

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**



**Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas  
Carrera De Ingeniería En Mantenimiento Eléctrico**

**SIMULACIÓN DE UN GENERADOR DE IMPULSOS DE VOLTAJE,  
PARA PRUEBAS DE AISLAMIENTO DE MATERIALES  
DIELÉCTRICOS Y DISPOSITIVOS.**

**Trabajo de grado presentado ante la Ilustre Universidad Técnica del Norte previo a la  
obtención del título de Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico**

**Autor:**

Bryan Omar Yazán Basantes

**Director:**

MSc. Jhonny Javier Barzola Iza

Ibarra – Ecuador

2022



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

### AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

#### 1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD:</b>	040141192-1		
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	Yazán Basantes Bryan Omar		
<b>DIRECCIÓN:</b>	Pana Americana y Tarqui (Julio Andrade-Tulcán-Carchi-Ecuador)		
<b>EMAIL:</b>	boyazanb@utn.edu.ec		
<b>TELÉFONO FIJO:</b>	062205292	<b>TELÉFONO MÓVIL:</b>	0986182004

DATOS DE LA OBRA	
<b>TÍTULO:</b>	SIMULACIÓN DE UN GENERADOR DE IMPULSOS DE VOLTAJE, PARA PRUEBAS DE AISLAMIENTO DE MATERIALES DIELECTRICOS Y DISPOSITIVOS
<b>AUTOR (ES):</b>	Yazán Basantes Bryan Omar
<b>FECHA: DD/MM/AAAA</b>	12 de enero de 2022
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
<b>PROGRAMA:</b>	PREGRADO
<b>TITULO POR EL QUE OPTA:</b>	Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico
<b>ASESOR /DIRECTOR:</b>	MSc. Jhonny Barzola

#### 2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.  
Ibarra, a los 18 días del mes de enero de 2022

#### EL AUTOR:

(Firma):

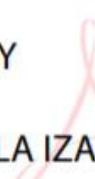
Nombre: Yazan Basantes Bryan Omar

## CERTIFICACION DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO

Yo, Barzola Iza Jhonny Javier en calidad de tutor del señor, Yazan Basantes Bryan Omar certifico que ha cumplido con las normas establecidas en la elaboración del trabajo de investigación titulado: **“SIMULACIÓN DE UN GENERADOR DE IMPULSOS DE VOLTAJE, PARA PRUEBAS DE AISLAMIENTO DE MATERIALES DIELECTRICOS Y DISPOSITIVOS”**. Para la obtención del titulo de Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico; aprobando la defensa, impresión y empastado.

JHONNY  
JAVIER  
BARZOLA IZA

Firmado digitalmente por  
JHONNY JAVIER  
BARZOLA IZA  
Fecha: 2022.01.13  
13:27:44 -05'00'



-----  
Msc. Jhonny Javier Barzola Iza  
DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

## **Dedicatoria**

El presente trabajo está dedicado a mi familia por haber sido mi apoyo a lo largo de mi carrera universitaria y a lo largo de mi vida. A todas las personas especiales y a las que ya no están con nosotros que me acompañaron en esta etapa, aportando a mi formación tanto profesional y como ser humano.

## **Agradecimiento**

A mi familia, por haberme dado la oportunidad de formarme y haber sido mi apoyo durante todo este tiempo.

De manera especial a mi tutor de tesis Msc. Jhonny Javier Barzola Iza, por haberme guiado en la elaboración de este trabajo como también a lo largo de mi carrera universitaria y haberme brindado el apoyo para desarrollarme profesionalmente y seguir cultivando mis valores, muchas gracias.

A la Universidad Técnica del Norte, por haberme brindado tantas oportunidades y enriquecerme en conocimiento.

***Yazán Basantes Bryan Omar***

## Resumen

En el presente proyecto se detalla el proceso de estudio del generador de impulsos de voltaje de una etapa, de igual manera la fundamentación teórica que será de base para realizar futuros estudios en torno a este proyecto.

Se realizó el dimensionamiento de un generador de impulsos de una etapa de 20kV (Max) con la posibilidad de generar impulsos de voltaje tipo rayo e impulsos de voltaje tipo maniobra, especificando cada uno de sus elementos, para ello se ha recopilado información y datos obtenidos de simulaciones y ensayos realizados en laboratorios de diferentes entidades e instituciones dando pautas y consejos a lo largo de este trabajo sirviendo como una guía básica que facilita una implementación física del equipo.

Se realiza la simulación de circuitos que generan impulsos de voltaje usando los parámetros propuestos modelándolos en MATLAB Simulink para comprobar sus resultados, observando que este software es muy eficiente en el estudio de los efectos ante variaciones de parámetros de los circuitos al momento de obtener los voltajes de impulso y las formas de onda deseadas para aplicaciones de alto voltaje.

**Palabras claves:** Simulación, MATLAB, generador de impulso, generador Marx impulso rayo, impulso maniobra, sobretensión.

## Abstract

This project details the process of studying a single-stage voltage pulse generator, as well as the theoretical basis that will be the support for future studies around this project.

A single-stage pulse generator of 20 kV (Max) was designed with the possibility of generating lightning-type voltage pulses and maneuver-type voltage pulses, specifying each of its elements, to this end, information and data obtained from simulations and tests carried out in laboratories of different entities and institutions have been collected, giving guidelines and advices throughout this work, serving as a basic guide that facilitates a physical implementation of this equipment in the future.

The simulation of the circuits that generate voltage pulses is performed using the parameters proposed by modeling them in MATLAB Simulink to check their results, in addition, it is observed that this software is very efficient in studying the effects on variations in circuit parameters when obtaining the desired pulse voltages and waveforms for high voltage applications.

**Keywords:** Simulation, MATALB, impulse generator, Marx generator, lightning impulse, switching impulse, overvoltage.

## TABLA DE CONTENIDOS

<b>Portada</b> .....	<b>1</b>
<b>IDENTIFICACION DE LA OBRA</b> .....	<b>II</b>
<b>CONSTANCIAS</b> .....	<b>II</b>
<b>CERTIFICACION DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO</b> .....	<b>III</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>IV</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	<b>IV</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>V</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>VI</b>
<b>TABLA DE CONTENIDOS</b> .....	<b>VII</b>
<b>INDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>INDICE DE TABLAS</b> .....	<b>X</b>
<b>INTRODUCCION</b>	
<b>CAPITULO 1</b> .....	<b>1</b>
<b>FUNDAMENTO TEORICO</b> .....	<b>1</b>
<b>Normatividad empleada para el desarrollo de este trabajo</b> .....	<b>1</b>
1.1 Impulsos de tensión.....	1
1.2 Clasificación de los impulsos de tensión.....	1
1.3 Impulso normalizado.....	2
1.3.1 Impulso normalizado tipo maniobra.....	2
1.3.2 Impulso normalizado tipo rayo.....	3
1.4 Generador de impulso.....	4
1.5 Generador de impulso de una etapa.....	5
1.6 Generador de impulsos de voltaje multietapa Marx.....	6
<b>CAPITULO 2</b> .....	<b>8</b>
Diseño conceptual del generador de impulso y todos sus elementos.....	8
2.1 Fundamentos del generador de impulsos de una etapa.....	9
2.2 Fuente de alimentación de un generador de impulsos.....	19
2.2.1 Transformador elevador seguido de un rectificador.....	20
2.2.2 Diodo Rectificador.....	20
2.3 Divisor capacitivo como dispositivo de medida.....	22

2.4 Diagrama de flujo del funcionamiento de un generador de impulsos de una etapa.....	23
2.5 Dimensionamiento de componentes para un prototipo.....	25
2.5.1 Capacitores.....	25
2.5.2 Resistencias.....	27
2.5.3 Explosor de Esferas.....	28
2.6 Parámetros de construcción.....	29
<b>CAPITULO 3.....</b>	<b>30</b>
Simulación de un generador de impulsos de voltaje.....	30
3.1 MATLAB / Simulink.....	30
3.2 Carga y descarga de un capacitor a través de simulación.....	30
3.3 Simulación de un generador de impulsos de una etapa en Simulink.....	32
3.4 Circuito A modelado en Simulink.....	34
3.4.1 Impulso tipo rayo de circuito A.....	34
3.4.2 Impulso tipo rayo de circuito A con variación de voltajes.....	35
3.4.3 Impulsos tipo maniobra de circuito A.....	36
3.4.4 Impulso tipo maniobra de circuito A con variaciones de voltajes.....	37
3.5 Circuito B modelado en Simulink.....	38
3.5.1 Impulso tipo rayo de circuito B.....	38
3.5.2 Impulso tipo rayo de circuito B con variaciones de voltaje.....	39
3.5.3 Impulso tipo maniobra de circuito B.....	40
3.5.4 Impulso tipo maniobra del circuito B con variaciones de voltaje.....	41
3.6 Circuito 3 modelado en Simulink.....	42
3.6.1 Impulso tipo rayo del circuito 3.....	42
3.6.2 Impulso tipo rayo de circuito 3 con variaciones de voltaje.....	43
3.6.3 Impulso tipo maniobra de circuito 3.....	44
3.6.4 Impulso tipo maniobra de circuito 3 con variaciones de voltaje.....	45
3.7 Resultados de simulaciones.....	46
3.8 Comparación de eficiencia entre circuitos Simulados.....	46
3.8.1 Impulsos tipo rayo de circuitos simulados.....	47

## Índice de Figuras

Figura 1.	Curva característica del impulso tipo maniobra .....	3
Figura 2.	Curva característica del impulso tipo rayo .....	4
Figura 3.	Circuitos de generadores de impulsos de tensión de una etapa .....	5
Figura 4.	Esquema de un generador de impulsos de tensión multietapa tipo MARX. ....	7
Figura 5.	Circuitos A y B esquemas básicos para un generador de impulsos de voltaje.....	8
Figura 6.	Diagrama de flujo del capítulo 2 .....	9
Figura 7.	Circuitos para análisis de onda de frente y cola.....	10
Figura 8.	Onda de impulso de voltaje y sus componentes según circuitos de la Figura 6.	12
Figura 9.	Factores de eficiencia de voltaje $\eta$ en dependencia de la relación de capacitancia de $C_c/C_g$ para impulso tipo rayo T1/ T2. ....	15
Fuente: (E. Kuffel, 2000) .....		15
Figura 10.	Diagrama básico de un transformador. ....	20
Figura 11.	Rectificación se señal .....	21
Figura 12.	Rectificador de alto voltaje. ....	21
Figura 13.	Circuito básico de carga para un generador de impulsos usando un diodo rectificador.....	22
Figura 14.	Divisor de tensión capacitivo.....	23
Figura 15.	Diagrama de flujo del funcionamiento de un generador de impulsos. ....	24
Figura 16.	Capacitor Marca AjR76 (0.56 $\mu$ F) 1000V DC vista inferior.....	27
Figura 17.	Ejemplos de resistencias de carbono.....	28
Figura 18.	Explosor vertical y explosor horizontal. ....	28
Figura 19.	Valores seleccionados para simulación de carga y descarga de un capacitor en Simulink.....	31
Figura 20.	Diagrama de carga y descarga de un capacitor elaborado en Simulink. ....	31
Figura 21.	Grafica de simulación de onda de carga y descarga de un capacitor.....	32
Figura 22.	Circuito A modelado en Simulink. ....	34
Figura 23.	Impulso rayo de Circuito A. ....	35
Figura 24.	Impulso rayo de circuito A usando diferentes voltajes.....	36
Figura 25.	Impulso tipo maniobra de circuito A. ....	37
Figura 26.	Impulso tipo maniobra de circuito A con diferentes voltajes. ....	37
Figura 27.	Circuito B modelado en Simulink. ....	38
Figura 28.	Impulso tipo rayo de circuito B. ....	39
Figura 29.	Impulso tipo rayo de circuito B. ....	40
Figura 30.	Impulso tipo maniobra de circuito B. ....	41
Figura 31.	Impulso tipo maniobra de circuito B con variaciones de voltaje.....	41
Figura 32.	Circuito 3 modelado en Simulink.....	42

Figura 33.	Impulso tipo rayo de circuito 3. ....	43
Figura 34.	Impulso tipo rayo de circuito 3 con variaciones de voltaje. ....	44
Figura 35.	Impulso tipo maniobra de circuito 3. ....	45
Figura 36.	Impulso tipo maniobra de circuito 3 con variaciones de voltaje. ....	45
Figura 37.	Impulsos tipo rayo de los circuitos A, B y 3. ....	47
Figura 38.	Impulsos tipo maniobra de los circuitos A, B y 3. ....	48
Figura 39.	Sensibilidad de circuito A al variar $R_{s1}$ (Rayo/Maniobra).....	49
Figura 40.	Sensibilidad de circuito B al variar $R_{s1}$ (Rayo/Maniobra).....	49
Figura 41.	Sensibilidad de circuito A al variar $R_p$ (Rayo/Maniobra).....	50
Figura 42.	Sensibilidad de circuito B al variar $R_p$ (Rayo/Maniobra).....	50
Figura 43.	Sensibilidad de circuito A al variar $C_c$ (Rayo/Maniobra).....	51
Figura 44.	Sensibilidad de circuito B al variar $C_c$ (Rayo/Maniobra).....	51
Figura 45.	Capacitor Marca AjR76 (0.56 $\mu$ F) 1000V DC vista superior.....	56
Figura 46.	Capacitor Marca AjR76 (0.56 $\mu$ F) 1000V DC en serie. ....	56
Figura 47.	Capacitor Marca jb473K (0.046 $\mu$ F).....	57
Figura 48.	Capacitores Marca jb473K (0.046 $\mu$ F) en serie. ....	57
Figura 49.	Rectificador de alto voltaje NTE 541 vista frontal. ....	57
Figura 50.	Modelado de circuitos de generador de impulsos. ....	62

## Índice de Tablas

Tabla 2.1	Relación entre el tiempo de frente, el tiempo de cola y las constantes del tiempo.....	16
Tabla 2.2	Parámetros de generadores de impulso comerciales.....	25
Tabla 2.3	Valores nominales de los componentes del generador .....	26
Tabla 2.4	Diseño de capacitores por unidades accesibles en el mercado. ....	26
Tabla 2.5	Diseño de resistencias por unidades accesibles en el mercado.....	27
Tabla 3.1	Resumen de resultados de simulación de circuitos simulados. ....	46
Tabla 3.2	Resultados de sensibilidad al variar valores de $R_{s1}$ en el circuito 1 (Rayo). ....	58
Tabla 3.3	Resultados de sensibilidad al variar valores de $R_{s1}$ en el circuito A (Maniobra)....	58
Tabla 3.4	Resultados de sensibilidad al variar valores de $R_{s2}$ en el circuito B (Rayo).....	58
Tabla 3.5	Resultados de sensibilidad al variar valores de $R_{s2}$ en el circuito B (Maniobra).....	59
Tabla 3.6	Resultados de sensibilidad al variar valores de $R_p$ en el circuito A (Rayo).....	59
Tabla 3.7	Resultados de sensibilidad al variar valores de $R_p$ en el circuito A (Maniobra).....	59
Tabla 3.8	Resultados de sensibilidad al variar valores de $R_p$ en el circuito B (Rayo).....	60

Tabla 3.9	Resultados de sensibilidad al variar valores de $R_p$ en el circuito B (Maniobra).....	60
Tabla 3.10	Resultados de sensibilidad al variar valores de $C_c$ en el circuito A (Rayo). .....	60
Tabla 3.11	Resultados de sensibilidad al variar valores de $C_c$ en el circuito A (Maniobra).....	61
Tabla 3.12	Resultados de sensibilidad al variar valores de $C_c$ en el circuito B (Rayo). .....	61
Tabla 3.13	Resultados de sensibilidad al variar valores de $C_c$ en el circuito B (Maniobra).....	61

## INTRODUCCIÓN

### Contextualización

El rápido crecimiento por el uso de energía conlleva a un mejoramiento de los equipos del sistema de energía con un alto nivel de fiabilidad y seguridad (Davalos, 2012), una de las partes más importantes de los equipos eléctricos es el aislamiento también conocido como dieléctrico. Los aislantes son ampliamente utilizados en los componentes de una red eléctrica tales como interruptores, transformadores, cables, equipos, entre otros.

Los generadores de impulso se emplean para verificar o investigar el comportamiento de los equipos y aislamientos ante sobretensiones (textoscientificos .com, 2015), las ondas de tensión de impulso tipo rayo empleadas en los ensayos son ondas completas, de evolución y duración similar a la del rayo, las cuales permiten verificar la capacidad de soporte del aislamiento ante dicha condición.

El entorno global de la problemática en estudio abarca lo concerniente a los estándares internacionales para las pruebas de alto potencial y hacia donde se orienta actualmente la investigación, las mejoras de los equipos y sus formas de aplicación (Fitzgerald, A. E. 2016).

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) para generación cd, 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. (Arango, 2014)

Actualmente los simuladores de impulsos son una buena herramienta de enseñanza, que permiten a los estudiantes entender la influencia de los parámetros del circuito sobre la forma de onda, además sirven de guía a los ingenieros y personal de pruebas para alcanzar los

valores de los parámetros cuando se aplican a diversos tipos de cargas (Internacional Electrotechnical Comisión (IEC), 2007)

Los impulsos de tensión se clasifican en frente lento y rápido. Los de frente lento son causados generalmente por maniobras de enganche y desenganche de interruptores, mientras que los de frente rápido son atribuidos principalmente a los efectos del rayo. (Webstore Internacional Electrotechnical Comisión, 2010)

Las sobretensiones transitorias, correspondientes a la evolución de las sobretensiones entre dos estados de funcionamiento permanente, típicamente se subdividen en internas al sistema eléctrico (maniobra, etc.) o externas al mismo (rayo, origen electrostático, explosiones nucleares). Se caracterizan por formas de onda aperiódicas tipo impulso o choque, con tiempos de ascenso que van desde un nanosegundo hasta un milisegundo y comprenden tiempos de descenso que van desde una centena de nanosegundos hasta un segundo. (Michel Aguet, 2005)

### **Formulación del Problema**

¿Cómo simular un generador de impulsos de voltaje para pruebas de aislamiento de materiales dieléctricos y dispositivos?

### **Objetivos**

#### **Objetivo General**

Analizar la simulación de un generador de impulsos para realizar pruebas de aislamiento de materiales dieléctricos y dispositivos.

## **Objetivos Específicos**

- Realizar una investigación teórica, recopilando información acerca de generadores de impulso.
- Realizar el diseño conceptual del generador de impulsos y todos sus elementos.
- Evaluar la simulación del generador de impulsos y su manipulación.

## **Justificación**

Los generadores de impulsos de tensión se definen como equipos necesarios para realizar ensayos a los sistemas de aislamiento eléctrico (IEC International Electrotechnical Comision, 2017), y las pruebas de alto potencial son parte importante de los estándares de calidad a los que son sometidos los diferentes tipos de materiales y equipos eléctricos antes de ponerlos en operación o de venta en el mercado.

Por el costo y el tamaño de los equipos comerciales se decidió simular un generador de impulsos portátil para ejecutar experimentos y estudios de aislamiento. Con la simulación del equipo se podrá complementar los conocimientos teóricos adquiridos, generando un mejor criterio y soluciones a cualquier problema presentado respecto a los diferentes sistemas de aislamiento eléctricos.

## **Alcance**

Con el siguiente trabajo, se desea simular un generador de impulso de voltaje portátil proyectado a parámetros de generadores comerciales con un valor de tensión moderado pero suficiente para la realizar pruebas, será configurable dependiendo de las necesidades del usuario.

Se realizará el análisis de funcionamiento con el cual se podrá realizar pruebas de aislamiento de materiales dieléctricos y equipos dentro del rango de voltaje permitido.

Por consiguiente, se podrá usar para fines investigativos, académicos y para ensayos reales en un rango de voltaje que va hasta 20 kV(máx.).

## **Viabilidad del trabajo**

Para el estudio en elementos con niveles básicos de aislamiento o en rangos inferiores los generadores de impulso comerciales no son la mejor opción por su costo y tamaño requerirían de instalaciones especiales para su uso. En el mercado existen simuladores o generadores portátiles en rango de tensiones requeridos para experimentación académica.

Actualmente existen instituciones acreditadas internacionalmente, por ejemplo: La American Society for Testing of Materials (ASTM) o Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) y International Electrotechnical Commission (I.E.C.) que se ocupan de fijar, publicar normas y procedimientos referidos al funcionamiento de equipos eléctricos y ensayo de diversos materiales. Estas ayudan como guía para realizar pruebas y ensayos reales o en simuladores facilitados en diferentes sitios web como herramientas de aprendizaje.

Se determino la opción de simular un generador de impulsos para realizar pruebas y ensayos de diferentes materiales dieléctricos o dispositivos representados por medio de simulación que cumplan con el nivel de aislamiento requeridos para dichas pruebas.

# CAPITULO 1

## 1 FUNDAMENTO TEORICO

### **Normatividad empleada para el desarrollo de este trabajo.**

Los documentos y normas referenciadas son indispensables para el desarrollo de este trabajo, por lo que cada documento de referencia se cita en el texto en este documento con su respectiva relación.

Las normas utilizadas en este trabajo son expedidas por instituciones como por ejemplo IEEE, IEC, ASTM (citadas correspondientemente) entre otras, las cuales brindan a detalle los procedimientos y lineamientos que se debe cumplir al momento de realizar pruebas de alto voltaje y específicamente dedicados para la investigación de este documento que se centra en la generación de impulsos de voltaje, normas las cuales indican los requisitos específicos que deben cumplir los impulsos de voltaje del tipo rayo y los impulsos de voltaje del tipo maniobra con su respectivas pruebas de verificación.

### **1.1 Impulsos de tensión.**

Según (Daniel, 2014), los impulsos son definidos como perturbaciones (picos) de tensión, con un tiempo de duración del orden de microsegundos. Un impulso tiene una variación brusca que se presenta en las líneas de transmisión o de alimentación.

Estas perturbaciones aparecen en cualquier punto de la red y se propagan a través de ella a una velocidad que depende de la naturaleza del impulso.

El impulso se atenúa a medida que se aleja del punto de generación.

Pueden llegar a tener un valor muy alto (kV kilovoltios) superior al valor nominal y su duración oscila entre algunos microsegundos y unos 10 milisegundos (medio ciclo de la onda senoidal).

### **1.2 Clasificación de los impulsos de tensión.**

Según el ciclo de la onda en el cual se produzcan, los impulsos pueden ser positivos o negativos ( IEEE Std 4-1978, ANSI/IEEE).

#### **a) Los impulsos de tensión se clasifican en frente lento y rápido:**

- 1. Frente lento:** La mayoría de las veces son causados por maniobras de enganche y desenganche de interruptores.

2. **Frente rápido:** Son atribuidos principalmente a los efectos del rayo o fenómenos atmosféricos.

**b) Según su naturaleza y forma se clasifican en:**

1. **Simples:** Presentan un frente de subida y otro de bajada y sin oscilaciones.
2. **Complejos:** Se caracterizan por un frente de subida seguido de oscilaciones que van amortiguándose en un periodo determinado de tiempo.

**c) Parámetros característicos**

1. **Tiempo de subida:** Intervalo de tiempo existente entre el 10% y el 90% de la amplitud máxima del impulso. Valor del orden de microsegundos.
2. **Tiempo de bajada:** Intervalo existente entre el punto de amplitud máxima del impulso y un valor determinado de su decrecimiento, normalmente el 50%. Valor del orden de microsegundos.
3. **Duración:** Diferencia absoluta entre los instantes de inicio y final del impulso. Valor que oscila entre varios microsegundos y algunos milisegundos.
4. **Valor de pico:** Amplitud máxima del impulso. Su valor es de 1 a 5 veces el valor nominal de la tensión.
5. **Energía:** Capacidad de disipación de la potencia del impulso sobre una impedancia dada. Depende de la duración y el valor de pico.
6. **Frecuencia de oscilación:** Frecuencia asociada a la amortiguación de un impulso de forma compleja. Su valor se sitúa por encima de 1 kHz.

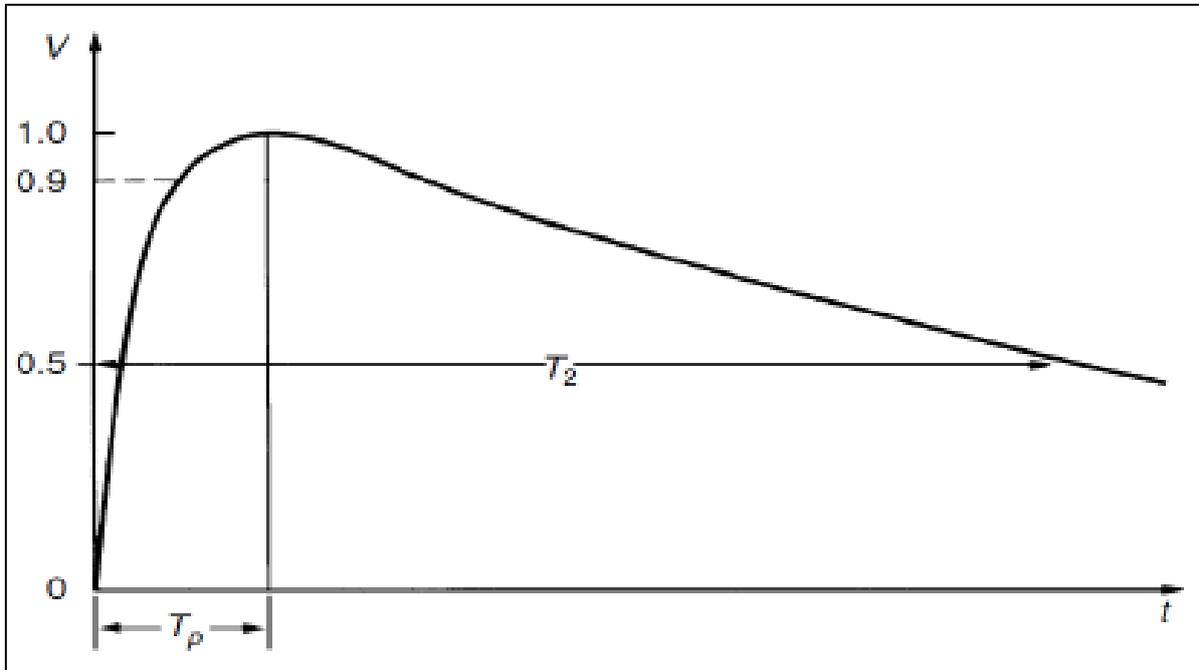
### 1.3 Impulso normalizado

Según (Ramírez, 2012) un impulso de tensión puede ser una tensión transitoria o permanente, estas sobretensiones pueden tener diferentes formas y se han estandarizado algunas de ellas según normas internacionales e instituciones como ANSI/IEEE, (Norma American Estándar, C68.1-1968 Measurement of Voltage in Dielectric Test), (IEC Estándar 60060-1, 1989). A continuación, se detalla las características de impulso normalizado tipo maniobra e impulso normalizado tipo rayo.

