



UNIVERSIDAD
DE LOS ANDES
MERIDA VENEZUELA

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**HERRAMIENTA EDUCATIVA PARA MOSTRAR EL
COMPORTAMIENTO DE LAS FUENTES DE IMPULSO**

www.bdigital.ula.ve

Br. Arias Briceño María Alejandra

Mérida, Agosto, 2019

Reconocimiento-No comercial- Compartir igual



UNIVERSIDAD
DE LOS ANDES
MERIDA VENEZUELA

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

HERRAMIENTA EDUCATIVA PARA MOSTRAR EL COMPORTAMIENTO DE LAS FUENTES DE IMPULSO

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

Br. Arias Briceño María Alejandra

Tutor: Prof. Francisco Vilorio

Prof. María Angélica Salazar

Mérida, Agosto, 2019

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**HERRAMIENTA EDUCATIVA PARA MOSTRAR EL COMPORTAMIENTO DE
LAS FUENTES DE IMPULSO**

Autor: Br. Arias Briceño María Alejandra

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

Prof. Ernesto Mora

Prof. Francisco Araujo

Prof. Francisco Vilorio

DEDICATORIA

A mi DIOS, por darme la vida y por estar conmigo en cada paso que doy, por iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas, que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

A mi Nazareno, por ser la luz en momentos difíciles y nunca fallarme, solo tú sabes todo lo que pase para llegar a este momento.

A Mis Padres Alejandro Arias y Felicia Briceño, por apoyarme en todo momento, por su motivación constante y amor infinito, por inculcar en mí el valor del estudio y enseñarme a ser una persona de bien, son los mejores padres del mundo.

A Mis Abuelos (Antonio, Felipe y Teresa), quienes hoy no se encuentran conmigo físicamente y en especial a mi **Nona Rosa**, que desde el cielo, sé que me ilumina y me da fuerzas para seguir adelante.

A Mis Hermanos Yelitza Arias y Yohnny Arias, gracias por todo su apoyo y por ser mi ejemplo a seguir en lo personal y profesional.

A mis sobrinos David Quintero y Cristian Quintero, que mi logro académico sea ejemplo para ustedes y con la Bendición de Dios, logren formarse como profesionales más adelante. A mi ángel **Alessandra Quintero**, que desde el cielo me cuida y me protege.

A mis Familiares, por su comprensión y consejos que fueron de gran motivación y a todos aquellos que participaron de manera directa e indirecta en la elaboración de este trabajo de grado.

AGRADECIMIENTO

A **Dios**, por permitirme llegar hasta este momento, no cesan mis ganas de decir, que es gracias a ti que esta meta está cumplida.

A **mi Profesora María Angélica Salazar**, quien me brindó la oportunidad de realizar este trabajo de grado, hoy no se encuentra conmigo, pero desde la distancia sé que sí, mil gracias profesora.

A **mi Profesor Francisco Vilorio**, quien con su conocimiento, paciencia y voluntad me guio en todo momento para realizar el trabajo de grado.

A **mi Jefe Omar Iván Díaz Vélchez**, quien durante la elaboración de este trabajo de grado me dio la oportunidad de realizarla, comprenderme y apoyarme en todo momento.

A **todos los profesores de la Escuela de Ingeniería Eléctrica**, de cada uno aprendí lo mejor, gracias por haberme formado durante este tiempo y brindarme las herramientas para ser una mejor profesional.

A **Todas aquellas Personas**, que de una u otra forma durante mi formación académica, aportaron un granito de arena.

RESUMEN

Autor: Br. María A. Arias B. **HERRAMIENTA EDUCATIVA PARA MOSTRAR EL COMPORTAMIENTO DE LAS FUENTES DE IMPULSO.** Universidad de Los Andes.
Tutor: Prof. Francisco Vilorio, Prof. María Angélica Salazar. Junio, 2019.

Esta investigación tiene como finalidad crear una herramienta educativa que permita demostrar el comportamiento de las fuentes de impulsos, específicamente el impulso tipo rayo y el impulso tipo maniobra. La investigación se sustenta en las normas IEEE/ANSI (IEEE Standard 4-1995). Para ello, se desarrollan las simulaciones a través del software de simulación MATLAB® implementando una interfaz, que permite al usuario obtener los resultados de acuerdo a la topología del circuito seleccionado, bien sea, el Circuito tipo A o el Circuito tipo B. Su diseño se basa para realizar el cálculo de los parámetros de acuerdo, a la topología del circuito que se desea implementar, en este caso son los siguientes: R_1, R_2, C_1, C_2 a partir del tiempo de frente, tiempo de cola y por lo tanto se le indica al usuario, que el resultado que se obtiene, se encuentra dentro los parámetros que indica la norma. Adicionalmente, esta interfaz le otorga al usuario soluciones gráficas que convalidan el diseño. Es importante resaltar, que la validación se sustenta en tres autores Naidu, Kuffel y Wadhwa, que a pesar de que cada uno tiene, su forma particular de realizar los cálculos de los parámetros que corresponden a cada topología del circuito, generan una solución que permite demostrar que se llega a un resultado correcto.

Descriptor: Fuente de impulso, fuentes de alta tensión.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTO	II
RESUMEN	III
ÍNDICE GENERAL	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
INTRODUCCION	1
CAPITULO I	3
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.2 OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN	3
1.2.1 OBJETIVOS GENERALES	3
1.2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	3
3 JUSTIFICACION	4
1.4 LIMITACIONES DEL ESTUDIO	4
CAPITULO II	5
MARCO TEORICO	5
2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	5
2.2 BASES TEÓRICAS	6
2.2.1 DEFINICIONES: VOLTAJE DE IMPULSO	7
2.2.2 GENERACIÓN DE ALTAS CORRIENTES DE IMPULSO	8
LAS PARTES ESENCIALES DE UN GENERADOR DE CORRIENTE DE IMPULSO SON	9
2.2.3 GENERACIÓN DE PULSOS DE CORRIENTE RECTANGULARES	9
2.2.4 DISPARO Y CONTROL DE GENERADORES DE IMPULSO	11
2.3.1 DIVISOR DE VOLTAJE PARA INDUCTANCIA	14
2.4 LA FORMA DE MEDICION	15
2.4.1 SEPARADORES DE VOLTAJE	16
2.4.2 MEDICIÓN DE IMPULSO	17
2.4.3 DIVISORES DE IMPULSO RESISTIVOS	17
2.4.4 DIVISORES DE IMPULSO CAPACITIVO	17

2.5 MEDICIÓN DE ALTO VOLTAJE (A.C) Y VOLTAJES DE IMPULSO.	17
2.6 METODOS DE INICIO DE LA DESCARGA DEL GENERADOR DE IMPULSOS.	18
2.6.1 DISPOSITIVO ELECTROMAGNÉTICO.....	19
2.7 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE LA TENSIÓN DE IMPULSO.....	19
2.7.1 MEDICIÓN DE LA TENSIÓN DE IMPULSO MEDIANTE EL ESPINTERÓMETRO DE ESFERAS.	20
2.7.2 MEDICIONES DE BRECHA DE ESFERA.....	21
2.8 GENERADOR DE IMPULSOS MULTIETAPAS	21
CAPÍTULO III.....	23
FUENTES DE IMPULSOS	23
3.1.- FORMA DE ONDA DE IMPULSO TIPO RAYO.....	24
3.2.- FORMA DE ONDA DE IMPULSO NORMALIZADA TIPO RAYO	24
3.3.- FORMA DE ONDA DE IMPULSO NORMALIZADA TIPO MANIOBRA	25
3.4- CIRCUITO DE CARGA PARA LOS GENERADOS DE IMPULSOS	27
3.5.- CIRCUITOS QUE GENERAN IMPULSO DE ONDA DE UNA ETAPA.....	28
3.6 MODELO MATEMÁTICO A PARTIR DEL AUTOR C.L WADHWA.....	30
3.7 MODELO MATEMÁTICO A PARTIR DEL AUTOR E. KUFFEL.....	32
3.8 MODELO MATEMÁTICO A PARTIR DEL AUTOR M. S. NAIDU.....	34
3.9 VALORES ESTÁNDARES PARA DIFERENTES ONDAS DE IMPULSO	36
3.10 SIMULACIÓN DE LA FUENTE DE IMPULSO	37
CAPÍTULO IV	49
INTERFAZ GRAFICO FUENTES DE IMPULSO.....	49
4.1 DIAGRAMA DE FLUJO TIPO DE IMPULSO	50
4.2 FUNCIONAMIENTO DE LA INTERFAZ TIPO DE IMPULSO	51
4.2.1 PANEL 1 (SE INTRODUCEN LOS DATOS POR EL USUARIO).....	52
4.2.2 PANEL 2 (RESULTADOS).....	56
CONCLUSION.....	60
RECOMENDACIONES.....	62
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Onda de Impulso Completo [2] [4].....	7
Figura 2 Circuito generador de corriente de impulso y su forma de onda [5].....	9
Figura 3 Circuito básico.....	10
Figura 4 Ondas de corriente producidas por generadores de corriente rectangulares [5].....	11
Figura 5 Esquema del Control de disparo del Generador de Impulso [5].....	13
Figura 6 Disparo Trigatron [5].....	13
Figura 7 Circuito de disparo utilizando un trigatron [5].....	14
Figura 8 Divisor de tensión de impulso con resistencia e inductancia conectadas al generador de impulsos y capacitancia de carga.....	15
Figura 9 Divisor de voltaje general.....	16
Figura 10 (a) Capacitancia parásita de un divisor resistivo y (b) el circuito equivalente [7].....	18
Figura 11 Inicio de la descarga de un generador de impulso con un dispositivo electromagnético [7].....	19
Figura 12 Espinterómetros de esferas con el eje vertical y espinterómetros de esferas con el eje horizontal [3].....	20
Figura 13 Esquema de un generador de impulsos multietapa (Quality Control, Reasearch. Buenos Aires Argentina).....	22
Figura 14 Circuito equivalente de la fase de descarga de un generador de impulsos. (Esquema de un generador de impulsos multietapa (Quality Control, Reasearch. Buenos Aires Argentina).....	22
Figura 15 Forma de onda plena del impulso normalizado 1,2/50 μ s [8].....	25
Figura 16 Forma de Onda Tipo Maniobra, Forma general de voltajes de impulso de conmutación. <i>T_p</i> : Tiempo para alcanzar el pico. <i>T₂</i> : Tiempo a mitad de valor. <i>T_d</i> : Tiempo superior al 90 por ciento [8].....	27
Figura 17 Carga para un generador de impulso.....	27
Figura 18 Circuito tipo A [8].....	29
Figura 19 Circuito tipo B [8].....	29
Figura 20 Circuito de Marx equivalente Tipo A de la Simulación.....	37
Figura 21 Circuito de Marx equivalente Tipo B de la Simulación.....	38
Figura 22 Grafica del comportamiento <i>T_{1T2}</i> = 1,2 μ s/5 μ s Circuito Tipo A.....	38
Figura 23 Grafica tiempo de frente para el impulso 1.2/5us Circuito Tipo A.....	39
Figura 24 Grafica tiempo de cola para el impulso 1.2/5us Circuito Tipo A.....	40
Figura 25 Grafica del comportamiento <i>T_{1T2}</i> = 1,2 μ s/5 μ s Circuito Tipo B.....	40
Figura 26 Grafica del comportamiento <i>T_{1T2}</i> = 1,2 μ s/50 μ s Circuito Tipo A.....	41
Figura 27 Grafica del comportamiento <i>T_{1T2}</i> = 1,2 μ s/50 μ s Circuito Tipo B.....	42
Figura 28 Comportamiento NABLA para el Impulso <i>T_{1T2}</i> = 1,2 μ s/50 μ s Circuito tipo B.....	43

Figura 29 Grafica del comportamiento $T1T2= 1,2\mu s/50\mu s$ Circuito Tipo A	44
Figura 30 Grafica del comportamiento $T1T2= 1,2\mu s/50\mu s$ Circuito Tipo B.....	45
Figura 31 Valor de los Elementos para el Impulso $T1T2= 250\mu s/2500\mu s$ tipo A	46
Figura 32 Valor de los Elementos para el Impulso $T1T2= 250\mu s/2500\mu s$ tipo B.....	47
Figura 33 Diagrama de Flujo Tipo de Impulso	50
Figura 34 Interfaz Fuentes de Impulso.....	51
Figura 35 Selección del Tipo de Impulso.....	52
Figura 36 Selección de la Norma Tipo Impulso.....	52
Figura 37 Norma 250/2500us.....	53
Figura 38 Esquema del Circuito tipo A.....	53
Figura 39 Esquema del Circuito tipo B.....	53
Figura 40 Cálculos a partir de $C1/C2$ o $C2$ NABLA.....	54
Figura 41 Campo habilitado para ingresar el valor de $C1$	54
Figura 42 Campo habilitado para ingresar el valor de $C2$	54
Figura 43 Campo habilitado para ingresar el valor de $C2$ y NABLA.....	54
Figura 44 Mensaje cuando el usuario no ha seleccionado el Tipo de Impulso	55
Figura 45 Mensaje cuando el usuario no ha seleccionado el Tipo de Circuito	55
Figura 46 Mensaje cuando el usuario no ha seleccionado el Tipo de Autor.....	56
Figura 47 Resultados para la condición $C1 C2$	56
Figura 48 Resultados para la condición $C2$ NABLA.....	57
Figura 49 Cálculo de los Tiempos de frente y cola.....	57
Figura 50 Representación gráfica del Tiempo de Frente y Tiempo de Cola.....	58
Figura 51 Comportamiento del Efecto Nabla.....	58
Figura 52 Interfaz Gráfico para el Impulso 1,2/50us Circuito Tipo B	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Divisores de tensión para diferentes tipos de tensiones.	16
Tabla 2 resultados para algunas formas de onda seleccionadas [8]	36
Tabla 3 Relación de los parámetros alfa1, alfa2 y beta que se usan en Naidu, Kuffel y Wadhwa	36
Tabla 4 Valor de los Elementos para el Impulso $T1T2= 1,2\mu s/5\mu s$ tipo A	39
Tabla 5 Valor de los Elementos para el Impulso $T1T2= 1,2\mu s/5\mu s$ Circuito Tipo B	41
Tabla 6 Valor de los Elementos para el Impulso $T1T2= 1,2\mu s/50\mu s$ Circuito tipo A	42
Tabla 7 Valor de los Elementos para el Impulso $T1T2= 1,2\mu s/50\mu s$ Circuito Tipo B	43
Tabla 8 RESPUESTA DEL COMPORTAMIENTO NABLA T PICO, VPICO, T90%	44
Tabla 9 Valores nuevos de $C1$ y $C2$ para obtener el impulso 1,2/200 Circuito Tipo A	45
Tabla 10 Valor de los Elementos para el Impulso $T1T2= 1,2\mu s/200\mu s$ tipo B	46
Tabla 11 Valor de los Elementos para el Impulso $T1T2= 250\mu s/2500\mu s$ tipo A	47
Tabla 12 Valor de los Elementos para el Impulso $T1T2= 250\mu s/2500\mu s$ tipo B	48

www.bdigital.ula.ve

INTRODUCCION

Las medidas precisas son la clave para pruebas e investigaciones exitosas. El problema con el alto voltaje ($\geq 1000V$) es que, por razones de seguridad, los instrumentos de medida, no se pueden conectar directamente a la alta tensión de los conductores, por lo tanto, es necesario utilizar un equipo para reducir la señal de voltaje a un valor determinado.

El esquema básico de los generadores de impulso fue originalmente propuesto por E. Marx en 1924. Los generadores de Marx son probablemente la manera más común de generar los impulsos de alto voltaje, que permiten demostrar el nivel de tensión requerido en el circuito.

Desde 1924 los generadores de Marx han evolucionado con el transcurrir del tiempo a nivel que avanza la tecnología, y se puede evidenciar esta innovación en las investigaciones que se han realizado en diversos trabajos de grado, como el de Pascual S (2004).

La tecnología ha hecho que nuestra percepción cambie y facilite la forma de llevar a cabo los cálculos, mediciones e interpretaciones de datos que antes no se podían analizar de forma precisa y por tal motivo, es una de las vertientes de la presente investigación ya que, en la actualidad existen diversas fuentes de investigación que abarca la complejidad del tema, mas no existe, un software en la Escuela de Ingeniería Eléctrica que a través de una Interfaz Gráfica se logren realizar los cálculos de acuerdo a los parámetros requeridos.

Por consiguiente, se realizó el análisis y la evaluación de los requisitos educativos en el estudio y operación de las diferentes fuentes de pruebas de impulso y sistemas de medición, específicamente para los impulsos tipo rayo y maniobra haciendo uso de un software (Matlab)[®] que modelarán cada una de las fuentes de impulsos.

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo demostrar el comportamiento de las fuentes de impulso tipo rayo y maniobra estructurada de la siguiente manera:

Capítulo I: Se indicó de manera detallada, los objetivos que se lograron con la solución del mismo, así como también sus limitaciones durante el desarrollo de la investigación, con el fin, de facilitar la comprensión del tema para los estudiantes y a su vez, es una herramienta que le permite al profesor suministrar un material didáctico, versátil y de cómodo acceso.

