabla 4.8 Datos del generador de ocho etapas

VALORES CONOCIDOS	VALORES CALCULADOS
$C_2=0,1 \text{ nf}$	$R'_1=531 \text{ }\Omega$
$T_1=1,2 \text{ }\mu\text{s}$	$R'_2=4,058 \text{ k}\Omega$
$T_2=50 \text{ }\mu\text{s}$	$C'_1=0,016 \text{ }\mu\text{f}$

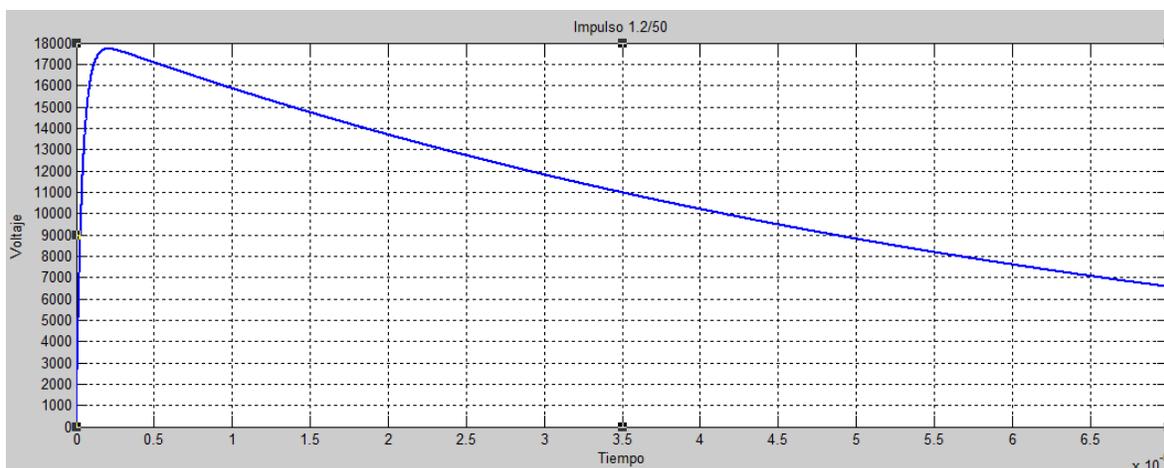


Figura 4,21 Forma de onda de un circuito de 8 etapas de un generador de Marx.

Tabla 4.9 Tiempo de frente y cola encontrado del modelo simulado, con rendimiento y voltaje pico incluidos para comparar características del impulso

Etp.	V _p (kV)	T.90 % (μs)	T.30 % (μs)	D.T (μs).	T.Frente (μs)	T.Cola (μs)	0,9V _p (kV)	0,3V _p (kV)	0,5V _p (kV)
1	2,216	0,858	0,139	0,719	1,2	49,77	1,994	0,664	1,108
3	6,640	0,857	0,139	0,718	1,199	49,35	5,976	1,992	3,320
8	17,720	0,858	0,139	0,719	1,2	49,59	15,948	5,316	8,850

C. Los siguientes calculos corresponden a la referencia [12]

- CALCULOS PARA 1 ETAPA

Tabla 4.10 Datos generador de una etapa

VALORES CONOCIDOS	VALORES CALCULADOS
C ₂ =0,1 nF	R ₁ =12 kΩ
T ₁ =1,2 μs	R ₂ =25 kΩ
T ₂ =50 μs	C ₁ =2 nF

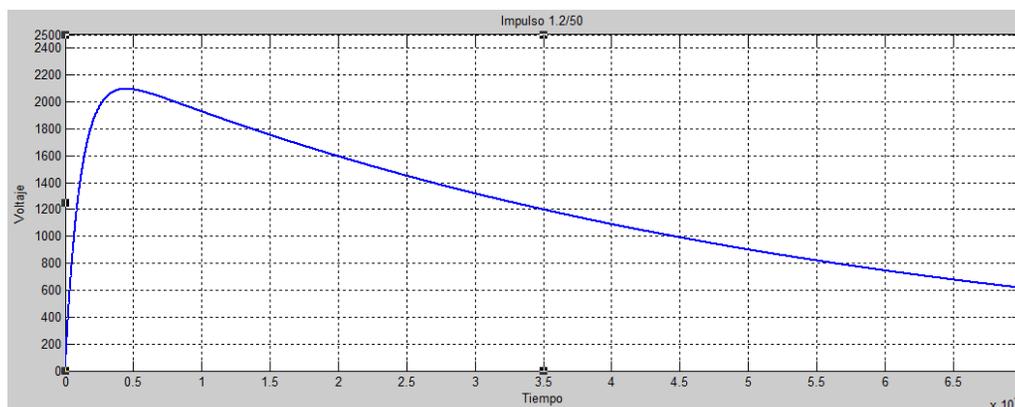


Figura 4.22 Forma de onda de un circuito básico de un generador de Marx.

- CALCULOS PARA 3 ETAPA

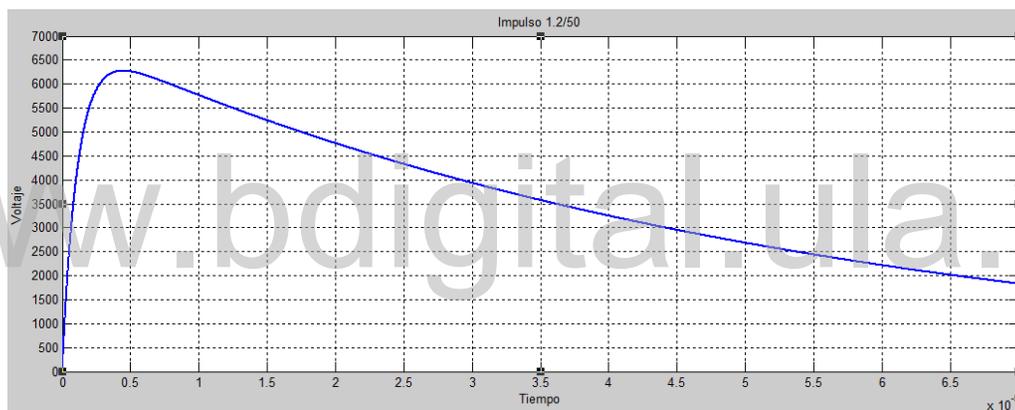


Figura 4.23 Forma de onda de un circuito de 3 etapas de un generador de Marx.