#### 1.3.1 Impulso normalizado tipo maniobra.

El impulso normalizado tipo maniobra es un impulso completo que se caracteriza por tener un tiempo frontal de 250  $\mu$ s y un tiempo medio de 2500  $\mu$ s, se define como un impulso positivo o negativo cuya amplitud máxima establecida fluctúa en un rango de  $\pm 3\%$  registrando en el ascenso un tiempo cresta  $T_{cr}$  (o pico  $T_p$ ) en el rango de 250  $\mu$ s  $\pm 20\%$  y para el 50% de su

valor de cresta en el descenso un tiempo de cola  $T_2$  ( $T_c$  o  $T_t$ ) en el rango de  $2500 \mu\text{s} \pm 60\%$ , se lo describe como un impulso 250/2500. (Norma American Estándar, C68.1-1968 Measurement of Voltage in Dielectric Test), en la Figura 1 se muestra la onda característica de un impulso tipo maniobra.



.3

Figura 1. Curva característica del impulso tipo maniobra  
Fuente: Santiago Gómez Arango 2013

### 1.3.2 Impulso normalizado tipo rayo.

El impulso normalizado tipo rayo es un impulso completo que se caracteriza por tener un tiempo frontal de  $1,2 \mu\text{s}$  y un tiempo a valor medio de  $50 \mu\text{s}$ , se define como un impulso positivo o negativo cuya amplitud máxima establecida fluctúa en un rango de  $\pm 3\%$ , registrando tiempos de frente que transcurre entre el 30% y el 90% de su valor máximo en el rango de  $1,2 \mu\text{s} \pm 30\%$  y de cola en el rango de  $50 \mu\text{s} \pm 20\%$  cuando la tensión desciende al 50% de su valor pico, se lo describe como un impulso 1,2/50. (Norma American Estándar, C68.1-1968 Measurement of Voltage in Dielectric Test).

El tiempo de frente  $T_1$  (o  $T_f$ ) del impulso tipo rayo, es determinado al escalar  $T$  y por un factor de 1,67, donde  $T$  es el intervalo de tiempo medido (en el flanco ascendente) entre los instantes de tiempo en que se alcanza el 30% y el 90% de la tensión pico entregada por el generador. El tiempo de cola  $T_2$ , es medido desde el origen virtual  $O_1$  o  $T_0$  (abscisa a partir de

la cual se miden los tiempos  $T_1$  y  $T_2$ , hasta cuando la tensión alcanza el 50% de la tensión nominal de la onda en el flanco descendente. (ENGINEERS, 2011), en la Figura 2 se muestra la forma de onda característica de un impulso de voltaje tipo rayo.

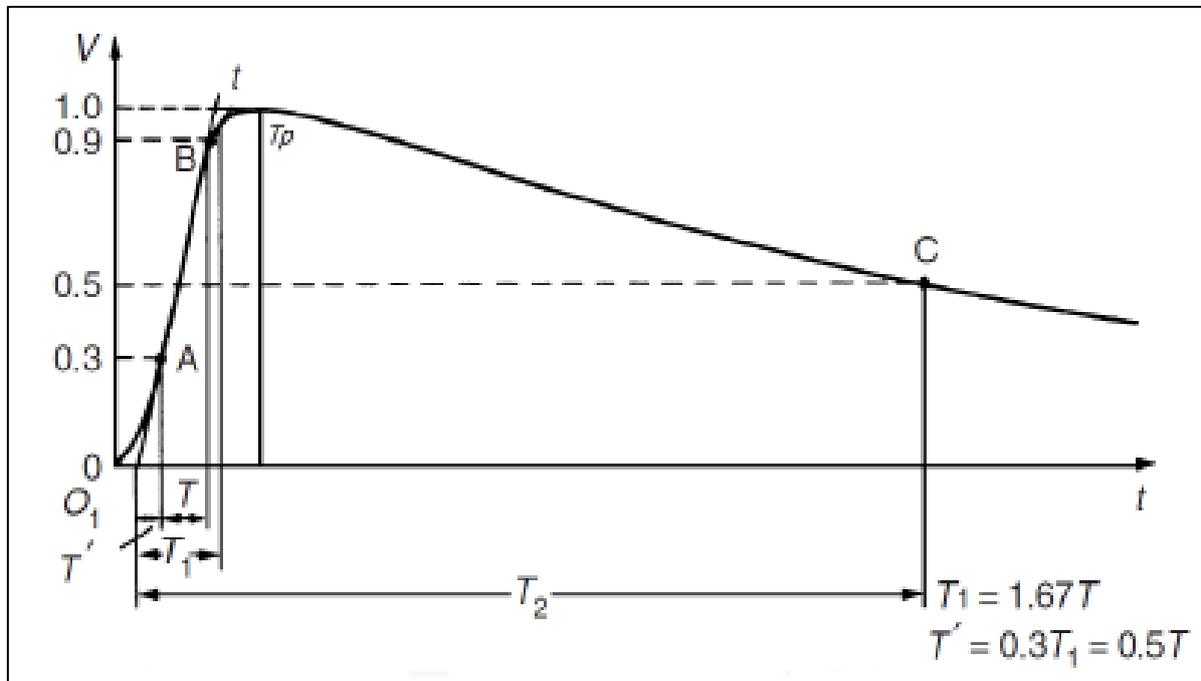


Figura 2. Curva característica del impulso tipo rayo  
Fuente: Santiago Gómez Arango (2013)

#### 1.4 Generador de impulso.

El circuito básico de un generador de impulso fue diseñado por el ingeniero Erwin Otto Marx en 1924 de ahí su nombre, el generador de impulsos de tensión tipo Marx es la manera más común para producir ondas eléctricas que simulen las formas y características que tiene un impulsos de alta tensión, facilitando realizar las pruebas de aptitud de aislaciones eléctricas al momento de analizar el comportamiento de las señales de onda tipo impulso ya sea tipo rayo (1,2/50 $\mu$ s) o tipo maniobra (250/2500 $\mu$ s).

Cabe mencionar que además existir impulsos voltaje del tipo rayo o maniobra, existen diferentes tipos de impulso, como por ejemplo los producidos por generadores de descargas electrostáticas para la industria de semiconductores el cual genera impulsos típicos considerados en instalaciones eléctricas de baja tensión, impulsos de corriente para telecomunicaciones, etc. Generadores que a pesar de no ser tema de estudio en este trabajo se encuentran normalizados con sus respectivas ondas y tiempos según (Arango, 2014).

### 1.5 Generador de impulso de una etapa.

La investigación y el estudio en el campo de las sobretensiones han llegado a determinar que se las puede representar mediante impulsos unidireccionales y producirlos a través de circuitos resultados de años de investigación.

Los generadores impulso de una etapa son circuitos simples los cuales se componen de dos funciones exponenciales que se obtienen mediante un circuito de segundo orden que contiene dos elementos almacenadores de energía (Castillo, 2014). Circuitos de una etapa como los presentados en la Figura 3.

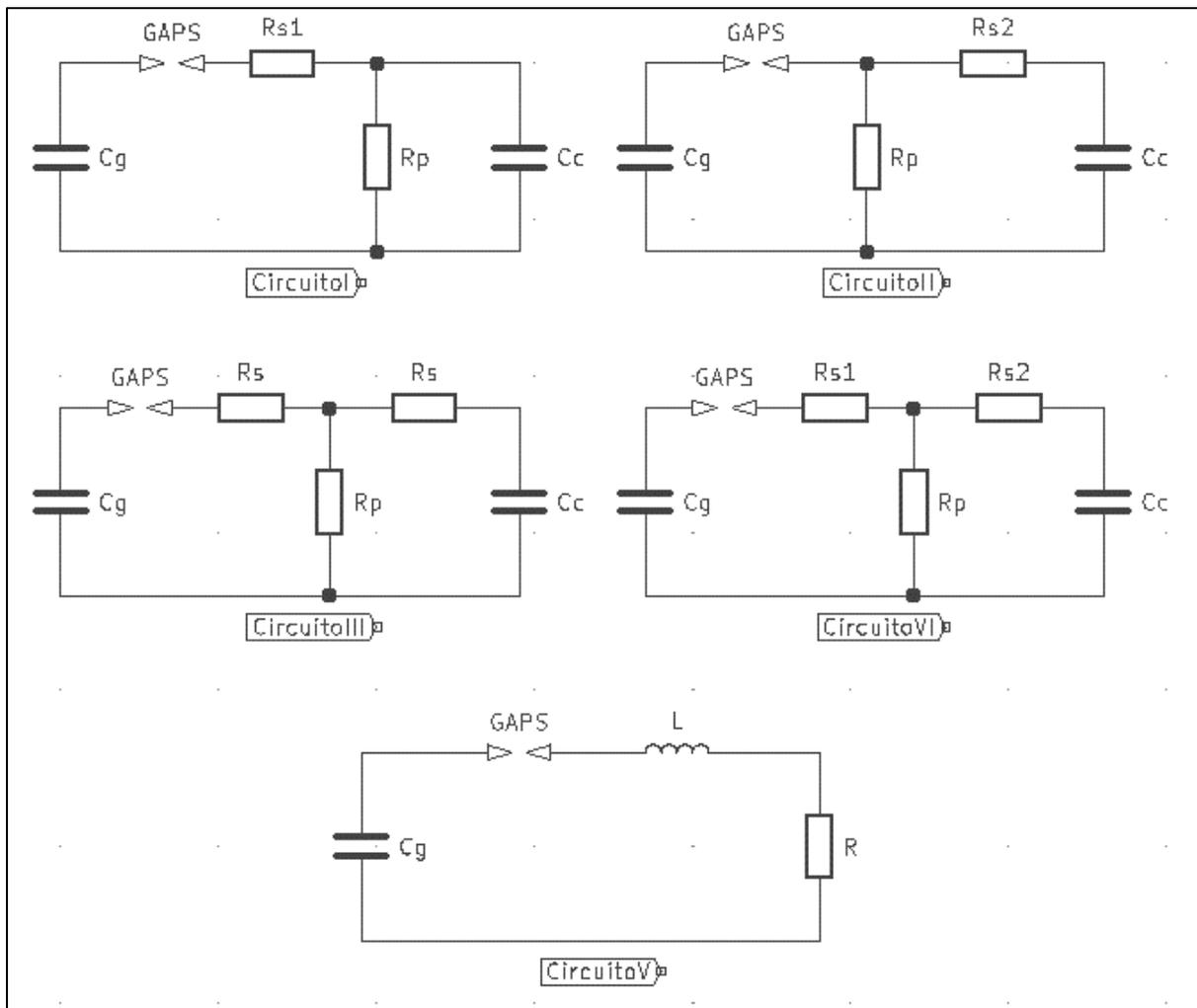


Figura 3. Circuitos de generadores de impulsos de tensión de una etapa  
Fuente: S. Gomez., M.P. Buitrago, F.A. Roldan. (2011)

Para (Rincon & Garcia, 2009) el método más común utilizado por este tipo de generadores para el inicio de descarga del circuito es el denominado explosor de esferas (gaps) o conocido como interruptor de aire y que de igual manera actúa de limitador de tensión (rompiendo la

rigidez dieléctrica del aire), es decir establece un arco eléctrico entre las esferas del explosor. De esta manera la tensión de  $C_g$  es transmitida hacia el capacitor  $C_c$  el cual representa el objeto que se va a poner a prueba.

Al analizar el circuito I de la Figura 3 considerado como circuito básico y general, se comprende que el capacitor de carga representado por  $C_g$  es cargado por tensión suministrada por una fuente DC de polaridad positiva o negativa, omitida en la Figura 3, siendo descargado hacia el circuito formado por las resistencias ( $R_{S1}$  o  $R_{S2}$ ),  $R_p$  y el capacitor de descarga representado por  $C_c$ . Produciéndose de esta manera la onda de impulso.

Los circuitos capacitivos y resistivos de la Figura 3 se caracterizan porque tienen relación en la cual los capacitores  $C_g \gg C_c$  y las resistencias  $R_p \gg R_{S1}$  o  $R_{S2}$ . El circuito formado por  $C_c - (R_{S1}$  o  $R_{S2})$  influyen hacia el tiempo de frente de onda y el circuito de  $C_g - R_p$  influyen al tiempo de cola de onda (Arango, 2014).

### **1.6 Generador de impulsos de voltaje multietapa Marx.**

(Rincon & Garcia, 2009) dicen que, con el pasar del tiempo y el avance tecnológico se necesitó incrementar el valor para las pruebas de impulso, por lo cual el esquema básico de generador de impulso de una etapa de la Figura 3 no podía generar este tipo de señales, ya que se necesitarían capacitores que soporten mayor tensión de carga y de igual manera se necesitaría una fuente de tensión para la carga de los capacitores que debe ser de mayor valor, lo cual era costoso y difícil de realizar tecnológicamente en ese tiempo.

Para solucionar este problema el ingeniero E. Marx determino que el método más sencillo para incrementar la tensión y poder realizar las pruebas de impulso la solución era utilizar múltiples etapas de los circuitos básicos presentados en la Figura 3.

(Electrical Teting Group, 2009) dice que, este tipo de generador está constituido por  $n$  etapas en donde, cada uno de los condensadores  $C_g$  correspondientes a cada una de las etapas son cargados en paralelo con la tensión DC requerida, se descarga a través de la resistencia de frente  $R_{S1}$ , de cola  $R_p$  y de carga  $R_c$ , esta última resistencia debe ser de un valor superior a las demás de algunas decenas de kohms ( $\Omega$ ).

Además, cuando el potencial de carga llega al límite de ruptura del primer explosor (GAPS), inmediatamente rompen todos los demás, formando un circuito en serie que finaliza con la descarga en el equipo bajo prueba a continuación en la Figura 4 se muestra un ejemplo de un esquema de un generador de impulsos de multietapas tipo Marx.

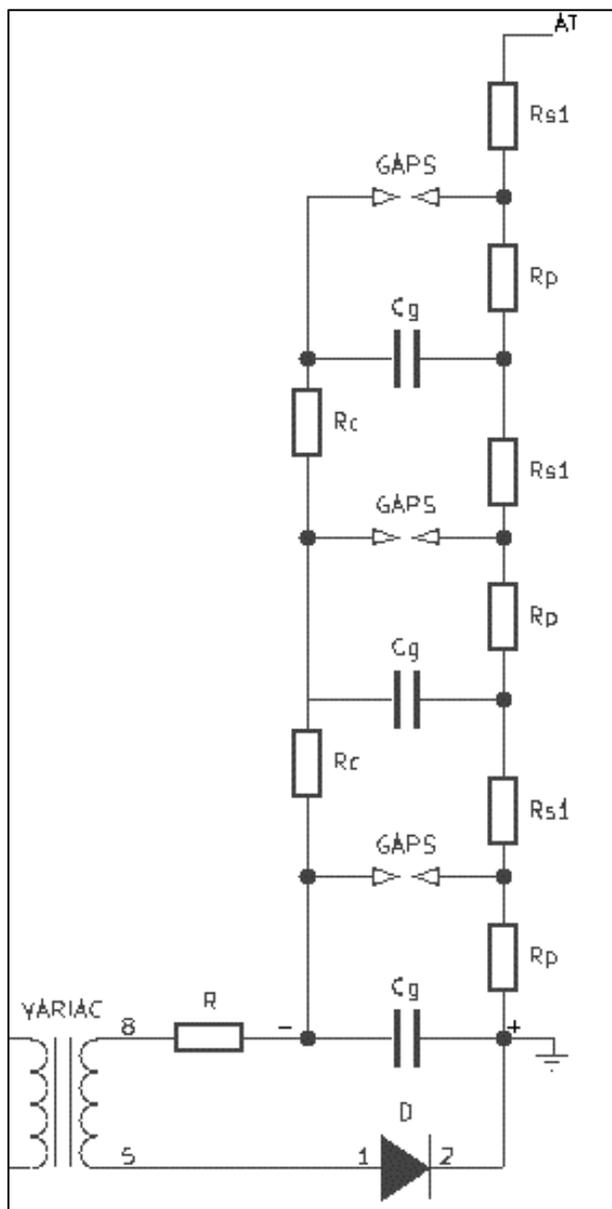


Figura 4. Esquema de un generador de impulsos de tensión multietapa tipo MARX.  
Fuente: Diego Fernando García (2010)

## CAPITULO 2

### Diseño conceptual del generador de impulsos y todos sus elementos.

- Fundamentos matemáticos
- Elementos de un generador de impulsos
- Selección de elementos para un generador de impulsos hasta 20 kV (Max)

Para el siguiente capítulo se expondrá los fundamentos matemáticos analizando el circuito del generador de impulsos de una etapa para la obtención de los elementos principales de un generador de impulsos con sus respectivos valores, los tiempos de ondas establecidos por normativa, los tiempos de carga, etc. Esto se realizará a partir de los circuitos A y B de la Figura 5 considerados esquemas básicos para generar impulsos de voltaje del tipo rayo y del tipo maniobra.

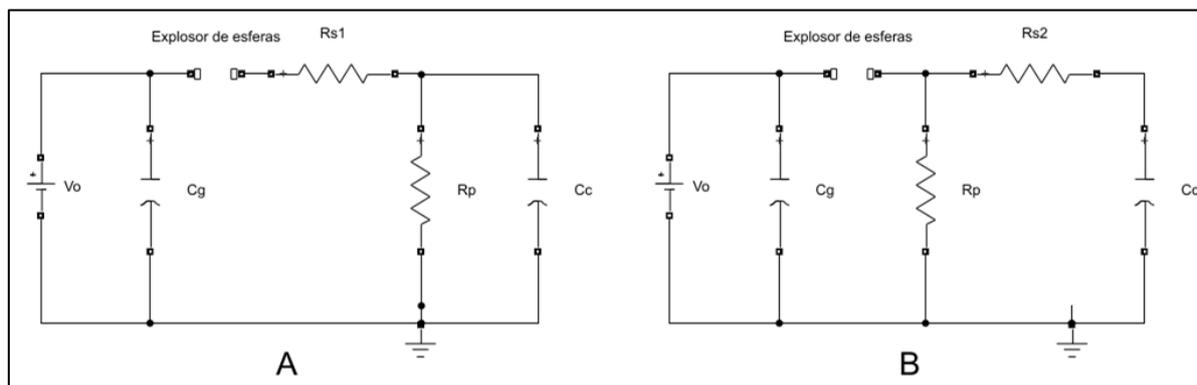


Figura 5. Circuitos A y B esquemas básicos para un generador de impulsos de voltaje.  
Fuente: Daniel Betancourt M. (2014)

Además, se propone el dimensionamiento del generador de impulsos de una etapa con materiales comunes de fácil acceso en el mercado mediante parámetros de generadores comerciales y basándose en estudios previos, con el objetivo de ser una guía básica para experimentación en un laboratorio de electricidad y poder realizar una implementación física del generador de impulsos.

A continuación, en la Figura 6 se muestra un diagrama de flujo resumido indicando todos los puntos a tratar en el Capítulo 2.

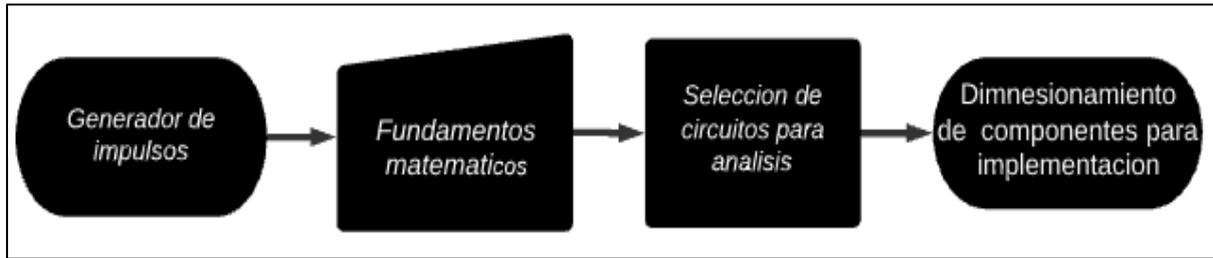


Figura 6. Diagrama de flujo del capítulo 2  
Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)

## 2.1 Fundamentos del generador de impulsos de una etapa.

Como se puede observar en la Figura 3 del Capítulo 1, existen más de un circuito para generar impulsos de voltaje, pero de entre estos diagramas destacan los circuitos 1 y 2 debido a su sencillez, resultados y bajo costo al conseguir los elementos en caso de realizar una experimentación a través de una implementación.

A continuación, se muestra los fundamentos matemáticos del generador de impulsos de voltaje de una etapa. El análisis se enfocará en los circuitos A y B de la Figura 5 definidos como circuitos clásicos para generación de ondas de impulso, conformados ambos por resistencias ( $R_{s1}$  o  $R_{s2}$ : "Resistencias de frente de onda"), ( $R_p$ : "Resistencias de cola de onda"), un capacitor de carga ( $C_g$ ), en capacitor de descarga ( $C_c$ ) que simula una carga capacitiva y el explosor de esferas, pero el diseño y el modelo cambiarán dependiendo de la carga que se requiera conectar a la salida del generador de impulsos (Araneda, 2017).

Al analizar los esquemas básicos de la Figura 5, circuitos para la generación de impulsos tipo rayo y tipo maniobra se obtiene como primer dato el valor del capacitor  $C_g$  (elemento principal que forma parte del generador y define la tensión que soportara el equipo), el cual es cargado con tensión continua de polaridad positiva y negativa.

A continuación  $C_g$  es descargado súbitamente por el circuito conformado por el capacitor de descarga  $C_c$  y formado por las resistencias  $R_{s1}$  y  $R_p$ . La descarga sucede al instante en el que se rompe la rigidez dieléctrica del aire entre explosores (espinterómetro o gaps) ocurriendo un arco eléctrico que transfiere la carga de  $C_g$  hacia  $C_c$  el cual es considerado el objeto de prueba al cual se realiza la descarga (E. Kuffel, 2000) (T. Gallagher, 1973).

La expresión matemática del impulso de voltaje estándar se la representa a continuación en la Ecuación (1):

$$V = V_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1)$$

Donde:

$V_0$  es la tensión para carga del capacitor  $C_g$ .

$\alpha$  y  $\beta$  son las raíces de la ecuación que caracterizan al sistema, en donde al obtener los inversos se obtiene las constantes de tiempo entre unos microsegundos en los circuitos.

Entonces si los valores capacitivos y resistivos de la Figura 5 son constantes y los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  de la Ecuación (1) son diferentes entre sí, se pueden analizar por separado dos circuitos los cuales son los que definen el tiempo de frente y el tiempo de cola de onda como indica en la Figura 7 (E. Kuffel, 2000).

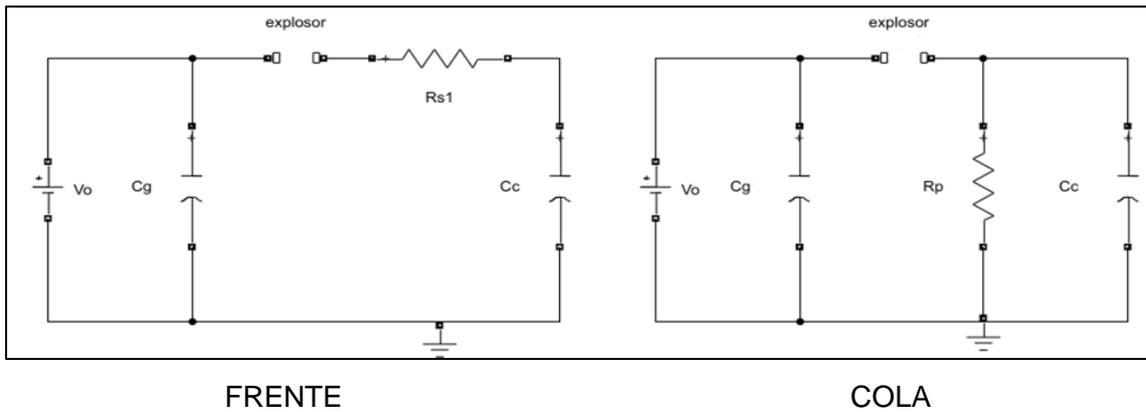


Figura 7. Circuitos para análisis de onda de frente y cola.  
Fuente: Daniel Betancourt M. (2014)

Al analizar en la Figura 7 el circuito de frente de onda, al momento que ocurre la descarga entre el explosor, espinterómetro (gaps), el capacitor  $C_c$  se carga con la constante de tiempo  $T_1$ , como la Ecuación (2):

$$-\frac{1}{\beta} = T_1 = R_{S1} \frac{C_g \cdot C_c}{C_g + C_c} \quad (2)$$

Y se la define como el resultado de la resistencia de frente  $R_{S1}$  con la capacidad equivalente serie de los capacitores  $C_g$  y  $C_c$ . Y se asume que  $C_g \gg C_c$  quedando la relación simplificada a la Ecuación (3):

$$T_1 \cong R_{S1} \cdot C_c \quad (3)$$

Indicando la duración del frente de la onda de tensión en el capacitor  $C_c$  y es directamente proporcional a la resistencia de frente  $R_{S1}$  y a la capacidad del objeto de prueba en este caso el capacitor  $C_c$ .

Al analizar el proceso en el circuito de cola de la Figura 7 justo en el momento que se da la transferencia de carga de  $C_g$  a  $C_c$  se obtiene cero al instante (por redistribución de la carga entre ambos capacitores), luego sucede la descarga en la resistencia  $R_p$  con una constante de tiempo  $T_2$  como indica la Ecuación (4).

Simplificando, sabiendo que  $C_g \gg C_c$  se obtiene la Ecuación (4):

$$T_2 \cong R_p \cdot C_g \quad (4)$$

Que depende proporcionalmente de la resistencia de cola  $R_p$  y la capacidad  $C_g$ .

Es importante resaltar que al obtener los valores de  $C_g$ ,  $C_c$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  es posible, por lo menos obtener una aproximación de los valores requeridos de  $R_{s1}$  y  $R_p$  para obtener la forma de onda de voltaje de impulso ya sea tipo rayo o tipo maniobra (E. Kuffel, 2000), (T. Gallagher, 1973).