Capitulo II: Se expuso de manera sencilla y clara los conceptos básicos que son de utilidad para entender el trabajo realizado, haciendo referencia a cada uno de los antecedentes, las bases teóricas que sustentan la teoría para el desarrollo y comprensión del tema.

Capitulo III: Se desarrolló la información teórica sobre las fuentes de impulsos, específicamente tipo rayo y tipo maniobra y la implementación de un programa de simulación Matlab® que comprueban, el cálculo de los parámetros que constituye al modelo del circuito correspondiente a cada caso que establecía la norma IEEE Std 4-1995.

Capitulo IV: Se creó una Interfaz Gráfica de fácil acceso al usuario, en donde se le permite seleccionar el tipo de impulso, la duración según la norma, el tipo de circuito, y a la vez se da las opciones al usuario para realizar el cálculo a partir de dos parámetros, C_1/C_2 ó $C_2/NABLA$ obteniendo así, como resultado el cálculo de las resistencias R_1/R_2 o C_1/γ , el tiempo de frente y de cola resultante. Además del efecto de la relación γ que es la relación C_1 y C_2 y la tabulación de datos en una gráfica en Excel.

CAPITULO I

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el proceso de la investigación sobre las fuentes de impulsos tipo rayo y tipo maniobra, es que se tiene poco acceso a este contenido, a través, de un método que sea de fácil enseñanza y aprendizaje, esto se debe, a que el tema no es muy frecuente para la investigación existiendo poca información en español de dicho contenido, con el que no cuenta el estudiante que cursa la materia de Alta Tensión para ampliar sus conocimientos. Así mismo, el no tener acceso a un software que le garantice una información segura, valiosa y que contribuya para el desarrollo y ampliación de sus conocimientos.

Por tal motivo, se requiere desarrollar un programa simulador de circuitos y/o sistemas eléctricos, que sirva como material para contribuir a la mejor comprensión del tema de los impulsos de tipo rayo y tipo maniobra a nivel de pregrado.

1.2 OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN

1.2.1 OBJETIVOS GENERALES

- Desarrollar una herramienta educativa para mostrar la operación de diferentes tipos de fuentes de impulsos, específicamente tipo rayo y tipo maniobra

1.2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Identificar el lenguaje de programación para la herramienta Informática.
- Determinar el modelo de cada una de las fuentes.
- Modelar las fuentes de pruebas de tensión de impulso y sistema de medición.
- Desarrollar un software de fácil acceso para el profesor y los estudiantes

3 JUSTIFICACION

En la actualidad no se dispone de una herramienta que permita demostrar la operación de diferentes tipos de fuentes de pruebas para alta tensión. Específicamente fuentes de prueba de impulso tipo rayo y tipo maniobra, así como de los respectivos sistemas de medición.

Por esta razón existe la necesidad de crear recursos que faciliten la acción del proceso de enseñanza-aprendizaje. En tal sentido, a nivel tecnológico desarrollar un software que brinde como resultado una solución confiable y a la vez, que permita al estudiante y/o usuario comprender el contenido teórico de manera sencilla y confiable.

1.4 LIMITACIONES DEL ESTUDIO

La poca información que existe sobre el tema, tiende a tener un gran peso para el momento de realizar la investigación, que por consecuencia, se crea que al momento de plasmar las ideas en cuanto a confiabilidad y validez de los resultados que sean más difícil de autenticar ya que, la mayor parte de la información es incompleta o en otro idioma, lo que demora su comprensión, y el no poseer suficientes fuentes que permitan confirmar, que lo indagado es correcto genera que el avance del tema no proceda de manera rápida y confiable.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Pascual S (2004), El aporte y desarrollo del tema de: **Investigación de los parámetros característicos del comportamiento de medios dieléctricos, frente a sobretensiones tipo rayo no normalizadas en alta tensión** aporta lo siguiente, la investigación en estudio desarrolla una nueva metodología de ensayos dieléctricos en laboratorio, con impulsos tipo rayo cuando estos tienen oscilaciones o una sobretensión superpuesta [1]. Esta situación es muy frecuente en los laboratorios y se debe, a que generalmente la influencia del objeto a ensayar sobre el generador de impulsos tipo rayo no es muy frecuente. El nuevo método propone como base para la modificación de la norma de referencia, para los ensayos de alta tensión IEC 60600-1 a los ensayos con impulsos tipo rayo, el nuevo método garantiza la receptibilidad del ensayo, ya que para obtener la tensión equivalente pondera la solicitud dieléctrica que supone la oscilación o sobretensión superpuesta al impulso. Este trabajo se relaciona con la investigación planteada, de tal manera, que demuestra cómo debe de ser el comportamiento de un impulso tipo rayo, desde la perspectiva del procedimiento de la información, a través de estrategias que permiten la comprensión del tema, por lo cual resulta un aporte importante para el estudio del impulso y su comportamiento.

Briceño (2016) En su tema de investigación para la realización de su trabajo de grado: **Fuente resonante y de impulso para laboratorio de alta tensión**. Esta investigación tiene como finalidad implementar, un modelo para la fuente de impulso y resonante que son usadas en los laboratorios de alta tensión, para potenciar el desarrollo sostenible en los laboratorios [2]. La investigación parte del estudio de las normas IEEE/ANSI [3] que se aplicarán en el momento de realizar las simulaciones en la fuente de impulso tipo rayo

normalizadas mediante un software de simulación SIMULATION PROGRAM WITH INTEGRATED CIRCUITS EMPHASIS PSPICE, haciendo uso del mismo programa de simulación para la fuente resonante. En la implementación del modelo de simulación de la fuente de impulso tipo rayo normalizada, se estudió el circuito ante cambios de parámetros y el objetivo es mantener la onda de los tiempos de frente y de cola que estén dentro de la norma, para esto se determinaron las ecuaciones que permiten corregir los valores de los elementos para cumplir con la norma, y para la fuente resonante se implementaron modelos de circuitos, en serie y paralelo con el fin de obtener una frecuencia en resonancia de 60 Hz y verificar como es el comportamiento, ante variaciones de los parámetros en la fuente en resonancia y así evitar que genere la inestabilidad en las fuentes. Este trabajo se relaciona con la investigación en curso, ya que propone un material de instrucción para la enseñanza de diversos conceptos, a través de enunciados claros, objetivos de aprendizajes precisos y una estructura de trabajo que aborda, paso a paso, la implementación de un software que ayuda a comprender la respuesta de los distintos impulsos, así como la descripción detalla que se necesita para su comprensión.

2.2 BASES TEÓRICAS

Una de las condiciones eléctricas más importantes son las sobretensiones que se pueden presentar en un lugar y en un instante determinado de la red eléctrica, cuyo valor de cresta es superior al de la tensión normal de funcionamiento de acuerdo al aparato de prueba.

Un material es capaz de soportar en régimen permanente, un valor eficaz máximo de tensión entre fases denominado tensión más elevada del material, pero durante su explosión puede estar sometido a sobretensiones que, aunque no sean permanentes serán de mayor amplitud que la tensión más elevada del material. Estas sobretensiones se clasifican en temporales y transitorias frente rápido tienen su origen principalmente en las descargas atmosféricas. Las de frente muy rápido, son debidas a los efectos de reflexiones por maniobras en subestaciones aisladas con gas, o por la actuación de interruptores automáticos de vacío en instalaciones de medición de tensión.

El rayo puede dar lugar a la aparición de sobretensiones en las líneas e instalaciones de alta tensión por uno de los dos mecanismos siguientes: por caída directa sobre una línea e instalación de alta tensión o por inducción cuando el rayo cae próximo a ella.

2.2.1 DEFINICIONES: VOLTAJE DE IMPULSO

Un voltaje de impulso es un voltaje unidireccional que sin oscilaciones apreciables, aumenta rápidamente a un valor máximo y cae más o menos rápidamente a cero como se muestra en la (Figura 1 El valor máximo, es el pico máximo que genera el impulso (A). Se toleran pequeñas oscilaciones, siempre y cuando su amplitud sea inferior al 5% del valor máximo del voltaje de impulso.

Si se desarrolla una tensión de impulso sin causar *Flash Over*, se llama impulso completo de voltaje. Si ocurre un *Flash Over*, por lo tanto, causa un repentino colapso de la tensión de impulso, el cual se conoce como voltaje de impulso picado. En un impulso completo la tensión se caracteriza por su valor pico y sus dos intervalos de tiempos, el frente de onda y la cola de onda, intervalos de tiempo definidos a continuación:

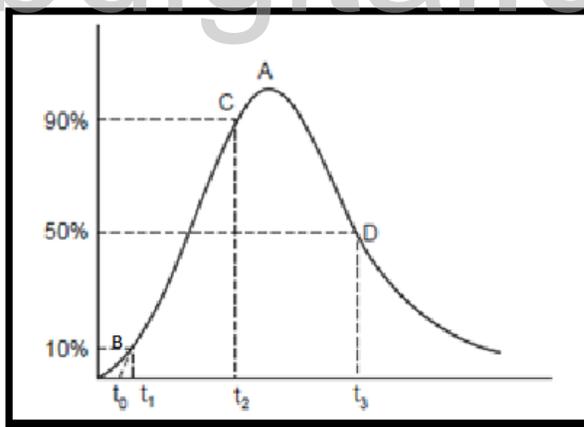


Figura 1 Onda de Impulso Completo [2] [4]

El tiempo de frente de onda de una onda de impulso es: el tiempo que tarda la onda en llegar a su máximo valor comenzando desde cero. Por lo general es difícil de identificar los puntos de inicio y pico de la onda y por lo tanto, el tiempo de frente de onda se especifica como en la

$$1.25 \text{ veces } (t_2 - t_1)$$

Ecuación 1

Donde t_2 es el tiempo donde la onda llega a su 90% del valor máximo y t_1 es el tiempo para alcanzar el 10% del valor máximo. Ya que $(t_2 - t_1)$ representa aproximadamente el 80% del tiempo de frente de onda, se multiplica por 1.25 para dar el frente de onda total. El punto donde la línea CB se cruza con el eje del tiempo se conoce como el punto de inicio nominal de la onda.

.El tiempo de cola de onda nominal se mide, entre el punto de inicio nominal t_0 y el punto en la cola de la onda en donde el voltaje es del 50% del valor pico, es decir, el tiempo de falla de la onda se expresa como en la Ecuación

$$t_3 - t_0$$

Ecuación 2

La inclinación nominal del frente de onda es la tasa promedio de aumento de voltaje entre los puntos en el frente de onda, donde el voltaje es del 10% y 90% del valor pico, respectivamente. Es un frente de onda de microsegundos y una cola de 50 microsegundos cuya tolerancia no es $\pm 50\%$ como se muestra en Figura 1.

2.2.2 GENERACIÓN DE ALTAS CORRIENTES DE IMPULSO

Para producir valores grandes de corrientes de impulso, se cargan varios condensadores en paralelo y para realizar el proceso de descarga, es a través de varios condensadores colocados de la misma manera ya que es la condición que requiere el circuito. Durante la implementación del circuito. Para minimizar la inductancia efectiva, los condensadores son subdivididos en unidades más pequeñas. Si hay n grupos de condensadores, cada uno formado por unidades n_2 y si L_0 es la inductancia de la ruta de descarga común, L_1 es la de cada grupo y L_2 es el de cada unidad, entonces la inductancia efectiva L viene dada por la Ecuación 3 representada en la Figura 2

$$L = L_0 + \frac{L_1}{n} + \frac{L_2}{n_1 n_2}$$

Ecuación 3

Además, la disposición de los condensadores en un diseño en forma de herradura minimiza la inductancia de carga efectiva.

Las partes esenciales de un generador de corriente de impulso son:

- Una unidad de carga DC que da un voltaje variable al banco de capacitores.
- Condensadores de alto valor (0.5 a 5 uf) cada uno con auto inductancia muy baja, capaz de dar altas corrientes de cortocircuito.
- Un inductor de núcleo de aire adicional de valor alto, *Shunts* apropiados y oscilógrafos para fines de medición y una unidad de activación y chispa para el inicio del generador de corriente.

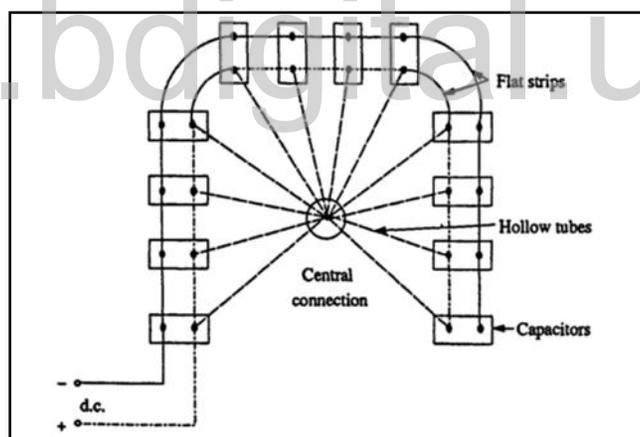


Figura 2 Circuito generador de corriente de impulso y su forma de onda [5]

2.2.3 GENERACIÓN DE PULSOS DE CORRIENTE RECTANGULARES

El generador de pulsos de corriente rectangulares de altas magnitudes, se puede hacer descargando una red previamente cargada. El circuito básico para producir pulsos rectangulares se muestra en Figura 3.

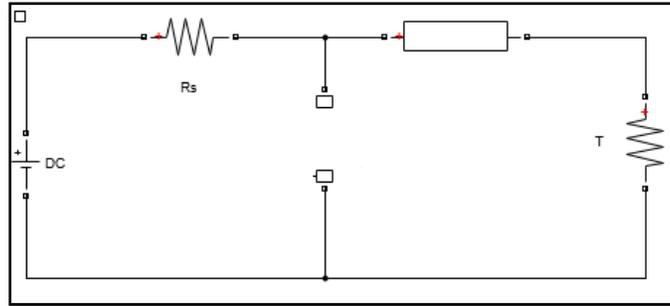


Figura 3 Circuito básico

La longitud de un cable pasa por una red de formación de impulsos equivalente, se carga a un voltaje especificado DC. Cuando el chispero se cortocircuita, el cable o pulso a través del objeto de prueba se descarga.

Para producir un pulso rectangular, un cable coaxial de impedancia de sobretensión

$$Z_0 = \sqrt{L_0/C_0}$$

Ecuación 4

www.bdigital.ula.ve

Donde L_0 es la inductancia y C_0 es la capacidad por objeto de prueba de resistencia R , el pulso actual, está dado por un voltaje de pulso

$$I = (V / (Z_0 + R))$$

Ecuación 5

$$RV / ((R + Z_0))$$

Ecuación 6

Es desarrollado a través del objeto de prueba y la corriente de pulso es sostenida por una onda de voltaje $R / (R + Z_0)$. A través del objeto de prueba y la corriente de pulso es sostenida por una onda de voltaje $(V - IR)$ para $R = Z_0$, la onda reflejada desde el extremo abierto del cable termina el pulso de corriente en el objeto de prueba, y el voltaje de pulso llega a ser igual a $V/2$.

En la práctica, es difícil obtener un cable coaxial de suficiente capacidad y longitud. A menudo, las líneas de transmisión artificial con L y C concentrados usualmente, de 6 a 9 secciones de L - C serán suficientes para dar buenas ondas rectangulares. La duración del tiempo de impulso es segundos, dada por:

$$t = 2(n-1) \sqrt{LC}$$

Ecuación 7

Donde n es la cantidad de secciones utilizadas, C es la capacitancia por etapa o sección, y L es la inductancia por etapa o sección. Las formas de onda actuales producidas por una línea artificial o red de pulsos y un cable coaxial se muestran en la Figura 4

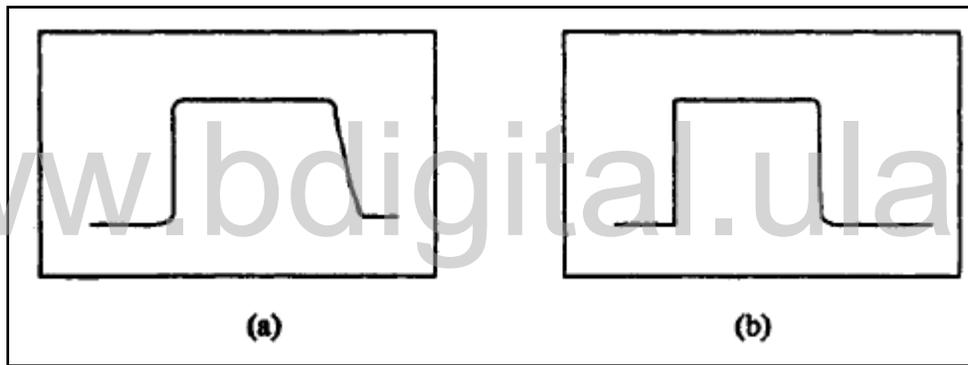


Figura 4 Ondas de corriente producidas por generadores de corriente rectangulares [5]

2.2.4 DISPARO Y CONTROL DE GENERADORES DE IMPULSO

En los grandes generadores de impulsos, la chispa que se genera normalmente es en las esferas o huecos formados por electrodos hemisféricos. Algunas esferas están dispuestas de tal manera que, generan una brecha de chispas automáticas.