- CALCULOS PARA 8 ETAPA

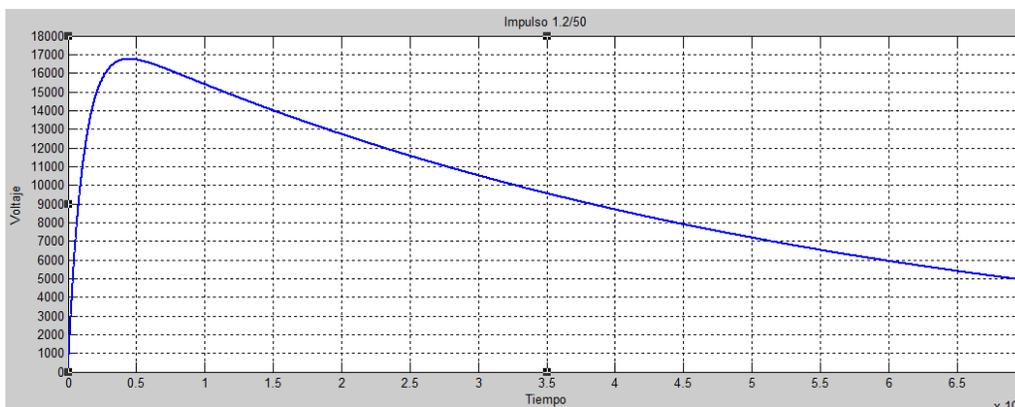


Figura 4.24 Forma de onda de un circuito de 8 etapas de un generador de Marx.

Tabla 4.11 Tiempo de frente y cola encontrado del modelo simulado, con rendimiento y voltaje pico incluidos para comparar características del impulso

Etp.	Vp (kV)	T.90 % (μs)	T.30 % (μs)	D.T (μs).	T.Frente (μs)	T.Cola (μs)	0,9Vp (kV)	0,3Vp (kV)	0,5Vp (kV)
1	2,097	2,152	0,369	1,787	2,984	42,050	1,887	0,629	1,048
3	6,275	2,151	0,368	1,783	2,977	41,830	5,647	1,882	3,137
8	16,750	2,153	0,369	1,784	2,979	41,957	15,075	5,025	8,375

Análisis general

Es de hacer notar, al detallar las diferentes formas de calcular los distintos componentes de un generador de impulso tipo Marx; como son el capacitor de carga, el capacitor objeto de prueba y sus resistencia para 1, 3 y 8 etapas. Se observa que las ecuaciones planteadas por los autores E. Kuffel, W. S. Zaengl y J. Kuffel, arrojan resultados parecidos en cuanto a los tiempos de frente de onda para 1 etapa 1,2 μ s, 3 etapas 1,199 μ s y 8 etapas 1,2 μ s con un margen de error de 0,001 μ s y para los tiempos de cola de onda 49,77 μ s para 1 etapa, 49,35 μ s para 3 etapas y 49,59 μ s para 8 etapas; con un margen de error de 0,43 μ s estos tiempos están comprendidos en los márgenes establecidos por la norma IEEE. Alcanzando valores exactos a los que se esperaba obtener analíticamente y de manera gráfica.

Siendo las ecuaciones establecidas por los autores E. Kuffel, W. S. Zaengl y J. Kuffel la mejor opción para el diseño del generador de impulso tipo rayo, ya que las otras ecuaciones utilizadas por los demás autores presentaban mayor margen de error en sus resultados de 0,020 μ s frente de onda y 4.307 μ s cola de onda para M.S. Naidu y V. Kamaraju y de 1,750 μ s tiempo de frente y 8,054 μ s tiempo de cola para el artículo de ELECTRICAL TESTING GROUP.

Con respecto al tiempo de frente Cabe resaltar que se tomó para el tiempo de frente de onda el punto al 30% del tiempo de subida porque se presenta una pendiente más suave al momento

de su construcción, esto hace mas facil la lectura debido a que las capacitancias presentes en el circuito producen oscilaciones lo cual dificulta su correcta lectura. .

4.4.2 Estudio del generador seleccionado

Con relacion al generador seleccionado, se realizó una serie de pasos que permitieron comprobar la utilidad del generador de Marx con respecto al generador multi-etapas, tomados como base para realizar el estudio, de acuerdo con las ecuaciones presentadas por los autores E. Kuffel, W.S. Zaengl y J. Kuffel. Todo ello, con el fin de conocer la diferencia de utilizar un Gennerador de una etapa o de multiples etapas

Tabla 4.12 Datos de un generador básico

VALORES CONOCIDOS	VALORES CALCULADOS
$C_2=0,1 \text{ nf}$	$R_1=4,250 \text{ k}\Omega$
$T_1=1,2 \text{ }\mu\text{s}$	$R_2=32,470 \text{ k}\Omega$
$T_2=50 \text{ }\mu\text{s}$	$C_1=2 \text{ }\eta\text{f}$

$$V_0=2,400 \text{ kV}$$

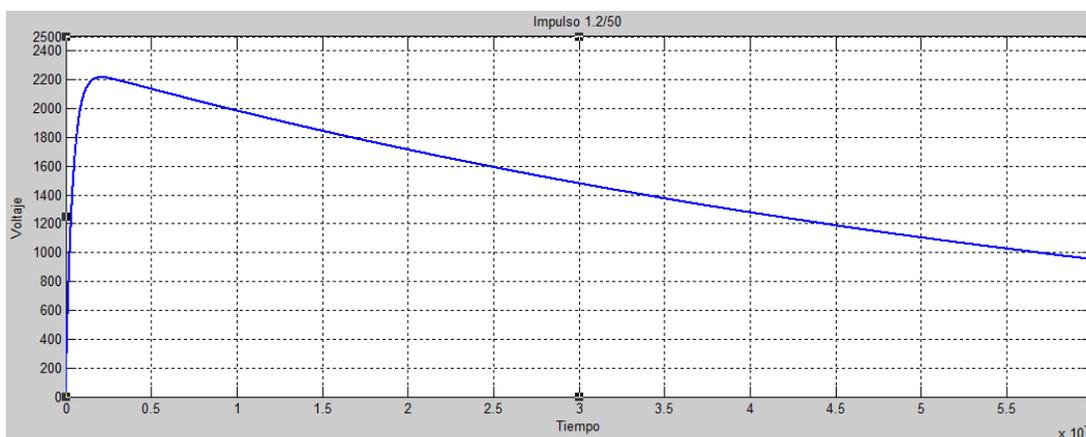


Figura 4.25 Forma de onda de un circuito básico de un generador de Marx.