Al analizar el circuito A de la Figura 5, en el momento en que ocurre la transferencia de energía entre los capacitores  $C_g$  y  $C_c$  se obtiene la Ecuación (5) en dominio de la frecuencia:

$$V_{(s)} = \frac{V_0}{k} * \frac{1}{(S^2 + a * S + b)} \quad (5)$$

Donde  $a$  es igual a la Ecuación (6):

$$a = \left( \frac{1}{R_{s1}C_g} + \frac{1}{R_{s1}C_c} + \frac{1}{R_pC_c} \right) \quad (6)$$

Donde  $b$  es igual a la Ecuación (7):

$$b = \left( \frac{1}{R_{s1}R_pC_gC_c} \right) \quad (7)$$

Donde  $k$  es igual a la Ecuación (8):

$$k = R_{s1}C_c \quad (8)$$

Por lo tanto, se obtiene para la ecuación en el dominio del tiempo, el voltaje de salida en el capacitor  $C_c$  es como la Ecuación (9).

$$V_{(t)} = \frac{V_0}{k} \frac{1}{(\alpha_1 - \alpha_2)} [e^{(-\alpha_1 t)} - e^{(-\alpha_2 t)}] \quad (9)$$

Donde  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  son raíces de la ecuación  $S^2 + a * S + b = 0$  o como la Ecuación (10).

$$\alpha_1, \alpha_2 = \frac{a}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 - b} \quad (10)$$

Sabiendo que el voltaje en  $C_c$  es  $V(t)$ , y es la superposición de dos funciones exponenciales de señales diferentes. En la Ecuación (10) la respuesta negativa de la raíz resulta una constante de tiempo más grande, que es  $1/\alpha_1$ , que el tiempo positivo que es  $1/\alpha_2$ . En la Figura 8 indica como se puede expresar la Ecuación (10) y una comparación entre las Figuras 1 y 2 demuestran la posibilidad de generar ambos tipos de impulsos de voltaje con los circuitos de la Figura 6 (Araneda, 2017).

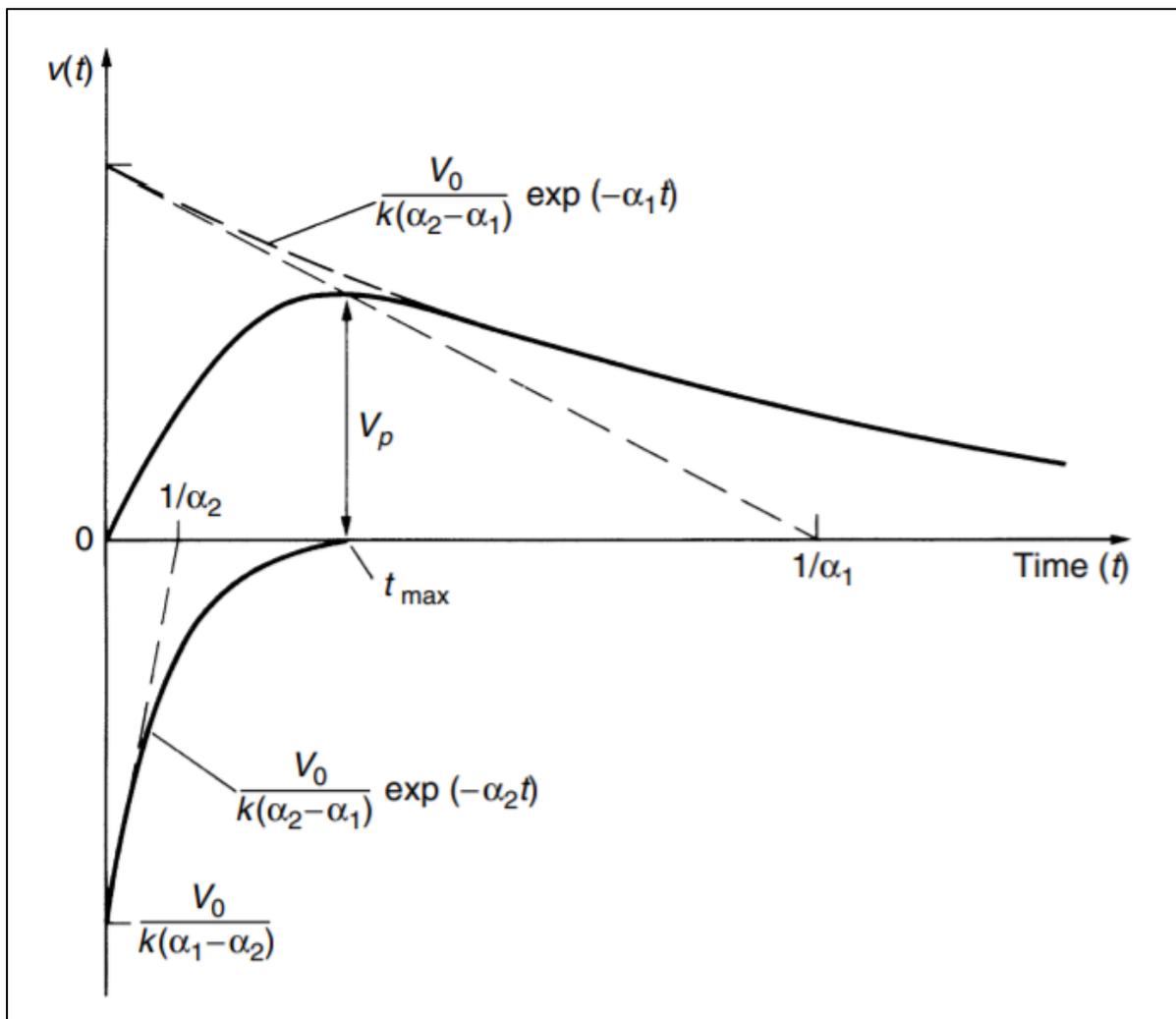


Figura 8. Onda de impulso de voltaje y sus componentes según circuitos de la Figura 5.  
Fuente: (E. Kuffel, 2000)

Al suponer que ambos circuitos de la Figura 6 son equivalentes, se puede observar una diferencia notable de resultados si se calcula la eficiencia del voltaje. La eficiencia está definida como la Ecuación (13).

$$\eta = \frac{V_p}{V_o} \quad (11)$$

Donde:

$V_p$  es el valor pico del voltaje de salida del generador como se observa en la Figura 8. Este valor es siempre menor que el 1 o el 100 por ciento además se puede calcular encontrando  $t_{max}$  a partir de  $dV/dt = 0$ , esta vez para que el voltaje  $V(t)$  llegue a su valor pico viene dado por la Ecuación (12).

$$t_{max} = \frac{\ln(\alpha_2/\alpha_1)}{(\alpha_2/\alpha_1)} \quad (12)$$

Al sustituir la Ecuación (12) en la Ecuación (9) se obtiene:

$$\eta = \frac{(\alpha_2/\alpha_1)^{[(\alpha_2/\alpha_1 = \alpha_1)]} - (\alpha_2/\alpha_1)^{[(\alpha_2/\alpha_2 = \alpha_1)]}}{k(\alpha_2 - \alpha_1)} \quad (13)$$

Para la forma de ondas de impulso dada por  $T_1/T_2$  o  $T_p/T_2$  de las tensiones de impulso, los valores de  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  deben ser iguales. Las diferencias en la eficiencia n solo puede darse al diferenciar en el valor de  $k = (Rs_1 \text{ o } Rs_2)C_c$  para los dos circuitos. Se puede calcular este término para el circuito B de la Figura 6, dado que siempre tiene mayor eficiencia para una relación dada de  $C_c / C_g$ , ya que durante la descarga las resistencias  $Rs_2$  y  $R_p$  no forman un sistema de división de voltaje.

El producto de  $Rs_2C_c$  es encontrado por la Ecuación (10) formando:

$$\alpha_1 \cdot \alpha_2 = b \quad (14)$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 = a \quad (15)$$

Entonces con la sustitución de  $a$  y  $b$  en las Ecuaciones (7) y (8) se obtiene la Ecuación (16):

$$k = Rs_2C_c = \frac{1}{2} \left( \frac{\alpha_2 + \alpha_1}{\alpha_2 \cdot \alpha_1} \right) \left[ 1 - \sqrt{1 - 4 \frac{\alpha_2 \cdot \alpha_1}{(\alpha_2 + \alpha_1)^2} \left( 1 + \frac{C_c}{C_g} \right)} \right] \quad (16)$$

Si  $C_c \leq C_g$  esta condición se cumple en todos los circuitos prácticos y con  $\alpha_2 \gg \alpha_1$  para todas las formas de ondas normalizadas, se puede simplificar quedando la Ecuación (17).

$$k \cong \frac{1 + C_c/C_g}{(\alpha_2 + \alpha_1)} \quad (16)$$

Al sustituir esta expresión en la Ecuación (13) se obtiene:

$$\eta = \frac{C_g}{(C_g + C_c)} = \frac{1}{1 + (C_c/C_g)} \quad (17)$$

Si de nuevo se toma en cuenta la desigualdad  $\alpha_2 \gg \alpha_1$ , la eficiencia de voltaje de este circuito aumentara continuamente, si  $(C_c/C_g)$  bajan a cero. En la Ecuación se indica la razón por la cual la capacitancia de descarga  $C_g$  debe ser mucho mayor que la carga de  $C_c$ .

En el circuito A de la Figura 6 el caculo de  $\eta$  puede basarse en la sustitución de  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  en la Ecuación (13) de la Ecuación (10), y un tratamiento de la relación de  $(R_{S_1} \text{ o } R_{S_2}) / R_p = f(C_c/C_g)$ , que aumenta considerablemente con valores decrecientes de  $C_c/C_g$ . Con aproximaciones menores y la desigualdad  $\alpha_2 \gg \alpha_1$  se puede encontrar el resultado.

$$\eta \cong \frac{C_g}{(C_g + C_c)} \frac{R_p}{(R_{S_1} \text{ o } R_{S_2} + R_p)} = \frac{1}{(1 + C_c/C_g)} \frac{1}{(1 + R_{S_1} \text{ o } R_{S_2}/R_p)} \quad (18)$$

Al comparar con la Ecuación (17) se muestra una disminución en  $\eta$  debido a factores como la relación  $R_{S_1} \text{ o } R_{S_2}/R_p$  que dependen de la forma de onda, solo se pierde la dependencia simple de  $(C_c/C_g)$ .

Para un impulso normalizado de 1,2 / 50  $\mu$ s e impulsos similares de voltaje de aumento rápido de  $R_{S_1} \text{ o } R_{S_2}/R_p$  conduce a una disminución de  $\eta$  para  $C_c/C_g \approx 0.1$ ; por lo tanto, la eficiencia se mueve a través de un valor optimo y disminuye con valores altos de  $C_c/C_g$  y de igual manera para valores pequeños. Incluso se puede demostrar que la relación de  $C_c/C_g$  con valores pequeños el circuito no funcionara.

Ya en la práctica ambos circuitos de la Figura 6 se utilizan, sin embargo, a menudo en forma mixta y de forma modificada. La resistencia de frente  $(R_{S_1} \text{ o } R_{S_2})$  se subdividen a menudo, principalmente en generadores multietapa.

Sin embargo la eficiencia depende de los factores de voltaje  $\eta$  que se muestran e la Figura 9 para un impulso tipo rayo estándar de 1,2 / 50  $\mu$ s, y de la misma manera para otras formas de ondas.

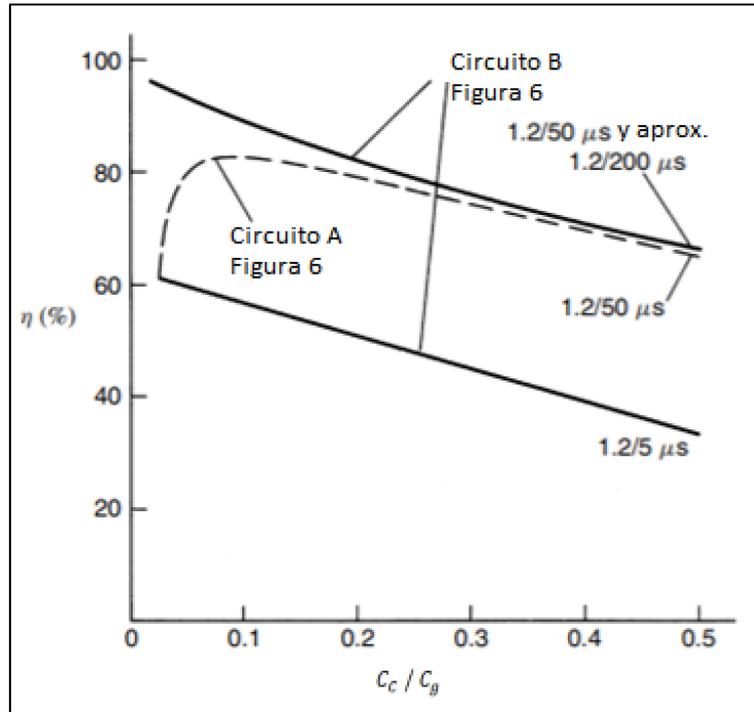


Figura 9. Factores de eficiencia de voltaje  $\eta$  en dependencia de la relación de capacitancia de  $C_c/C_g$  para impulso tipo rayo  $T_1/T_2$ .  
Fuente: (E. Kuffel, 2000)

Para dimensionar los elementos de circuito lo más común es encontrar los valores de las resistencias re frente y cola de onda ( $Rs_1$  o  $Rs_2 + R_p$ ), ya que por lo general ya se conocen los valores de los capacitores ( $C_c$  y  $C_g$ ).

Para generadores de impulso más grandes, en general siempre se proporcionan los condensadores de descarga y se los dimensiona con una buena eficiencia, ver las Ecuaciones (17) y (18) dentro de un cierto rango entorno a  $C_g$ , la capacitancia de carga total se la puede medir fácilmente si no se conoce por adelantado.

Los valores de las resistencias desconocidos se las puede calcular usando las Ecuaciones (14) y (15), los valores dependientes de los circuitos A y B de la Figura 5 a través de las Ecuaciones (7) y (8) quedando lo siguiente:

Para el Circuito A de la Figura 5 se usa la Ecuación (19) para calcular la resistencia de frente o  $Rs_1$  y la Ecuación (20) para calcular la resistencia de cola o  $R_p$  quedando de la siguiente manera:

$$Rs_1 = \frac{1}{2C_g} \left[ \left( \frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} \right) - \sqrt{\left( \frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} \right)^2 - \frac{4(C_g + C_c)}{a_1 a_2 C_c}} \right] \quad (19)$$

$$R_p = \frac{1}{2(C_g + C_c)} \left[ \left( \frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} \right) + \sqrt{\left( \frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} \right)^2 - \frac{4(C_g + C_c)}{a_1 a_2 \cdot C_c}} \right] \quad (20)$$

Para el Circuito B de la Figura 5 se puede usar la Ecuación (21) para obtener el valor de la resistencia de frente o  $R_{S_2}$  y la Ecuación (22) para obtener la resistencia de cola o  $R_p$  quedando de la siguiente manera:

$$R_{S_2} = \frac{1}{2C_g} \left[ \left( \frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} \right) - \sqrt{\left( \frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} \right)^2 - \frac{4(C_g + C_c)}{a_1 a_2 \cdot C_g}} \right] \quad (21)$$

$$R_p = \frac{1}{2(C_g + C_c)} \left[ \left( \frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} \right) + \sqrt{\left( \frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} \right)^2 - \frac{4(C_g + C_c)}{a_1 a_2 \cdot C_g}} \right] \quad (22)$$

Las Ecuaciones (19), (20), (21) y (22), contienen las constantes de tiempo  $1/a_1$  y  $1/a_2$  y que dependen del tipo de onda. Sin embargo, no existe una relación entre las constantes de tiempo y los tiempos  $T_1$ ,  $T_2$  y  $T_p$  los cuales son definidos y recomendados por instituciones internacionales como en las Figuras 1 y 2. Esta relación se la puede hallar aplicando definiciones de expresión analítica para  $V(t)$ , quedando la Ecuación (9). La relación es irracional y debe calcularse numéricamente. La Tabla 2.1 muestra el resultado de algunas formas de onda seleccionadas:

**Tabla 2.1 Relación entre el tiempo de frente, el tiempo de cola y las constantes del tiempo**

Fuente: (Mondal, 2014)

<b>RELACIÓN ENTRE EL TIEMPO DE FRENTE, EL TIEMPO DE COLA Y LAS CONSTANTES DEL TIEMPO</b>			
$T_1 / T_2$ ( $\mu\text{s}$ )	$T_p / T_2$ ( $\mu\text{s}$ )	$1 / a_1$ ( $\mu\text{s}$ )	$1 / a_2$ ( $\mu\text{s}$ )
1.2/5	---	3.48	0.80
1.2/50	---	68.2	0.405
1.2/200	---	284	0.381
250/2500	---	2877	104
---	250/2500	3155	62.5

Al tratar con ondas de impulso normalizadas tipo rayo, con un tiempo de frente de 1,2  $\mu\text{s}$ , un tiempo de cola de 50  $\mu\text{s}$  e impulso tipo maniobra con un tiempo de frente de 250  $\mu\text{s}$ , un tiempo de cola de 2500  $\mu\text{s}$ .

Entonces, al considerar la Tabla 2.1, se usarán las constantes de tiempo correspondientes para determinar los elementos de los circuitos A y B de la Figura 5.

Se puede señalar que existen otras ecuaciones válidas que permiten determinar los tiempos de frente onda y de cola de onda, observando que la resistencia de cola ( $R_p$ ) tiene un mayor valor, por lo tanto, el tiempo que se necesita para cargar es aproximadamente tres veces la constante de tiempo de los circuitos A y B de la Figura 5 según (M. Naidu, V. Kamaraju, 1996), entonces  $t_1$  (tiempo de frente) es el tiempo que tarda en cargar  $C_c$  a través de  $R_{s1}$  (recordando que es igual  $R_{s2}$ ) Ecuación (23):

$$t_1 = 3 \cdot R_{s1} C_e \quad (23)$$

Donde  $C_e$  esta dada por la ecuación (24):

$$C_e = (C_g \cdot C_c) / (C_g + C_c) \quad (24)$$

Entonces si  $R_{s1}$  esta expresada en ohms,  $C_e$  en microfarads y siendo como constantes de tiempo de carga,  $t_1$  se obtiene en microsegundos.

Por consiguiente, para determinar el tiempo de cola tenemos que la capacitancia de  $C_g$  y  $C_c$  son descargadas a través de  $R_{s1}$   $R_p$  por lo que se obtiene que el tiempo al 50% de la descarga es aproximadamente la Ecuación (25):

$$t_2 = 0.7(C_g + C_c)(R_{s1} + R_p) \quad (25)$$

A continuación, se indica un ejemplo de la obtención del valor de los elementos que componen un generador de impulsos de tensión, usando las ecuaciones revisadas a lo largo del capítulo 2.

Los métodos de resolución pueden ser varios siempre y cuando se tenga el valor de los elementos principales como los son los capacitores tanto de carga  $C_g$  y descarga  $C_c$  elementos que definen el nivel de tensión que va a soportar el generador de impulsos de voltaje, de igual manera al contar con esta información y seleccionado el tipo de impulso que se necesite generar (rayo o maniobra), usando los tiempos normalizados  $T_1$  y  $T_2$  dados en la tabla 2.1 y usando las Ecuaciones (23) y (25) es posible despejar  $R_{s1}$  o  $R_{s2}$  y  $R_p$  dando como resultado un valor aproximado de las resistencias de frente de onda y de cola de onda.

Al sustituir la Ecuación (23) con los datos de la Tabla 2.1 y de la Tabla 2.2, considerando que se necesita generar un impulso tipo rayo nos queda de la siguiente manera la Ecuación (26):

$$1,2 * 10^{-6} = 3 * R_{s1} \left( \frac{0,025 * 10^{-6} * 0,0012 * 10^{-6}}{0,025 * 10^{-6} + 0,0012 * 10^{-6}} \right) \quad (26)$$

Para obtener un valor aproximado de la resistencia de frente se despeja  $R_{s1}$  o  $R_{s2}$  en la Ecuación (26) quedando de la siguiente manera:

$$R_{s1} = \frac{1,2 * 10^{-6}(0,025 + 0,0012 * 10^{-6})}{3 * 0,025 * 10^{-6} * 0,0012 * 10^{-6}}$$

$$\mathbf{R_{s1} = R_{s2} = 349,33ohms (\Omega) = 350ohms (\Omega)}$$

Para la obtención de la resistencia de cola  $R_p$  se puede usar la Ecuación (25) y de igual manera que la resistencia de frente se la puede despejar dando como resultado un valor aproximado de la resistencia necesaria para el generador de impulsos de voltaje al reemplazar los datos de las Tablas 2.1 y 2.2 y suponiendo que se necesita generar un impulso de voltaje del tipo rayo la Ecuación (25) quedaría de la siguiente manera (27):

$$50 * 10^{-6} = 0,7(0,025 * 10^{-6} + 0,0012 * 10^{-6})(350 + R_p) \quad (27)$$

Despejando  $R_p$  de (27) se puede obtener un valor aproximado de la resistencia de cola a continuación se muestra el despeje de la resistencia de cola  $R_p$  para un impulso de voltaje tipo rayo y su resultado:

$$\frac{50 * 10^{-6}}{0,7(0,025 * 10^{-6} + 0,0012 * 10^{-6})} = 350 + R_p$$

$$\frac{50 * 10^{-6}}{0,7(2,62 * 10^{-8})} = 350 + R_p$$

$$\frac{50 * 10^{-6}}{1,83 * 10^{-8}} = 350 + R_p$$

$$2732,2 = 350 + R_p$$

$$2732,2 - 350 = R_p$$

$$\mathbf{R_p = 2384,2ohms (\Omega) = 2400ohms (\Omega)}$$

Conociendo el valor de los capacitores de carga y de descarga ( $C_g, C_c$ ), las resistencias de frente y de cola ( $R_{s1} + R_p$ ) se puede usar la Ecuación (23) para obtener

un aproximado del tiempo de frente de onda quedando resultado como se muestra a continuación:

$$t_1 = 3.350\Omega \frac{(0,025\mu F)(0,0012\mu F)}{0,025\mu F + 0,0012\mu F}$$

$$t_1 = 1,202\mu s$$

De igual manera se puede usar la Ecuación (25) para obtener el tiempo de cola de onda dando como resultado lo siguiente:

$$t_2 = 0.7(350\Omega + 2400\Omega)(0,025\mu F + 0,0012\mu F)$$

$$t_2 = 50,435\mu s$$

El método de resolución indicado puede ser aplicado a modo de ejemplo para ejercicio de resolución, de ahí lo recomendable es usar las tablas y constantes establecidas para el tipo de impulso que se necesite simular ya sea impulso rayo o maniobra.

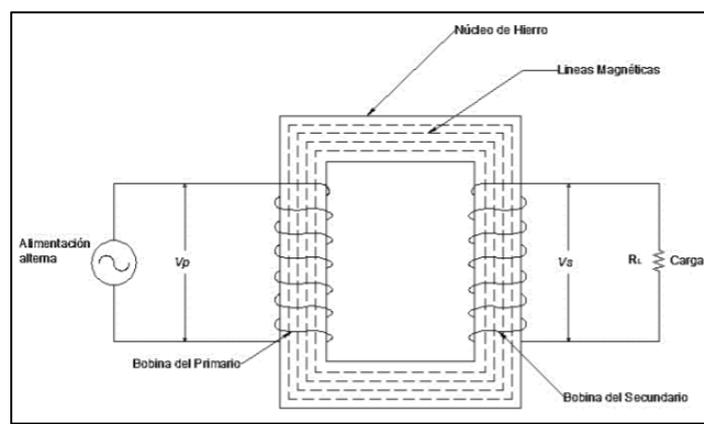
## 2.2 Fuente de alimentación de un generador de impulsos.

Como se mencionó, los generadores de impulso se alimentan mediante una fuente de voltaje, pueden ser varios los métodos utilizados para la carga de los capacitores como por ejemplo un transformador elevador de voltaje, circuitos flyback, dobladores (multiplicadores) de tensión, transformadores de alta tensión seguidos de un rectificador, entre otros (Urquidi, 1990).

El método más común empleado para la alimentar un generador de impulsos de una etapa Figura 6 es usando una fuente de voltaje CA seguida un rectificador de tensión se debe tener muy en cuenta las protecciones y con su respectiva puesta a tierra para experimentación, las características de estos elementos dependerán del tipo de fuente con el cual se cargará el generador.

### 2.2.1 Transformador elevador seguido de un rectificador.

Según (Julian Guillermo Castro Bayas, John Erick Jara Fajardo, 2016) Un transformador básico consiste en dos bobinas eléctricamente aisladas y enrolladas sobre un núcleo común. La energía eléctrica se transfiere en una bobina a otra por medio del acoplamiento magnético. La bobina que recibe energía de a fuente CA se lo denomina devanado primario y la que proporciona energía de una carga de CA se lo llama devando secundario. El núcleo de los transformadores que se usan a bajas frecuencias se hace con un material magnético, usualmente acero laminado en la Figura 10 se muestra el diagrama básico de un transformador.



**Figura 10. Diagrama básico de un transformador.**

Fuente: (Julian Guillermo Castro Bayas, John Erick Jara Fajardo, 2016)

Los núcleos de los transformadores que se usan en frecuencias altas se hacen de hierro pulverizado y cerámica sobre formas huecas no magnéticas. Algunos modelos de bobinas se arrollan sencillamente sobre formas huecas no magnéticas usando cartón o plástico de manera que el material del núcleo sea en realidad el aire.

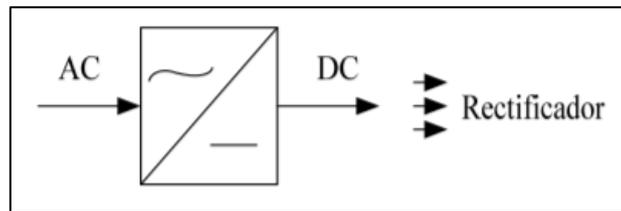
Un transformador opera en condiciones ideales, la transferencia de energía de un voltaje hacia otro no va acompañado de pérdidas.

El transformador es una máquina estática que permite transformar la potencia a un determinado nivel de tensión e intensidad, en prácticamente la misma potencia, pero con un nivel de tensión requerido modificando la intensidad de corriente en proporción inversa a la tensión. (Gussow, 2004)

### 2.2.2 Diodo rectificador.

Un diodo rectificador permite pasar la mitad positiva o la mitad negativa de una señal de corriente alterna AC permitiendo que la corriente fluya de un solo sentido, pero no del otro.

Comúnmente los circuitos rectificadores son utilizados en el diseño de fuentes de poder, donde la potencia de corriente alterna AC se debe transformar en potencia de corriente directa DC (Figura 11).