Para tener consistencia en las chispas, la irradiación de una lámpara ultravioleta es provista desde abajo a todos los espacios, para disparar el generador en un tiempo predeterminado, las chispas pueden montarse en un marco móvil, la distancia puede reducirse moviendo los electrodos, este método es difícil y no garantiza un disparo consistente y controlado.

Un método simple de disparo controlado consiste, en hacer que el primer espacio sea dispararlo desde una fuente controlada. En este método se utilizan tres electrodos. La primera etapa del generador de impulso está instalada con un espacio de tres electrodos, y el electrodo central se mantiene a un potencial entre los electrodos superior e inferior con las resistencias R y R_L . El disparo se inicia al aplicar un pulso al tiratrón G al cerrar el interruptor S .

El condensador C produce un pulso exponencialmente decreciente de polaridad positiva. El pulso inicia la base de tiempo del oscilógrafo. El tiratrón conduce al recibir el pulso desde el interruptor S y produce un pulso negativo a través de la capacitancia C_1 en el electrodo central de la brecha de tres electrodos. Por lo tanto, el voltaje entre el electrodo central y el electrodo superior de la brecha de tres electrodos va por encima de sus chispas potenciales y por lo tanto la brecha conduce.

El lapso de tiempo requerido para el tiratrón y la interrupción de la brecha de tres electrodos, asegura que el circuito de barrido del oscilógrafo, comienza antes del inicio de la tensión del generador de impulso. La resistencia R asegura desacoplamiento de las oscilaciones de tensión producidas en el espacio de chispa, que entra al osciloscopio a través del circuito de disparo común, como se observa en la Figura 5. La brecha de tres electrodos requiere un espacio más grande y una construcción elaborada.

Hoy en día se usa un espacio de trigatron que se muestra en la Figura 6, y esto requiere un voltaje más pequeño, para el funcionamiento en comparación con el espacio de tres electrodos. Una brecha de trigatron consiste, en un electrodo esférico de alto voltaje del tamaño adecuado, un electrodo principal conectado a tierra de forma esférica, y un electrodo de gatillo a través del electrodo principal.

El electrodo de disparo, es una varilla de metal con una holgura anular de aproximadamente 1 mm instalada en la tubería principal del electrodo a través de un buje. El trigatron está conectado a un circuito de pulso como se muestra en la Figura 7.

El disparo del generador de impulsos se efectúa mediante un impulso de disparo que produce una chispa entre el electrodo de disparo y la esfera conectada a tierra. Debido al espacio, el efecto de carga y la distorsión del campo ocurre en la brecha principal, (*sparkover*). La brecha

de *trigatron*, es sensible a la polaridad y debe tener un pulso de polaridad adecuado aplicado para la correcta operación.

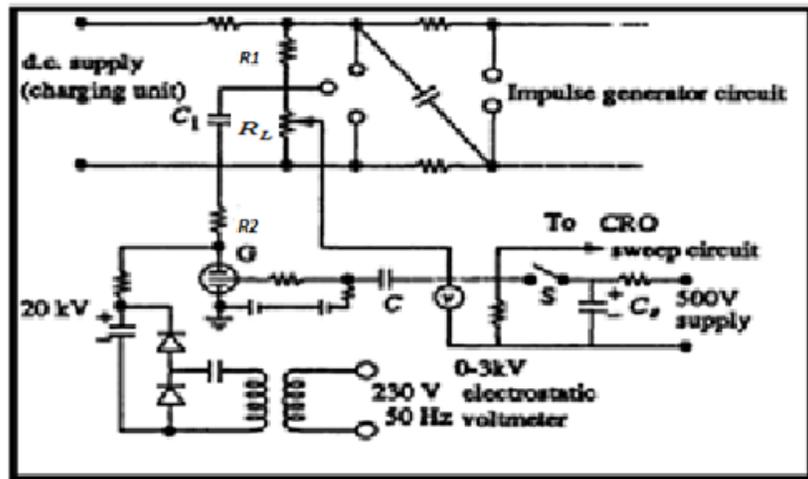


Figura 5 Esquema del Control de disparo del Generador de Impulso [5]

En el caso de generadores de impulsos corriente, que utilizan tres espacios de electrodos para disparo y control, se necesita un cierto diseño especial. Los electrodos tienen que llevar alta corriente del banco de condensadores. En segundo lugar, el electrodo tiene que cambiar grandes corrientes en un tiempo muy pequeño (en aproximadamente un microsegundo). Por lo tanto, el interruptor debería ser muy bajo en inductancia.

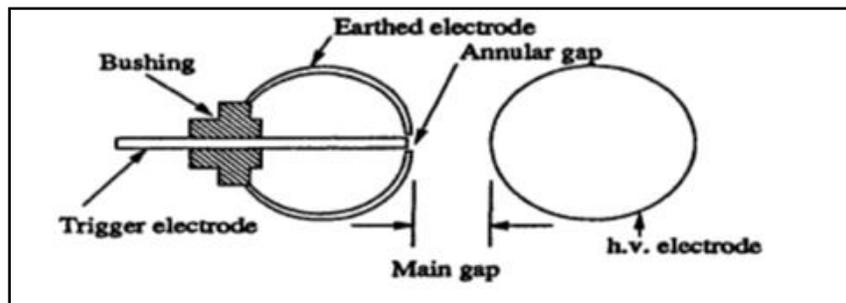


Figura 6 Disparo Trigatron [5]

Las diversas inductancias inherentes a un generador de impulsos y al circuito de prueba no fueron consideradas. Existen inductancias en el generador mismo, los cables de conexión y

sistema de medición que da lugar, a una deformación de la forma de onda ideal de doble exponencial en el frente, pico y cola.

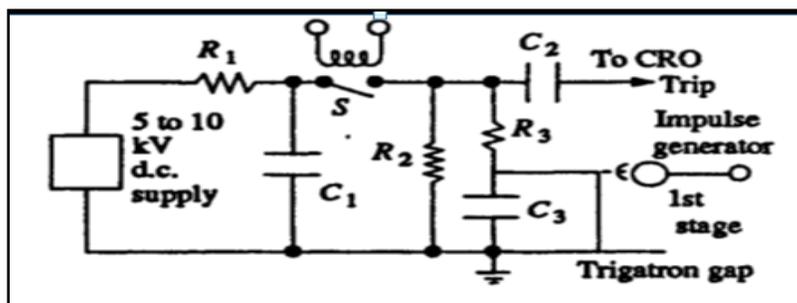


Figura 7 Circuito de disparo utilizando un trigatron [5]

2.3 GENERADORES DE IMPULSO CON INDUCTANCIA

Por lo tanto, ninguna forma de onda generada en un generador de impulsos es verdaderamente doble exponencial. Estas inductancias son:

- inductancia en la capacitancia del generador, resistencias y conductores que los conectan internamente.
- inductancia en el cable de alto voltaje, que conecta el terminal de salida del generador con el divisor de tensión y el objeto de prueba.
- inductancia en la columna divisora de voltaje.
- Inductancia en la conexión a tierra.

2.3.1 DIVISOR DE VOLTAJE PARA INDUCTANCIA

Los divisores de voltaje se utilizan para reducir el alto voltaje a un valor adecuado para el equipo de medición. Estos divisores pueden ser del tipo resistivo puro, capacitivo puro o una combinación de resistencia y capacitancia, la resistencia solo se utiliza para humedecer cualquier oscilación causada por el capacitor de alto voltaje y la inductancia originada del propio condensador.

Por ejemplo, una capacitancia de 1000 pF con una inductancia de 2.5 mH requiere una resistencia $R_d = 2 L_d / C_d = 100$ ohmios para amortiguar críticamente las oscilaciones.

El efecto de la inductancia L_d del divisor, es aumentar la tasa del frente de onda para que la forma de onda medida, tenga un tiempo de frente de onda más corto que el voltaje real al que el objeto de prueba será sometido.

El circuito equivalente de un circuito generador de impulsos considerando la capacidad del divisor, inductancia, y la resistencia como se muestra en la Figura 8.

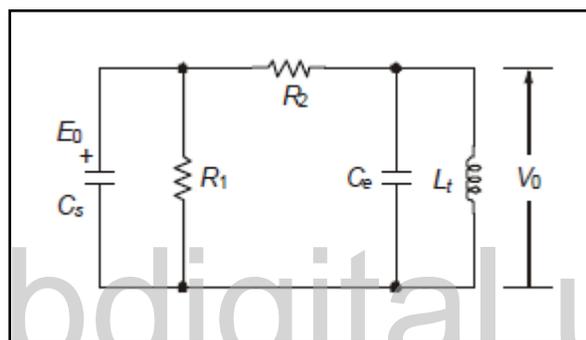


Figura 8 Divisor de tensión de impulso con resistencia e inductancia conectadas al generador de impulsos y capacitancia de carga

2.4 LA FORMA DE MEDICION

Lord Kelvin (William Thomson, 1824 - 1907) escribió: "Medir es saber y si no se puede medir, no se puede mejorar. Lo que no se mejora se degrada siempre". [6]

Las medidas precisas son también la clave para pruebas e investigaciones exitosas. El problema con el alto voltaje, debido a razones de seguridad los medidores no se pueden conectar directamente a la alta tensión. Por lo tanto, es necesario utilizar un equipo para reducir la señal de voltaje, a un valor seguro que se pueda mostrar en los instrumentos.

2.4.1 SEPARADORES DE VOLTAJE

El funcionamiento de los divisores se basa en dividir el voltaje usando dos impedancias en serie, Z_1 y Z_2 como se muestra en la Figura 9, donde la tensión de salida se muestra en la ecuación 8

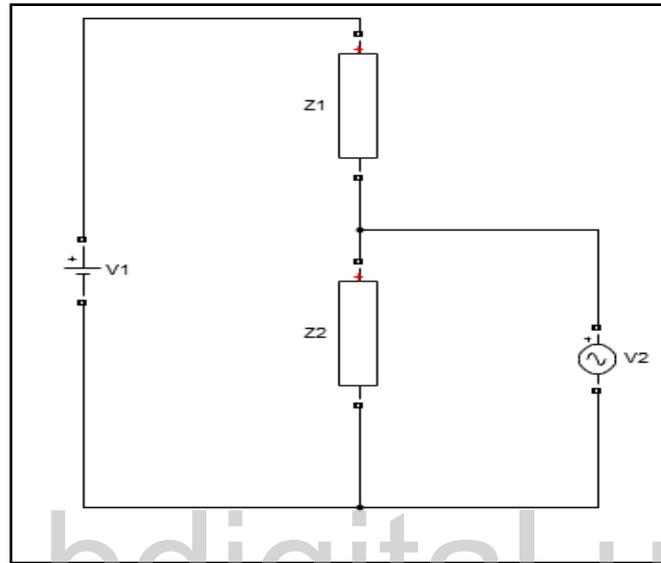


Figura 9 Divisor de voltaje general

$$V_2 = \frac{Z_2}{Z_2 + Z_1} V_1$$

Ecuación 8

En esta ecuación $Z_2 \ll Z_1$ lo que hace que V_2 sea una escala versión de V_1 . La naturaleza de Z_1 y Z_2 depende del tipo de voltaje, la tabla 1 muestra la naturaleza de las impedancias de acuerdo si el voltaje a medir es DC o AC.

Tabla 1 Divisores de tensión para diferentes tipos de tensiones.

Voltaje Típico	Impedancia
DC	Resistencia
AC	Resistencia y Capacitores
Impulso	Resistencia y Capacitores

2.4.2 MEDICIÓN DE IMPULSO

Las ondas de impulso pueden medirse y mostrarse en un osciloscopio, utilizando divisores resistivos o capacitivos.

2.4.3 DIVISORES DE IMPULSO RESISTIVOS

Un divisor resistivo ha distribuido capacitancia parásita a tierra que puede afectar la precisión de las mediciones de alta frecuencia. Como se muestra en la Figura 10. La capacitancia se puede aproximar con un capacitor equivalente, C_e conectado al centro de la columna resistiva y se puede demostrar que:

$$C_2 = \frac{2}{3} C \quad \text{Ecuación 9}$$

Y que la constante de tiempo del divisor es:

$$\tau = \frac{1}{6} R_1 C_e \quad \text{Ecuación 10}$$

2.4.4 DIVISORES DE IMPULSO CAPACITIVO

En el caso de un divisor capacitivo las capacitancias generalmente son insignificantes, en comparación con los valores de capacitancia del divisor.

2.5 MEDICIÓN DE ALTO VOLTAJE (A.C) Y VOLTAJES DE IMPULSO.

Un espacio de chispa de campo uniforme siempre tendrá un voltaje de chispa dentro de una tolerancia conocida, en condiciones atmosféricas constantes. Por lo tanto, se puede usar un chispazo para medida del valor máximo de la tensión, si se conoce la distancia de la brecha.

Un voltaje de *spai*cover de 30 kV (pico) a 1 cm de espacio en el aire a 20°C y 760 torr de presión ocurre para un espacio de esfera o cualquier espacio de campo uniforme. Pero la

experiencia ha demostrado que las mediciones son confiables, solo para ciertas configuraciones de brecha. Normalmente en solo esferas los huecos se usan, para mediciones de voltaje. En ciertos casos, huecos de campo uniforme y varilla las brechas también se usan, pero su precisión es menor.

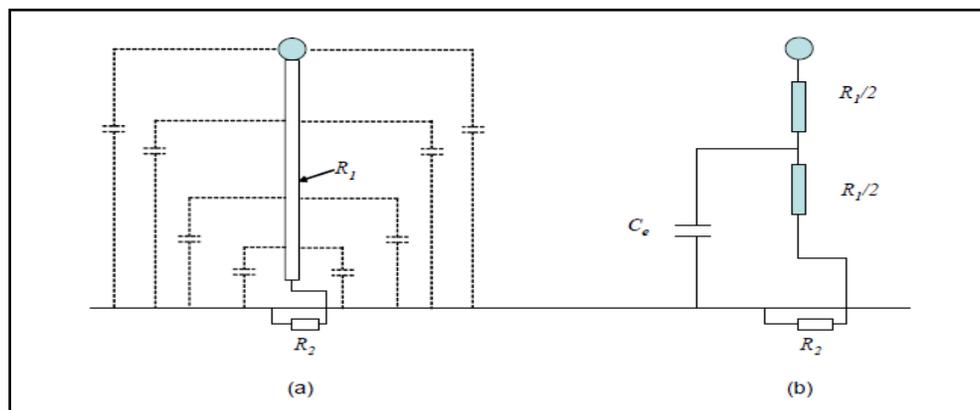


Figura 10 (a) Capacitancia parásita de un divisor resistivo y (b) el circuito equivalente [7]

Al momento de ocurrir la chispa, especialmente en el desglose del espacio de la esfera, es independiente de la forma de onda del voltaje y, por lo tanto, es altamente adecuado para todo tipo de formas de onda desde D.C a voltajes de impulso de tiempos de subida cortos (tiempo de subida > 0.5 ms). Como tal, los huecos de esfera se pueden usar para mediciones de tensión de radiofrecuencia (hasta 1 MHz).

2.6 METODOS DE INICIO DE LA DESCARGA DEL GENERADOR DE IMPULSOS.

La descarga inicial entre las esferas de cada etapa del generador, se hace de forma "natural" o mediante el uso de un sistema auxiliar. El primer método (descarga natural), se aplica para obtener la tensión de impulso deseada con alguno de los siguientes procedimientos:

Con las esferas ajustadas a una distancia superior a la del inicio de la descarga, el generador es cargado a una tensión prefijada. Luego, se disminuye la separación interelectródica con un accionamiento a distancia hasta provocar la ruptura del aire.

Las esferas de la primera etapa se ajustan a una distancia correspondiente a la tensión de descarga. Luego, se aumenta pausadamente la tensión de carga hasta que ocurra la ruptura. Una alternativa al método de ruptura natural es el empleo de un sistema auxiliar para el inicio de la descarga, el cual posee como principal ventaja una mayor precisión del valor de la tensión provista por el generador, resultando en la reducción de la dispersión de campo eléctrico que se verifica en el caso de inicio natural. A continuación, se describen algunas técnicas empleadas para iniciar la descarga con sistemas auxiliares.

2.6.1 DISPOSITIVO ELECTROMAGNÉTICO

El espinterómetro de la primera etapa está compuesto por tres esferas, mostradas en la Figura 11, donde las externas 1 y 3 soportan toda la tensión de carga mientras que la esfera central 2 es sometida a un potencial intermedio a través de un divisor resistivo. Mediante un dispositivo electromagnético, se conecta un contacto metálico entre las esferas 2 y 3 de tal modo que aparezca la tensión de carga entre las esferas 1 y 2, provocando la descarga natural.