$V_o=7,200$ kV

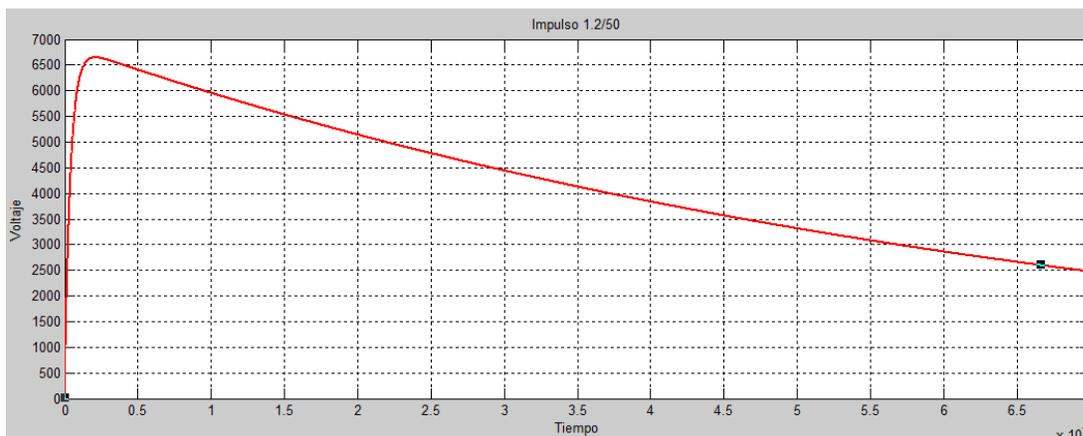


Figura 4.26 Forma de onda de un circuito básico de un generador de Marx.

$V_o=19,200$ kV

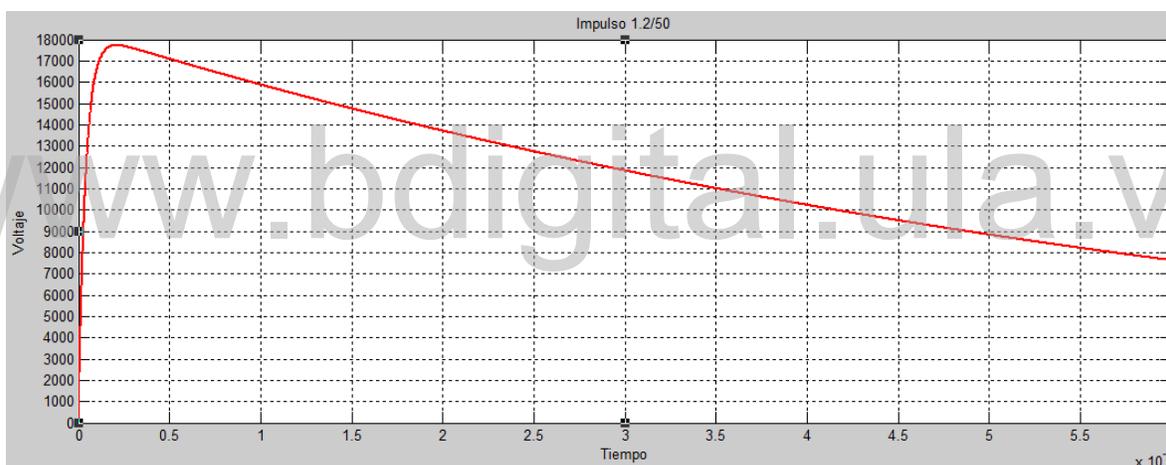


Figura 4.27 Forma de onda de un circuito básico de un generador de Marx.

Tabla 4.13 Tiempo de frente y cola encontrado del modelo simulado, con rendimiento y voltaje pico incluidos para comprobar la utilidad del generador

Etapa	V_o (kV)	V_p (kV)	T.90% (μs)	T.30% (μs)	D.T. (μs)	T.Frente 1,67*DT (μs)	T.Cola (μs)
1	2,400	2,097	2,152	0,369	1,787	2,984	42,050
1	7,200	6,648	0,859	0,139	0,720	1,202	49,600
1	19,200	17,729	0,860	0,139	0,721	1,204	49,710

Análisis

Ahora bien, hasta el momento se observó que indiferentemente que el generador sea de una etapa o de múltiples etapas el rendimiento del generador va hacer el mismo demostrado por las herramientas de simulación utilizadas en este trabajo de grado, sin embargo, en un estudio de investigación realizado la diferencia se presenta en la práctica para generadores de una etapa, ya que se aprecian dificultades con las brechas de chispa para la conmutación de tensiones muy altas, por ello, el aumento del tamaño físico de los elementos del circuito, así como los voltajes para cargar C_1 y, por último, pero no menos importante, las dificultades para suprimir las descargas de corona de la estructura y los cables durante el período de carga hacen que el circuito de una etapa sea inconveniente para voltajes más altos, por ello, se recomienda utilizar generadores multi-etapas aunque representa mayor costo para su construcción pero mejor rendimiento en cuanto a la tensión que se va a someter el objeto de prueba

4.5. Comparación del generador de Marx diseñado con la revista Internacional de Ética en Ingeniería y Educación de Gestión

4.5.1. Comparación del generador diseñado y el artículo para 1 etapa

Por otra parte, para determinar la funcionalidad del generador de Marx diseñado se estableció otra comparación con lo expresado en el artículo de la revista Internacional de Ética en Ingeniería y Educación de Gestión, en el cual, se manifiesta el rendimiento de un generador de impulso de 8 etapas. Por tanto, para analizar dicho circuito se estudió el circuito básico de ambos generadores.

Tabla 4-14 Datos generales para los diseños

DATOS GENERALES
TENSION DE CARGA 2,000 kV
FORMA DE ONDA 1,2/50 μ s

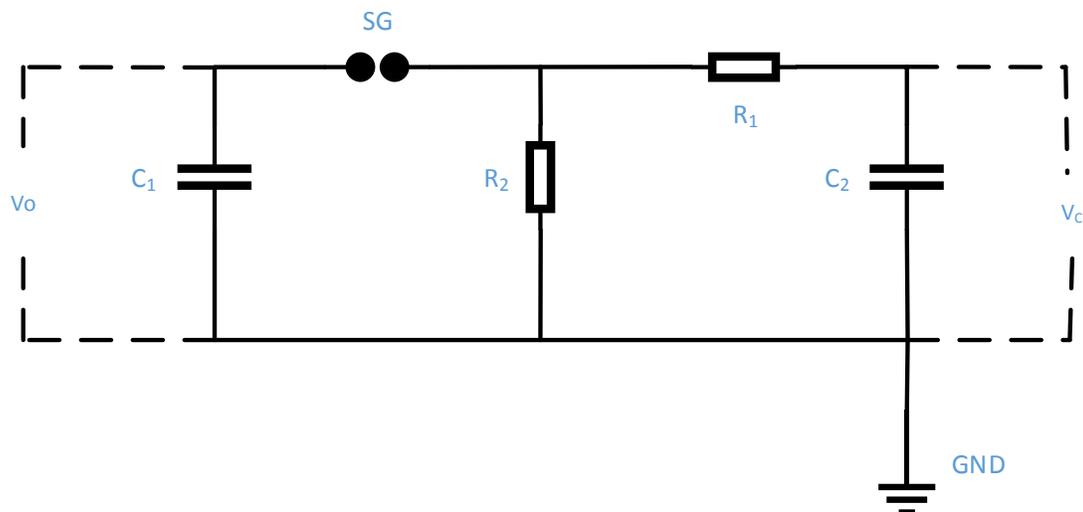


Figura 4.28 Circuito básico de un generador de Marx.