**Figura 11. Rectificación de señal**  
Fuente: Tarquino Sánchez (2013).

Generalmente los rectificadores comunes de estado sólido se los construye de silicio. (SÁNCHEZ, 2013) a continuación, en la Figura 12 se muestra un diodo rectificador de alto voltaje usado comúnmente como parte de la configuración de un generador de impulsos. Las especificaciones y vistas del diodo rectificador usado como referencia y base para una futura implementación se puede observar en el Anexo A.



**Figura 12. Rectificador de alto voltaje.**  
Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)

La tensión que se aplica en el capacitor de carga  $C_g$  se la obtiene por medio de la rectificación de la señal alterna presente en la salida de una fuente de voltaje. Es importante destacar que la resistencia cumple con dos funciones importantes las cuales son limitar la corriente absorbida por el generador y desacoplarlo del circuito alimentador en el momento en que se produzca el impulso, a continuación, circuito de alimentación Figura 13.

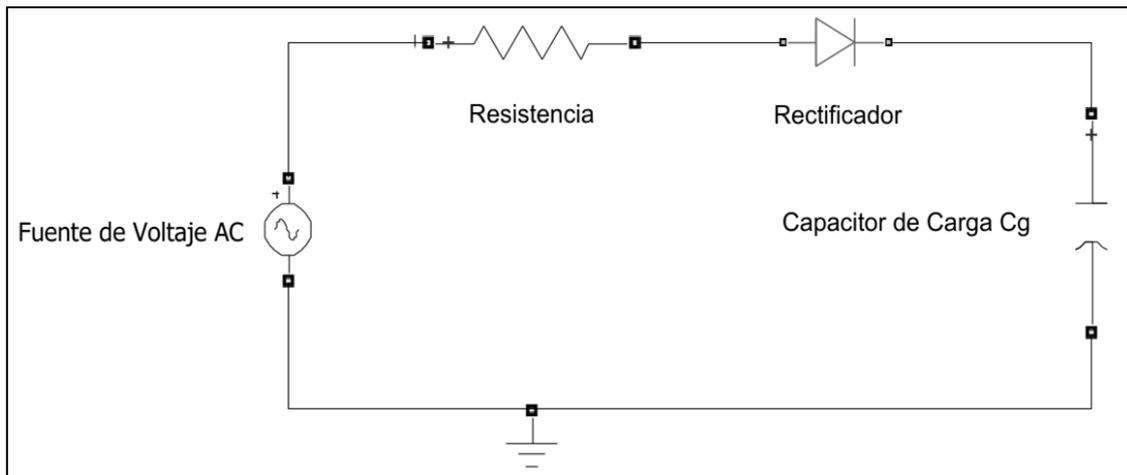


Figura 13. Circuito básico de carga para un generador de impulsos usando un diodo rectificador.  
Fuente: Bryan Omar Yazan Basantes (2021)

### 2.3 Divisor capacitivo como dispositivo de medida.

Los sistemas de medición para ensayos de alta tensión en laboratorio incorporan dispositivos de conversión, transmisión y registro de datos. Siendo una de las partes más importantes del proceso, el dispositivo de conversión conocido como divisor de tensión el cual reduce la amplitud del voltaje a un valor adecuado seguro para los dispositivos de medición y registro (Prochazka, R., Hlavacek, J., Knenicky, M. y Mahmoud, R., 2016).

Dado que los niveles de tensión que manejan los generadores de impulso son altos entre unos kV no es frecuente disponer de sondas de alta tensión o que el nivel de tensión es limitado, por aquello es necesario el uso de un divisor de tensión capacitivo para poder registrar de manera precisa la magnitud y forma de la onda de impulso y poder acoplarse con una sonda de baja tensión la cual es más común en laboratorios.

Los divisores capacitivos esta conformados por dos ramas capacitivas y representan una mejora respecto a los divisores resistivos, ya que eliminan la dependencia del factor de escala con la frecuencia (Juan David Mina-Casaran, Diego Fernando García, Diego Fernando Echeverry, 2019).

Dada la Ecuación (26) para su resolución:

$$VM = \frac{C_1 + C_2}{C_1} VS \quad (26)$$

Donde:

$C_1$ = Capacitor de alto voltaje

$C_2$ = Capacitor de bajo voltaje

$VM$ = Voltaje máximo dado por el generador

$VS$ = Voltaje de salida

Al conocer el capacitor  $C_g$ , la tensión máxima  $VM$  y suponiendo un valor para una tensión de  $VS$  (500 V) voltaje admisible en la gran variedad de osciloscopios.

De esta manera es como  $C_2$  puede ser aproximado a uno de los capacitores con los cuales se podrá construir  $C_c$  elemento con el cual se hará el dimensionamiento de un generador de impulsos portátil que se analizará más adelante, en la Figura 14 se indica el diagrama de un divisor capacitivo.

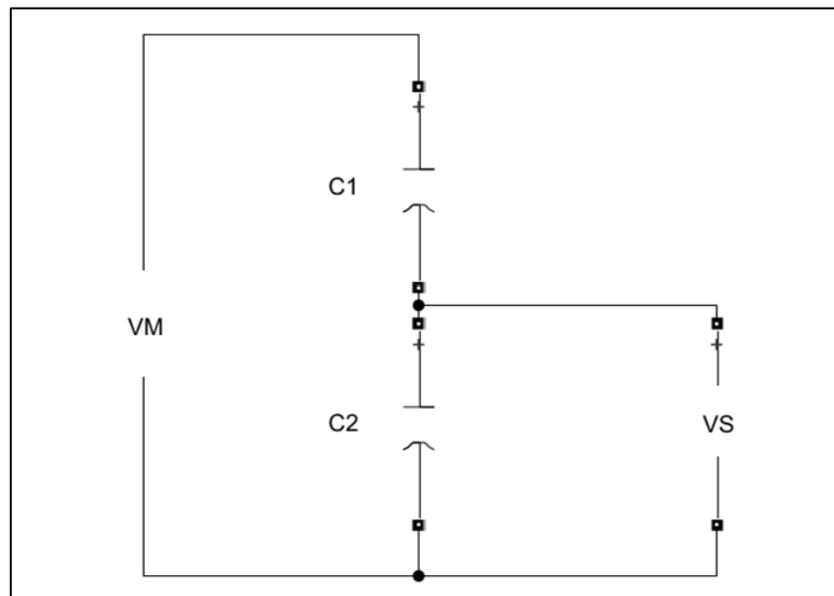


Figura 14. Divisor de tensión capacitivo.  
Fuente: S. Gomez, M.P.Buitrajo, F.A. Roldan,(2011)

#### 2.4 Diagrama de flujo del funcionamiento de un generador de impulsos de una etapa.

El circuito básico de un generador de impulso está conformado por dos capacitores ( $C_g$  y  $C_c$ ) y dos resistencias ( $R_p$  y  $Rs_1$  o  $Rs_2$ ) cómo se observa en circuitos A y B de Figura 5. El funcionamiento inicia con la carga del capacitor  $C_g$  por lo que se necesita un alto voltaje de CD, lo recomendable es usar una fuente de voltaje CA seguido de un rectificador.

Una vez cargado  $C_g$ , la descarga del capacitor se realiza a través de electrodos o un explosor de esferas, al analizar los circuitos de la Figura 5 se puede observar que el explosor

no tiene conexión eléctrica, entonces en esta parte es cuando el circuito actúa como un generador de impulsos, el capacitor  $C_g$  se carga hasta que el voltaje sea lo suficiente como para cruzar de un electrodo a otro cerrando el circuito y funcionando el explosor también como un interruptor de aire, el tiempo de respuesta del generador se puede controlar variando el voltaje o la distancia entre esferas.

La carga atraviesa por las resistencias, las cuales controlan la forma y tiempos de onda que se necesitaría para replicar el impulso de voltaje ya sea un impulso tipo rayo o tipo maniobra y al final llegando a él capacitor  $C_c$  el cuál es la capacidad de carga que descargara el capacitor  $C_g$  como impulso de voltaje, en la Figura 15 se indica un diagrama de flujo del funcionamiento de un generador de impulsos de una etapa.

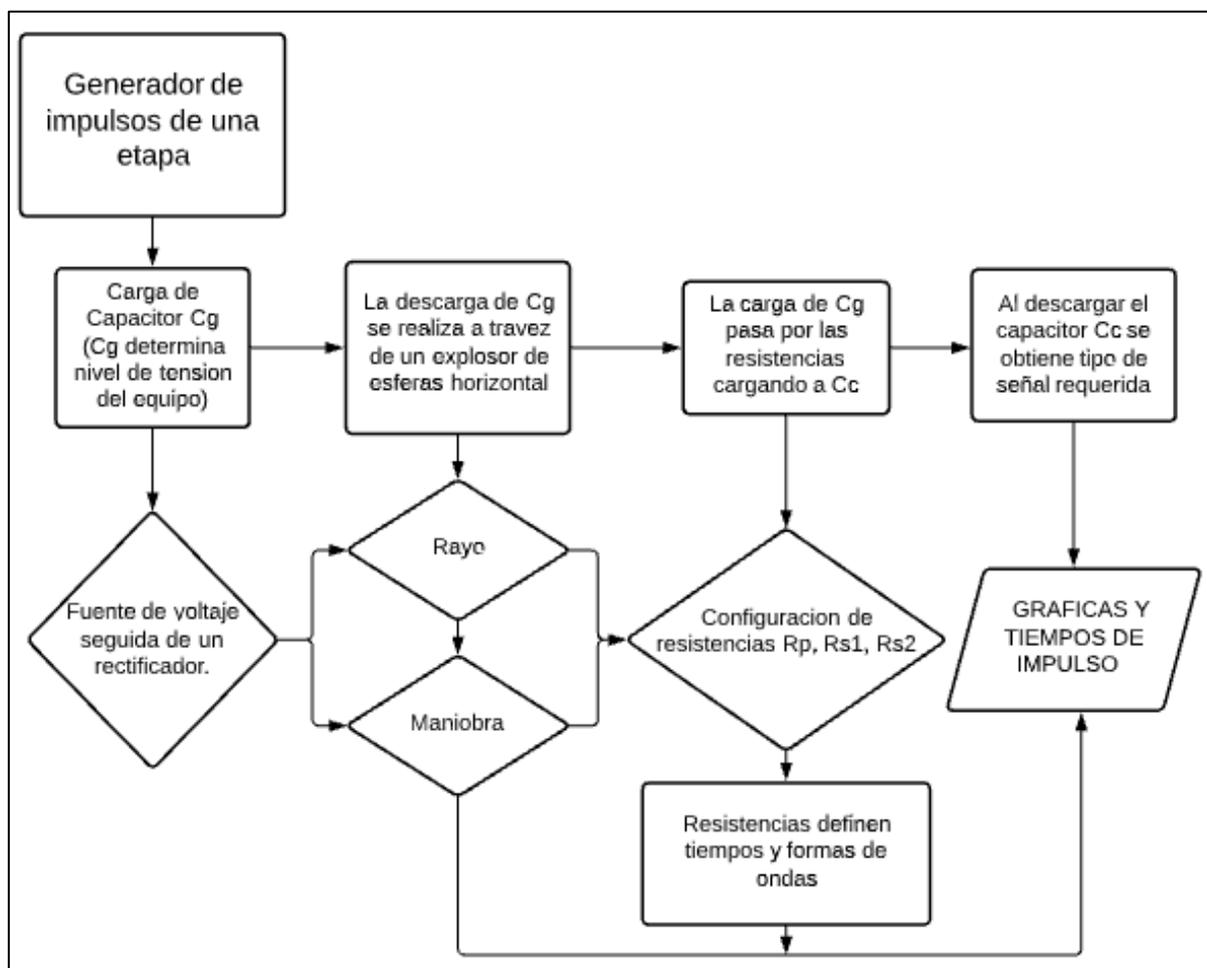


Figura 15. Diagrama de flujo del funcionamiento de un generador de impulsos.  
Fuente: Bryan Yazan Basantes Omar (2021)

## 2.5 Dimensionamiento de componentes para un prototipo.

El valor de los componentes del generador de impulsos se los obtiene a partir de generadores comerciales obtenidos de catálogos de fabricantes y referencias bibliográficas recopiladas tras varios estudios por lo que facilita la obtención en el mercado de los elementos principales que componen un generador de impulsos eligiendo los generadores HEFELY y TERCO, las especificaciones de valores tanto como de capacitores y de resistores se muestran a continuación en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Parámetros de generadores de impulso comerciales.

Fuente: (Arango, 2014)

Fabricante	Impulso rayo (1,2/50) $\mu\text{s} \pm (30/20) \%$ Impulso maniobra (250/2500) $\mu\text{s} \pm (60/20) \%$	Tipo de Circuito Figura 3	Capacitores ( $\mu\text{F}$ )		Resistores ( $\Omega$ )		
			$C_g$	$C_c$	$R_{S1}$	$R_{S2}$	$R_p$
AGUET	Rayo	2	0,01	0,0012	.....	375	6100
TERCO	Rayo	2	0,025	0,0012	.....	350	2400
		1			350	.....	2400
HAEFELY	Rayo	2	0,025	0,0012	.....	355	2400
	Maniobra				.....	55000	120000
AGUET	Rayo	2	0,125	0,001	.....	360	544
	Maniobra				.....	59834	24710
HAEFELY	Rayo	2	0,25	0,001	.....	400	300
EMC PARTNER	Rayo	2	1	0,03	.....	13	76
HILO	Rayo	2	1	0,03	.....	13	75

### 2.5.1 Capacitores

Como se mencionó el generador se proyectó con valores de equipos comerciales que tienen la misma configuración, que tengan un nivel de tensión lo suficiente como para que sea seguro, experimental y apto para su estudio se propone usar los circuitos A o B de la Figura 5 los cuales son capaces de producir impulsos del tipo rayo y maniobra además que sus componentes como lo son capacitores y resistencias pueden llegar a ser replicables adquiriéndolos en el mercado.

Para el dimensionamiento de un generador de impulso de una etapa se proyectará el análisis conociendo su elemento principal  $C_g$  elemento el cual se logró adquirir en el mercado contando con las especificaciones requeridas mostradas en la Tabla 2.2 y de igual manera los demás componentes como se muestra en el Anexo A.

En el caso de los capacitores que se indica en la Tabla 2.3 para  $C_g$  ( $\mu F$ ) y  $C_c$  ( $\mu F$ ) deben soportar cada uno un voltaje de 20 kV, voltaje considerable muy similar al de los generadores comerciales y como las capacidades son de un valor pequeño es muy difícil de encontrar comercialmente, la mejor opción es optar por una configuración de capacitores conectados en serie llegando al valor requerido tratando de no variar demasiado con el valor de los elementos, como se trata de manejar altos voltajes es importante tomar en cuenta la resistencia dieléctrica entre los elementos, se recomienda encapsular los capacitores en tubos acrílicos usando espuma rígida de poliuretano para su relleno y sellando con resina de fibra de vidrio en los extremos para obtener mejores resultados de aislamiento.

Tabla 2.3 Valores nominales de los componentes del generador

Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)

Tipo de Impulso	Tipo de Circuito	Capacitores		Resistencias	
		$C_g$ ( $\mu F$ )	$C_c$ ( $\mu F$ )	$R_p$ ( $\Omega$ )	$Rs_1$ ( $\Omega$ ) o $Rs_2$ ( $\Omega$ )
Rayo	Circuito A y B Figura 6	0.025	0.0012	2,400	350
Maniobra	Circuito A y B Figura 6	0.025	0.0012	120,000	47000

La tabla 2.4 muestra las características técnicas de los elementos que se pueden conseguir en el mercado para la construcción de los capacitores tanto de carga como descarga, tomando en cuenta que se usa una configuración de capacitores conectados en serie para lograr obtener los valores requeridos o aproximados.

Tabla 2.4 Diseño de capacitores por unidades accesibles en el mercado.

Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)

Tipo de Impulso	Capacitor de carga $C_g$ ( $\mu F$ )		Capacitor de descarga $C_c$ ( $\mu F$ )	
	Valor Individual ( $\mu F$ )	Cantidad de Capacitores	Valor Individual ( $\mu F$ )	Cantidad de Capacitores
Rayo y Maniobra	0.56	21	0.047	39
	0.025 $\mu F$		0.0012 $\mu F$	

En la Figura 16 se muestra uno de los capacitores seleccionados para el dimensionamiento de los componentes de un generador de impulsos de una etapa más detalles de este se puede observar en el Anexo A.



Figura 16. Capacitor Marca AjR76 ( $0.56 \mu F$ ) 1000V DC vista inferior  
Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)

### 2.5.2 Resistencias

Para realizar la construcción de las resistencias se puede usar unidades convencionales de carbono que soporten una tensión a la cual está diseñado el equipo y que conectadas en serie se pueda obtener un valor aproximado al de los requeridos o aproximados a los de la Tabla 2.2, para su aislamiento se recomendaría usar el mismo proceso de encapsulado que los capacitores por ser una buena opción al ser materiales con buena rigidez dieléctrica.

A continuación, se muestra la configuración de las resistencias del generador  $R_{s1}(\Omega)$  o  $R_{s2}(\Omega)$  y  $R_p(\Omega)$  usando elementos resistivos comunes que son de fácil acceso en el mercado en la Tabla 2.5 se indica las unidades necesarias para la construcción de las resistencias de frente y las resistencias de cola.

Tabla 2.5 Diseño de resistencias por unidades accesibles en el mercado  
Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)

Tipo de Impulso	Resistencia de Frente $R_{s1}(\Omega)$ o $R_{s2}(\Omega)$		Resistencia de Cola $R_p(\Omega)$	
	Valor Individual ( $\Omega$ )	Cantidad de Resistencias	Valor Individual ( $\Omega$ )	Cantidad de Resistencias
Rayo	20	18	200	12
	350		2400	
Maniobra	4.7k	10	10k	12
	47 k		120 k	

En la Figura 17 se muestra ejemplos de resistencias de carbono que se podrían usar para hacer una implementación física de un prototipo de generador de impulsos, tomando en cuenta los valores de las unidades que se necesitaría para obtener los valores requeridos mostrados en la Tabla 2.5.

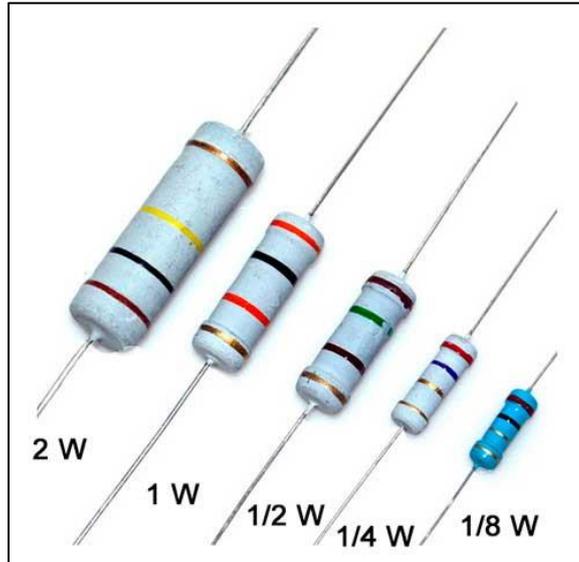


Figura 17. Ejemplos de resistencias de carbono.  
Fuente: (El Octavo Bit, 2020)

### 2.5.3 Explosor de Esferas

Un explosor son dos esferas metálicas del mismo diámetro que se encuentran situadas sobre el mismo eje y con una distancia de separación entre ellas limitada que se puede regular. Las disposiciones más comunes de este elemento son explosores de eje vertical y de eje horizontal como se puede observar en la Figura 18.

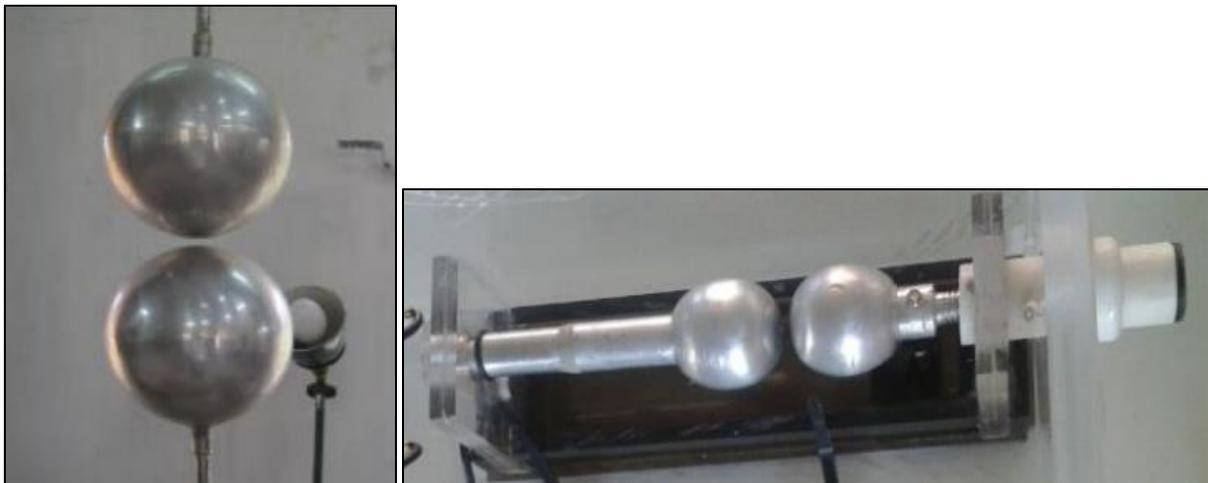


Figura 18. Explosor vertical y explosor horizontal.  
Fuente: Arango, Santiago Flores 2014, Gonzales Jose Tomas (2014)

La descarga del generador de impulsos entre esferas se realiza mediante forma “natural” método recomendado o usando otro sistema auxiliar según (T. Gallagher, 1973), (Khalifa, 1990). El método de descarga natural se lo puede realizar con los siguientes procedimientos:

- a) Con el explosor ajustado a una distancia superior a la del inicio de la descarga siendo el generador cargado a una tensión prefijada, luego ir disminuyendo la separación de las esferas del explosor hasta provocar la ruptura del aire.
- b) El explosor se ajusta a una distancia correspondiente al voltaje de descarga, luego ir aumentando con pausas el voltaje de carga hasta que se dé la ruptura del aire.

Según (González, 2014) hasta un voltaje de 20 kV (Max.) se recomienda usar un explosor horizontal con esferas de 30mm de diámetro y con una separación entre ellas de máximo 8mm. Una propuesta experimental sería construir el explosor en aluminio sobre una base de acrílico con la opción de regular la distancia entre esferas, dependiendo del nivel de voltaje con el cual se va a experimentar.

## **2.6 Parámetros para construcción.**

Los parámetros analizados para construir un generador de impulsos de una etapa se consideraron revisando experimentos e implementaciones con valores de equipos comerciales usados para su diseño y dimensionamiento, especificando cada una de sus partes, comprobando que es posible replicar el equipo usando elementos que son de fácil acceso en el mercado y de igual manera a lo largo del capítulo 2 se recomiendan propuestas para facilitar su construcción como por ejemplo lograr un buen aislamiento dieléctrico en cada uno de sus componentes, se detalla el número de unidades necesarias de capacitores y resistores ya que se necesitan usar diferentes configuraciones de estos para lograr los valores requeridos, el tipo de rectificador en caso de usar una fuente de alimentación AC y el tipo de conductores necesarios para la conexión de los elementos dependería de los parámetros de la fuente con la cual se va a trabajar tomando en cuenta que se manejaría un voltaje considerable y que el generador de impulsos está diseñado para soportar una tensión de 20 kV (Max), posteriormente se muestra el generador modelado con sus circuitos correspondientes a través de simulación usando MATLAB / Simulink, y se marca un procedimiento para su funcionamiento.

## CAPITULO 3

### Simulación de un generador de impulsos de voltaje.

- Implementación de componentes para simulación en MATLAB / Simulink.
- Modelos y parámetros de circuitos.
- Simulación resultados y análisis.

A continuación, a lo largo del capítulo 3 se detalla el proceso usado para realizar la simulación de un generador de impulsos de una etapa por lo cual se necesita un software que pueda representar el circuito lo más real posible a modo de simulación. Se selecciono usar MATLAB / Simulink por su accesibilidad y fácil manejo a la hora de realizar simulaciones de circuitos eléctricos.

#### 3.1 MATLAB / Simulink.

Simulink es una extensión de Matlab y esta específicamente diseñada para analizar, modelar y simular una amplia variedad de sistemas dinámicos además proporciona una interfaz al usuario permitiendo construir modelos de diagramas de bloques con una biblioteca de componentes estándar lo cual brinda una construcción fácil e intuitiva de diagramas mostrando los resultados de la simulación de manera rápida (Zahid Javid, Ke-Jun Li, , Kaiqi Sun and Arooj Unbreen, 2018).

Simulink proporciona al usuario una herramienta de fácil aprendizaje permitiendo cambiar parámetros y algoritmos simulando muchos de los problemas que se encuentran en el mundo real además proporciona una arquitectura abierta ampliando el entorno de simulación brindando resultados intuitivos (Gomez–Estern, 2006/2007).

#### 3.2 Carga y descarga de un capacitor a través de simulación.

Antes de simular y modelar un generador de impulsos de una etapa en Simulink se optó por iniciar por simular la carga y descarga de un capacitor con el objetivo de familiarizarse con el software, para entender la manera en cómo funciona el generador y por ende el origen del tipo de señal que este nos brinda.

Se opto por simular un circuito sencillo de fácil construcción que consiste en cargar un capacitor con una fuente de voltaje DC y por medio de interruptores programados realizar su descarga. Se definieron los valores de los elementos con los cuales vamos a trabajar, al momento de insertar valores de componentes y tiempos para interruptores quedando definidos los valores de los elementos sin presentar complicaciones a continuación se muestra los valores definidos para la simulación en la Figura 19.

```

Editor - D:\Carpetas usuarios\bryan\mathlab\Polyspace\R2021a\bin\carga y descarga del capacitor.m
carga y descarga del capacitor.m x Untitled6.m x +
1 - R=270000;
2 - C=10e-6;
3 - tao=R*C;
4 - tsim=12*tao;
5 - tc=6*tao;
6 - V=12000;

```

Figura 19. Valores seleccionados para simulación de carga y descarga de un capacitor en Simulink.  
Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)

Se definieron los valores y elementos como son resistencia R, capacitor C, constante de tiempo tao (usado para la configuración de los interruptores), tiempo de simulación tsim, cabe resaltar que se usa  $12 * \text{tao}$  de tal manera que la mitad del tiempo de simulación sea de carga y la otra mitad para descarga del capacitor y se la define como tc, fuente de voltaje V, se crearon las variables para llevar la construcción del circuito a Simulink usando la librería de Simscape y quedando de la siguiente manera Figura 20.