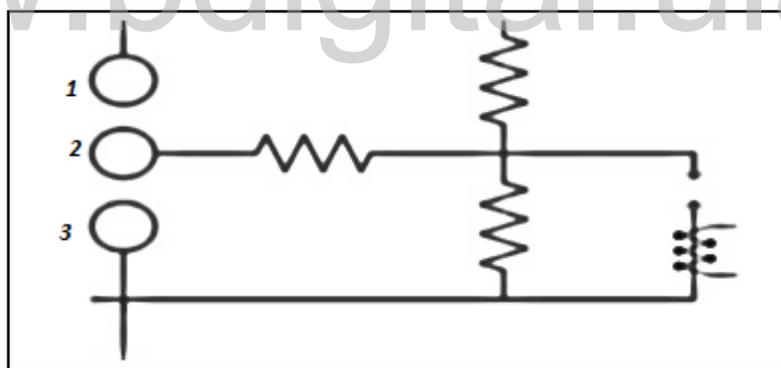


Figura 11 Inicio de la descarga de un generador de impulso con un dispositivo electromagnético [7]

2.7 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE LA TENSIÓN DE IMPULSO

En la prueba de impulso es necesario efectuar la medición de la tensión que se aplica al objeto de prueba, la cual se puede hacer utilizando algunos de los siguientes métodos: a través de un

espinterómetro de esferas, por medio del divisor de tensión conectado a un osciloscopio y por medio del divisor de tensión conectado a un voltímetro pico.

2.7.1 MEDICIÓN DE LA TENSIÓN DE IMPULSO MEDIANTE EL ESPINTERÓMETRO DE ESFERAS.

La norma ANSI/IEEE Standard 4-1995 [3] Define al espinterómetro como "un dispositivo constituido por dos electrodos metálicos, esféricos y de igual diámetro, donde la distancia que los separa es regulada a voluntad". Al aplicar entre dichas esferas un potencial, la descarga a cierta distancia de ruptura, ocurre a un valor de tensión predeterminado. En la prueba de impulso, este valor es el voltaje pico de la onda o nivel básico de aislamiento (BIL) del equipo a ensayar. La disposición física de las esferas se hace vertical u horizontalmente, como se ve en la Figura 12.

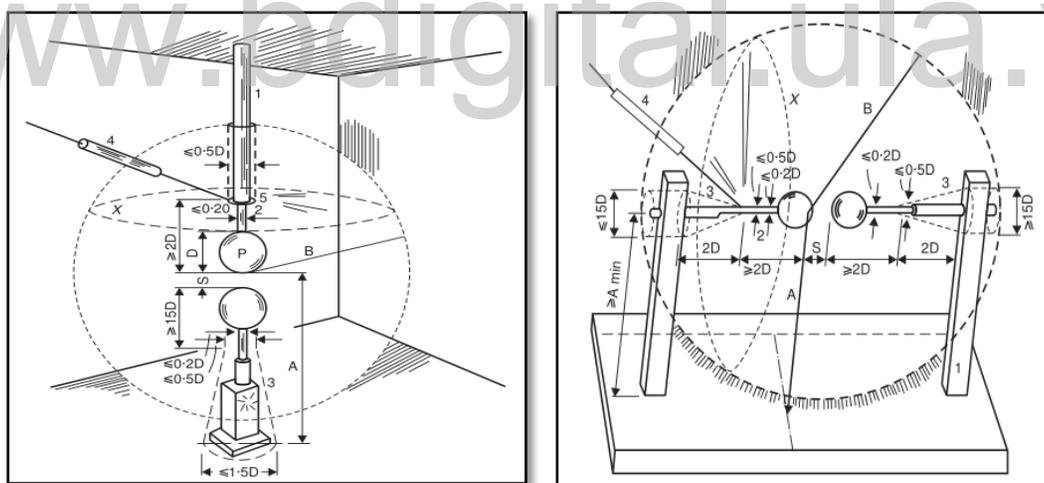


Figura 12 Espinterómetros de esferas con el eje vertical y espinterómetros de esferas con el eje horizontal [3]

Las dimensiones mostradas son las distancias exigidas a los soportes y bases de las esferas, donde A y B como se observan en la Figura 12, son las distancias mínimas a tierra del espinterómetro respecto a cualquier objeto circundante.

Cabe destacar que, para espacios pequeños, la ubicación de cualquier objeto a tierra alrededor del espinterómetro no afecta considerablemente la medición, pero a espacios entre esferas más grandes la presencia de superficies tales como paredes incluso a la distancia B tiene un importante efecto.

2.7.2 MEDICIONES DE BRECHA DE ESFERA

Los espacios de la esfera se pueden organizar ya sea (i) verticalmente con una esfera inferior conectada a tierra, o (si) horizontalmente con ambas esferas conectadas a la fuente de voltaje o una esfera conectada a tierra. En configuraciones horizontales, generalmente está dispuesto de tal manera que, ambas esferas están simétricamente a alto voltaje sobre el suelo. Las dos esferas utilizadas son idénticas en tamaño y forma.

2.8 GENERADOR DE IMPULSOS MULTITETAPAS

Desde el punto de vista económico, el empleo de un generador de una sola etapa, es válido para tensiones que no superen la tensión diseño de la etapa. Además, para obtener un rango amplio de tensiones de prueba es necesario disponer de un generador de impulsos de varias etapas que cumpla con la siguiente característica: que mediante la conexión en serie de dichas etapas se produzca la tensión de prueba deseado al momento de la descarga. Cuyo ejemplo se muestra en la Figura 13

Cuando ha transcurrido cuatro o cinco veces la constante de tiempo de este proceso (TI) todos los condensadores se cargan a la tensión pico. En este instante, el generador de impulsos está disponible para iniciar la descarga en el circuito externo. Posteriormente, en la fase de descarga del generador y considerando que la resistencia de carga R_1 el circuito queda reducido al representado en la Figura 14

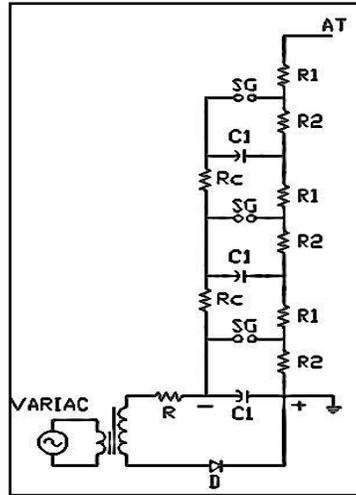


Figura 13 Esquema de un generador de impulsos multietapa (Quality Control, Reasearch. Buenos Aires Argentina)

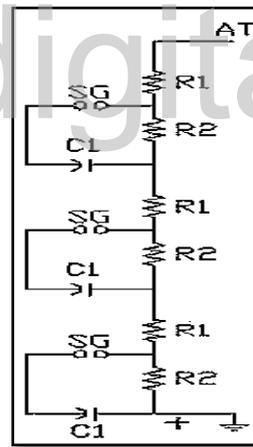


Figura 14 Circuito equivalente de la fase de descarga de un generador de impulsos. (Esquema de un generador de impulsos multietapa (Quality Control, Reasearch. Buenos Aires Argentina)

CAPÍTULO III

FUENTES DE IMPULSOS

El esquema básico de los generadores de impulso fue originalmente propuesto por E. Marx en 1924, los generadores de Marx son probablemente la manera más común de generar los impulsos de alto voltaje, para probar cuando el nivel de voltaje requerido es más alto que el disponible cargando voltajes de fuente, que consiste en un cierto grupo de capacitores que se cargan en paralelo por medio de rectificadores de alta tensión, a través de resistencias de carga. La descarga de los capacitores se realiza a través de espinterómetros de esferas en un circuito serie que incluye resistencias amortiguadoras para las oscilaciones.

El generador de impulsos, es un equipo que genera intencionalmente transitorios de alto nivel de tensión para simular sobretensiones tipo atmosférico y de maniobra, con la finalidad de verificar la capacidad que posee un determinado dispositivo, o máquina de soportar dicho impulso, sin que ocurra ruptura dieléctrica en su aislamiento.

Su aplicación principal es la realización de pruebas de aislamiento (prueba de impulso) en equipos y maquinaria eléctrica en general. Estos impulsos se pueden diferenciar con un frente que actúa de manera rápida, el cual es causado por los interruptores y otro frente, que es un poco más lento debido al proceso de los efectos que el rayo produce.

A medida que los sistemas eléctricos comienzan a aumentar su capacidad de transmisión, se requiere aumentar la tensión de transmisión, además se requiere una forma de disminuir los daños producto de transitorios de alta energía de ocurrencia aleatoria. Bajo estas circunstancias aparecen generadores de impulsos de alta tensión. Dentro de los cuales se pueden encontrar una gran variedad, destacando de manera importante el generador de impulsos tipo Marx.

3.1.- FORMA DE ONDA DE IMPULSO TIPO RAYO

El comportamiento de una onda de impulso tipo rayo, se caracteriza por ser unidireccional con aproximación a una doble exponencial, cuya representación puntual es la diferencia de dos magnitudes iguales.

Su valor estándar es $T_1/T_2 = 1.2\mu\text{s} / 50\mu\text{s}$ donde su amplitud máxima está en el valor de tensión máxima de 100% y su valor de tolerancia es de $\pm 3\%$, el tiempo de frente T_1 y 20% el tiempo de cola T_2 de impulso tipo rayo, es determinado tomando en cuenta la norma *IEC 61000-4-5*.

3.2.- FORMA DE ONDA DE IMPULSO NORMALIZADA TIPO RAYO

Aunque las formas de onda de las sobretensiones atmosféricas poseen gran variedad, se han estandarizado algunas de ellas para efectuar pruebas de impulso en equipos y máquinas eléctricas. Como onda normalizada de tensión impulsiva, se entiende como aquella que posee unas características bien definidas respecto a la duración y amplitud de la misma y para el caso de la sobretensión atmosférica, la Norma ANSI/IEEE Standard 4-1995 establece las siguientes características [3]:

- Valor pico: es la máxima amplitud de la onda, medida desde la referencia de voltaje, con una tolerancia de $\pm 3\%$.
- Tiempo de frente T_1 : es el primer tiempo que, medido desde la referencia T_{01} , transcurre entre el 30% y 90% del valor pico, multiplicado por 1,67. El lapso de duración es de $T_1 = 1,2\% \pm 30\% \mu\text{s}$.
- Tiempo de cola T_2 : Es el mayor tiempo que transcurre hasta alcanzar el 50% del máximo valor pico, esto es $T_2 = 50\% \pm 20\% \mu\text{s}$ ó $40 \leq T_2 \leq 60 \mu\text{s}$.

Donde T_1 es el tiempo de frente en un impulso de tiempo atmosférico pico. Tales instantes se denominan puntos A y B del frente de onda como se muestra en la Figura 15.

$$T_1 = 1.67 * (T_{90} - T_{30})$$

Ecuación 11

T_2 , es el intervalo de tiempo entre el origen O_1 y el instante en el tiempo cuando ha disminuido a la mitad del valor pico. Por lo que T_2 se llama tiempo de cola del impulso.

$$T_2 = (t_{50} * 0.5 * t_{30} - 1.5 * t_{30})$$

Ecuación 12

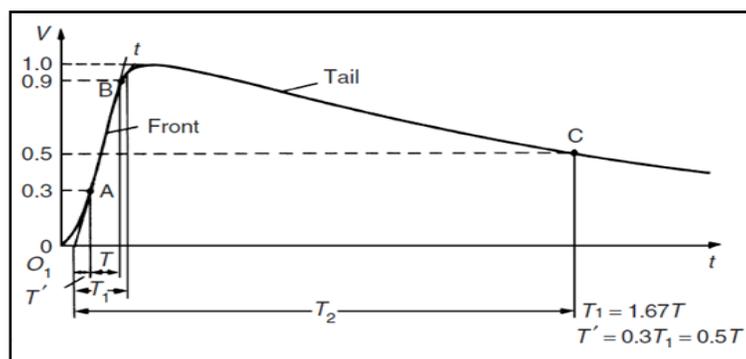


Figura 15 Forma de onda plena del impulso normalizado 1,2/50 μ s [8]

3.3.- FORMA DE ONDA DE IMPULSO NORMALIZADA TIPO MANIOBRA

Las sobretensiones de maniobra, son aquellas que pueden aparecer entre fases o entre fase a tierra y el cambio de configuración de la red o maniobra que las origina, puede en realidad deberse a causas diversas, tales como maniobras de conexión o desconexión de circuitos y aparatos, aparición de fallas o cortocircuitos, variaciones bruscas de cargas.

Así pues, las sobretensiones de maniobra, pueden presentar una gran variedad de magnitudes y formas de onda. En general, su evaluación o cálculo exacto es bastante complicado, no solamente por la gran cantidad y variedad de parámetros que intervienen, sino también porque muchos de ellos, son a menudo, totalmente desconocidos o se los conoce con muy poca precisión.

Además, hay parámetros relacionados con magnitudes que son esencialmente aleatorias. Finalmente, varias maniobras pueden producirse dentro de un intervalo de tiempo tan pequeño, que hay una superposición e interacción de los diferentes procesos transitorios a que dan lugar.

Es por esto que las herramientas de cálculo utilizadas se basan siempre en técnicas de simulación con modelos, matemáticos o físicos y que la información obtenida suele darse en forma de curvas de distribución de probabilidades, cuya determinación es muy costosa.

Los parámetros que determinan o influyen sobre la naturaleza de un proceso transitorio que da lugar a la aparición de sobretensiones de maniobra, son numerosos y sus relaciones muy complejas, pero pueden distinguirse dos clases de parámetros:

- Los que caracterizan el circuito y sus componentes antes y después de la maniobra (cambio de configuración).
- Los que identifican el tipo, la forma y momento de la ejecución de la maniobra (características del interruptor, cortocircuito, etc., que ocasiona el cambio de configuración).

Las sobretensiones de maniobra más importantes suelen ser originadas por:

- a) Energización y re-energización de líneas largas.
- b) Aparición o supresión brusca de fallas.
- c) Interrupción de grandes corrientes capacitivas.
- d) Interrupción de pequeñas corrientes inductivas.
- e) Desconexión brusca de carga al extremo de una línea de transmisión larga.

Debe señalarse que el impulso normalizado tipo maniobra tiene como impulso un valor positivo o negativo como se muestra en la Figura 16

Cuyo valor estándar es $T1/T2 = 250\mu s / 2500\mu s$ donde su amplitud máxima está en un rango de $\pm 3\%$, y para un tiempo de frente $T1 = 250\mu s \pm 20\%$ y el tiempo de cola $T2 = 2500\mu s \pm 60\%$.

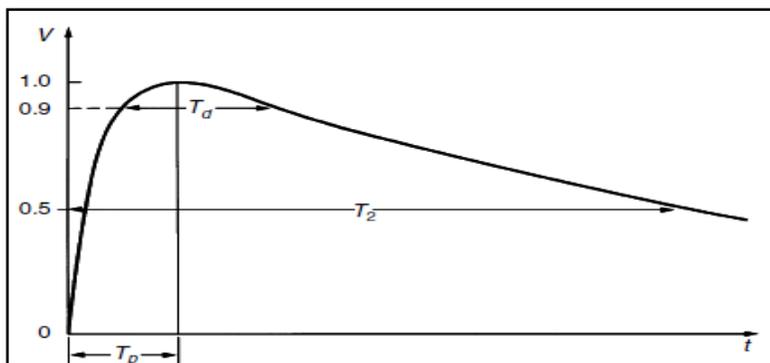


Figura 16 Forma de Onda Tipo Maniobra, Forma general de voltajes de impulso de conmutación. T_p : Tiempo para alcanzar el pico. T_2 : Tiempo a mitad de valor. T_d : Tiempo superior al 90 por ciento [8]

3.4- CIRCUITO DE CARGA PARA LOS GENERADOS DE IMPULSOS

El circuito de generador de impulso se comporta de la siguiente manera, se alimenta de una fuente de corriente continua (DC) a tensión nominal. La alimentación del circuito se realiza a través de un transformador elevador, como se muestra en la Figura 17 la tensión que se genera en el capacitor de carga C_1 , resulta de la rectificación de la onda que produce el impulso a la salida del mismo, y es controlada por un variador de tensión.

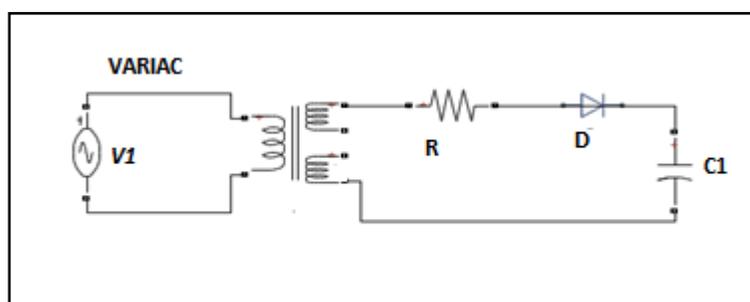


Figura 17 Carga para un generador de impulso

La resistencia (R) tiene como función limitar la corriente que circula por el circuito que recibe del generador y desacoplarlo del circuito alimentador, al momento que se genera el impulso.

3.5.- CIRCUITOS QUE GENERAN IMPULSO DE ONDA DE UNA ETAPA

En las Figura 18 y Figura 19 se muestran dos circuitos básicos para generadores de impulsos de una sola etapa. El condensador C_1 se carga lentamente desde una fuente DC hasta que se produce la descarga en G .

Esta chispa actúa como un limitador de voltaje cuyo tiempo de encendido (tiempo hasta la ruptura de voltaje) es muy corto en comparación con T_1 . Como tales, los generadores de una sola etapa se pueden usar para cargar voltajes desde algunos kV hasta aproximadamente 1MV, las brechas de esferas ofrecerán condiciones de operación adecuadas.