Generador Artículo 1 etapa

www.bdigital.ula.ve

Tabla 4.15 Datos del generador de una etapa

VALORES CONOCIDOS	VALORES CALCULADOS
$C_2=1 \text{ nf}$	$R1=4,253 \text{ k}\Omega$
$T_1=1,2 \mu\text{s}$	$R2=32,466 \text{ k}\Omega$
$T_2=50 \mu\text{s}$	$C1=0,016 \mu\text{f}$
$C'=0,128\mu\text{f}$	

Se simuló el circuito de la Figura 4.28 con los valores de la Tabla 4.15 para obtener las formas de onda. que se presentan a continuación, en las figuras 4.29 se muestra el tiempo de frente y en la figura 4.30 el tiempo de cola

FORMAS DE ONDA DEL CIRCUITO SIMULADO

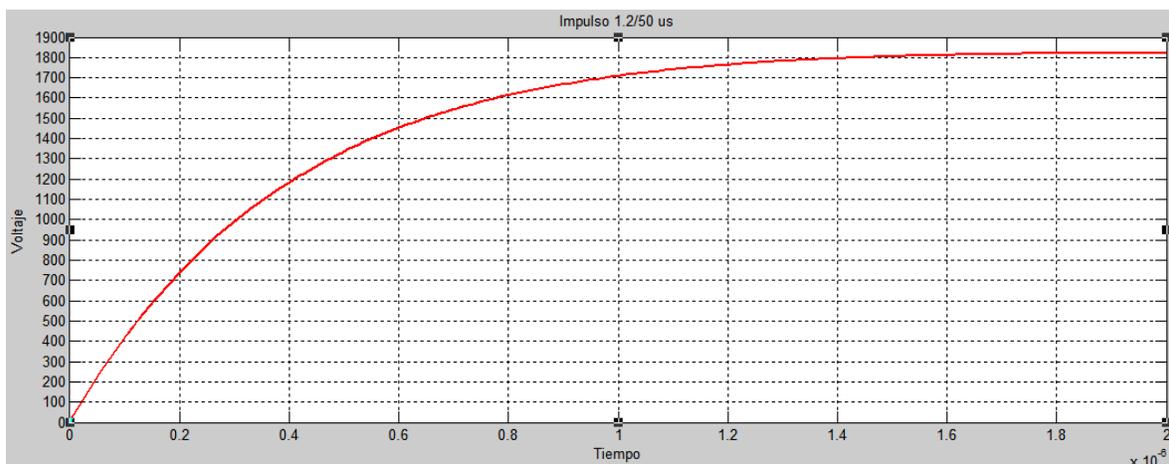


Figura 4.29 Frente de onda

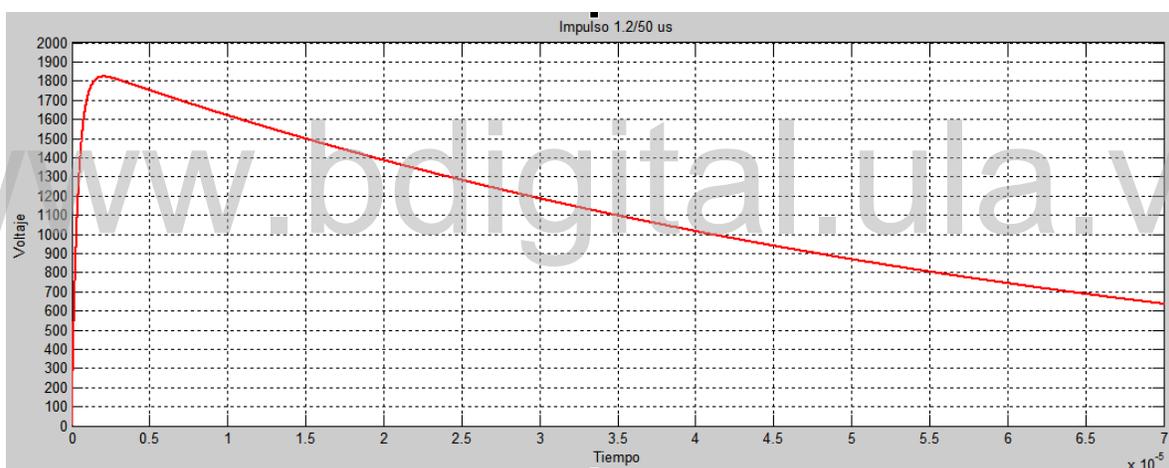


Figura 4.30 Cola de onda

Generador Diseño 1 etapa

De igual forma, para el generador diseñado de una sola etapa se presentan las formas de ondas obtenidas en las figura 4.31 para el tiempo de frente y para la figura 4.31 el tiempo de cola.

En la figura 4.33 se puede observar la comparación entre las formas de onda de la figura 4.30 y 4.32.