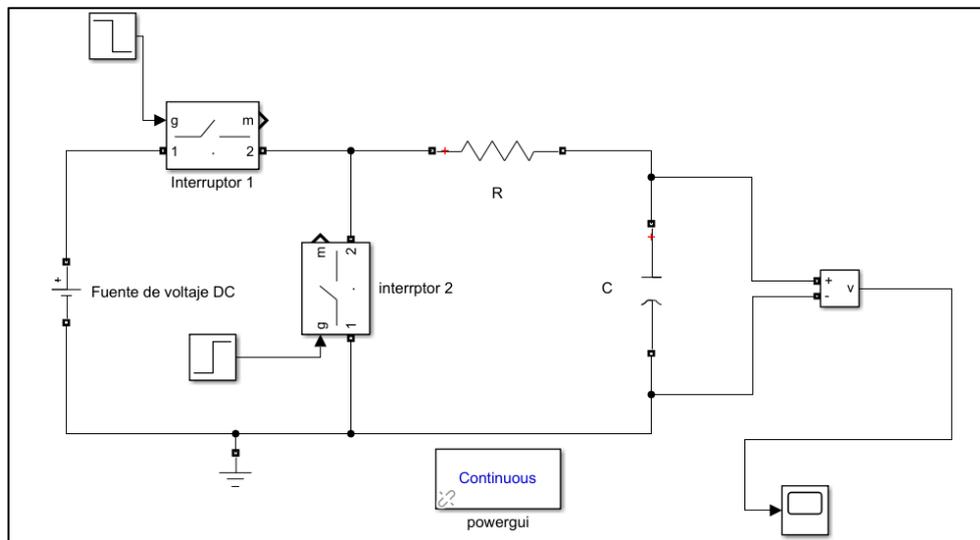
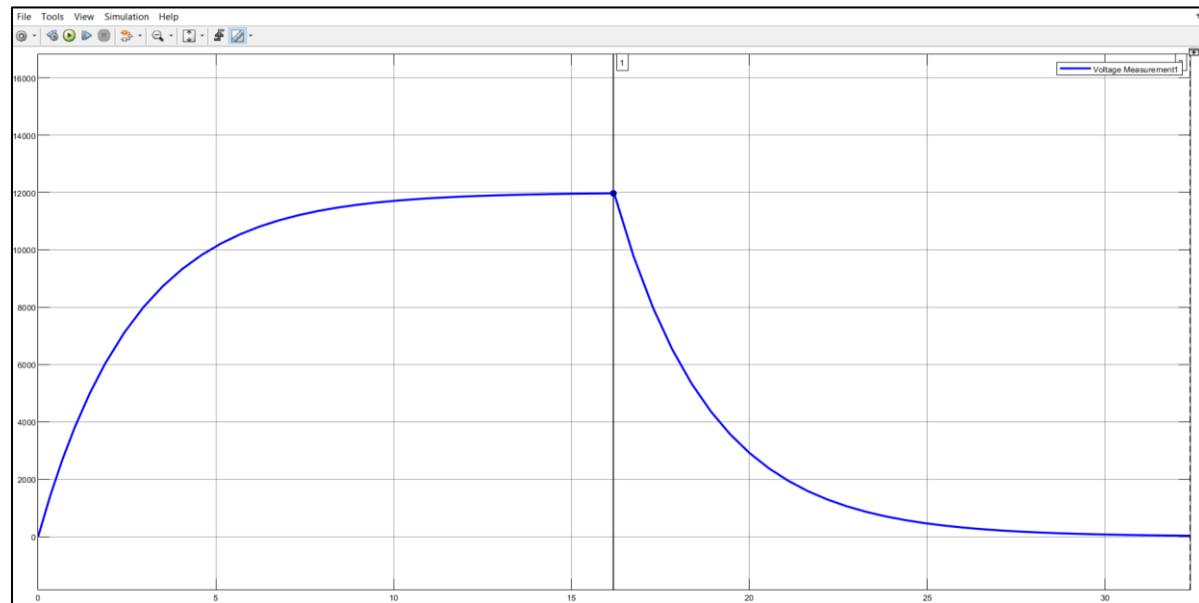


Figura 20. Diagrama de carga y descarga de un capacitor elaborado en Simulink.  
Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)

Al iniciar con la simulación del circuito, el interruptor 1 y 2 se configuraron con la condición de que ejecutar la simulación inicie con un interruptor abierto y el otro cerrado así viceversa, en el momento en que el interruptor 1 esté cerrado inicia la carga del capacitor, pero no adquiere instantáneamente su valor máximo al instante, sino que va aumentando en una proporción que depende de la capacidad del capacitor y también de la resistencia que va conectada en serie luego de la fuente, se puede notar que al llegar al pico de señal de la

amplitud de onda está cargado al máximo e inicia la descarga como se observa en la Figura 21.



**Figura 21. Grafica de simulación de onda de carga y descarga de un capacitor.**  
Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)

Una vez cargado el capacitor de prueba (para este caso se usa los valores definidos en la Figura 17), el interruptor 2 se cierra y se abre el interruptor 1 de tal manera que el capacitor se desconecta de la fuente de alimentación y hace que vaya perdiendo su carga paulatinamente o se vaya descargando.

Además, se observa que las ondas de carga como la de descarga son iguales ya que su única diferencia son los signos que van en sentidos contrarios positivo de carga y negativo de descarga como se muestra en la Figura 21, observando el parecido que tiene a una señal de un generador de impulso.

### **3.3 Simulación de un generador de impulsos de una etapa en Simulink.**

Para iniciar con la simulación y modelación de los circuitos A y B de la Figura 5 del Capítulo 2, seleccionados para simulación por mostrar mejores resultados al momento de generar impulsos de voltaje y de igual manera se seleccionó el circuito 3 de la Figura 3 del Capítulo 1 para realizar una comparación con los circuitos A y B de la Figura 5 del Capítulo 2 simulándolos en Matlab / Simulink tomando como base la simulación de carga y descarga de la Figura 20, llegando a modelos equivalentes y simplificados de generadores de impulsos de una etapa. El explosor de esferas o espinterómetro es posible representar usando un interruptor ideal que se puede configurar llegando a replicar parámetros similares que los

explosores de esferas reales como por ejemplo su resistencia de tiempo, resistencia de tiempo de inactividad, capacitancia, voltaje de ruptura, tiempo de ruptura, corriente de retención, etc.

Los circuitos modelados en Simulink se configuraron usando los parámetros propuestos en la Tabla 2.3 del Capítulo 2 tomando en cuenta que  $R_{S_1}$  es igual a  $R_{S_2}$  correspondientemente (impulso tipo rayo e impulso tipo maniobra), de igual manera se introdujeron valores a todos los componentes que conforman a un generador como lo son la fuente de alimentación, los parámetros del interruptor que actúa como un explosor de esferas, capacitores y resistores, se configuro cada componente de manera muy accesible y sencilla sin tener mayores complicaciones.

Para iniciar con la simulación de los circuitos se optó por iniciar la carga de los capacitores  $C_g$  con un voltaje promedio de la capacidad máxima a la cual está diseñado el generador se optó por insertar una fuente de voltaje DC configurable entre 10 kV hasta los 20 kV, nivel de voltaje al cual funcionan los generadores comerciales, tomando en cuenta que es posible conseguir fuentes reales entre estos rangos de voltaje y observando que los resultados de las señales de impulso cumplan con las normas establecidas según (IEEE Standard 4; IEC Standard 60060-1).

El tiempo de carga de un capacitor depende del tipo de fuente de alimentación, la resistencia colocada en serie y la capacidad del capacitor, al iniciar la simulación con todos los parámetros y valores configurados de los circuitos A y B de la Figura 5 y el circuito 3 de la Figura 3 del Capítulo 1 se observó que las señales de impulso se generan luego de un tiempo determinado resultado que es influenciado por los parámetros dados por la fuente de alimentación y la resistencia conectada en serie.

El interruptor el cual actúa como un explosor de esferas está configurado con estado inicial cerrado y se abre en el tiempo cuando el capacitor llegue a su carga total simulando el tiempo que tarda en cargar  $C_g$ , para facilitar la visualización de las señales se decidió configurar el capacitor  $C_g$  con carga inicial de 12 kV el interruptor con estado inicial abierto con un tiempo de simulación de 0.15  $\mu$ s omitiendo la fuente de voltaje y la resistencia conectada en serie de tal manera que los resultados sean instantáneos observando que las señales de impulsos de voltaje inicien desde cero y facilitando el análisis individual de cada señal.

Como se mencionó a lo largo de este trabajo, un generador de impulsos consiste esencialmente en un capacitor que se carga a un voltaje requerido y es descargado a través de un circuito formado por resistencias, los modelos construidos para la simulación usan los mismos valores propuestos de resistencias y capacitores de la Tabla 2.2 para verificar y

analizar su comportamiento e impacto al momento de generar impulsos de voltaje los resultados se muestran a continuación con sus respectivas señales.

### 3.4 Circuito A modelado en Simulink

Al iniciar la modelación del circuito A de la Figura 5 Capítulo 1, se insertó una fuente de alimentación variable con el propósito de ir probando y analizando la simulación de los circuitos con diferentes voltajes de entre los 10 kV hasta los 20 kV(Max), las gráficas de las ondas que se mostraran para el análisis serán el resultado de la simulación de los circuitos configurados con la fuente de voltaje DC de 12 kV.

Al final se compararán las señales de impulso con diferentes rangos de voltaje al modelar el circuito A no se presentaron dificultades al momento de modelar e insertar los parámetros de sus componentes mostrando resultados satisfactorios siendo como base para la modelación de los circuitos B de la Figura 5 y el circuito 3 de la Figura 3 el modelo final del circuito A se muestra a continuación en la Figura 22.

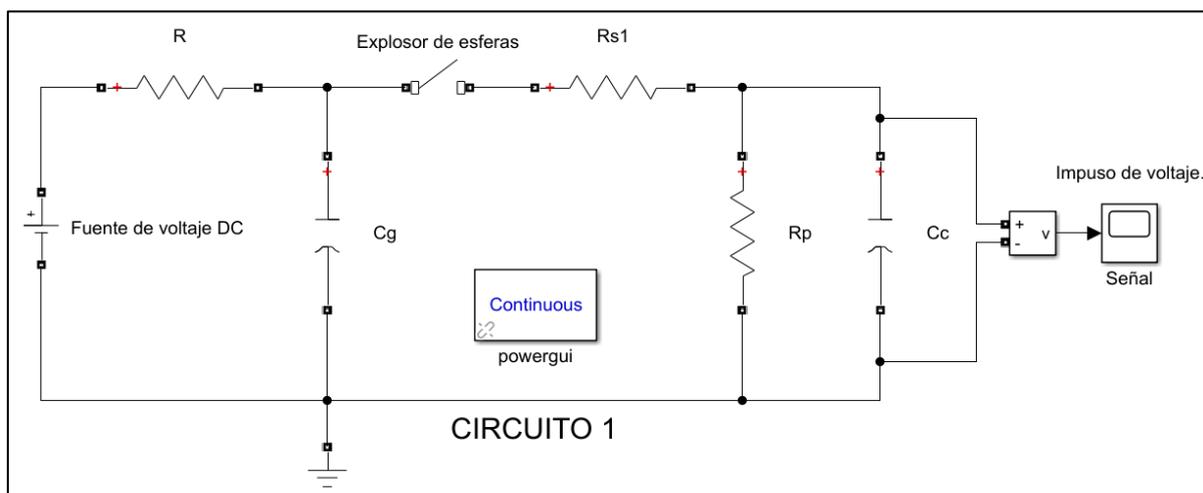


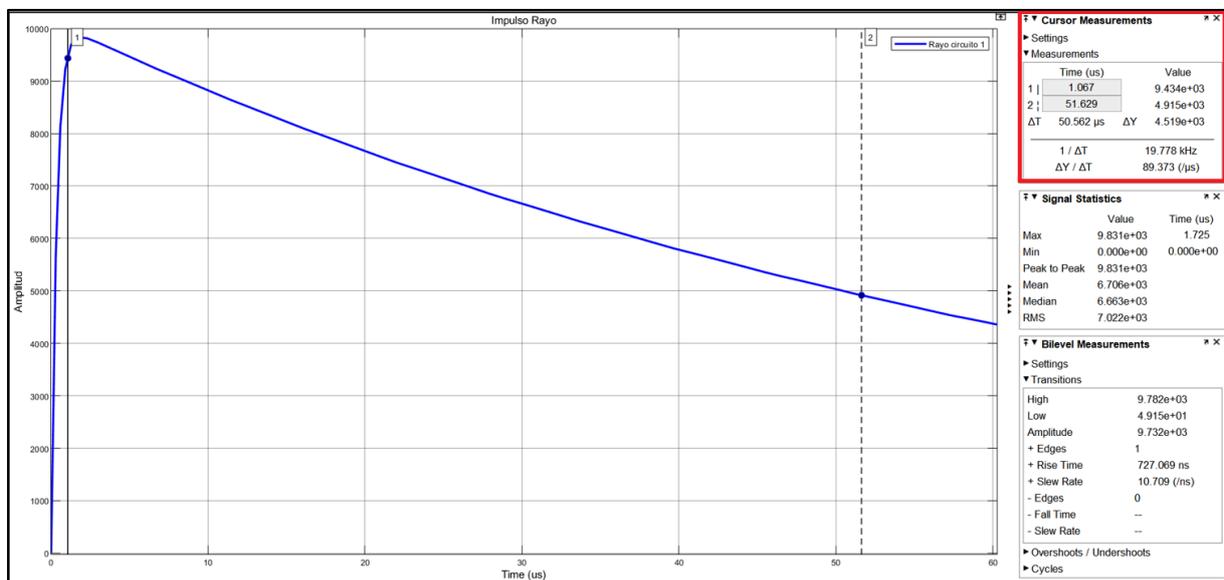
Figura 22. Circuito A modelado en Simulink.  
Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)

#### 3.4.1 Impulso tipo rayo de circuito A.

El resultado de la señal de impulso tipo rayo del circuito A de la Figura 5 brinda datos satisfactorios al usar un voltaje nominal de 12 kV, se usó la opción de reglas en scope de Simulink facilitando la visualización de los valores resultantes dados por la simulación, como por ejemplo se visualiza tiempos, voltajes y todos los valores que componen la onda de impulso. Al comparar los resultados de las señales con la normatividad establecida la cual

específica que para un impulso tipo rayo los tiempos de frente son de  $1.2 \mu\text{s} \pm 30\%$  y de cola  $50 \mu\text{s} \pm 20\%$ , se verifica el correcto funcionamiento del circuito dando un tiempo de frente de  $1.067 \mu\text{s}$  y tiempo de cola de  $51.629 \mu\text{s}$ , se observa un voltaje pico de  $9831 \text{ V}$  notando caída de voltaje considerable en comparación al voltaje de entrada.

En la Figura 23 se observa la onda producida por el circuito A de la Figura 5 se usó la opción regla para ubicar los puntos de donde se toma los tiempos de onda para poder comparar con la normativa, siendo punto 1 tiempo de frente y punto 2 tiempo de cola valores que son resaltados en la parte superior derecha por un cuadro rojo, también se visualizan otros datos adicionales arrojados por el software valores que componen a la señal de impulso tanto en amplitud (voltaje) y datos en tiempo, estos se ubican en la parte derecha de la imagen.

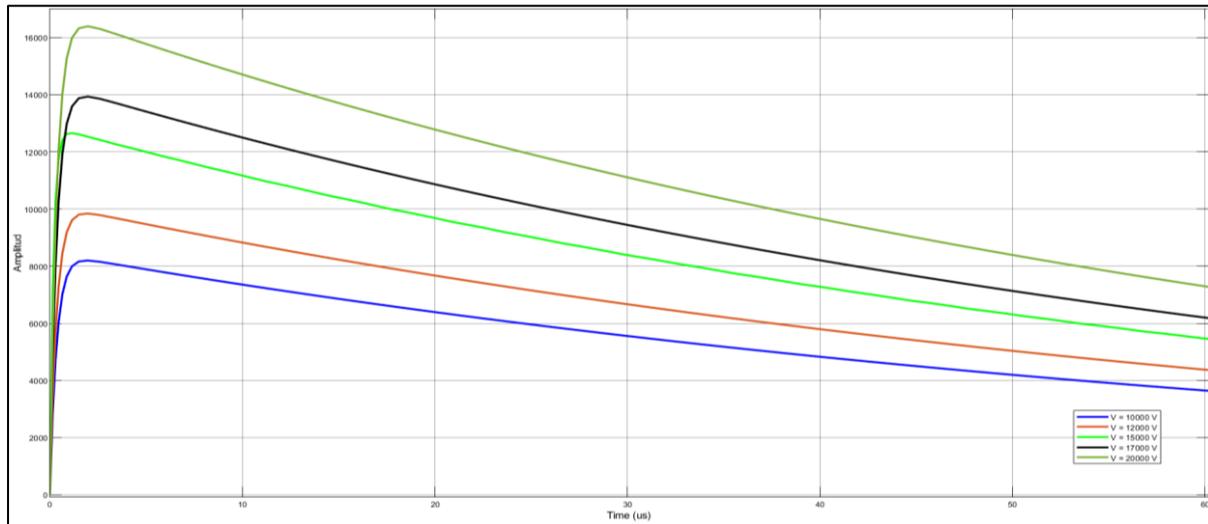


**Figura 23. Impulso rayo de Circuito A.**  
**Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)**

### 3.4.2 Impulso tipo rayo de circuito A con variación de voltajes.

Al ser un generador dimensionado para soportar un voltaje de  $20 \text{ kV}$  (Max), tiene que brindar resultados similares en los tiempos de ondas sin que el voltaje a usar cambie los resultados, a continuación se muestra la simulación del circuito A de la Figura 5 configurado con resistencias para la generar impulsos de voltaje tipo rayo se usaron cinco voltajes diferentes para verificar su funcionamiento y se observó que los tiempos de ondas cumplen con la normativa establecida la cual específica que para impulso tipo rayo el tiempo de frente es de  $1.2 \mu\text{s} \pm 30\%$  y de cola  $50 \mu\text{s} \pm 20\%$  en la Figura 24 se visualiza que al variar los voltajes no interfiere en los tiempos de ondas pero si muestran una variación mínima que no afecta los resultados notando que la única diferencia es el voltaje pico de cada señal de manera que es posible trabajar entre estos rangos de voltaje sin problemas de respuesta además se nota

que el circuito brinda un voltaje por debajo del voltaje de entrada a continuación se muestra el circuito A simulado con diferentes voltajes que van desde los 10 kV hasta los 20 kV.



**Figura 24. Impulso rayo de circuito A usando diferentes voltajes.**  
Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)

### 3.4.3 Impulso tipo maniobra de circuito A.

Al configurar el circuito A con los parámetros para generar impulso tipo maniobra se usó una resistencia de frente de 47 kohms ( $\Omega$ ) y una resistencia de cola de 120 kohms ( $\Omega$ ) la fuente de alimentación con un voltaje DC de 12 kV, los tiempos de ondas establecidos por normativa indican que un impulso tipo maniobra tiene un tiempo de frente de  $250 \mu\text{s} \pm 20\%$  y un tiempo de cola de  $2500 \mu\text{s} \pm 60\%$  la simulación muestra un tiempo de frente  $190 \mu\text{s}$  y de tiempo de cola  $3214 \mu\text{s}$  con un voltaje pico de  $8052 \text{ V}$  notando de igual manera una caída de voltaje con referencia al voltaje de entrada.

Los puntos de intersecciones mostrados en la Figura 25 muestran la posición en la onda donde se cumplen los tiempos siendo punto 1 tiempo de frente y punto 2 tiempo de cola.

En la parte superior derecha resaltado en un cuadro de color rojo se observa los tiempos de ondas tanto de frente y de cola, de igual manera el software proporciona datos adicionales que arroja la onda de impulso.

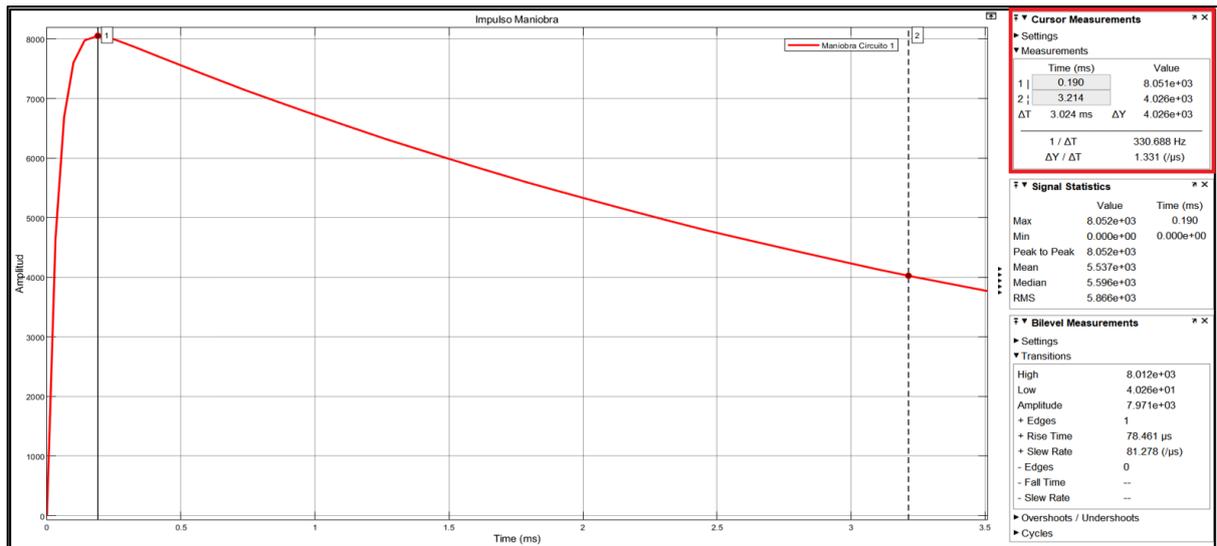


Figura 25. Impulso tipo maniobra de circuito A.  
Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)

### 3.4.4 Impulso tipo maniobra de circuito A con variación de voltajes.

Para visualizar las señales de impulso tipo maniobra se configuraron 5 circuitos del circuito A de la Figura 5 cada uno con resistencias de frente de 47 kohms ( $\Omega$ ) y resistencias de cola de 120 kohms ( $\Omega$ ) con fuentes independientes cada uno entre voltajes de 10 kV hasta 20 kV, al ejecutar la simulación se puede observar que al trabajar con diferentes rangos de voltajes los tiempos de las ondas no varían de tal manera que no cambian los resultados la única diferencia son los voltajes que aumentan las señales o disminuyen dependiendo del valor con el cual se necesite trabajar a continuación en la Figura 26 se observa las ondas de impulso tipo maniobra ejecutándose con diferentes rangos de voltaje apreciando que el circuito A da un valor de voltaje muy bajo en comparación con el voltaje de carga de cada circuito.

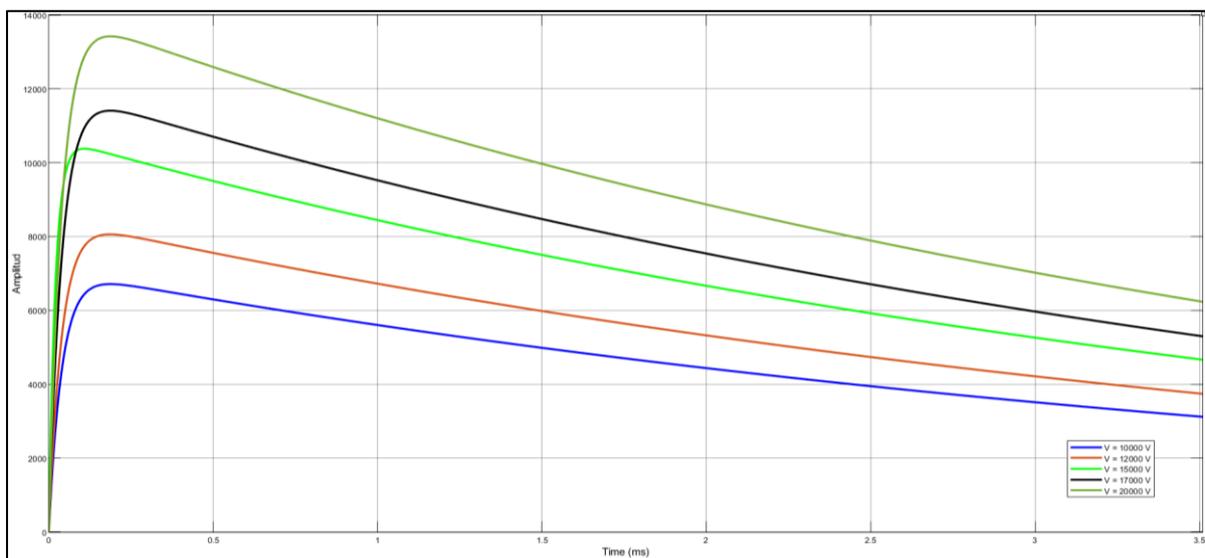


Figura 26. Impulso tipo maniobra de circuito A con diferentes voltajes.  
Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)

### 3.5 Circuito B modelado en Simulink

El circuito B de la Figura 5 del Capítulo 2 se lo modelo y configuro con los parámetros dados en la tabla 2.2 correspondientemente con un capacitor de carga de  $0.025 \mu\text{F}$ , un capacitor de descarga de  $0.0012 \mu\text{F}$  las resistencias tanto de frente como de cola dependerían de que tipo de impulso se necesita simular ya sea impulso de voltaje tipo rayo o impulso de voltaje tipo maniobra, se llega a notar que el circuito B es una variación del circuito A ya que solo modifica la posición de la resistencia de frente  $R_{s1}$  colocándola después de la resistencia de cola  $R_p$  definiéndola como  $R_{s2}$ , otra particularidad de este circuito es que es el más usado en mayoría de los generadores comerciales o simuladores ya sea para generadores impulso de voltaje de una etapa o de varias etapas el cual es elegido por mostrar un mejor rendimiento y facilidad al momento de modelarlo o para implementarlo físicamente y ser usado para experimentación, al igual que el circuito A se configuro con una fuente de voltaje DC con la opción de variar el voltaje de carga para realizar posteriormente su análisis variando los voltajes que van desde los 10 kV hasta los 20 kV(Max), a continuación el modelo del circuito B en la Figura 27.