Las resistencias R_1 , R_2 y la capacitancia C_2 forma la red de conformación de ondas. R_1 controlan el tiempo delantero T_1 y T_2 descargará los condensadores, por lo tanto básicamente se controla la forma de onda. La capacitancia C_2 representa la carga, es decir, el objeto bajo prueba, así como todos los demás elementos capacitivos que están en paralelo al objeto de prueba (dispositivos de medición; capacitor de carga adicional) para evitar grandes variaciones de T_1/T_2 , si se cambian los objetos de prueba).

Es importante mencionar que, la respuesta del circuito es una doble exponencial y esto se debe al efecto que se genera el tiempo en que se produce la carga y descarga de los condensadores. Para ello existe una solución general relaciona a los tres autores Naidu, Kuffel y Wadhwa como se demuestra en la

$$V_0 = V * e^{(-a.t)} - e^{(-b.t)}$$

Ecuación 13

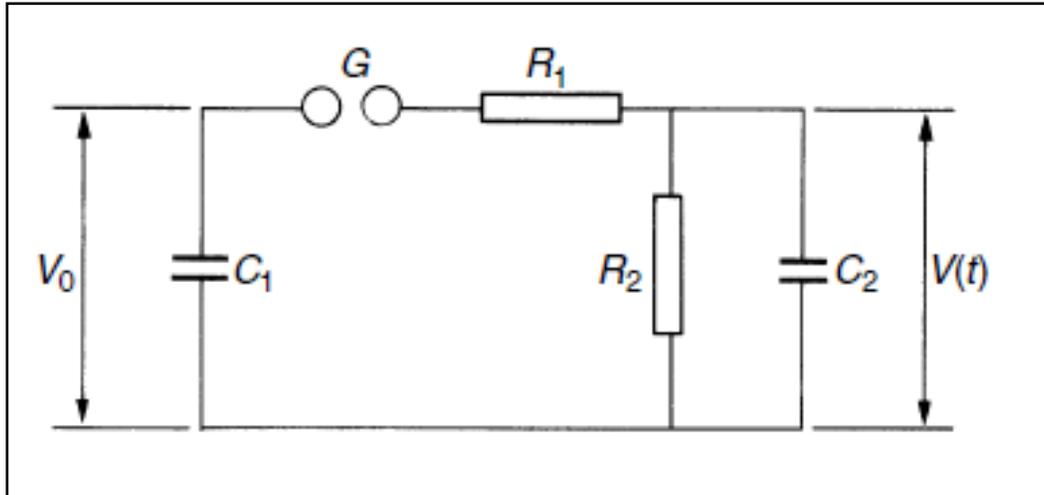


Figura 18 Circuito tipo A [8]

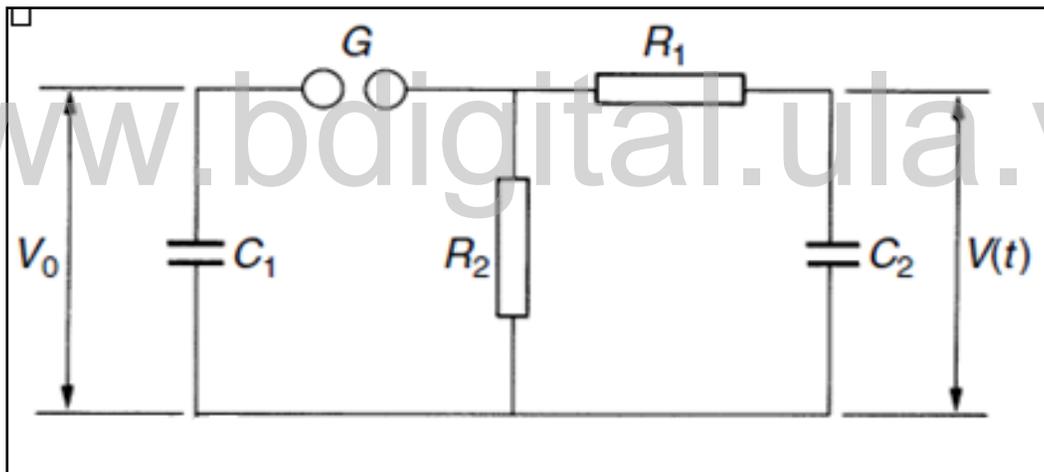


Figura 19 Circuito tipo B [8]

- V_0 = Tensión de Entrada.
- G = Explosor de Esfera
- R_1 =Resistencia de Frente
- R_2 = Resistencia de Cola
- C_1 =Capacitor de Carga
- C_2 = Capacitor de Descarga

Para el análisis matemático de acuerdo a la topología de los circuitos, tipo A y tipo B y haciendo referencia a los 3 autores, Naidu, Kuffel y Wadhwa en el cual se sustenta la teoría, para realizar los cálculos correspondientes se demuestra de la siguiente manera:

3.6 MODELO MATEMÁTICO A PARTIR DEL AUTOR C.L WADHWA

El comportamiento de la onda de impulso está dado por la tensión de salida, que resulta de la resta de las dos curvas exponenciales, esto se debe a las descargas que ocurren en el capacitor C_1 y C_2 .

Siendo la expresión matemática:

$$V_{(s)} = \frac{V_0}{2\beta R_1 C_2} [e^{-(\alpha-\beta)t} - e^{-(\alpha+\beta)t}]$$

Ecuación 14

www.bdigital.ula.ve

Donde α y β son los parámetros que se utilizan para realizar los cálculos de los parámetros, de acuerdo al impulso a seleccionar.

Circuito tipo A

$$R_2 = \frac{1}{C_1} \left[\frac{\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - (\gamma + 1)(\alpha^2 - \beta^2)}}{\frac{\gamma + 1}{\gamma} (\alpha^2 - \beta^2)} \right]$$

Ecuación 15

Calculo de las resistencias R_2 y R_1

$$R_1 = \frac{1}{C_1} \left[\frac{\gamma + 1}{\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - (\gamma + 1)(\alpha^2 - \beta^2)}} \right] \quad \text{Ecuación 16}$$

La relación γ para el circuito tipo A

$$\alpha^2 - (\gamma + 1)(\alpha^2 - \beta^2) \geq 0$$

$$\alpha^2 \geq (\gamma + 1)(\alpha^2 - \beta^2)$$

$$\frac{\alpha^2}{\alpha^2 - \beta^2} \leq \gamma + 1$$

$$\frac{\beta^2}{\alpha^2 - \beta^2} \geq \gamma$$

$$\gamma \leq \frac{\beta^2}{\alpha^2 - \beta^2}$$

www.bdigital.ula.ve

Circuito Tipo B

Calculo de las resistencias R_2 y R_1

$$R_2 = \frac{1}{C_1} \left[\frac{\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \frac{1+\gamma}{\gamma}(\alpha^2 - \beta^2)}}{\frac{1+\gamma}{\gamma}(\alpha^2 - \beta^2)} \right] \quad \text{Ecuación 17}$$

$$R_1 = \frac{1}{C_1} \left[\frac{1 + \gamma}{\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \frac{1+\gamma}{\gamma}(\alpha^2 - \beta^2)}} \right] \quad \text{Ecuación 18}$$

La relación γ para el circuito tipo B

$$\alpha^2 - \frac{1+\gamma}{\gamma}(\alpha^2 - \beta^2) \geq 0$$

$$\alpha^2 \geq \frac{1+\gamma}{\gamma}(\alpha^2 - \beta^2)$$

$$\frac{\alpha^2}{\alpha^2 - \beta^2} \geq \frac{1+\gamma}{\gamma}$$

$$\frac{\alpha^2}{\alpha^2 - \beta^2} - 1 \geq \frac{1}{\gamma}$$

$$\gamma \geq \frac{\alpha^2 - \beta^2}{\beta^2}$$

3.7 MODELO MATEMÁTICO A PARTIR DEL AUTOR E. KUFFEL

El comportamiento de la onda de impulso está dado por la tensión de salida, que resulta de la resta de las dos curvas exponenciales, esto se debe a las descargas que ocurren en el capacitor C_1 y C_2 .

Siendo así la expresión, matemática:

$$V_{(s)} = \frac{V_0}{K} \left[\frac{1}{\alpha_2 - \alpha_1} [e^{(-\alpha_1 t)} - e^{(-\alpha_2 t)}] \right]$$

Ecuación 19

Donde k , es el producto de $R_1 \cdot C_2$ y α_1, α_2 son valores único independiente del circuito particular utilizado.

Circuito tipo A

Calculo de las resistencias R_1 y R_2

$$R_1 = \frac{1}{2C1} \left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) - \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C1 + C2)}{\alpha_1 \alpha_2 C2}} \right] \quad \text{Ecuación 20}$$

$$R_2 = \frac{1}{2(C1 + C2)} \left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C1 + C2)}{\alpha_1 \alpha_2 C2}} \right] \quad \text{Ecuación 21}$$

Circuito tipo B

Calculo de las resistencias R_1 y R_2

$$R_1 = \frac{1}{2C1} \left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) - \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C1 + C2)}{\alpha_1 \alpha_2 C1}} \right] \quad \text{Ecuación 22}$$

$$R_2 = \frac{1}{2(C1 + C2)} \left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C1 + C2)}{\alpha_1 \alpha_2 C1}} \right] \quad \text{Ecuación 23}$$

3.8 MODELO MATEMÁTICO A PARTIR DEL AUTOR M. S. NAIDU

El comportamiento de la onda de impulso está dado por la tensión de salida, que resulta de la resta de las dos curvas exponenciales, esto se debe a las descargas que ocurren en el capacitor C_1 y C_2 .

Siendo así la expresión, matemática:

$$V_o(t) = \frac{VC_1R_2\alpha\beta}{(\beta - \alpha)} [e^{(-\alpha t)} - e^{(-\beta t)}]$$

Ecuación 24

$$\alpha + \beta = - \left[\frac{1}{C_1R_1} + \frac{1}{C_2R_2} + \frac{1}{C_2R_1} \right]$$

Ecuación 25

$$\alpha\beta = \left[\frac{1}{C_1C_2R_1R_2} \right]$$

Ecuación 26

Para el cálculo de la resistencia R_2 y R_1 asumiendo el circuito equivalente, se obtiene a partir de las siguientes ecuaciones:

T_1 = Tiempo de frente

T_2 = Tiempo de cola

R_2 = Resistencia de cola

R_1 = Resistencia de frente

C_2 = Capacitor de carga

C_1 = Capacitor de descarga

Para la expresión matemática de los tiempos de frente y de cola, se calcula de la siguiente manera:

$$T_1 = 3.0R_1 \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad \text{Ecuación 27}$$

$$R_1 = T_1 \frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2} * \frac{1}{3} \quad \text{Ecuación 28}$$

$$T_2 = 0.7 * (R_1 + R_2)(C_1 + C_2) \quad \text{Ecuación 29}$$

www.bdigital.ula.ve

$$R_2 = \frac{T_2}{0.7 * (C_1 + C_2) - R_1} \quad \text{Ecuación 30}$$

Las ecuaciones 20, 21, 22 y 23 del modelo matemático del Autor E. Kuffel, contienen las constantes de tiempo $1/\alpha_1$ y $1/\alpha_2$ que dependen de la forma de onda expresadas en la tabla 2. Sin embargo, no existe una relación simple entre las constantes de tiempo y los tiempos T_1 , T_2 y T_p . Tal cual como se definen en las recomendaciones internacionales.

La relación es irracional y debe de ser computada de forma numérica. La tabla 2 muestra el resultado para algunas formas de ondas seleccionadas

3.9 VALORES ESTÁNDARES PARA DIFERENTES ONDAS DE IMPULSO

Tabla 2 resultados para algunas formas de onda seleccionadas [8]

$T_1/T_2 (\mu s)$	$T_p/T_2 (\mu s)$	$1/\alpha_1 (\mu s)$	$1/\alpha_2 (\mu s)$
1.2/5	-	3.48	0.80
1.2/50	-	68.2	0.405
1.2/200	-	284	0.381
250/2500	-	2877	104

www.bdigital.ula.ve

Tabla 3 Relación de los parámetros alfa1, alfa2 y beta que se usan en Naidu, Kuffel y Wadhwa

TIPO DE IMPULSO		1,2/5	1.2/50	1.2/200	250/2500
KUFFELL	α_1	287356	14663	3521	348
	α_2	1250000	2469136	26246712	9615
WADHWA	α	768678	1241899	1314097	4981
	β	481322	1227237	1310575	4634
NAIDU	α	768678	1241899	1314097	4981
	β	481322	1227237	1310575	4634

3.10 SIMULACIÓN DE LA FUENTE DE IMPULSO

Para la demostración de la siguiente simulación, se realiza usando el programa de simulación Matlab® 2016, cuya finalidad es de obtener la respuesta del tiempo de frente y tiempo de cola, que establece la norma tipo rayo $T_1/T_2 = 1.2/5 \mu s$, $T_1/T_2 = 1.2/50 \mu s$ y $T_1/T_2 = 1.2/200 \mu s$ y tipo maniobra $T_1/T_2 = 250/2500 \mu s$ y el cálculo correspondiente a las resistencias R_1 y R_2 de acuerdo a la topología del circuito a usar.

La implementación de los circuitos equivalentes tipo A y tipo B corresponden a los circuitos de una etapa, para simular el comportamiento de cada uno de ellos de acuerdo a los valores de los parámetros que se le asignan. Es importante mencionar que *Ideal Switch 1* e *Ideal Switch 2* tiene como función simular el *spark gap*.

Circuito tipo A

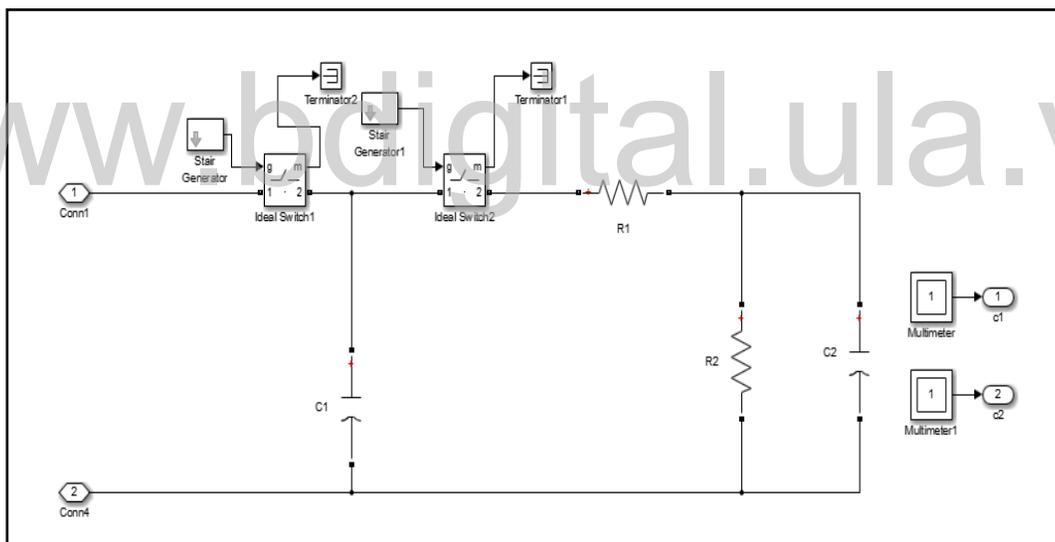


Figura 20 Circuito de Marx equivalente Tipo A de la Simulación

Circuito tipo B

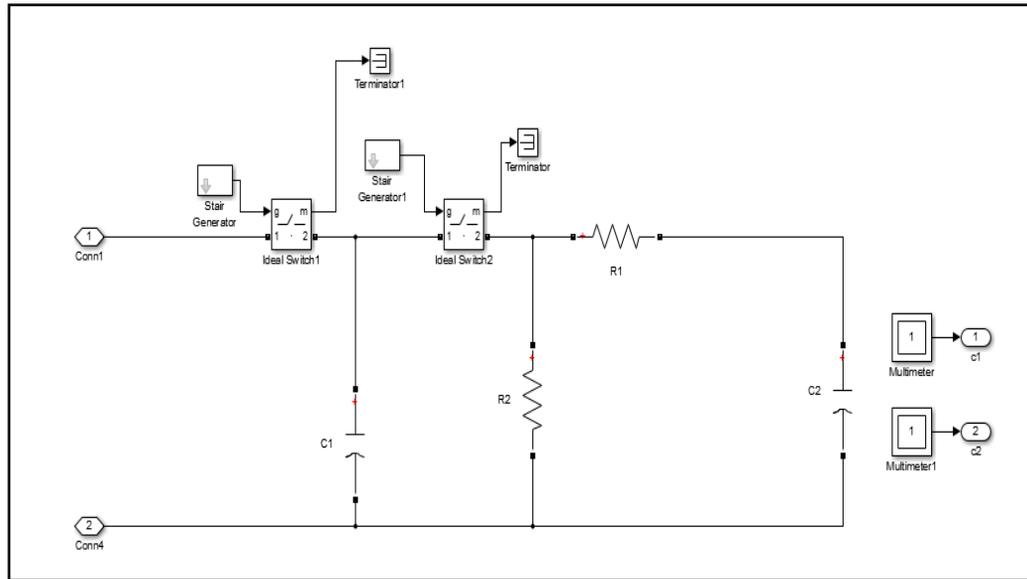


Figura 21 Circuito de Marx equivalente Tipo B de la Simulación

www.bdigital.ula.ve

Impulsos tipo Rayo

- Impulso $T_1/T_2 = 1,2\mu\text{s}/5\mu\text{s}$ Tipo A

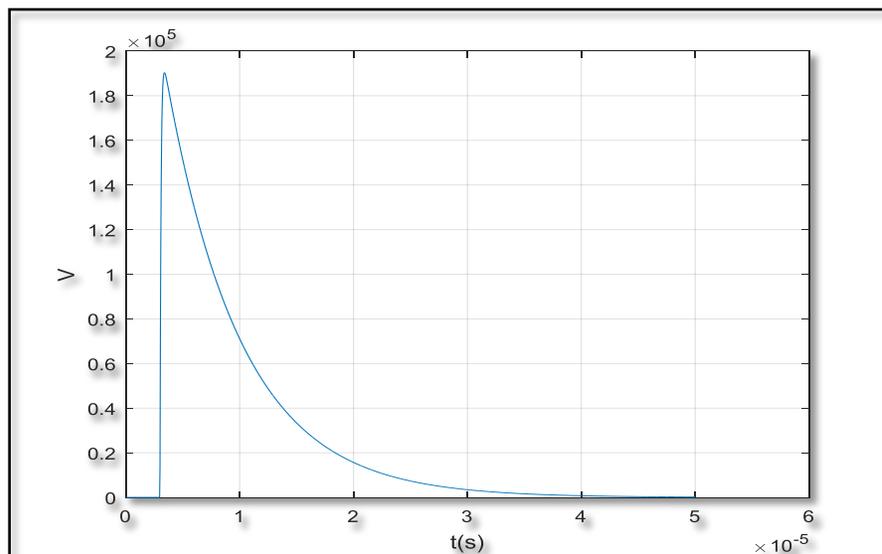


Figura 22 Grafica del comportamiento $T_1/T_2 = 1,2\mu\text{s}/5\mu\text{s}$ Circuito Tipo A

En la Tabla 4 se expresan los valores de los capacitores C_1 y C_2 , que son datos que se asignan para obtener los resultados de R_1 y R_2 a través de las Ecuaciones 20 y 21 correspondiente al cálculo de las resistencias, por el autor [5] para ello es importante resaltar que existe una relación nabra (γ) $\gamma = C_1 / C_2$, en este caso corresponde a un $\gamma = 12$.