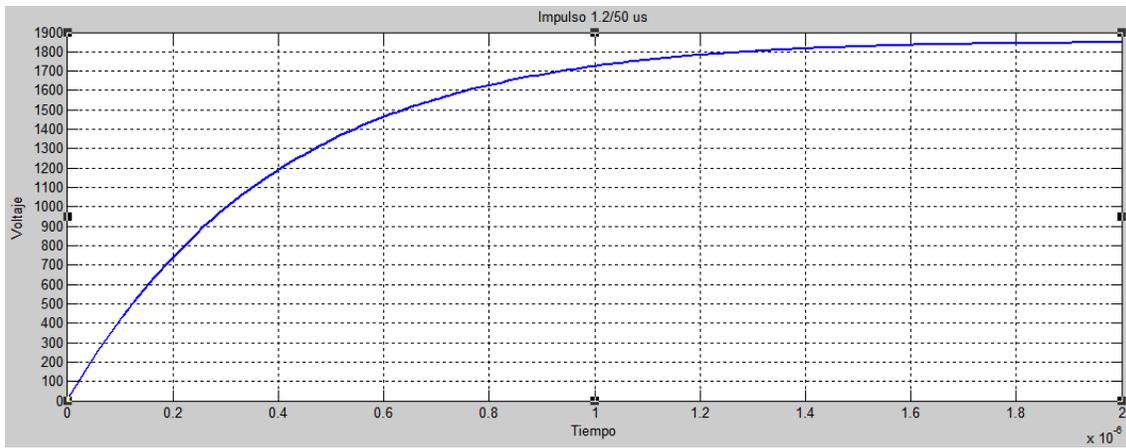


Figura 4.31 Frente de onda

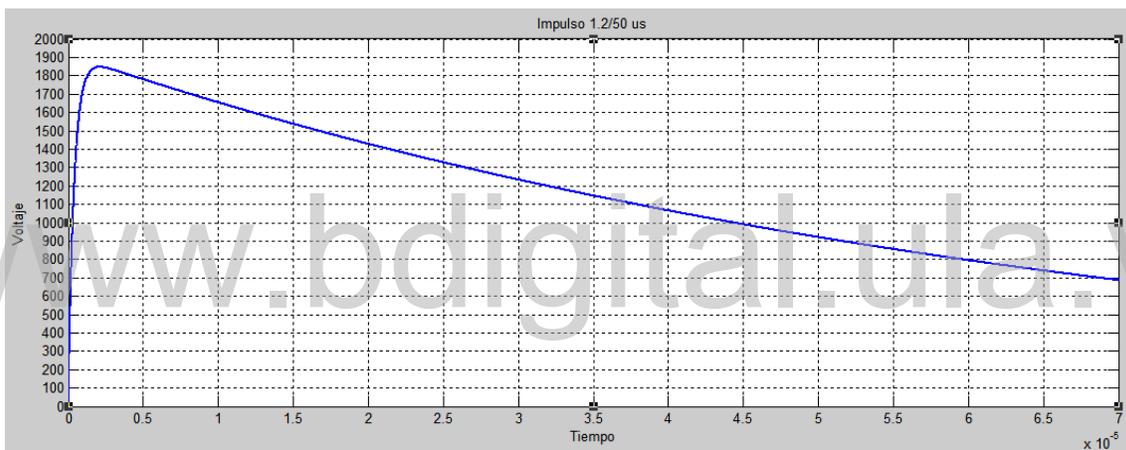


Figura 4.32 Cola de onda

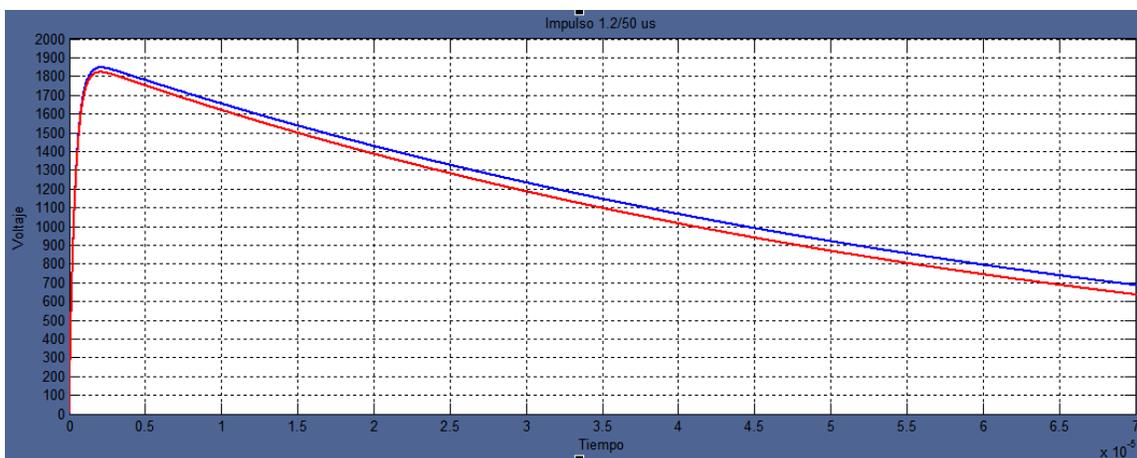


Figura 4.33 Comparación de la simulación entre las dos formas de onda.

Tabla 4.16 Tiempo de frente y cola encontrado del modelo simulado, con rendimiento y voltaje pico incluidos para comparar características del impulso del circuito básico

	V_P (kV)	T.90% (μs)	T.30% (μs)	D.T (μs).	T.Frente 1.67(μs)	T.Cola (μs)	Rend.
Diseño	1,847	0,859	0,139	0,719	1,201	49,760	92,350%
Artículo	1,823	0,885	0,137	0,709	1,185	46,968	91,150%

4.5.2. Comparación entre el generador de Marx diseñado y del artículo para 8 etapas

De igual manera, se realizó una comparación sobre el impulso generado en 8 etapas, correspondiente al circuito simulado en la Figura 4.17, lo cual permitió cambiar los valores de resistencias y capacitancia para cada referencia.

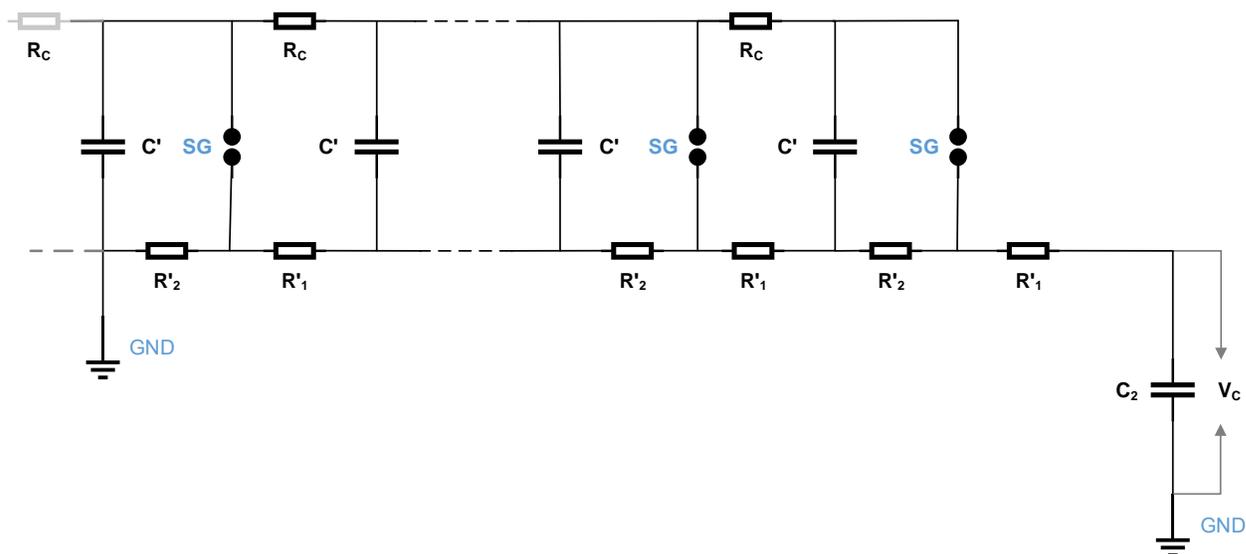


Figura 4.34 Generador de Marx 8 etapas

Generador Artículo 8 etapas.