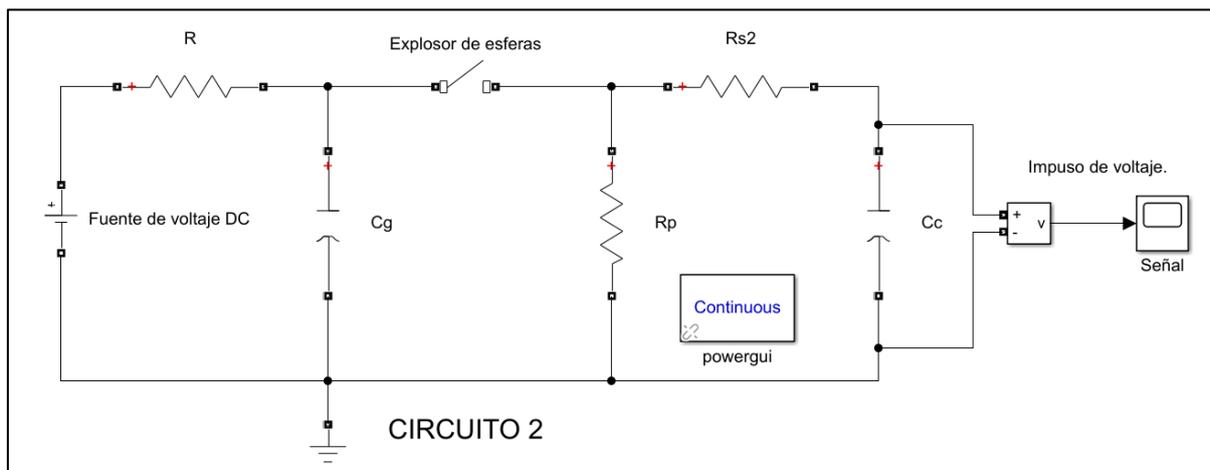


Figura 27. Circuito B modelado en Simulink.  
Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)

### 3.5.1 Impulso tipo rayo de circuito B.

Al simular el circuito B de la Figura 5 del Capítulo 2 se configuraron las resistencias para obtener un impulso de voltaje tipo rayo con los parámetros propuestos en las tabla 2.2 correspondientemente usando una resistencia de frente o  $R_{s2}$  con un valor de 350 ohms ( $\Omega$ ) y una resistencia de cola o  $R_p$  con un valor de 2400 ohms ( $\Omega$ ), una fuente de voltaje DC o una carga inicial del capacitor  $C_g$  de 12 KV, al obtener el resultado de la simulación del circuito B se observa que el tiempo de frente es de  $1.2 \mu\text{s}$  y el tiempo de cola de  $46 \mu\text{s}$  con un voltaje

pico de 11070 V datos visualizados que se facilitaron al usar la herramienta rules de Scope en Simulink la cual brinda todos los valores de tiempos y voltajes de la señal simulada siendo mostrados en la parte superior derecha resaltados en cuadro rojo como se observa en la Figura 28, estos valores denotan de un buen rendimiento con respecto al voltaje pico entregado y a las normas establecidas las cuales indican que para un impulso de voltaje tipo rayo el tiempo de frente es de  $1.2 \mu\text{s} \pm 30\%$  y el tiempo de cola de  $50 \mu\text{s} \pm 20\%$  además se observa los puntos marcados los cuales indican los tiempos de onda en este caso serian punto 1 tiempo de frente y punto 2 tiempo de cola como se muestra a continuación Figura 28.

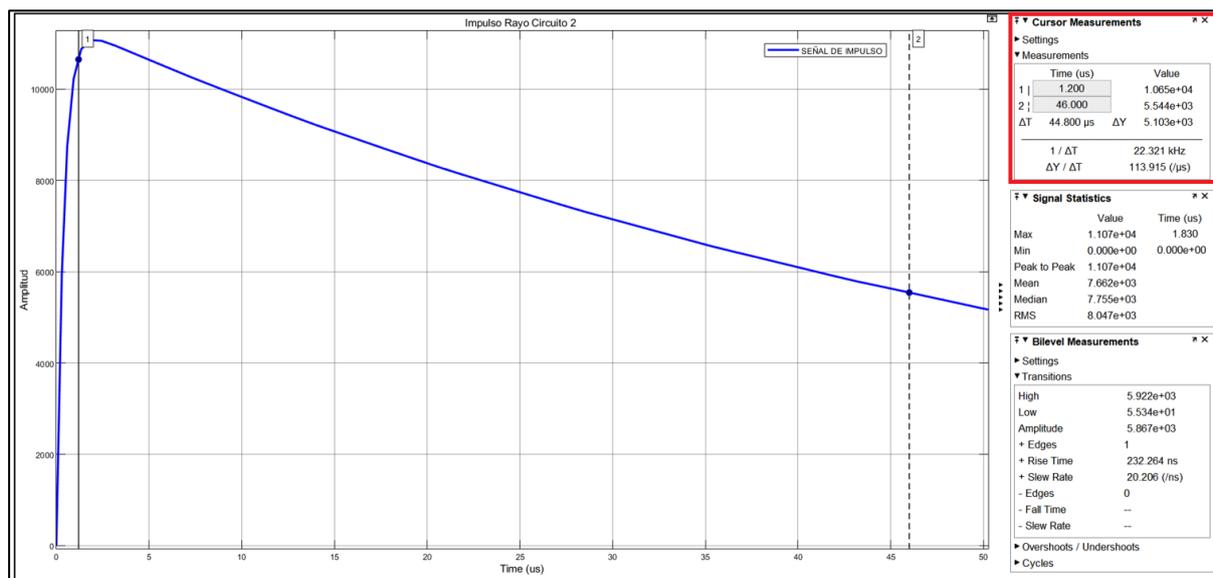
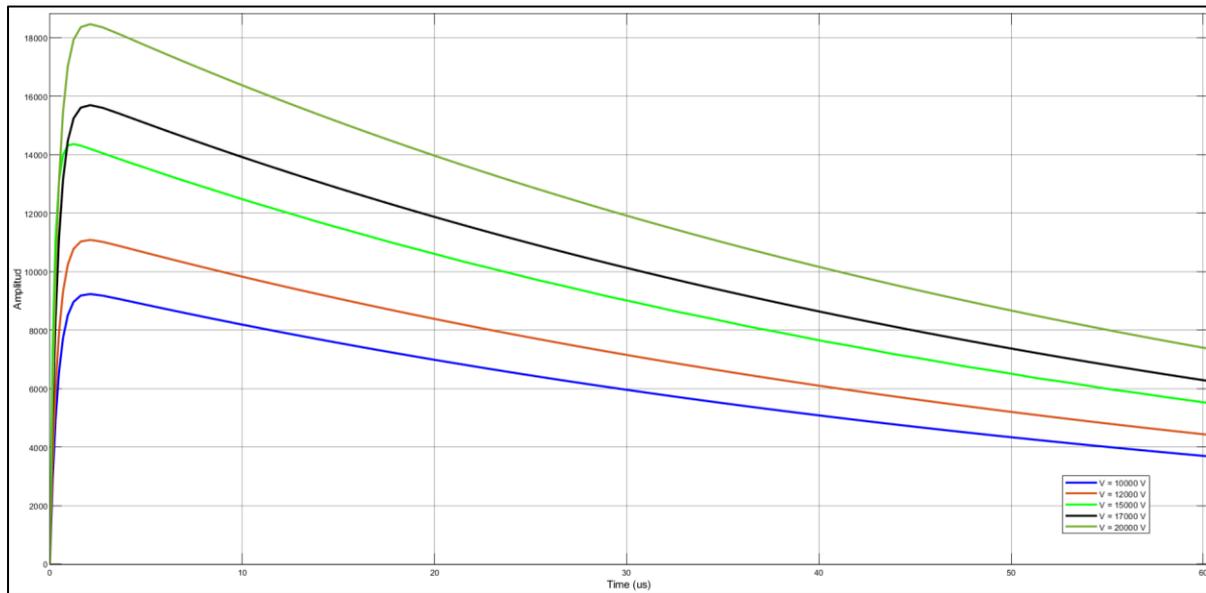


Figura 28. Impulso tipo rayo de circuito B.  
Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)

### 3.5.2 Impulso tipo rayo de circuito B con variaciones de voltaje.

Al iniciar con la simulación del circuito B de la Figura 5 se configuraron 5 circuitos con fuentes de voltaje o con cargas iniciales en los capacitores  $C_g$  con voltajes DC de 10 kV hasta 20 kV (Max) cada uno conservando la configuración de resistencias para generar impulsos de voltaje tipo rayo usando para  $R_{s2}$  o resistencias de frente con un valor de 350 ohms ( $\Omega$ ) y para  $R_p$  o resistencias de cola con un valor de 2400 ohms ( $\Omega$ ) al analizar los resultados se observa que los tiempos de las ondas varían pero de manera casi insignificante dependiendo del voltaje usado, notando que la única diferencia es la amplitud o voltajes de las señales además se observa que todas las ondas brindan excelentes resultados y cumplen con la normativa establecida la cual indica que para impulsos de voltaje tipo rayo el tiempo de frente es de  $1.2 \mu\text{s} \pm 30\%$  y el tiempo de cola de  $50 \mu\text{s} \pm 20\%$ , se analiza que al trabajar con el rango de voltajes propuestos no influyen a los tiempos de ondas dando resultados similares como se muestra a continuación en la Figura 29.



**Figura 29. Impulso tipo rayo de circuito B.**  
**Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)**

### 3.5.3 Impulso tipo maniobra de circuito B.

Para iniciar con la simulación y generación de impulso tipo maniobra se configuró el circuito B de la Figura 5 del Capítulo 2 con los parámetros propuestos en la tabla 2.2 correspondientemente en este caso se usó una resistencia de frente de onda o  $R_{s2}$  con un valor de 47 kohms ( $k\Omega$ ) y una resistencia de cola o  $R_p$  con un valor de 120 kohms ( $k\Omega$ ), para su análisis y muestra de resultados se usó un voltaje DC de 12 kV, para facilitar la observación de tiempos y voltajes se usó la herramienta rules la cual brinda los diferentes resultados un tiempo de frente de 227  $\mu s$ , un tiempo de cola de 2473  $\mu s$  con un voltaje pico de 1066 V estos valores muestran un buen rendimiento del circuito B al momento de generar impulsos de voltaje del tipo maniobra comparándolo con la norma establecida la cual indica que un impulso tipo maniobra tiene un tiempo de frente de 250  $\mu s \pm 20\%$  y un tiempo de cola de 2500  $\mu s \pm 60\%$  además el voltaje pico entregado es superior en comparación con el circuito A configurado para la generación de impulso de voltaje tipo maniobra los tiempos de ondas se resaltan con un cuadro rojo en la parte superior derecha de la Figura 30, además se observa otros valores que brinda el software que definen la onda.

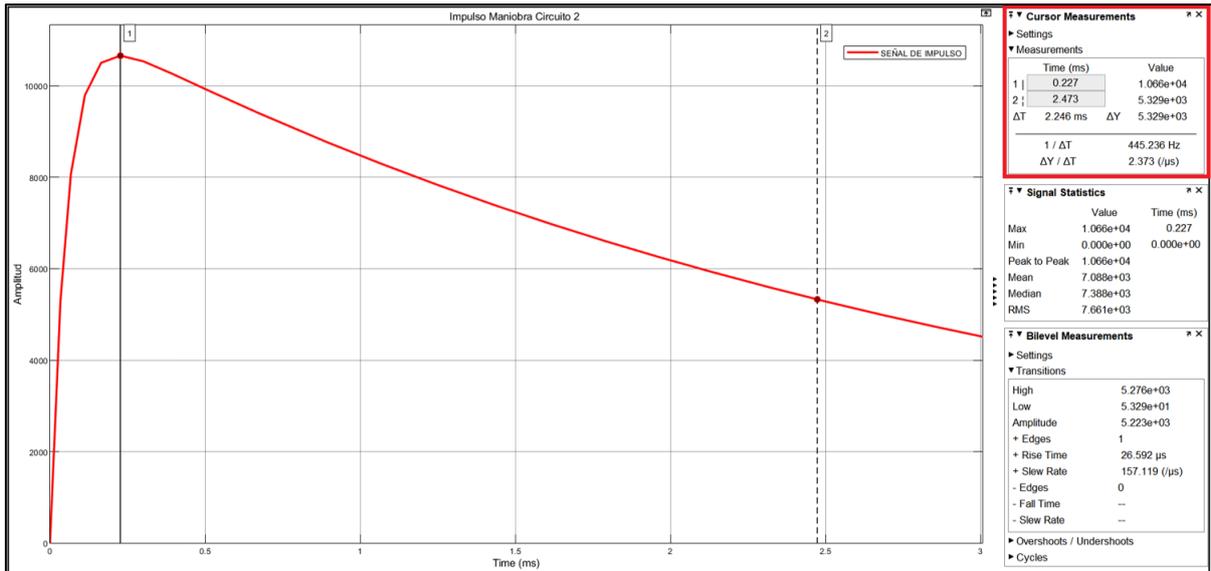


Figura 30. Impulso tipo maniobra de circuito B.  
Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)

### 3.5.4 Impulso tipo maniobra del circuito B con variaciones de voltaje

Para iniciar con la simulación del circuito B de la Figura 5 del Capítulo 2 se modelaron 5 circuitos cada uno con fuentes independientes que van desde los 10 kV hasta los 20 kV (Max) conservando la misma configuración de resistencias y parámetros mostrados en la Tabla 2.2 los cuales son conformados por una resistencia de frente de onda o  $R_{S_2}$  con un valor de 47 kohms ( $k\Omega$ ) y una resistencia de cola o  $R_p$  con un valor de 120 kohms ( $k\Omega$ ) al analizar los resultados se observa que se mantienen los mismos tiempos de ondas con mínimas diferencias casi imperceptibles y que no cambian el resultado sin importar el voltaje al cual se esté trabajando notando que la única diferencia es el voltaje o la amplitud de las señales de onda como se muestra a continuación Figura 31.

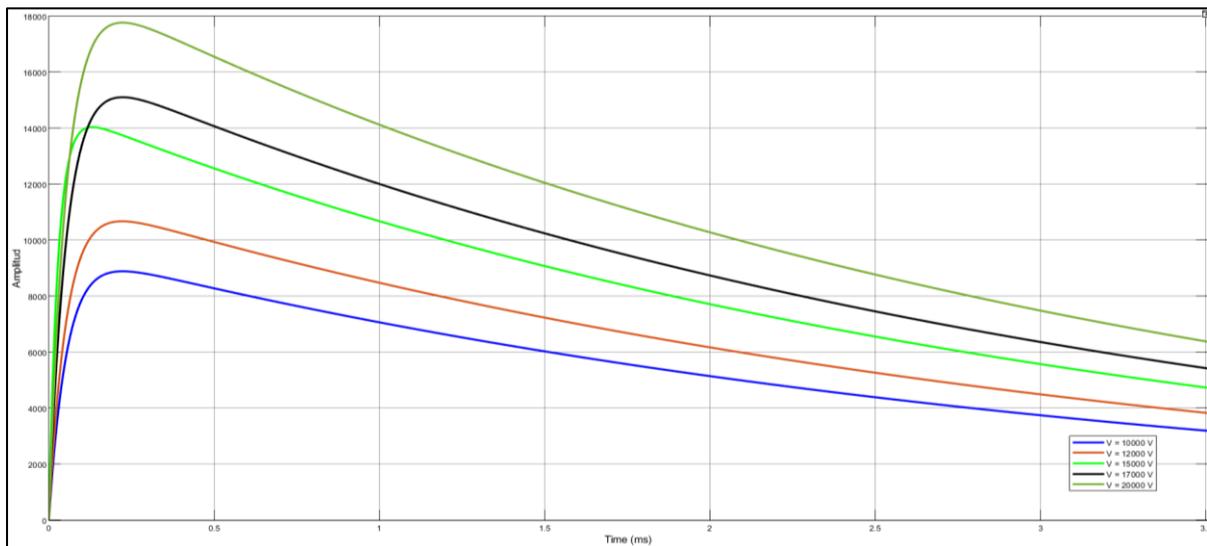


Figura 31. Impulso tipo maniobra de circuito B con variaciones de voltaje

### 3.6 Circuito 3 modelado en Simulink.

El circuito 3 de la Figura 3 del Capítulo 1 se lo modelo usando los mismos parámetros de los circuitos A y B de la Figura 5 observando que el circuito es una combinación de los circuitos mencionados, introduciendo las resistencias  $R_{s1}$  y  $R_{s2}$  en un solo circuito conectadas en serie y teniendo en cuenta que  $R_{s1} = R_{s2}$  siendo estas resistencias las que definen el tiempo de frente y  $R_p$  como resistencia que define el tiempo de cola, los valores de los componentes serán los mismos de la tabla 2.2 correspondientemente y de igual manera se usaran diferentes voltajes entre los 10 kV hasta los 20 kV además se aprecia que este tipo de circuito no es usado con frecuencia ya que solo asemeja la forma de onda de los impulsos tipo rayo o tipo maniobra alejándose de tiempos establecidos por normatividad, a continuación se muestra la modelación del circuito 3 en la Figura 32.

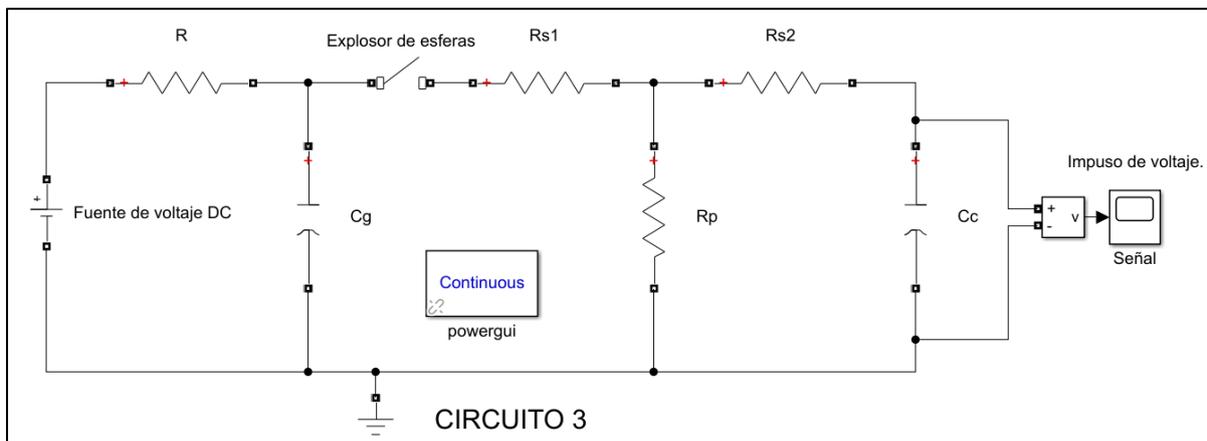


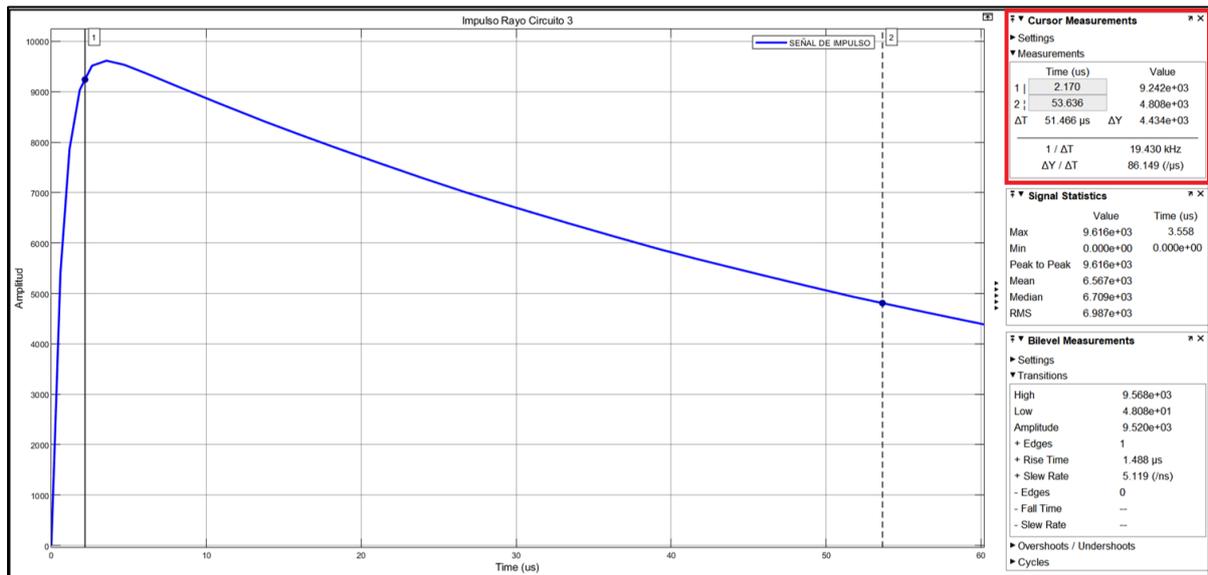
Figura 32. Circuito 3 modelado en Simulink.  
Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)

#### 3.6.1 Impulso tipo rayo de circuito 3

El circuito 3 de la Figura 3 al ser un modelo de la combinación del circuito A y B de la Figura 5, muestra variaciones de valores más visibles al momento de simular impulso de voltaje tipo rayo se usó como resistencias de frente  $R_{s1}$  y  $R_{s2}$  con un valor de 350 ohms ( $\Omega$ ) y resistencia de cola o  $R_p$  un valor de 2400 ohms ( $\Omega$ ) para muestra de resultados se usó una carga inicial al capacitor  $C_g$  de 12 kV, los valores y tiempos se visualizaron usando herramientas de Simulink las cuales ayudan para la visualización de valores precisos arrojando los siguientes resultados un tiempo de frente de 2.17  $\mu$ s, tiempo de cola de 53.636  $\mu$ s con un voltaje pico de 9616 V, datos que son resaltados con un cuadro de color rojo en la parte superior derecha de la Figura 33 como también se observa datos adicionales correspondientes a la onda de

impulso, concluyendo que el circuito 3 no brinda buenos resultados muy por debajo del circuito A y B de la Figura 5.

Para identificar los tiempos de ondas en la Figura 33 se establece el punto 1 como tiempo de frente y el punto 2 como tiempo de cola, los datos son resaltados en la parte superior derecha con un marco rojo indican los tiempos de onda de igual manera el software brinda datos adicionales que corresponden a la onda de impulso.



**Figura 33. Impulso tipo rayo de circuito 3.**  
**Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)**

### 3.6.2 Impulso tipo rayo de circuito 3 con variaciones de voltaje.

Para iniciar con la simulación del circuito 3 de la Figura se modelaron 5 circuitos independientes cada uno con voltajes diferentes que van desde los 10 kV hasta los 20 kV usando las configuraciones de resistencias para generar impulso de voltaje tipo rayo observando que al igual que los circuitos A y B de la Figura 5 conservan los tiempos de ondas en todos los casos con la única variación de que cambia la amplitud de las señales de acuerdo al voltaje usado y un rendimiento muy por debajo en comparación a los circuitos A y B no siendo viable al momento de querer usar este modelo para una implementación física los resultados se muestran a continuación Figura 34.

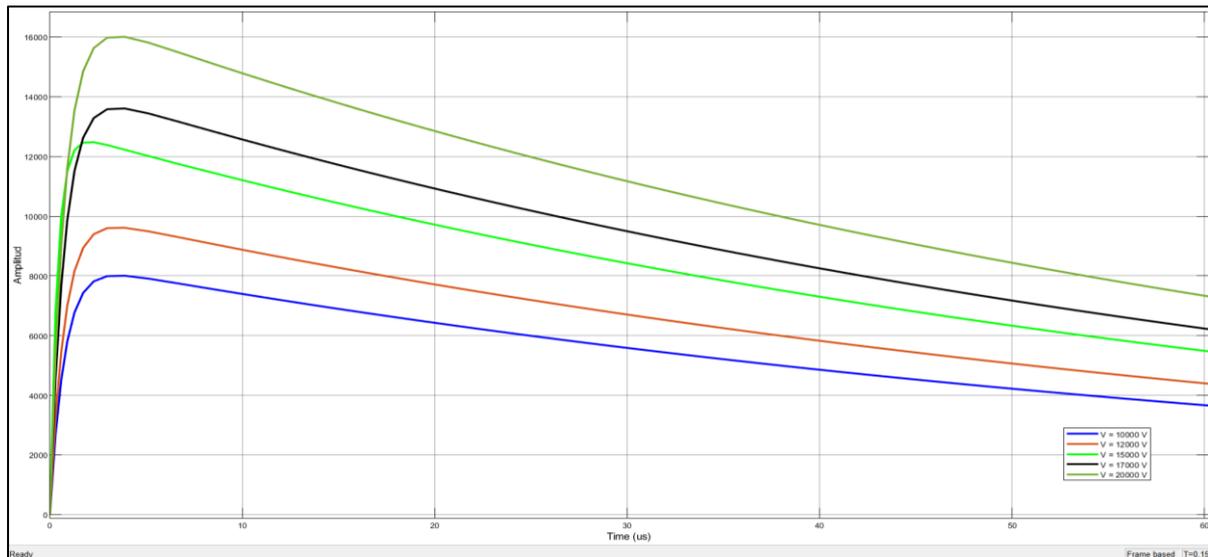


Figura 34. Impulso tipo rayo de circuito 3 con variaciones de voltaje.  
Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)

### 3.6.3 Impulso tipo maniobra de circuito 3

El circuito 3 de la Figura 3 muestra una variación de tiempos y voltajes más considerable, pero conservando la forma de la onda característica de un impulso según normativa, para la simulación del circuito se usaron resistencias de frente en este caso  $R_{s1}$  y  $R_{s2}$  con un valor de 47 kohms ( $\Omega$ ) y de resistencia de cola o  $R_p$  con un valor de 120 kohms ( $\Omega$ ), los resultados indicaron un tiempo de frente de 326  $\mu s$ , un tiempo de cola de 3471  $\mu s$  y con un voltaje pico de 7695 V, al comparar con la norma establecida la cual especifica que un impulso tipo maniobra tiene un tiempo de frente de 250  $\mu s \pm 20\%$  y un tiempo de cola de 2500  $\mu s \pm 60\%$  se observa que no es muy eficiente al generar impulsos de voltaje del tipo maniobra, los tiempos de las ondas en la gráfica se visualizan con los puntos siendo punto 1 el tiempo de frente y siendo punto 2 el tiempo de cola, datos resaltados en la parte superior derecha con un marco rojo como se muestra en la Figura 35.