Tabla 4 Valor de los Elementos para el Impulso $T_1/T_2 = 1,2\mu s/5\mu s$ tipo A

$C_1(\mu f)$	$C_2(\mu f)$	$R_1(\Omega)$	$R_2(\Omega)$
0,012	0,001	433,3	116,1

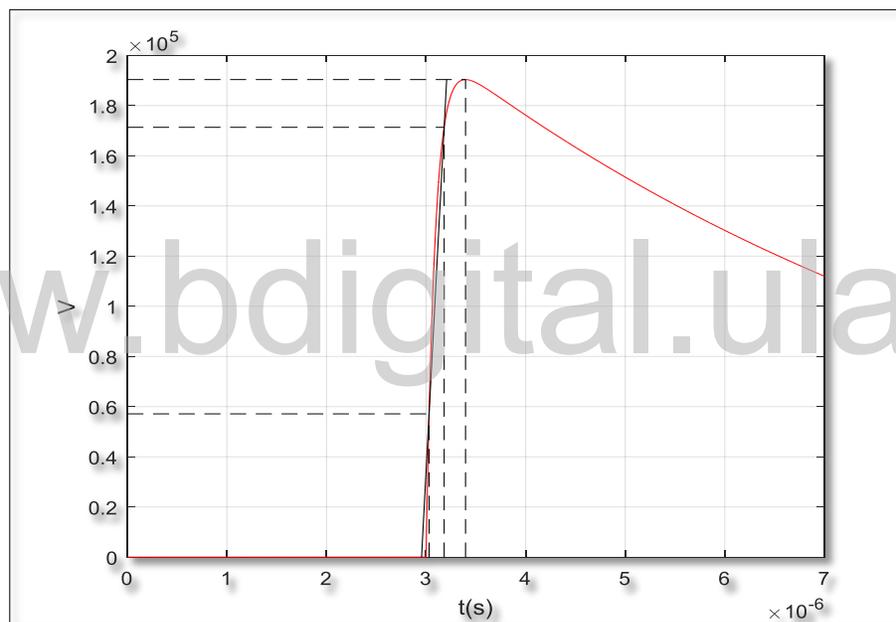


Figura 23 Grafica tiempo de frente para el impulso 1.2/5us Circuito Tipo A

En la Figura 23 se observa el tiempo de frente obtenido $T_1 = 2,5e-7$ s, en este caso el tiempo de frente no se encuentra dentro de la norma establecida ya que su respuesta está por encima y es de un 21,0% por lo tanto se sugiere que modifique la relación de nabra $\gamma < 0,647$

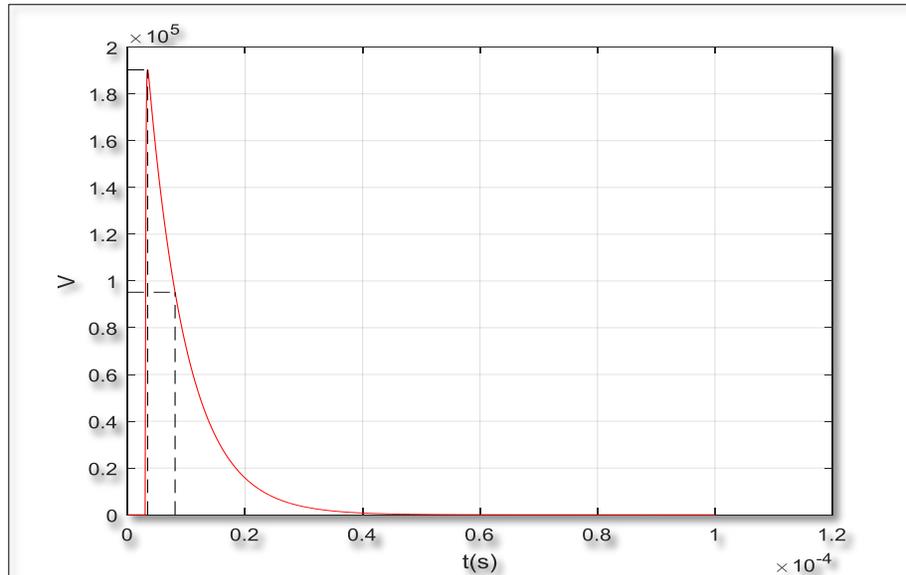


Figura 24 Grafica tiempo de cola para el impulso 1.2/5us Circuito Tipo A

En la Figura 24 se observa el tiempo de cola obtenido $T_2 = 5,1206 \times 10^{-6}$ s, en este caso el tiempo de frente, se encuentra dentro de la norma establecida ya que su respuesta es de un 102,4%.

➤ Impulso $T_1/T_2 = 1,2\mu\text{s}/5\mu\text{s}$ Tipo B

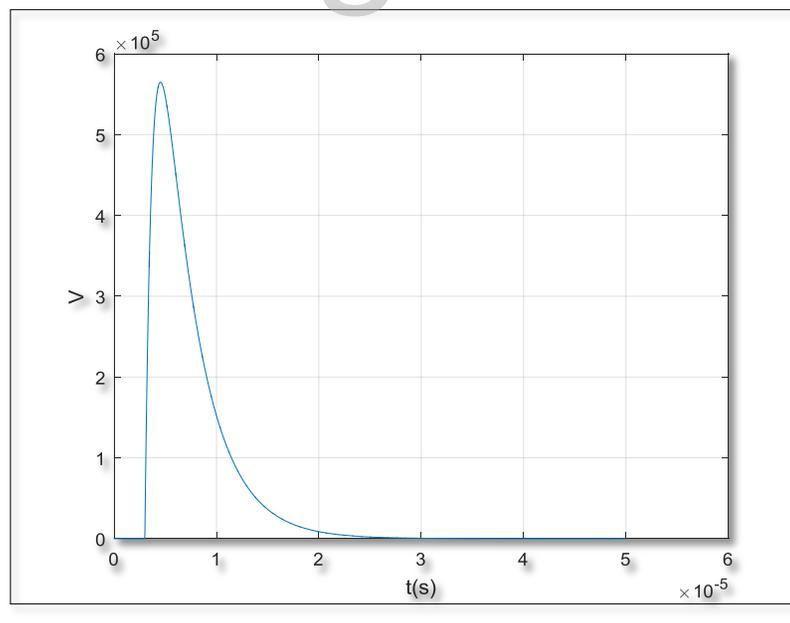


Figura 25 Grafica del comportamiento $T_1/T_2 = 1,2\mu\text{s}/5\mu\text{s}$ Circuito Tipo B

En la Tabla 5 se expresan los valores de los capacitores C_1 y C_2 que son datos que se introducen para obtener los resultados de R_1 y R_2 a través de las ecuaciones 22 y 23 que corresponde al cálculo de las resistencias por el autor Kuffel y la relación de $\gamma=14$

Tabla 5 Valor de los Elementos para el Impulso $T_1/T_2= 1,2\mu\text{s}/5\mu\text{s}$ Circuito Tipo B

$C_1(\mu\text{f})$	$C_2(\mu\text{f})$	$R_1 (\Omega)$	$R_2 (\Omega)$
0,07	0,005	175	45

El tiempo de frente para el comportamiento del impulso $T_1/T_2= 1,2\mu\text{s}/5\mu\text{s}$ Circuito Tipo B es $T_1= 1,2\text{e-}6$ s y se encuentra dentro de la norma con un 100% y para el tiempo de cola $T_2 = 4,9\text{e-}6$ s, está dentro de la norma con un 99,9% y la relación es de, $\gamma=14$.

➤ Impulso $T_1/T_2= 1,2\mu\text{s}/50\mu\text{s}$ Tipo A

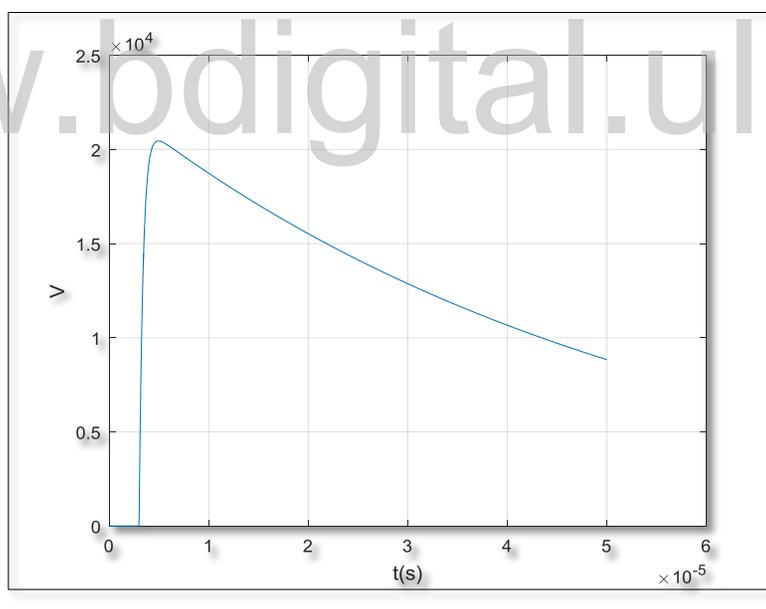


Figura 26 Grafica del comportamiento $T_1/T_2= 1,2\mu\text{s}/50\mu\text{s}$ Circuito Tipo A

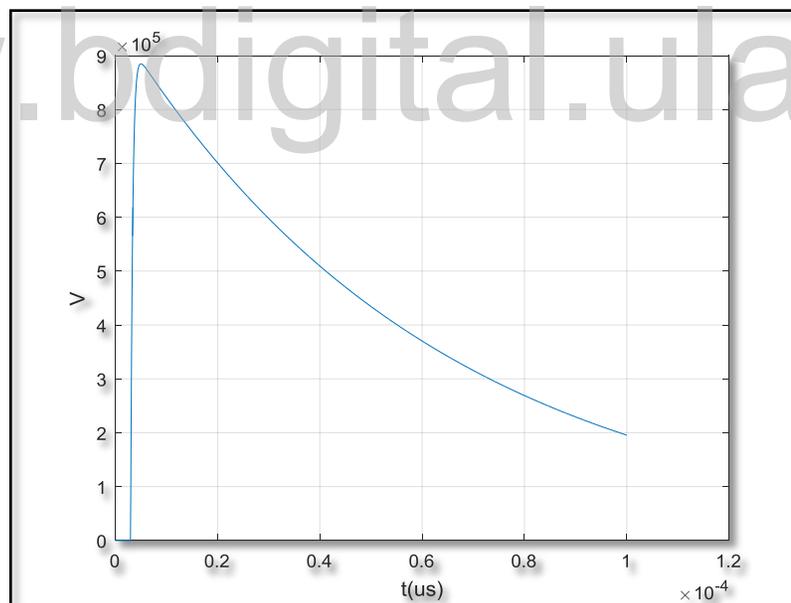
En la Tabla 6 se expresan los valores de los capacitores C_1 y C_2 que son datos que se introducen para obtener los resultados de R_1 y R_2 a través de las ecuaciones 28 y 30, que corresponde al cálculo de las resistencias por el autor Naidu , su relación de $\gamma=0.023$

Tabla 6 Valor de los Elementos para el Impulso $T_1/T_2= 1,2\mu\text{s}/50\mu\text{s}$ Circuito tipo A

$C_1(\mu\text{f})$	$C_2(\mu\text{f})$	$R_1 (\Omega)$	$R_2 (\Omega)$
0,023	0,001	17791	52031

El tiempo de frente para el comportamiento del impulso $T_1/T_2= 1,2\mu\text{s}/50\mu\text{s}$ Circuito Tipo A es $T_1= 1,1467\text{e-}6$ s, y se encuentra dentro de la norma con un 95.5% y para el tiempo de cola $T_2=3,944\text{e-}5$ s, está dentro de la norma con un 78.8%.

Impulso $T_1/T_2= 1,2\mu\text{s}/50\mu\text{s}$ Circuito Tipo B

Figura 27 Grafica del comportamiento $T_1/T_2= 1,2\mu\text{s}/50\mu\text{s}$ Circuito Tipo B

En la Tabla 7 se expresan los valores de los capacitores C_1 y C_2 , estos son datos que se introducen para obtener los resultados de R_1 y R_2 a través de las ecuaciones 28 y 30 que

corresponde al cálculo de las resistencias por el autor Naidu. Es necesario resaltar que este ejemplo, se respalda en el ejercicio resuelto 6.3 de la página 153, del capítulo *Generation of High Voltages and Currents*.

Tabla 7 Valor de los Elementos para el Impulso $T_1/T_2=1,2\mu\text{s}/50\mu\text{s}$ Circuito Tipo B

$C_1(\mu\text{f})$	$C_2(\mu\text{f})$	$R_1(\Omega)$	$R_2(\Omega)$
0,02	0,001	420	2981

El tiempo de frente para el comportamiento del impulso $T_1/T_2=1,2\mu\text{s}/50\mu\text{s}$ Circuito Tipo A es $T_1=1,1784\text{e-}6$ s, y se encuentra dentro de la norma con un 98.2% y para el tiempo de cola $T_2=4,606\text{e-}5$ s, está dentro de la norma con un 92.1%.

En la Figura 28 se expresa de manera gráfica el comportamiento nabla, el donde la relación mínima es de $\gamma=20$ y a medida que el capacitor C_2 se incrementa, nabla cambia por su relación de condición.