Tabla 4.17 Datos del generador de ocho etapas

VALORES CONOCIDOS	VALORES CALCULADOS
$C_2=1 \text{ nf}$	$R'_1=53,125 \text{ k}\Omega$
$T_1=1,2 \mu\text{s}$	$R'_2=471,825 \text{ k}\Omega$
$T_2=50 \mu\text{s}$	$C_1=0,016\mu\text{f}$
$C'_1=0,128 \mu\text{f}$	

Se simuló el circuito del artículo con los valores de la Tabla 4.15 para obtener las formas de ondas. que se presentan a continuación, en las figuras 4.35 se muestra el tiempo de frente para las ocho etapas y en la figura 4.36 el tiempo de cola.

FORMAS DE ONDA DEL CIRCUITO SIMULADO

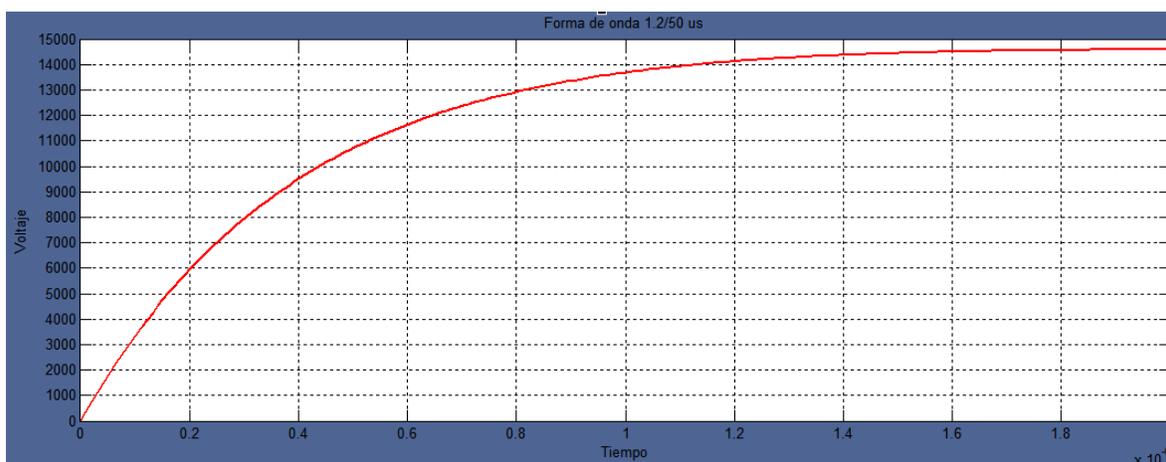


Figura 4.35 Frente de onda

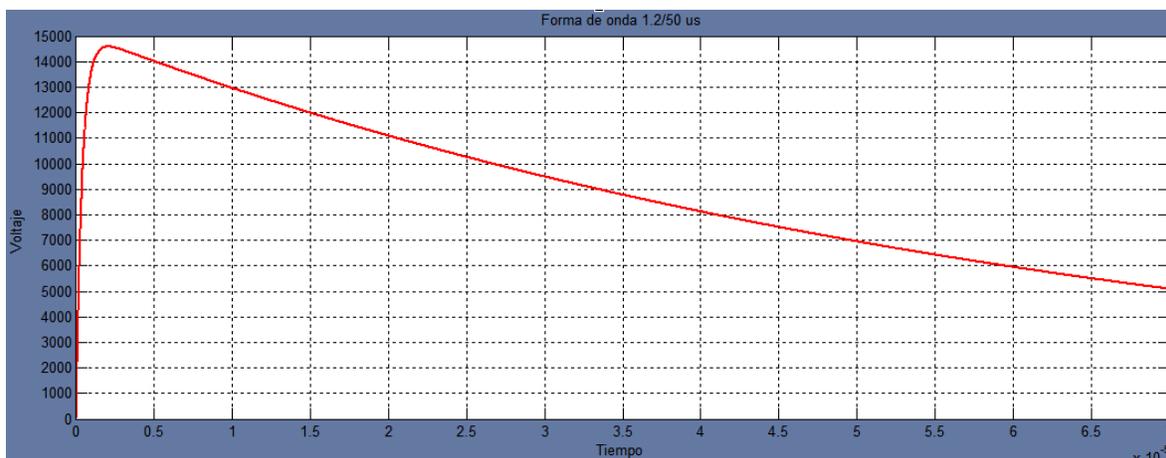


Figura 4.36 Cola de onda

Generador diseñado.

En la figura 4.37 se muestra el diseño que se usó para hacer las simulaciones del circuito del generador de Marx de ocho etapas y, en la tabla 4.18 se presentan los valores utilizados para las simulaciones.

www.bdigital.ula.ve

Tabla 4.18 Datos del generador diseñado

VALORES CONOCIDOS	VALORES CALCULADOS
$C_2 = 0,1 \text{ nf}$	$R'_1 = 531 \Omega$
$T_1 = 1,2 \text{ us}$	$R'_2 = 4,058 \text{ k}\Omega$
$T_2 = 50 \text{ us}$	$C'_1 = 0,016 \text{ uf}$

En la figura 4.38 se ve a detalle la forma de onda para observar el tiempo de frente que presenta el generador diseñado con las ocho etapas en funcionamiento. En la figura 4.39 se puede apreciar el tiempo de cola. Para poder comparar mejor las formas de ondas, en la figura 4.40 se observan los dos resultados.