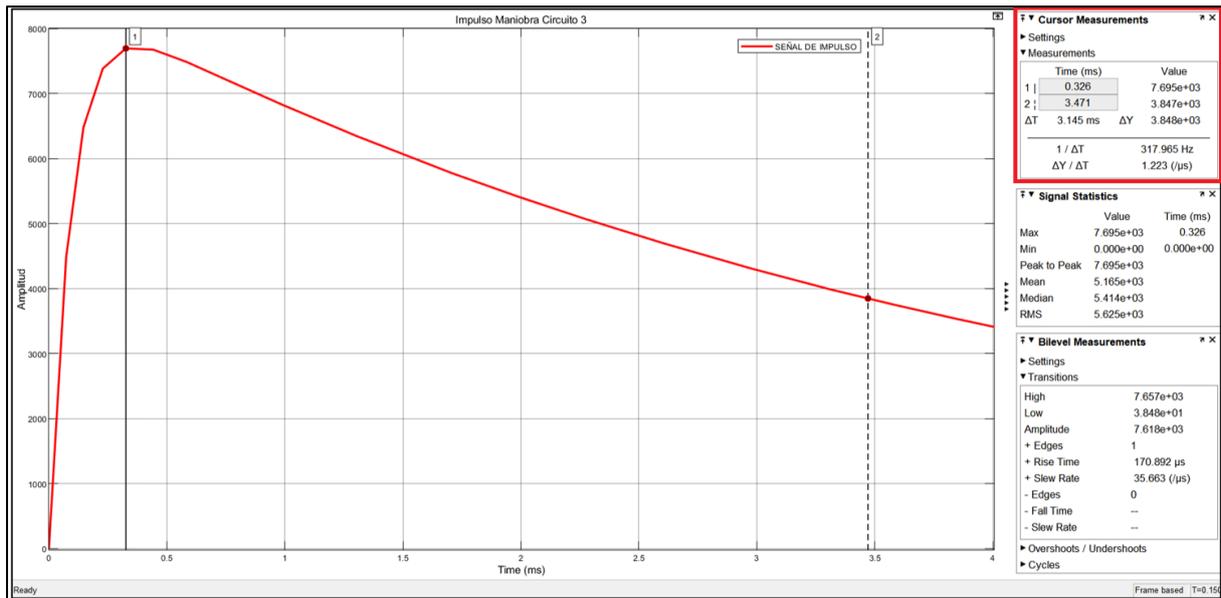


Figura 35. Impulso tipo maniobra de circuito 3.  
Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)

### 3.6.4 Impulso tipo maniobra de circuito 3 con variaciones de voltaje.

Para simular las 5 señales de impulso de voltaje se modelaron 5 circuitos del circuito 3 de la Figura 3, cada uno con una configuración independiente de fuente de voltaje que va desde los 10 kV hasta los 20 kV, el osciloscopio o herramienta usada conocida como scope se la configuro para que disponga de 5 entradas de señal, al visualizar las ondas se observa que todas mantienen los mismo tiempos tanto de frente de onda como de cola de onda según la normativa la cual dice que un impulso tipo maniobra tiene un tiempo de frente de  $250 \mu s \pm 20\%$  y un tiempo de cola de onda de  $2500 \mu s \pm 60\%$ , se observa que la única diferencia notoria es la amplitud de las señales que se define de acuerdo al voltaje con el cual se está trabajando como se ve a continuación en la Figura 36.

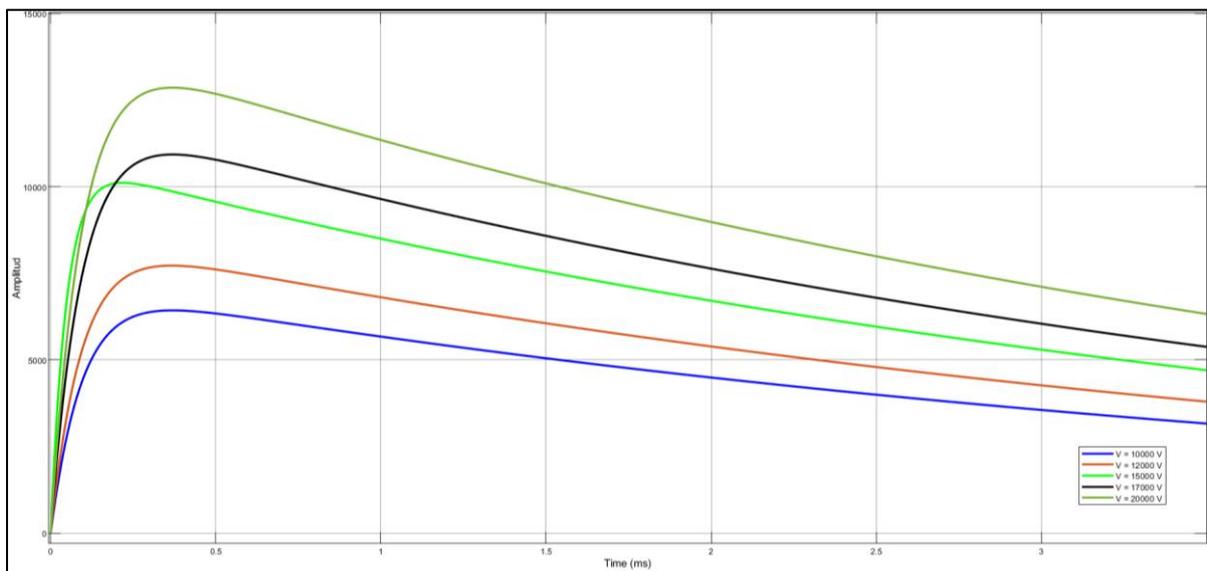


Figura 36. Impulso tipo maniobra de circuito 3 con variaciones de voltaje.

### 3.7 Resultados de simulaciones.

A continuación, se muestra la tabla de resultados de tiempos de ondas y voltajes pico brindados por las simulaciones tomando en cuenta que se usó 12 kV como voltaje de referencia inicial para poder comparar los tiempos entre los circuitos A y B de la Figura 5 y el circuito 3 de la Figura 3.

Las gráficas de las ondas de impulsos de voltaje ya sean tipo rayo o tipo maniobra de los circuitos simulados se las analiza a lo largo del capítulo para poder observar su rendimiento, según las normas establecidas que indican que para un impulso tipo rayo el tiempo de frente de onda es de  $1.2 \mu\text{s} \pm 30\%$  y el tiempo de cola de onda es de  $50 \mu\text{s} \pm 20\%$  y para impulso tipo maniobra se define como tiempo de frente onda de  $250 \mu\text{s} \pm 20\%$  y un tiempo de cola de onda de  $2500 \mu\text{s} \pm 60\%$ .

Al analizar los resultados de las simulaciones de los circuitos A y B de la Figura 5 y el circuito 3 de la Figura 3, se puede observar que el circuito B es el que mejor rendimiento tiene al generar impulsos de voltaje tipo rayo y tipo maniobra tanto en tiempos de ondas como en voltajes pico entregado brindando resultados más apegados a normativa establecida y justificando por qué el circuito 2 es el que se usa para la generación de este tipo de impulsos, a continuación se muestra los resultados de las simulaciones en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Resumen de resultados de simulación de circuitos simulados.  
Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)

Resultados De Simulación De Circuitos Según Normativa						
Circuito	Tipo de Impulso	Resistencias ( $\Omega$ )			Tiempos (Frente / Cola) $\mu\text{s}$	Voltaje pico V
		Rsi1	Rs2	Rp		
A	Rayo	350 $\Omega$		2400 $\Omega$	1,06 $\mu\text{s}$ / 51,6 $\mu\text{s}$	9831 V
B	Rayo		350 $\Omega$	2400 $\Omega$	1,89 $\mu\text{s}$ / 46 $\mu\text{s}$	11070 V
3	Rayo	350 $\Omega$	350 $\Omega$	2400 $\Omega$	2,17 $\mu\text{s}$ / 53,6 $\mu\text{s}$	9616 V
A	Maniobra	47 k $\Omega$		120 k $\Omega$	187.2 $\mu\text{s}$ / 3193 $\mu\text{s}$	8052 V
B	Maniobra		47 k $\Omega$	120 k $\Omega$	227 $\mu\text{s}$ / 2458 $\mu\text{s}$	10660 V
3	Maniobra	47 k $\Omega$	47 k $\Omega$	120 k $\Omega$	326 $\mu\text{s}$ / 3471 $\mu\text{s}$	7695 V

### 3.8 Comparación de eficiencia entre circuitos simulados.

Para iniciar con la simulación se modelaron los circuitos A, B de la Figura 5 y el circuito 3 de la Figura 3 se modelaron 3 circuitos, cada uno configurado con una fuente de voltaje DC o también Simulink brinda la opción de iniciar con carga inicial en el capacitor  $C_g$  omitiendo la fuente de voltaje de la simulación, los circuitos de igual manera son configurados con los parámetros de la tabla 2.2 correspondientemente se optó por usar un voltaje de 12 kV y configurando la herramienta scope con tres entradas de señal para los circuitos modelados, los resultados son usados para verificar su rendimiento y análisis.

### 3.8.1 Impulsos tipo rayo de Circuitos simulados

Al comparar las señales de los circuitos A y B de la Figura 5 y el circuito 3 de la Figura 3 se puede observar que el circuito B es el que mejor rendimiento da ya que brinda un voltaje pico mayor comparado con el voltaje de entrada que alimenta el generador en este caso se usó 12 kV y en rendimiento es seguido por el circuito A y el circuito 3, los resultados del voltaje pico de cada circuito se detallan en la Tabla 3.1 observando que los resultados de todas las simulaciones cumplan y se comparen con las normas establecidas según (IEEE Standard 4; IEC Standard 60060-1).

Al comparar las ondas de impulso entre si se nota la gran influencia que tienen los componentes al momento de generar impulsos de tensión, notando como influyen los elementos  $R_{s1}$ ,  $R_{s2}$ ,  $R_p$  y  $C_c$  en la forma y tiempos de la señal de cada onda como se indica en la Figura 37.

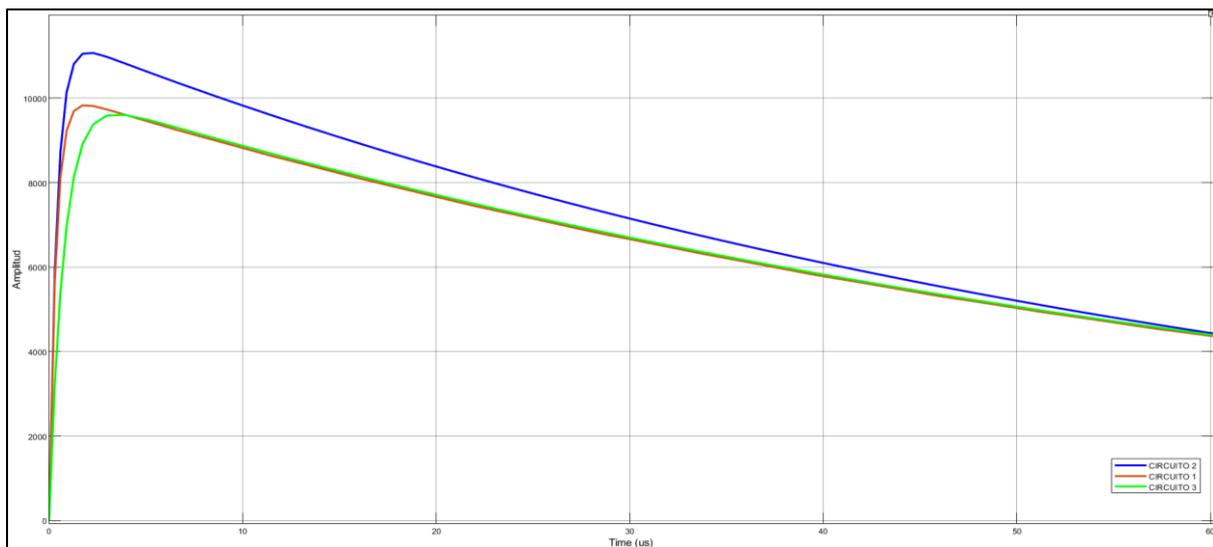
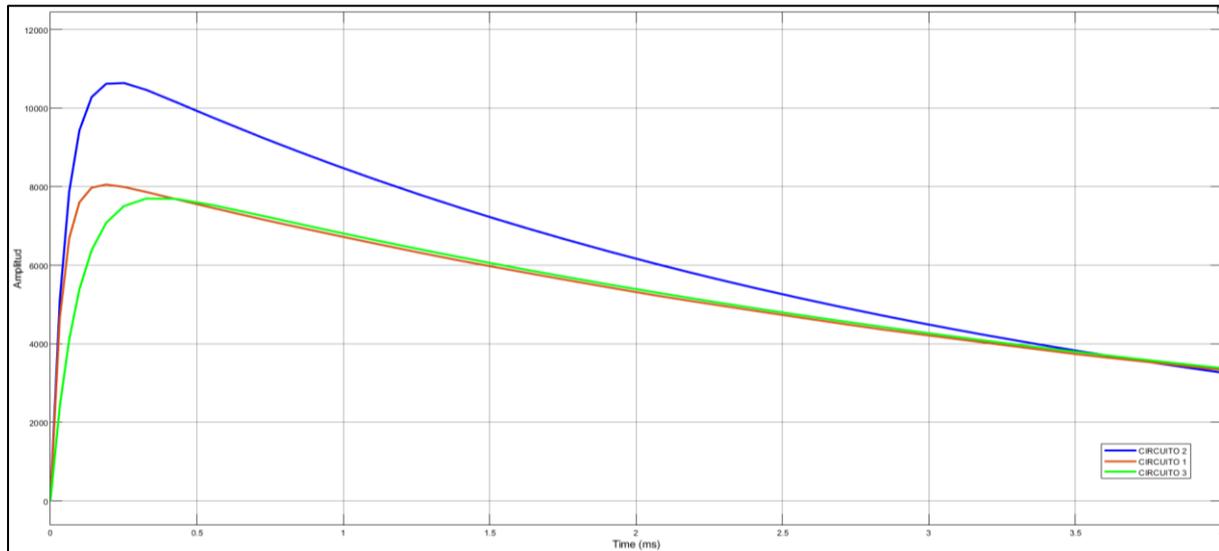


Figura 37. Impulsos tipo rayo de los circuitos A, B y 3.  
Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)

### 3.8.2 Impulsos tipo maniobra de los circuitos simulados.

De igual manera al configurar los circuitos A, B de la Figura 5 y el circuito 3 con los parámetros propuestos en la tabla 2.2 con resistencias para generar impulsos tipo maniobra, se observa que el circuito B ofrece un mayor rendimiento al momento de generar impulsos de voltaje del tipo maniobra dando tiempos de ondas más apegados a con las normas establecidas según (IEEE Standard 4; IEC Standard 60060-1) también se observa un voltaje pico mayor por parte del circuito B más apegado al voltaje de entrada seguido por el circuito

A y el circuito 3, en la tabla 3.1 se especifica los tiempos de ondas y voltajes pico la comparación de las ondas se pueden ver en la Figura 38.



**Figura 38. Impulsos tipo maniobra de los circuitos A, B y 3.**  
**Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)**

### 3.9 Sensibilidad de circuitos simulados al variar parámetros $R_{s1}$ , $R_{s2}$ , $R_p$ y $C_c$ .

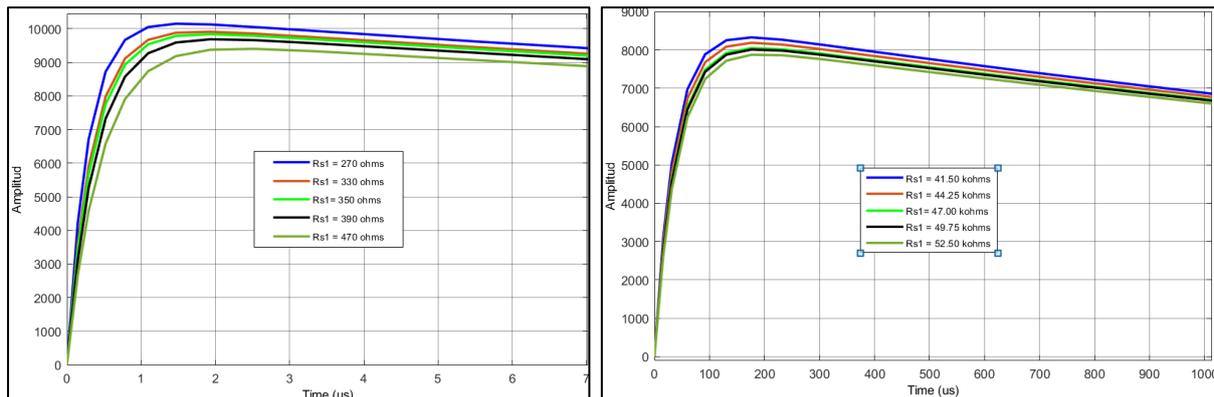
Al comparar los impulsos de voltaje en las figuras 37 y 38 se notó que los componentes y el diseño de los circuitos que generan impulsos de voltaje influyen en la forma y tiempos de onda, las simulaciones que se realizaran a continuación prueban la sensibilidad que presentan los circuitos simulados al variar sus elementos principales como son resistores y capacitores, se decidió usar valores de componentes no muy alejados de los valores propuestos en la Tabla 2.3 parámetros considerados para observar su comportamiento al notar que los circuitos A y B de la Figura 5 ofrecen mejores resultados al momento de generar impulsos decidiendo usarlos para esta simulación.

#### 3.9.1 Sensibilidad de los circuitos A y B al variar las resistencias de frente $R_{s1}$ y $R_{s2}$ .

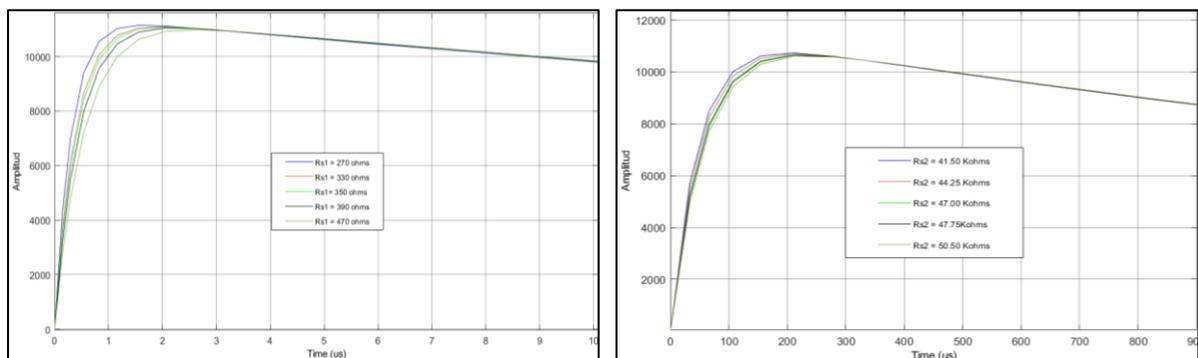
Al variar los parámetros de las resistencias de frente o  $R_{s1}$  y  $R_{s2}$  del circuito A y B de la Figura 5 se tomó como valor inicial para generar un impulso tipo rayo las resistencias de frente con un valor 350 ohms ( $\Omega$ ) y en el caso de impulso tipo maniobra las resistencias de frente de 47 kohms ( $\Omega$ ) sin variar los valores de las resistencias de cola o  $R_p$ , se optó por usar los componentes con dos valores por encima y dos por debajo del valor inicial para visualizar su comportamiento, como resultado se observa que al disminuir  $R_{s1}$  los tiempos de frente como los voltajes pico aumentan y al aumentar el valor de las resistencias de frente  $R_{s1}$  los tiempos de las ondas y los voltajes pico disminuyen tomando como referencia los valores iniciales

además se observa que este comportamiento de sensibilidad es igual tanto para el circuito A y B también para impulso tipo rayo o impulso tipo maniobra.

A continuación, en la figura 39 se indica la sensibilidad del circuito A de la Figura 5 del capítulo 2 y en la figura 40 la sensibilidad del circuito B de la Figura 5 ante variaciones de la resistencia de frente  $R_{s1}$  o  $R_{s2}$  siendo izquierda impulso tipo rayo y derecha impulso tipo maniobra los resultados de los valores se justifican en los Anexos A y B correspondientemente.



**Figura 39. Sensibilidad de circuito A al variar  $R_{s1}$  (Rayo/Maniobra)**  
Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)

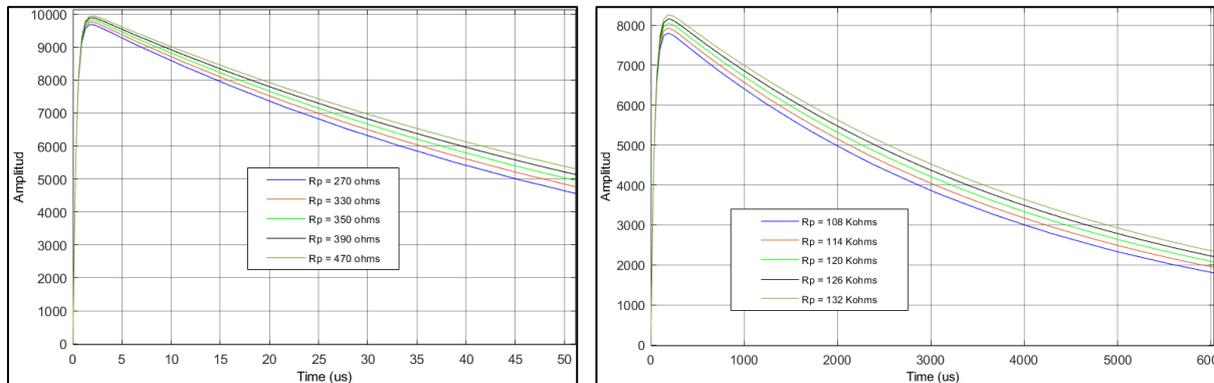


**Figura 40. Sensibilidad de circuito B al variar  $R_{s1}$  (Rayo/Maniobra)**  
Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)

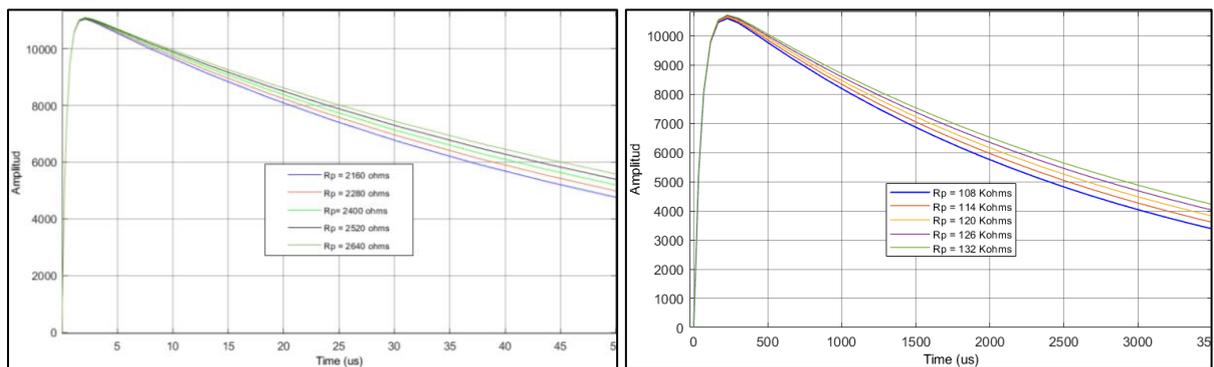
### 3.9.2 Sensibilidad de los circuitos A y B al variar $R_p$ .

Para comprobar la sensibilidad de los circuitos simulados se configuro los valores de las resistencias de cola o  $R_p$  con resistencias con dos valores por encima y dos valores por debajo del valor propuesto que es de 2400 ohms ( $\Omega$ ) para la generación de impulsos tipo rayo y de 120 kohms ( $\Omega$ ) para impulso tipo maniobra los resultados indican lo siguiente se observa que al aumentar la resistencia de cola  $R_p$  el voltaje y la amplitud de las señales incrementan y al disminuir la resistencia de cola  $R_p$  el voltaje y la amplitud de la señal decae este

comportamiento se observa en el circuito A y B por igual ya sea impulso rayo o maniobra en las Figuras 41 y 42 los resultados de los valores se encuentran e los Anexos C y D correspondientemente para su respectivo analisis.



**Figura 41. Sensibilidad de circuito A al variar Rp (Rayo/Maniobra)**  
Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)



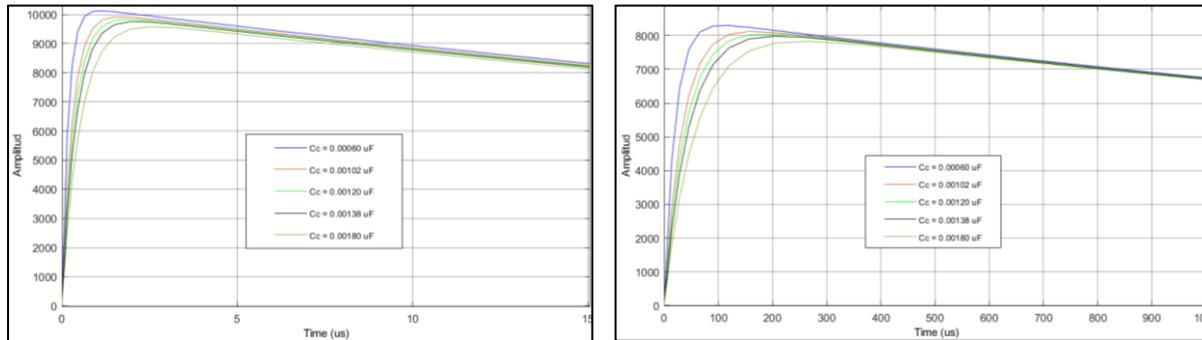
**Figura 42. Sensibilidad de circuito B al variar Rp (Rayo/Maniobra)**  
Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)

### 3.9.3 Sensibilidad de los circuitos A y B al variar $C_c$ .

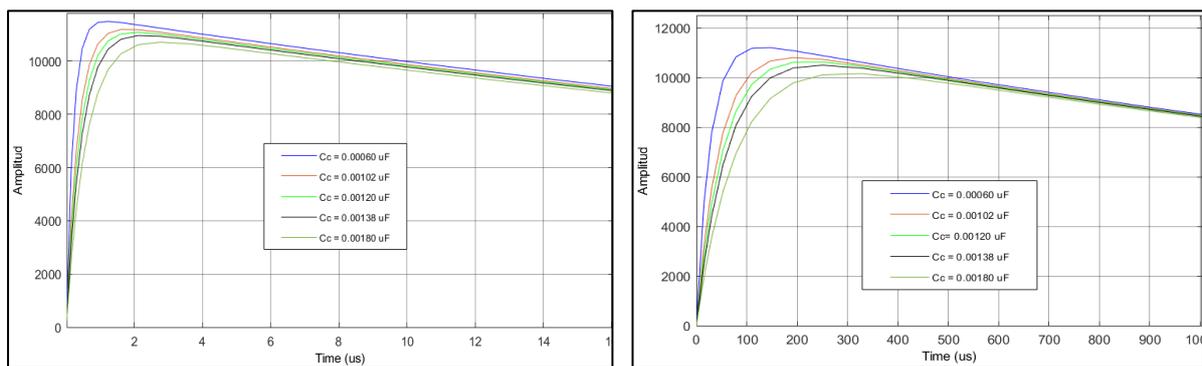
Para comprobar la sensibilidad de los circuitos A y B se decidió comparar las señales de ondas de impulsos variando los valores de los capacitores de descarga o  $C_c$  conservando los valores de los resistores tanto de impulso tipo rayo como de impulso tipo maniobra dando como resultados que al aumentar el valor del capacitor de descarga disminuye el voltaje pico, el tiempo de frente como el tiempo de cola y al usar un capacitor de menor valor en comparación al capacitor inicial propuesto en la Tabla 2.3 el valor de las señales aumenta verificando como influyen cada uno de los componentes en la forma y tiempos de ondas.