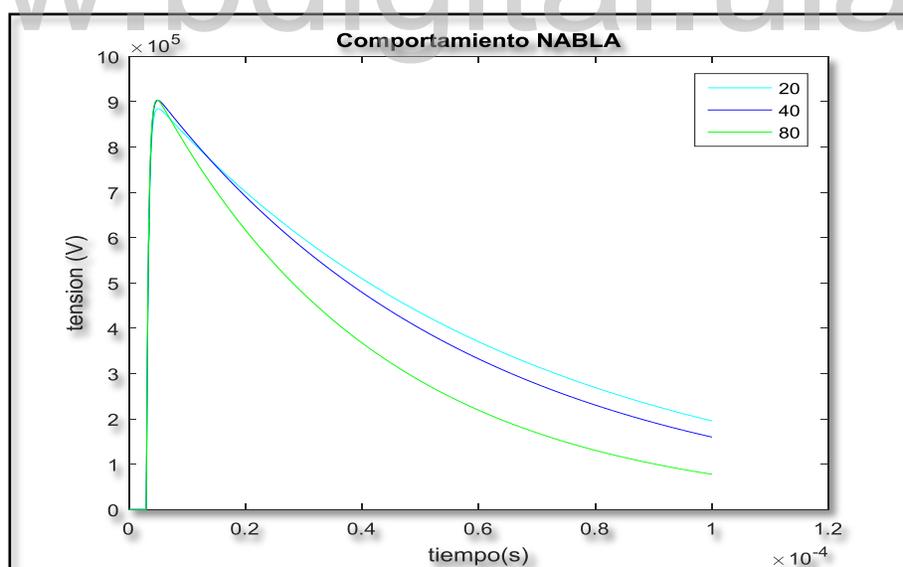


Figura 28 Comportamiento NABLA para el Impulso $T_1/T_2=1,2\mu\text{s}/50\mu\text{s}$ Circuito tipo B

En la tabla se expresan el comportamiento del impulso $1,2/50\mu\text{s}$ de la topología del circuito tipo B

Tabla 8 RESPUESTA DEL COMPORTAMIENTO NABLA T PICO, VPICO, T90%

NABLA	T PICO (μs)	VPICO (V)	$T_1(\mu\text{s})$	$T_2(\mu\text{s})$	$C_1 (\mu\text{f})$	$R_1 (\Omega)$	$R_2(\Omega)$
20	5,0343	8,8478e5	1,1784	46,061	200,00	420	2981
40	4,9810	9,0306e5	1,1683	40,462	400,00	410	1332
80	4,8470	9,0374e5	1,1333	29,229	800,00	405	476,8
160	4,1950	7,9619e5	87,33	6,3480	16,000	402,5	41,15

➤ Impulso $T_1/T_2=1,2\mu\text{s}/200\mu\text{s}$ Tipo A

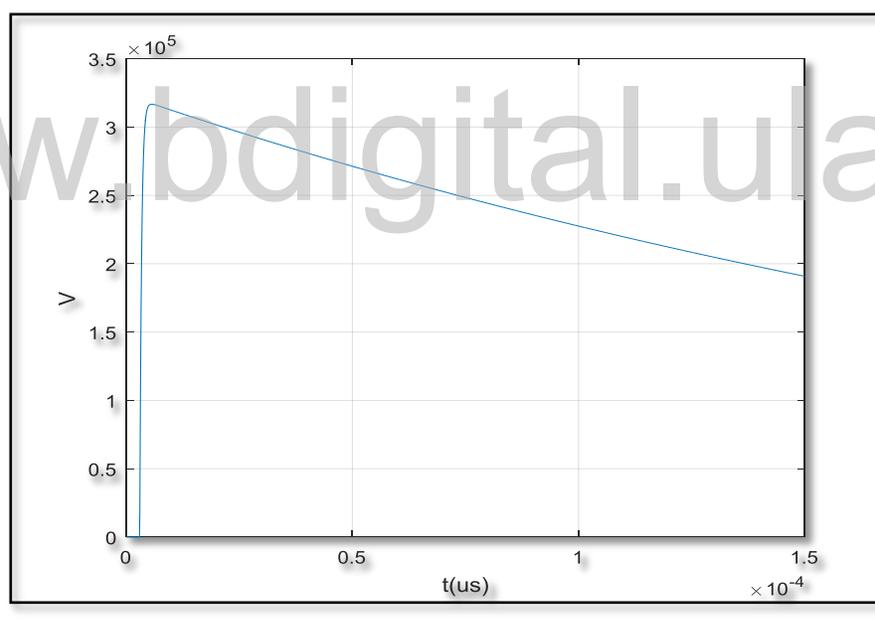


Figura 29 Grafica del comportamiento $T_1/T_2=1,2\mu\text{s}/50\mu\text{s}$ Circuito Tipo A

En la Tabla 9 se expresan los valores de los capacitores $C_1 = 0.001\text{e-}9$ F y $C_2 = 0.002\text{e-}6$ F son datos que se introducen para obtener los resultados de R_1 y R_2 a través de las ecuaciones 28 y 30 que corresponde, al cálculo de las resistencias por el autor Naidu y su solución es la siguiente $R_1=0$ y $R_2=0$, por lo que se sugiere una relación mayor a 467,13

Para que exista una solución real, se modifica el valor de nabra $C_1=0,001e-6$ F y $C_2 =0,002e-6$ F obteniendo los nuevos valores de resistencia como se muestra Tabla 9

Tabla 9 Valores nuevos de C_1 y C_2 para obtener el impulso 1,2/200 Circuito Tipo A

$C_1(\mu\text{f})$	$C_2(\mu\text{f})$	$R_1 (\Omega)$	$R_2 (\Omega)$
0.001	0,002e	600	94638

El tiempo de frente para el comportamiento del impulso $T_1/T_2= 1,2\mu\text{s}/200\mu\text{s}$ Circuito Tipo A es $T_1= 1,256 e-6$ s y se encuentra dentro de la norma con un 104% y para el tiempo de cola $T_2 =9,723e-5$ s, no está dentro de la norma con un 48,6%.

➤ Impulso $T_1/T_2= 1,2/200\mu\text{s}/5\mu\text{s}$ Tipo B

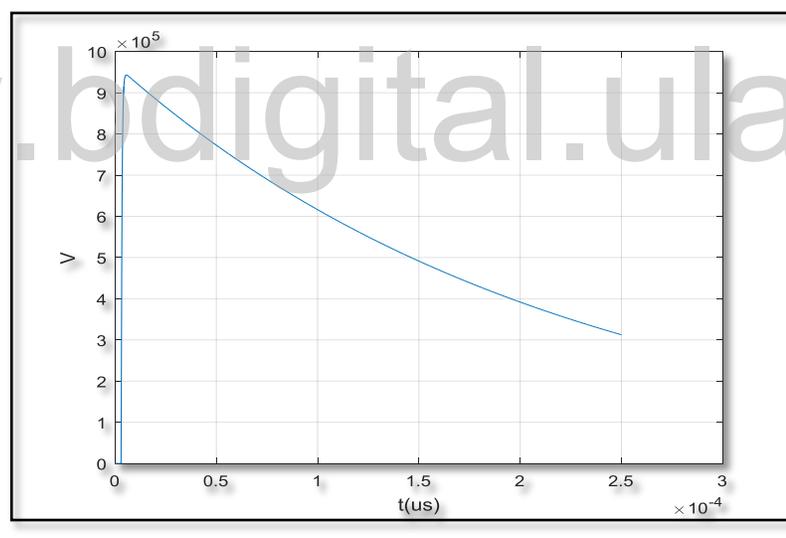


Figura 30 Grafica del comportamiento $T_1/T_2= 1,2\mu\text{s}/50\mu\text{s}$ Circuito Tipo B

En la Tabla 10 se expresan los valores de los capacitores C_1 y C_2 que son datos que se introducen para obtener los resultados de R_1 y R_2 a través de las ecuaciones 28 y 30 que corresponde al cálculo de las resistencias.

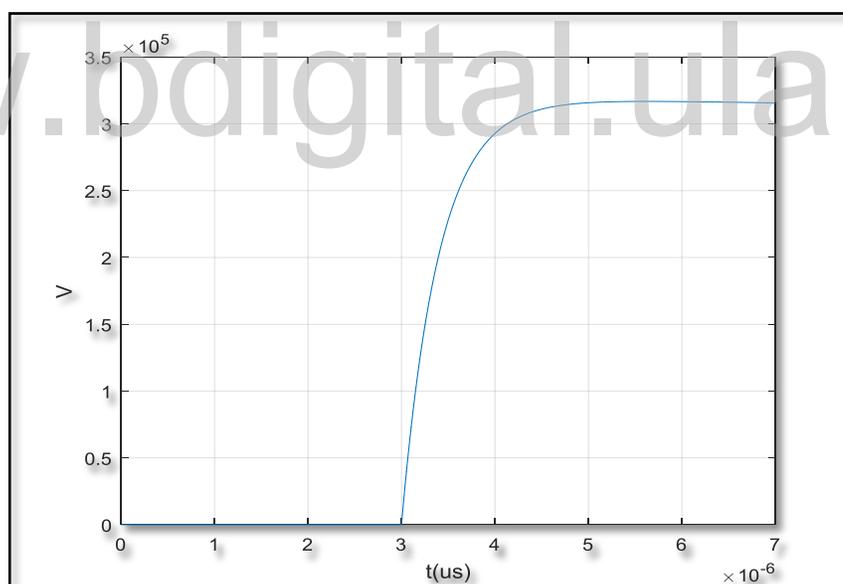
Tabla 10 Valor de los Elementos para el Impulso $T_1/T_2= 1,2\mu\text{s}/200\mu\text{s}$ tipo B

$C_1(\mu\text{f})$	$C_2(\mu\text{f})$	$R_1 (\Omega)$	$R_2 (\Omega)$
0,02	0,001	420	13185

El tiempo de frente para el comportamiento del impulso $T_1/T_2= 1,2\mu\text{s}/50\mu\text{s}$ Circuito Tipo B es $T_1= 1,2567\text{e-}6$ s, y se encuentra dentro de la norma con un 104% y para el tiempo de cola $T_2 =9,72$ s, está dentro de la norma con un 49%.

Impulso Tipo Maniobra

➤ Impulso $T_1/T_2= 250\mu\text{s}/2500 \mu\text{s}$ Tipo A

Figura 31 Valor de los Elementos para el Impulso $T_1/T_2= 250\mu\text{s}/2500\mu\text{s}$ tipo A

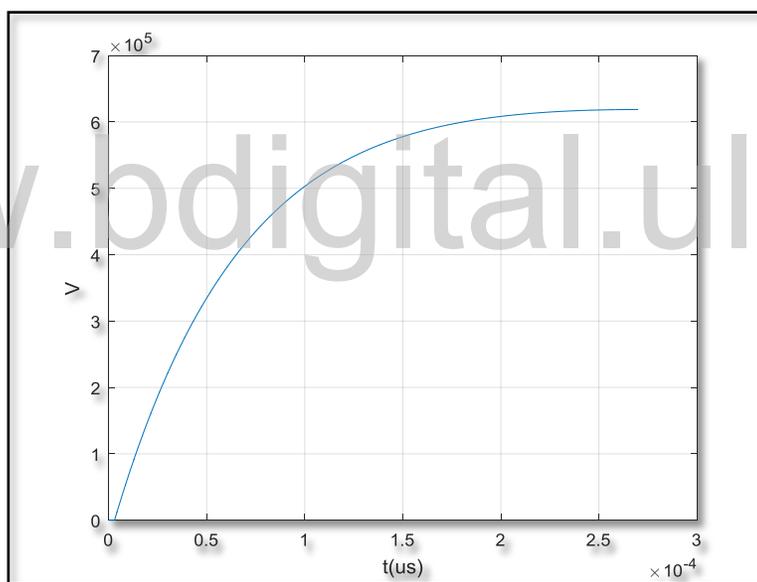
En la Tabla 11 se expresan los valores de los capacitores C_1 y C_2 que son datos que se introducen para obtener los resultados de R_1 y R_2 a través de las ecuaciones 21 y 23 que corresponde al cálculo de las resistencias.

Tabla 11 Valor de los Elementos para el Impulso $T_1/T_2=250\mu\text{s}/2500\mu\text{s}$ tipo A

$C_1(\mu\text{f})$	$C_2(\mu\text{f})$	$R_1(\Omega)$	$R_2(\Omega)$
0.02	0.019	8553	82023

El tiempo de frente para el comportamiento del impulso $T_1/T_2=250\mu\text{s}/2500\mu\text{s}$ Circuito Tipo B es $T_1=2,5 \text{ e-}3 \text{ s}$, y se encuentra dentro de la norma con un 87% y para el tiempo de cola $T_2=3.7 \text{ e-}3 \text{ s}$ no está dentro de la norma con un 41%.

➤ Impulso $T_1/T_2=250\mu\text{s}/2500\mu\text{s}$ Tipo B

Figura 32 Valor de los Elementos para el Impulso $T_1/T_2=250\mu\text{s}/2500\mu\text{s}$ tipo B

En la Tabla 12 se expresan los valores de los capacitores C_1 y C_2 que son datos que se introducen para obtener los resultados de R_1 y R_2 a través de las ecuaciones 20 y 21 Kuffel que corresponde al cálculo de las resistencias.

Tabla 12 Valor de los Elementos para el Impulso $T_1/T_2=250\mu\text{s}/2500\mu\text{s}$ tipo B

$C_1(\mu\text{f})$	$C_2(\mu\text{f})$	$R_1 (\Omega)$	$R_2 (\Omega)$
0,178	0.14	1368	8771

El tiempo de frente para el comportamiento del impulso $T_1/T_2=250\mu\text{s}/2500\mu\text{s}$ Circuito Tipo B es $T_1=4,01\text{e-}6$ y no se encuentra dentro de la norma con un 1,6% y para el tiempo de cola $T_2=9,702\text{e-}6$ no está dentro de la norma con un 3,8%..

www.bdigital.ula.ve

CAPÍTULO IV

INTERFAZ GRAFICO FUENTES DE IMPULSO

Con la idea de simplificar el uso de los computadores para usuarios de todo tipo y no sólo para los expertos, se ha convertido en una práctica habitual utilizar metáforas visuales por medio de la llamada Interfaz Gráfica de Usuario (IGU o GUI en inglés) para que el usuario interactúe y establezca un contacto más fácil e intuitivo con el computador.

Sin embargo, cuando aquí se habla de interfaz nos referimos a la cara visible de los programas tal y como se presenta a los usuarios, para que interactúen con la misma. La interfaz gráfica implica la presencia de un monitor de computador o pantalla constituida, por una serie de menús e íconos que representan las opciones que el usuario puede tomar dentro del sistema.

El desarrollo de la Interfaz Fuentes de Impulso, tiene como finalidad desarrollar una herramienta educativa que permite al usuario, realizar cálculos que garanticen la solución de acuerdo al impulso a utilizar, bien sea el impulso tipo rayo o el impulso tipo maniobra. Por lo tanto, este tipo de herramientas hoy en día no son ofrecidas usualmente, los simuladores de impulsos son una gran herramienta de enseñanza que permiten a los estudiantes comprender el comportamiento de los parámetros del circuito, de acuerdo a la topología del circuito a analizar y además dicha interfaz sirve como guía para a los estudiantes e ingenieros o personal de prueba, que requiere alcanzar los valores de los parámetros de circuito del generador cuando se aplican diversos tipos de cargas.

En este capítulo se desarrolla una aplicación en MATLAB® para el trabajo con generadores de Marx, con carga capacitiva pura y así mismo haciendo uso de los parámetros de los impulsos seleccionados, facilitando de manera ágil, interactiva y didáctica la comprensión de su desempeño.

4.1 DIAGRAMA DE FLUJO TIPO DE IMPULSO

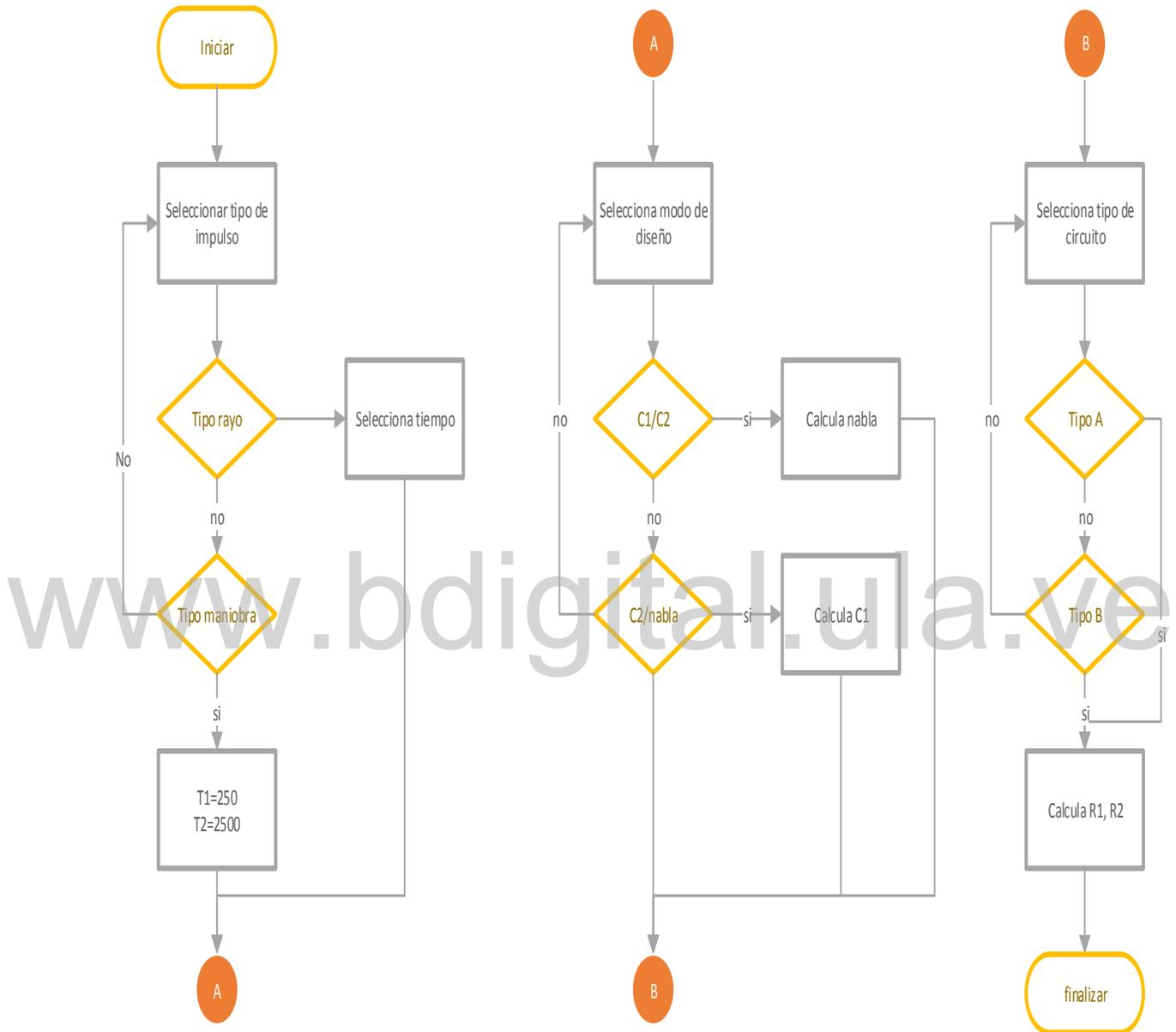


Figura 33 Diagrama de Flujo Tipo de Impulso

En la Figura 33 Se explica a través de un Diagrama de flujo el razonamiento lógico que desarrolla el interfaz, en donde se propone una secuencia lógica para lograr una simulación exitosa. Cuenta con mensajes de error que guían al usuario.