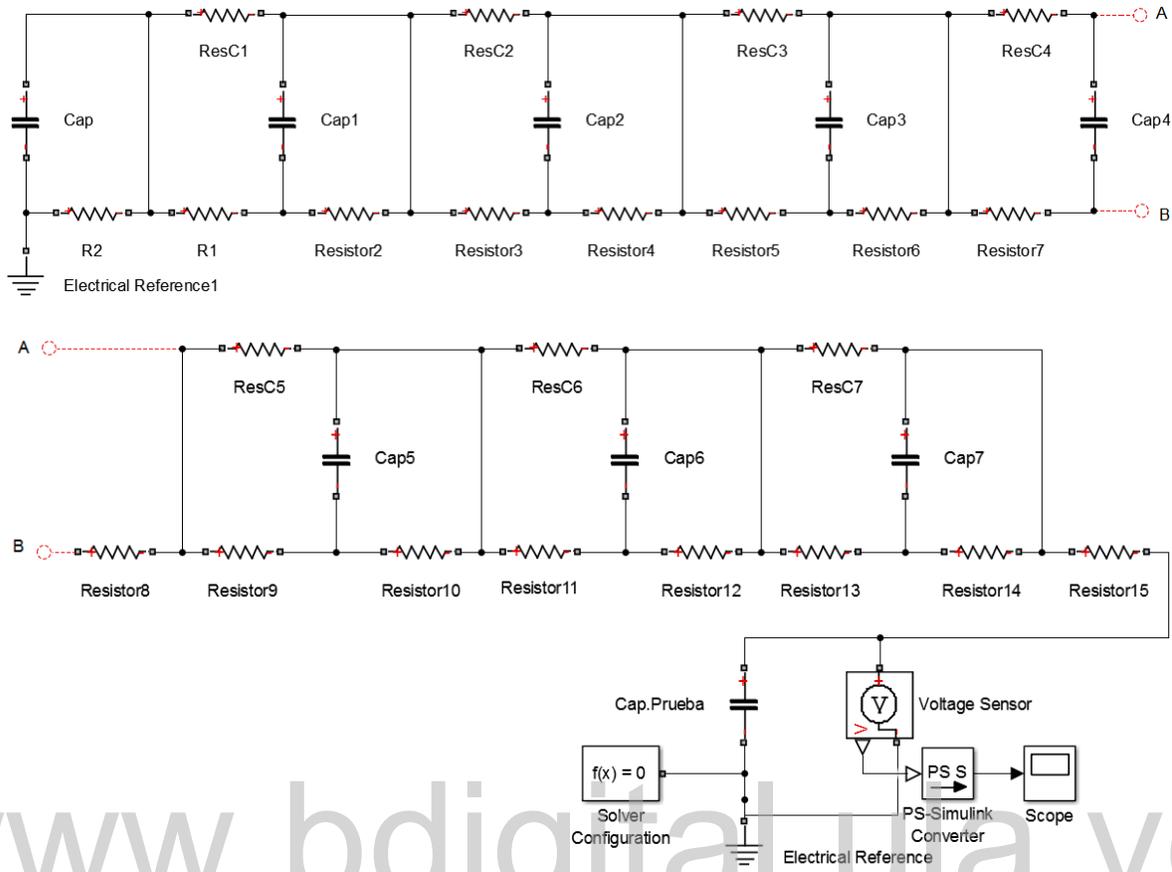


Figura 4.37 Simulación de un circuito 8 etapas de un generador de impulso

FORMAS DE ONDA DEL CIRCUITO SIMULADO

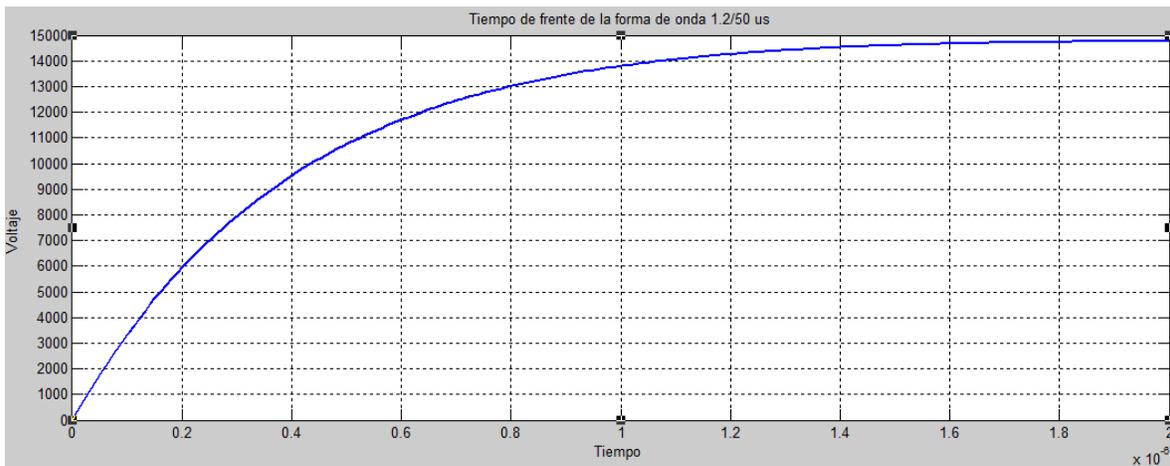


Figura 4.38 Frente de onda

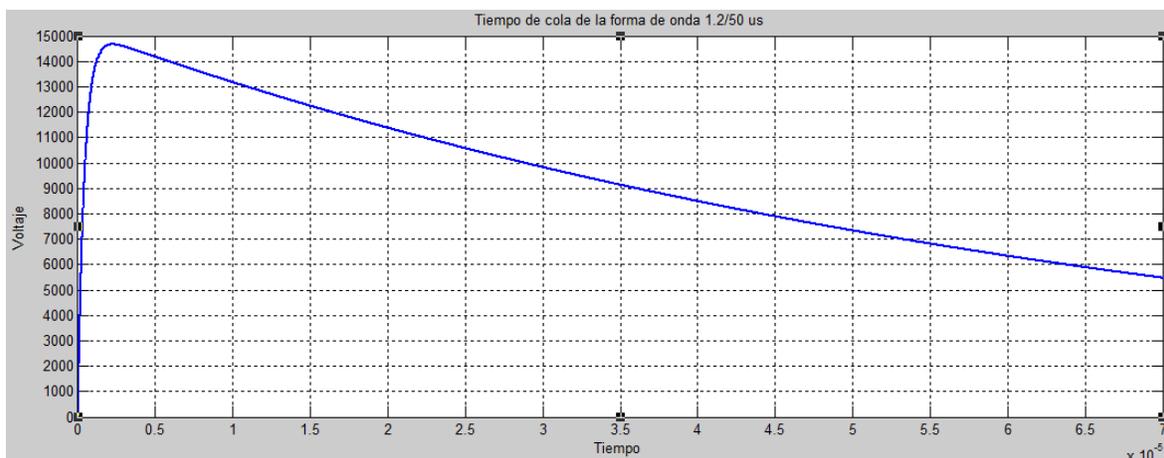


Figura 4.39 Cola de onda

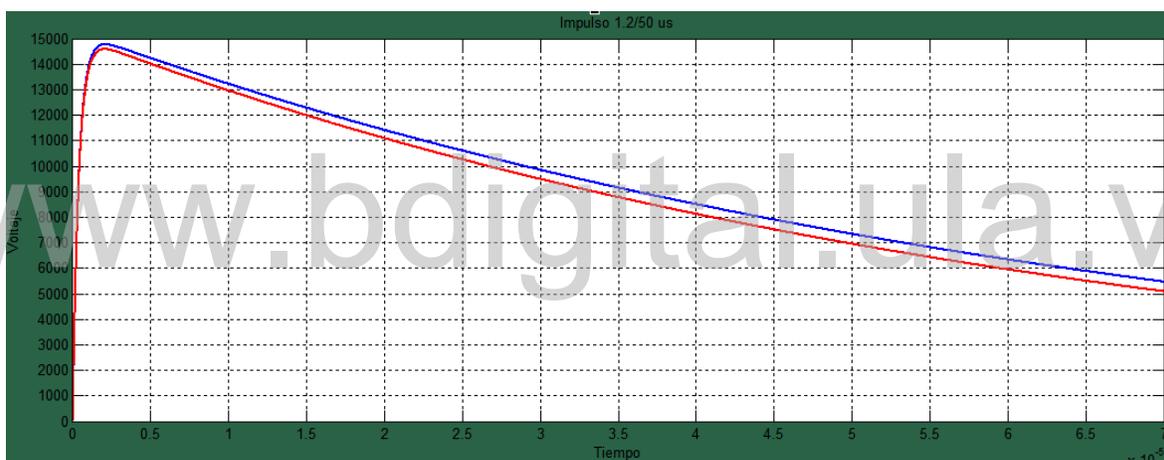


Figura 4.40 Comparación de la simulación entre las dos formas de onda

Tabla de comparación

Tabla 4.19 Tiempo de frente y cola encontrado del modelo simulado, con rendimiento y voltaje pico incluidos para comparar características del impulso de 8 etapas.