En las Figuras 43 y 44 se observa las gráficas de sensibilidad al variar el capacitor de descarga o  $C_c$  resultados que influyen de igual manera en los dos circuitos simulados A y B

de la Figura 5 los resultados de las gráficas se muestran a continuación en la Figura 43 y 44 los resultados de la simulación se apoyan en los Anexos E y F correspondientemente.



**Figura 43. Sensibilidad de circuito A al variar Cc (Rayo/Maniobra)**  
**Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)**



**Figura 44. Sensibilidad de circuito B al variar Cc (Rayo/Maniobra)**  
**Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)**

Como se mencionó anteriormente las pruebas de impulso tienen como objetivo caracterizar el aislamiento de los equipos ante sobretensiones en su mayoría transformadores.

Cada equipo a poner a prueba se rige por normatividad al momento de aplicar pruebas de impulsos de voltaje con un procedimiento especial que depende del caso en el cual se va a realizar la prueba, durante la aplicación de las diferentes ondas de impulso se debe obtener un oscilograma de la tensión aplicada sirviendo para verificar la forma de onda inyectada y que cumpla con los parámetros requeridos ayudando para realizar la evaluación de la prueba que se va a realizar (Valecillos, 2005).

La normatividad sobre pruebas de impulso da guías de interpretación brindando gran cantidad de información sobre cómo interpretar los resultados de las mediciones, por lo general la evaluación de los resultados se hace de forma comparativa con los oscilogramas que dan las pruebas de impulso (ANSI/IEEE Std C57.98, 1993).

## Conclusiones

- Los generadores de impulso son equipos necesarios en el ámbito del alto voltaje, siendo de gran importancia conocer su funcionamiento y la normatividad al cual se rigen esta clase de equipos como también su relevancia al momento de estudiarlos.
- Al analizar el funcionamiento de los circuitos para la generación de impulsos de voltaje se notó que son esquemas básicos y que todos los componentes es posible conseguirlos en el mercado o con una aproximación cercana considerando el porcentaje de error permitido según normativa.
- Los modelos realizados en MATLAB / Simulink muestran la comparación de los circuitos verificando cual tiene mejor resultados, analizando tiempos y formas de ondas concluyendo que es posible usar diferentes elementos a los propuestos. Además, se comprueba la sensibilidad y comportamiento al variar los parámetros establecidos indicando que se pueden usar diferentes combinaciones de elementos para obtener los resultados deseados.

## Recomendaciones

- Al dimensionar el generador de impulsos de voltaje se notó que los valores de los elementos pueden ser variados ya que no es fácil disponer de elementos con valores exactos como los mencionados en este trabajo y también es posible variar las configuraciones de los elementos que componen los generadores de impulsos.
- Al ser simulaciones modeladas en MATLAB Simulink de generadores de impulsos de una etapa los resultados pueden cambiar si se opta por realizar una implementación física ya que factores como la fuente de voltaje, rectificadores y resistencias influyen al momento de observar los resultados.
- En caso de hacer simulaciones de generadores de impulso con elementos de valores diferentes a los propuestos, se recomienda comprobar los resultados variando el valor de los componentes y que los resultados sean comparados con normativas dadas por instituciones como IEEE, IEC, etc. Siendo este trabajo destinado también como guía básica para usar MATLAB / Simulink brindando pautas y consejos para usar el software como herramienta de simulación.

## Referencias

- IEEE Std 4-1978, ANSI/IEEE. (s.f.). *Standard Techniques for High Voltage Testing*. .
- (IEC), I. E. (6 de Junio de 2007). *IEC WEBSTORE. Obtenido de Internacional Electrotechnical Comisión (IEC): <https://webstore.iec.ch/publication/18775>* .
- Andres Aguirre, J. V. (Marzo de 2015). Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/10252/1/UPS-GT001342.pdf>
- ANSI/IEEE Std C57.98. (1993). *Guide for Transformer Impulse Test*.
- ANSI/IEEE, S. (1995). *IEEE Standard Techniques For High Voltage Testing*.
- Araneda, F. N. (2017). *Modelación, Diseño e Implementación de un Generador de Marx de Estado Sólido para Aplicaciones de Campo Eléctrico Pulsado*. Concepción.
- Arango, S. G. (2014). Diseño y Construcción de un Generador de Impulsos de Alta Tensión, Portátil y Didáctico. En P. y. Diseño y Construcción de un Generador de Impulsos de Alta Tensión.
- Castillo, J. S. (2014). *Diseño y Construcción de un Generador de Impulsos Recurrentes*. SANTIAGO DE CALI.
- Comisión., W. I. (29 de Noviembre de 2010). *IEC. Obtenido de Webstore Internacional Electrotechnical Comisión: <https://webstore.iec.ch/publication/301>*.
- Daniel, B. M. (2014). Circuito Generador de Impulsos De Tensión. *Academia.edu*.
- E. Kuffel, W. Z. (2000). *High Voltage Engineering Fundamentals*. Butterworth.
- El Octavo Bit*. (Agosto de 2020).
- Electrical Teting Group. (2009). *Inducor*. Obtenido de <http://www.inducor.com.ar>
- ENGINEERS, I. O. (2011). *IEEE Standard for Insulation Coordination-Definitions, Principles and Rules. IEEE Std C62.82.1-2010*. New York.
- Fitzgerald, A. E. (2016). *Máquinas Eléctrica, A. E. Fitzgerald, Quinta Edición*. .
- G., D. F. (2010). *Diseño y construcción de un generador de voltaje de 10 KV*. Cali, Colombia.
- Gomez–Estern, J. A. (2006/2007). *Introducción a Matlab y Simulink*.
- González, J. T. (2014). *Diseño de un explosor de esferas para*. Leganes España.
- Gussow, M. (2004). *Fundamentos de Electricidad* . McGraw-Hill.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMISSION. ( 2010). *High-voltage test techniques –Part 1: General definitions and test requirements. IEC 60060-1. 3 ed. Geneve, Suiza*.
- Juan David Mina-Casaran, Diego Fernando García, Diego Fernando Echeverry. (2019). *Construcción y evaluación de un divisor de alto voltaje para pruebas de impulso tipo rayo*.

- Julian Guillermo Castro Bayas, John Erick Jara Fajardo. (2016). "*Modelado matematico y construccion de dos elemetos resistivos, para el analisis de sobredimensiones debido a impulsos de tipo maniobra en alta tension*". Guayaquil.
- Khalifa, M. (1990). *High-Voltage Engineering Theory and Practice*. Marcel Dekker, Inc.
- M. Naidu, V. Kamaraju. ( 1996). *High-Voltage Engineering*. McGraw Hill, U.S.A.
- Mondal, J. (2014). *Modelling and Simulation of Impulse Voltage Generator using Marx Circuit*. Odisha.
- Morales, R. G. (2007). *MODELACIÓN DEL GENERADOR DE IMPULSOS*. Caracas,.
- Prochazka, R., Hlavacek, J., Knenicky, M. y Mahmoud, R. (2016). *Determination of frequency characteristics of high voltage dividers in frequency domain. En 2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*.
- Ramírez, J. J. (2012). *Scribd*. Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/100566504/Impulsos-Tipo-Rayo-Tipo-Maniobra>
- Rincon, D. F., & Garcia, D. F. (29 de Enero de 2009). *www.academia.edu*. Obtenido de [https://www.academia.edu/31680527/Dise%C3%B1o\\_y\\_construcci%C3%B3n\\_de\\_un\\_generador\\_de\\_impulso\\_de\\_voltaje\\_de\\_10kV](https://www.academia.edu/31680527/Dise%C3%B1o_y_construcci%C3%B3n_de_un_generador_de_impulso_de_voltaje_de_10kV)
- S. Gomez, M.P.Buitrajo, F.A. Roldan. (2011). *Portable High Voltage Impulse Generator*. Cali Colombia.
- SÁNCHEZ, I. T. (2013). *ELECTRÓNICA DISPOSITIVOS Y APLICACIONES* .
- T. Gallagher, A. P. (1973). "*High voltage. Measurement, testing and design*". John & Wiley Sons.
- Urquidi, J. (1990). *Guía de Laboratorio de Alta Tensión CT-5181*. Marcel Dekker, Inc.
- Valecillos, B. (2005). *Análisis de la respuesta en frecuencia como herramienta de evaluación de las pruebas de impulso en transformadores*. Leganés.
- Zahid Javid, Ke-Jun Li, , Kaiqi Sun and Arooj Unbreen. (2018). *Cost Effective Design of High Voltage Impulse Generator and Modeling*.

## Anexos

Anexo A: Imágenes de los componentes adquiridos en los cuales se basa el diseño del dimensionamiento del generador de impulsos.



Figura 45. Capacitor Marca AJR76 ( $0.56 \mu F$ ) 1000V DC vista superior  
Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)

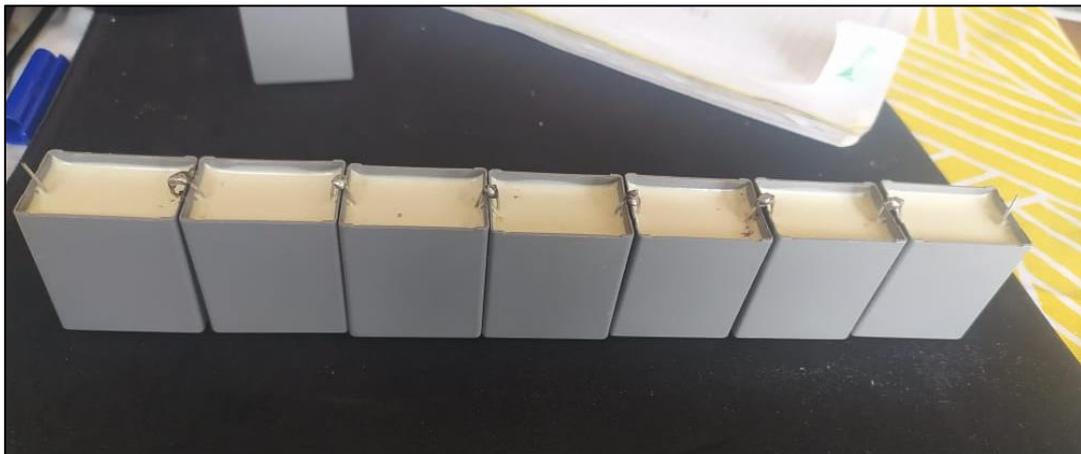


Figura 46. Capacitor Marca AJR76 ( $0.56 \mu F$ ) 1000V DC en serie.  
Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)



**Figura 47. Capacitor Marca jb473K (0.046  $\mu F$ ).**  
Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)



**Figura 48. Capacitores Marca jb473K (0.046  $\mu F$ ) en serie.**  
Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)



**Figura 49. Rectificador de alto voltaje NTE 541 vista frontal.**

Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)

## Anexo B: Resultados de sensibilidad al variar $R_{s1}$ en circuito A.

Tabla 3.2 Resultados de sensibilidad al variar valores de  $R_{s1}$  en el circuito 1 (Rayo).  
Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)

RESULTADOS DE SENSIBILIDAD AL VARIAR $R_{s1}$ $\Omega$ EN EL CIRCUITO A (Rayo)				
Resistencia $R_{s1}$	Tipo de Onda	Tiempos de Onda		Voltaje Pico
		Frente	Cola	
270 $\Omega$	Rayo	0,55 $\mu$ s	49,82 $\mu$ s	10124 V
330 $\Omega$	Rayo	0,90 $\mu$ s	51,18 $\mu$ s	9913 V
350 $\Omega$	Rayo	1,06 $\mu$ s	51,6 $\mu$ s	9835 V
390 $\Omega$	Rayo	1,2 $\mu$ s	52,21 $\mu$ s	9752 V
470 $\Omega$	Rayo	1,54 $\mu$ s	53,41 $\mu$ s	9575 V

Tabla 3.3 Resultados de sensibilidad al variar valores de  $R_{s1}$  en el circuito A (Maniobra).  
Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)

RESULTADOS DE SENSIBILIDAD AL VARIAR $R_{s1}$ $\Omega$ EN EL CIRCUITO A (Maniobra)				
Resistencia $R_{s1}$	Tipo de Onda	Tiempos de Onda		Voltaje Pico
		Frente	Cola	
41.50 k $\Omega$	Maniobra	172,7 $\mu$ s	3082 $\mu$ s	8330 V
44.25 k $\Omega$	Maniobra	179,9 $\mu$ s	3138 $\mu$ s	8188 V
47.00 k $\Omega$	Maniobra	187,2 $\mu$ s	3193 $\mu$ s	8052 V
49.75 k $\Omega$	Maniobra	188,8 $\mu$ s	3208 $\mu$ s	8016 V
52.50 k $\Omega$	Maniobra	195,4 $\mu$ s	3263 $\mu$ s	7886 V

## Anexo C: Resultados de sensibilidad al variar $R_{s2}$ en circuito 2.

Tabla 3.4 Resultados de sensibilidad al variar valores de  $R_{s2}$  en el circuito B (Rayo).  
Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)

RESULTADOS DE SENSIBILIDAD AL VARIAR $R_{s2}$ $\Omega$ EN EL CIRCUITO B (Rayo)				
Resistencia $R_{s2}$	Tipo de Onda	Tiempos de Onda		Voltaje Pico
		Frente	Cola	
270 $\Omega$	Rayo	,96 $\mu$ s	45,53 $\mu$ s	11147 V
330 $\Omega$	Rayo	1,14 $\mu$ s	45,93 $\mu$ s	11095 V
350 $\Omega$	Rayo	1,89 $\mu$ s	46 $\mu$ s	11070 V
390 $\Omega$	Rayo	1,35 $\mu$ s	46,40 $\mu$ s	11041 V
470 $\Omega$	Rayo	1,59 $\mu$ s	46,40 $\mu$ s	10981 V

Tabla 3.5 Resultados de sensibilidad al variar valores de  $R_{s2}$  en el circuito B (Maniobra).  
Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)

<b>RESULTADOS DE SENSIBILIDAD AL VARIAR <math>R_{s2}</math> <math>\Omega</math> EN EL CIRCUITO B (Maniobra)</b>				
Resistencia $R_{s2}$	Tipo de Onda	Tiempos de Onda		Voltaje Pico
		Frente	Cola	
41.50 k $\Omega$	Maniobra	202,7 $\mu$ s	2431 $\mu$ s	10729 V
44.25 k $\Omega$	Maniobra	212,2 $\mu$ s	2444 $\mu$ s	10694 V
47.00 k $\Omega$	Maniobra	227 $\mu$ s	4473 $\mu$ s	10660 V
49.75 k $\Omega$	Maniobra	225 $\mu$ s	2462 $\mu$ s	10649 V
52.50 k $\Omega$	Maniobra	235 $\mu$ s	2475 $\mu$ s	10615 V

#### Anexo D: Resultados de sensibilidad al variar $R_p$ en circuito A.

Tabla 3.6 Resultados de sensibilidad al variar valores de  $R_p$  en el circuito A (Rayo).  
Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)

<b>RESULTADOS DE SENSIBILIDAD AL VARIAR <math>R_p</math> <math>\Omega</math> EN EL CIRCUITO A (Rayo)</b>				
Resistencia $R_p$	Tipo de Onda	Tiempos de Onda		Voltaje Pico
		Frente	Cola	
2160 $\Omega$	Rayo	1,05 $\mu$ s	47,2 $\mu$ s	9688 V
2280 $\Omega$	Rayo	1,05 $\mu$ s	49,4 $\mu$ s	9762 V
2400 $\Omega$	Rayo	1,06 $\mu$ s	51,6 $\mu$ s	9831 V
2520 $\Omega$	Rayo	1,07 $\mu$ s	53,9 $\mu$ s	9891 V
2640 $\Omega$	Rayo	1,07 $\mu$ s	56,1 $\mu$ s	9948 V

Tabla 3.7 Resultados de sensibilidad al variar valores de  $R_p$  en el circuito A (Maniobra).  
Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)

<b>RESULTADOS DE SENSIBILIDAD AL VARIAR <math>R_p</math> <math>\Omega</math> EN EL CIRCUITO A (Maniobra)</b>				
Resistencia $R_p$	Tipo de Onda	Tiempos de Onda		Voltaje Pico
		Frente	Cola	
108 k $\Omega$	Rayo	179.2 $\mu$ s	2968 $\mu$ s	7806 V
114 k $\Omega$	Rayo	183.5 $\mu$ s	3080 $\mu$ s	7934 V
120 k $\Omega$	Rayo	187,2 $\mu$ s	3193 $\mu$ s	8052 V
126 k $\Omega$	Rayo	190.6 $\mu$ s	3306 $\mu$ s	8163 V
132 k $\Omega$	Rayo	193.1 $\mu$ s	3418 $\mu$ s	8266 V

## Anexo E: Resultados de sensibilidad al variar $R_p$ en circuito B.

Tabla 3.8 Resultados de sensibilidad al variar valores de  $R_p$  en el circuito B (Rayo).  
Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)

RESULTADOS DE SENSIBILIDAD AL VARIAR $R_p \Omega$ EN EL CIRCUITO B (Rayo)				
Resistencia $R_p$	Tipo de Onda	Tiempos de Onda		Voltaje Pico
		Frente	Cola	
2160 $\Omega$	Rayo	1,21 $\mu s$	41,63 $\mu s$	11045 V
2280 $\Omega$	Rayo	1,23 $\mu s$	43,79 $\mu s$	11063 V
2400 $\Omega$	Rayo	1,89 $\mu s$	46 $\mu s$	11070 V
2520 $\Omega$	Rayo	1,21 $\mu s$	48,18 $\mu s$	11094 V
2640 $\Omega$	Rayo	1,23 $\mu s$	50,32 $\mu s$	11107 V

Tabla 3.9 Resultados de sensibilidad al variar valores de  $R_p$  en el circuito B (Maniobra).  
Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)

RESULTADOS DE SENSIBILIDAD AL VARIAR $R_p \Omega$ EN EL CIRCUITO B (Maniobra)				
Resistencia $R_p$	Tipo de Onda	Tiempos de Onda		Voltaje Pico
		Frente	Cola	
108 k $\Omega$	Rayo	217,4 $\mu s$	2235 $\mu s$	10595 V
114 k $\Omega$	Rayo	219,9 $\mu s$	2346 $\mu s$	10628 V
120 k $\Omega$	Rayo	227 $\mu s$	2458 $\mu s$	10660 V
126 k $\Omega$	Rayo	225 $\mu s$	2570 $\mu s$	10687 V
132 k $\Omega$	Rayo	227,6 $\mu s$	2681 $\mu s$	10713 V

## Anexo F: Resultados de sensibilidad al variar $C_c$ en circuito A.

Tabla 3.10 Resultados de sensibilidad al variar valores de  $C_c$  en el circuito A (Rayo).  
Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)

RESULTADOS DE SENSIBILIDAD AL VARIAR $C_c$ EN EL CIRCUITO A (Rayo)				
Capacitor $C_c$	Tipo de Onda	Tiempos de Onda		Voltaje Pico
		Frente	Cola	
0,00060 $\mu F$	Rayo	0,55 $\mu s$	49,82 $\mu s$	10124 V
0,00102 $\mu F$	Rayo	0,90 $\mu s$	51,18 $\mu s$	9913 V
0,00120 $\mu F$	Rayo	1,2 $\mu s$	46 $\mu s$	9835 V
0,00138 $\mu F$	Rayo	1,2 $\mu s$	52,21 $\mu s$	9752 V
0,00180 $\mu F$	Rayo	1,54 $\mu s$	53,41 $\mu s$	9575 V

Tabla 3.11 Resultados de sensibilidad al variar valores de  $C_c$  en el circuito A (Maniobra).  
Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)

<b>RESULTADOS DE SENSIBILIDAD AL VARIAR <math>C_c</math> EN EL CIRCUITO A (Maniobra)</b>				
Capacitor $C_c$	Tipo de Onda	Tiempos de Onda		Voltaje Pico
		Frente	Cola	
0,00060 $\mu F$	Maniobra	119,53 $\mu s$	3059 $\mu s$	8295 V
0,00102 $\mu F$	Maniobra	156,37 $\mu s$	3156 $\mu s$	8119 V
0,00120 $\mu F$	Maniobra	182,2 $\mu s$	3196 $\mu s$	8052 V
0,00138 $\mu F$	Maniobra	204,10 $\mu s$	3232 $\mu s$	7983 V
0,00180 $\mu F$	Maniobra	267,43 $\mu s$	3319 $\mu s$	7830 V

### Anexo G: Resultados de sensibilidad al variar $C_c$ en circuito 2.

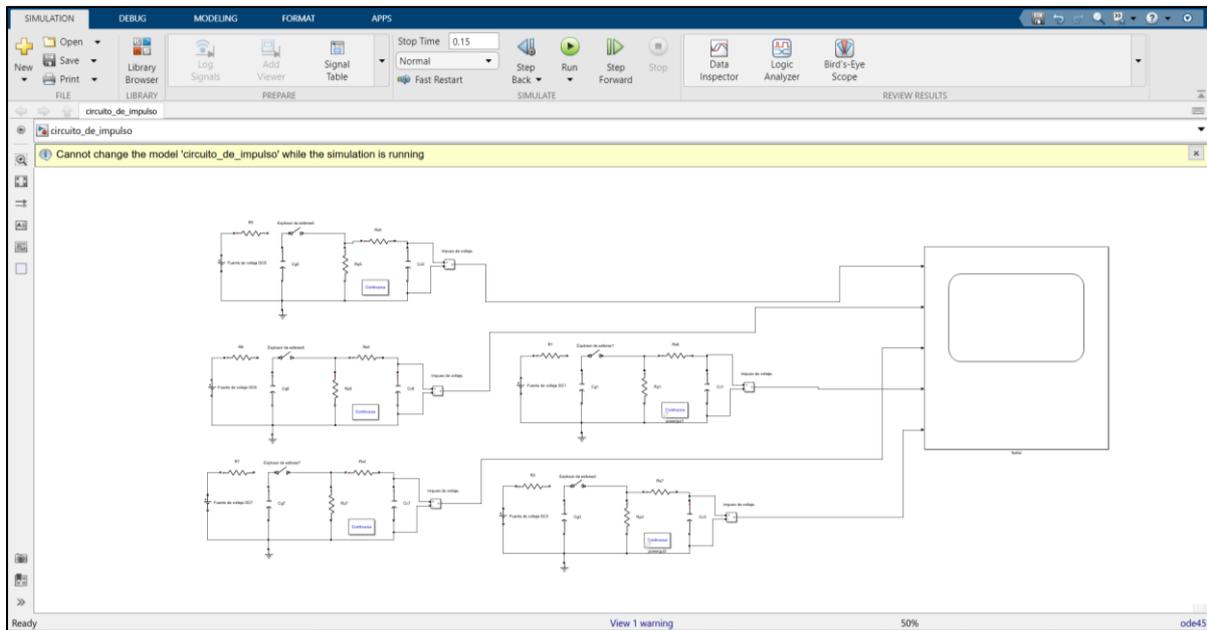
Tabla 3.12 Resultados de sensibilidad al variar valores de  $C_c$  en el circuito B (Rayo).  
Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)

<b>RESULTADOS DE SENSIBILIDAD AL VARIAR <math>C_c</math> EN EL CIRCUITO B (Rayo)</b>				
Capacitor $C_c$	Tipo de Onda	Tiempos de Onda		Voltaje Pico
		Frente	Cola	
0,00060 $\mu F$	Rayo	0,56 $\mu s$	43,87 $\mu s$	11493 V
0,00102 $\mu F$	Rayo	1,03 $\mu s$	45,52 $\mu s$	11188 V
0,00120 $\mu F$	Rayo	1,2 $\mu s$	46,04 $\mu s$	11079 V
0,00138 $\mu F$	Rayo	1,35 $\mu s$	46,68 $\mu s$	10960 V
0,00180 $\mu F$	Rayo	1,68 $\mu s$	48,03 $\mu s$	10711 V

Tabla 3.13 Resultados de sensibilidad al variar valores de  $C_c$  en el circuito B (Maniobra).  
Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)

<b>RESULTADOS DE SENSIBILIDAD AL VARIAR <math>C_c</math> EN EL CIRCUITO B (Maniobra)</b>				
Capacitor $C_c$	Tipo de Onda	Tiempos de Onda		Voltaje Pico
		Frente	Cola	
0,00060 $\mu F$	Maniobra	146,58 $\mu s$	2291 $\mu s$	11212 V
0,00102 $\mu F$	Maniobra	192,30 $\mu s$	2410 $\mu s$	10816 V
0,00120 $\mu F$	Maniobra	250,35 $\mu s$	2464 $\mu s$	10638 V
0,00138 $\mu F$	Maniobra	250,59 $\mu s$	2506 $\mu s$	10507 V
0,00180 $\mu F$	Maniobra	328,44 $\mu s$	2618 $\mu s$	10165 V

**Anexo H: Imagen del modelado realizado en MATLAB Simulink para simulación de generador de impulsos de una etapa.**



**Figura 50. Modelado de circuitos de generador de impulsos.  
Fuente: Yazan Basantes Bryan Omar (2021)**