	V_p (kV)	T.90% (μs)	T.30% (μs)	D.T (μs).	T.Frente 1.67(μs)	T.Cola (μs)	Rend.
Diseño	14,767	0,859	0,139	0,719	1,201	49,624	92,290%
Artículo	14,582	0,844	0,137	0,707	1,180	46,931	91,130%

Análisis

Cabe resaltar, que al observar los datos obtenidos en las Tabla 4.16 y Tabla 4.19, se puede determinar que el generador diseñado presenta un mayor rendimiento y exactitud en sus tiempos de frente y tiempos de cola de onda, con respecto al mostrado en el artículo de IJEEE [13] estudiado, por tanto, para 1 etapa y 8 etapas se demostró que hay mejor funcionamiento y aprovechamiento de la tensión de entrada para la producción de la tensión final que van a estar sometidas los objetos de carga, por ellos los valores de componentes seleccionados son más viables

www.bdigital.ula.ve

CONCLUSIÓN

En este trabajo de grado se presenta el diseño y modelado de un generador de Marx. Donde los resultados obtenidos fueron comparados en tiempo y formas de onda con respecto a un artículo de IJEEE [13] y estándares internacionales expuestos en los libros de Ingeniería de alta tensión utilizados en el desarrollo de esta tesis, lo cual valida el correcto funcionamiento del generador y demuestra que se encuentra dentro de los parámetros establecidos dentro de la norma. [14].

En tal sentido, por medio del software computacional Proteus y Matlab se pudieron observar las variaciones de los parámetros propios del circuito del generador de impulso, lo que consistió en escoger los componentes más adecuados para su correcto funcionamiento como lo fueron C_1 , C_2 , R_1 y R_2 lo cual, nos permitió observar los comportamientos de la onda generada como lo son el tiempo de frente de onda variando R_1 y C_2 que admite valores comprendidos $1,2 \pm 30\% \mu s$ y el tiempo de cola de onda variando R_2 y C_1 admite valores $50 \pm 20\% \mu s$ de esta manera se cumple con las premisas establecidas en la norma para tenciones tipo rayo.

Por otra parte, en relación a la fuente de alimentación del generador se tomaron las precauciones necesarias para que sea lo más energéticamente eficiente y segura para ser manipulada por el usuario la cual, transforma la corriente alterna de la línea eléctrica comercial que se recibe en los domicilios 120 V en corriente continua que es la que utiliza los componentes electrónicos que conforman dicho generador

De igual manera, se concluye que el sistema de medición juega un papel importante en el desarrollo de un generador de Marx, ya que, les brindará a los estudiantes de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Los Andes quienes realizan sus prácticas en el laboratorio de alta tensión un conocimiento significativo, al poder corroborar la tensión que serán sometidos los objetos de prueba al facilitar su estudio.

Cabe resaltar, que el proyecto se diseñó con el fin de desarrollar en el estudiante de ingeniería eléctrica un mayor acercamiento a la parte práctica del campo de ingeniería de alta tensión para que así pueda corroborar lo expuesto en dicha asignación.

www.bdigital.ula.ve

RECOMENDACIONES

Se recomienda a la Universidad de los Andes facilitar los recursos para implementar el modelo del generador de Marx propuesto para el Laboratorio de Alta tensión para que de esa manera los estudiantes que cursan la materia puedan obtener un conocimiento significativo a través del desarrollo de las prácticas de la materia.

Es de hacer notar, que la investigación servirá de base para estudios posteriores en los cuales se ejecute el modelo del generador de Marx, por tanto, se recomienda tomar las precauciones establecidas en la norma para su correcto funcionamiento en el lugar de trabajo

www.bdigital.ula.ve

REFERENCIAS

- [1] Manual de Trabajos de Grado de Especialización y Maestría y Tesis Doctorales. Universidad Pedagógica Experimental Libertador, Caracas, 2016.
- [2] S. G. Arango, Diseño y Construcción de un Generador de Impulsos de Alta Tensión, Portátil y Didáctico, Manizales, Colombia, 2013.
- [3] P. d. S. Canivell, «Automatización de la distancia de los Explosores en un generador Marx,» Pamplona, Colombia, 2015.
- [4] J. Martin, «JEMAELECTRO BLOG,» Powered by Blogger, 2019. [En línea]. Available: <http://jemaelectro.blogspot.com/2016/02/que-es-una-sobretension-tipos-de.html>. [Último acceso: 10 Junio 2019].
- [5] W. Z. J. E. Kuffel, High Engineering (Fundamentals), Butterworth-Heinemann, 2000.
- [6] V. K. M.S Naidu, High Voltage Engineering, USA: McGraw-Hill, 1996.
- [7] A. S. H. y. F. R. P. F.S. Edwards, IEE981, 1951.
- [8] Z. Maker, «Zona Maker,» [En línea]. Available: <https://www.zonamaker.com/electronica/intro-electronica/instrumentacion/fuente-de-alimentacion>.
- [9] I. Mecafenix, «Ingeniería Mecafenix,» 20 julio 2019. [En línea]. Available: <https://www.ingmecafenix.com/electronica/el-fusible/>.
- [10] WikiSysop, «EcuRed,» 12 Agosto 2009. [En línea]. Available: https://www.ecured.cu/Regulador_de_tensi%C3%B3n.
- [11] tectronixs, «tectronixs,» 21 Noviembre 2017. [En línea]. Available: <http://www.tectronixs.com/single.blog.php?id=1>.
- [12] «Academia,» 02 07 2019. [En línea]. Available: https://www.academia.edu/24068837/GENERADORES_DE_IMPULSOS_DE_TENSION_SU_APLICACION_EN_ENSAYOS_DE_TRANSFORMADORES PARTE_1_ASPECTOS_FUNDAMENTALES_TOTAL_3_PARTES.
- [13] e. a. Fathima S., «Rendimiento de un generador de impulsos de etapas múltiples,» *Revista Internacional de Ética en Ingeniería y Educación Gerencial*, vol. 2, p. www.ijeee.in, 2015.
- [14] IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing, New York, Estados Unidos de America , 1995.