4.2 FUNCIONAMIENTO DE LA INTERFAZ TIPO DE IMPULSO

El interfaz gráfico consta de 3 paneles, el primer panel es donde el usuario tiene la opción de ingresar los datos que se necesitan para obtener los resultados, es importante resaltar que en este panel el usuario tiene acceso o manipulación del mismo. El segundo panel, expresa el resultado que el usuario requiere y por último en el tercer panel expresan los resultados de forma gráfica. Para ello se explicará de manera detallada el funcionamiento del interfaz.

A continuación se muestra la ventana final del Interfaz Gráfico Fuentes de Impulso como se muestra en la Figura 34

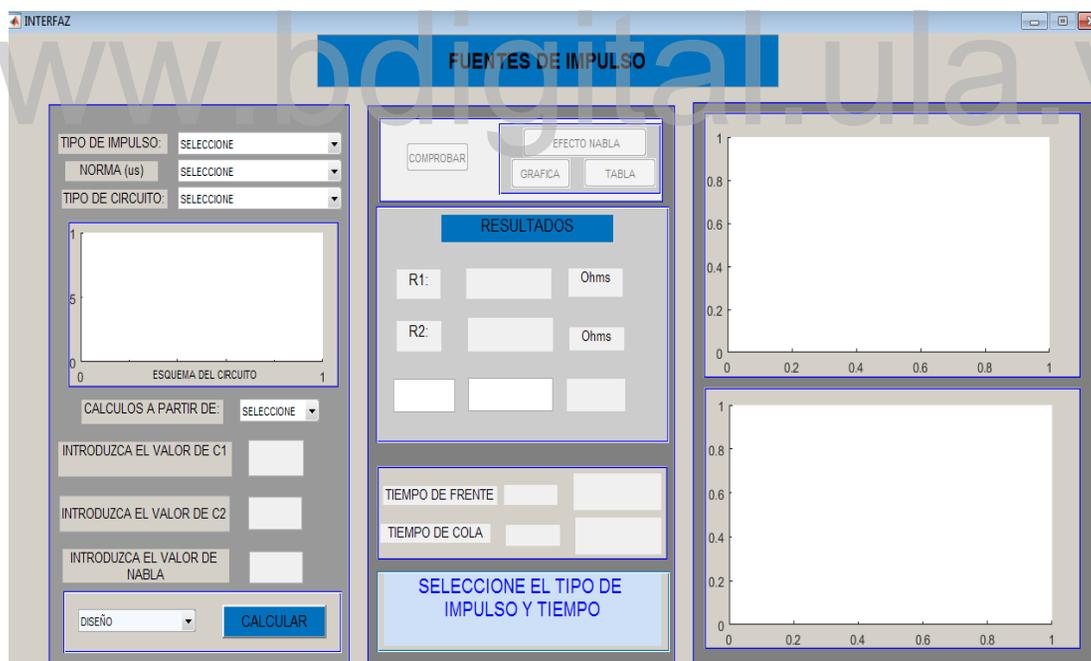


Figura 34 Interfaz Fuentes de Impulso

4.2.1 PANEL 1 (SE INTRODUCEN LOS DATOS POR EL USUARIO)

Primero, la simulación inicia con la selección de Tipo de Impulso, desplegándose entre las dos opciones disponibles, primera opción Impulso Tipo Rayo y la segunda opción Impulso Tipo Maniobra.

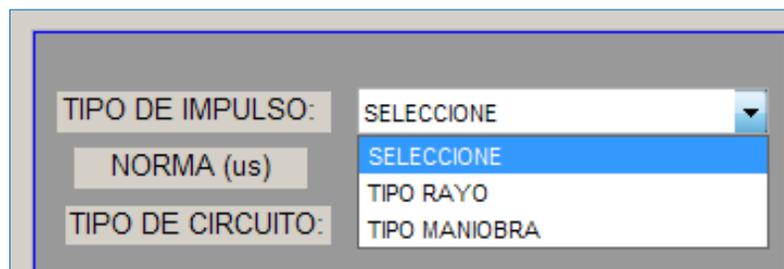


Figura 35 Selección del Tipo de Impulso

Segundo, de acuerdo a la selección del tipo impulso el usuario tiene la opción de escoger el impulso que establece la norma, si selecciona el impulso Tipo Rayo se despliega tres opciones 1,2/5us, 1,2/50us y 1,2/200us como se muestra en la Figura 36 de lo contrario, si se encuentra en la opción Tipo Maniobra se selecciona la norma 250/2500us como se muestra en la Figura 36

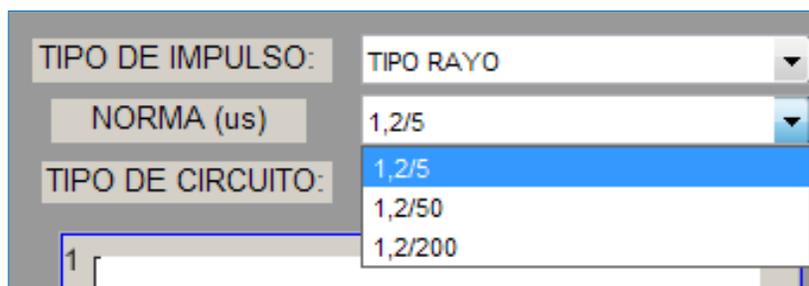


Figura 36 Selección de la Norma Tipo Impulso



Figura 37 Norma 250/2500us

Al seleccionar el tipo de impulso y la norma, el usuario debe seleccionar el tipo de topología del circuito a utilizar, bien sea el Circuito tipo A o Circuito tipo B, eso depende de la solución que se requiera. Si la topología seleccionada es el Circuito A automáticamente se carga el esquema del circuito como se indica en la Figura 38, ahora bien de ser el Circuito B automáticamente se carga el esquema del Circuito tipo B como se muestra en la Figura 39

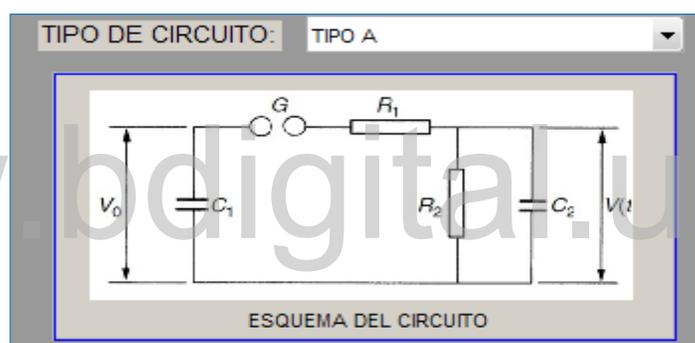


Figura 38 Esquema del Circuito tipo A

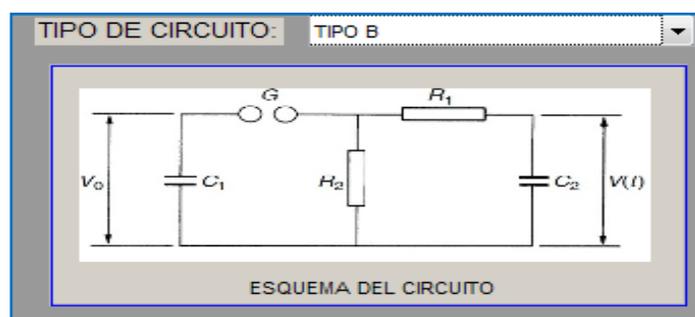


Figura 39 Esquema del Circuito tipo B

Luego de seleccionar el Tipo de Impulso, la norma requerida y la selección del tipo de circuito a usar, el usuario tendrá la opción de elegir a partir de que condición va requerir el cálculo,

para ello existen dos opciones, la primera opción es obtener los cálculos a partir de C_1 y C_2 como se indica en la Figura 40 o la segunda opción que parte de C_2 y NABLA como se indica en la Figura 40

The image shows a grey rectangular box with a label 'CALCULOS A PARTIR DE:' on the left. To its right is a dropdown menu. The menu is currently open, showing three options: 'SELECCIONE' (with a small downward arrow), 'C1 C2', and 'C2 NABLA'. The 'C2 NABLA' option is highlighted in blue.

Figura 40 Cálculos a partir de C_1/C_2 o C_2 NABLA

Para realizar los cálculos, el usuario luego de establecer la condición que va a requerir para obtener los resultados. Si se encuentra en la primera condición $C_1 C_2$ puede hacer el ingreso del valor C_1 en el campo habilitado como se muestra en la Figura 41 y el valor de C_2 como se muestra en la Figura 42

The image shows a grey rectangular box with a label 'INTRODUZCA EL VALOR DE C1' on the left and a white text input field on the right.

Figura 41 Campo habilitado para ingresar el valor de C_1

The image shows a grey rectangular box with a label 'INTRODUZCA EL VALOR DE C2' on the left and a white text input field on the right.

Figura 42 Campo habilitado para ingresar el valor de C_2

Ahora bien, de encontrarse en la segunda condición C_2 /NABLA el usuario tendrá habilitado las siguientes opciones para realizar el cálculo como se muestra en la Figura 43

The image shows a grey rectangular box containing two text input fields. The top field is labeled 'INTRODUZCA EL VALOR DE C2' and the bottom field is labeled 'INTRODUZCA EL VALOR DE NABLA'. Both fields are currently empty.

Figura 43 Campo habilitado para ingresar el valor de C_2 y NABLA

Para obtener el resultado dependiendo de la condición establecida por el usuario, al darle al botón de calcular y poder observar los resultados existen restricciones propias del interfaz y son las siguientes:

- Si se oprime el botón calcular, sin haber seleccionado el tipo de impulso aparecerá en una ventana ubicada en el panel 2, un mensaje en donde le indica al usuario que debe seleccionar el Tipo de Impulso como se muestra en la Figura 44

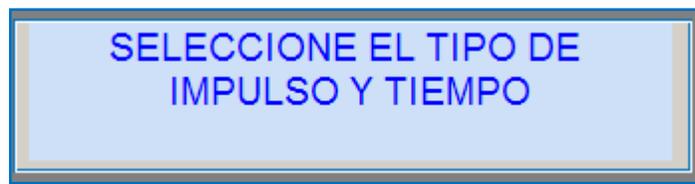


Figura 44 Mensaje cuando el usuario no ha seleccionado el Tipo de Impulso

- Si se oprime el botón calcular y solo se ha seleccionado el tipo de impulso, mas no la norma con la que se desea realizar el cálculo, aparecerá un mensaje que le indica al usuario que realice la selección del tipo de circuito como se muestra en la Figura 45

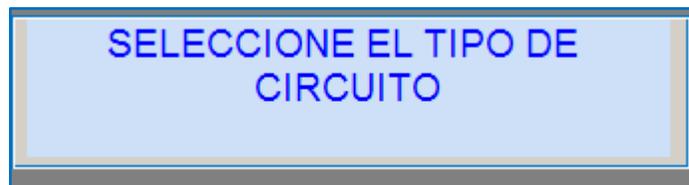


Figura 45 Mensaje cuando el usuario no ha seleccionado el Tipo de Circuito

Luego de establecer las condiciones es obligatorio seleccionar el tipo de autor, para realizar el cálculo en este caso se despliega un panel con tres opciones. El primer autor Naidu, el segundo autor Kuffel y por ultimo Wadhwa. De no elegir una de las tres opciones antes mencionada, aparecerá un mensaje como se muestra en la Figura 46

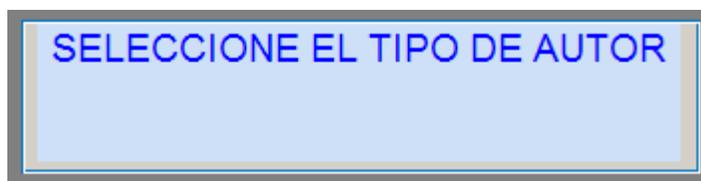


Figura 46 Mensaje cuando el usuario no ha seleccionado el Tipo de Autor

4.2.2 PANEL 2 (RESULTADOS)

En el segundo panel se expresan los resultados luego de introducidos los parámetros del circuito, el simulador solo permite asignar los campos C_1 , C_2 y NABLA en donde, se obtienen el cálculo de los parámetros de las resistencias R_1 y R_2 y el comportamiento NABLA si el usuario se ha de encontrar en la condición 1 de lo contrario, se realiza el cálculo de R_1 , R_2 y C_1 de encontrarse en la condición 2.

Si el propósito es el cálculo de los parámetros de acuerdo a la topología del circuito a analizar, bien sea, el circuito tipo A o el circuito tipo B, previo al ingreso de los datos suministrados por el usuario y dichos parámetros habilitados por el simulador en el primer panel, se da inicio a la simulación con el botón CALCULAR, como se expresan en la Figura 47 y Figura 48.

Figura 47 Resultados para la condición $C_1 C_2$

The image shows a software interface with a blue header bar containing the word "RESULTADOS". Below the header, there are three rows of input fields. The first row has a label "R1:" followed by a text input field and a button labeled "Ohms". The second row has a label "R2:" followed by a text input field and a button labeled "Ohms". The third row has a label "C1" followed by a text input field and a button labeled "FARADIO".

Figura 48 Resultados para la condición C_2 NABLA

Luego, si se desea el cálculo del tiempo de frente y tiempo de cola de la onda simulada presentadas en la interfaz gráfica, y si se encuentra dentro de la norma como se muestra en la Figura 49 para ello es necesario pulsar el botón COMPROBAR, el cual permitirá la respuesta de los tiempos y habilitará el panel 3, en donde se refleja la respuesta gráfica del tiempo de frente y el tiempo de cola, como se muestra en la Figura 49

The image shows a software interface with a light gray background. It contains two rows of input fields. The first row has a label "TIEMPO DE FRENTE" followed by a text input field and a button. The second row has a label "TIEMPO DE COLA" followed by a text input field and a button.

Figura 49 Cálculo de los Tiempos de frente y cola

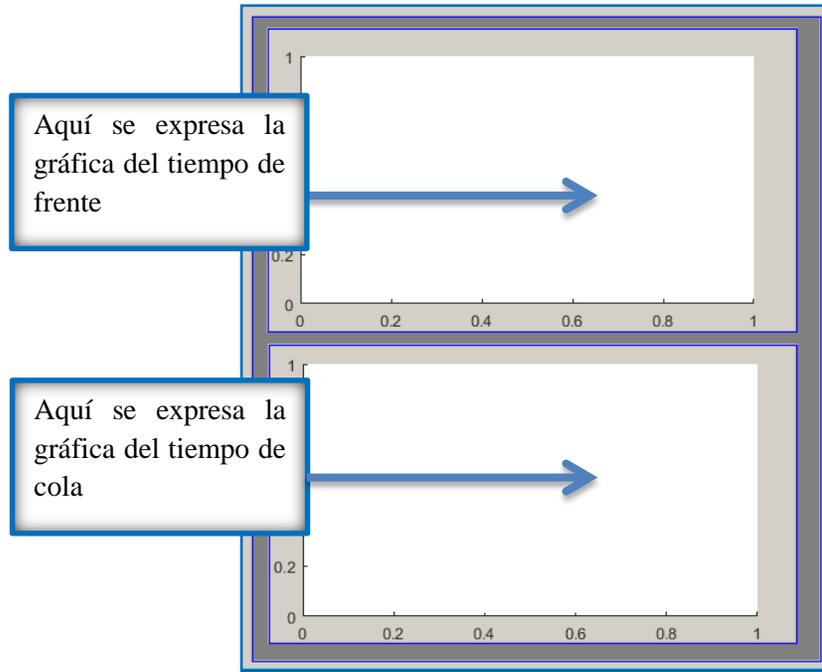


Figura 50 Representación gráfica del Tiempo de Frente y Tiempo de Cola

Si, por el contrario, se desea demostrar el estudio del efecto nabla, como solución gráfica y de manera tabulada al presionar el botón EFECTO NABLA, se cargará automáticamente los valores y se podrá observar ambas respuestas siempre y cuando la norma se lo permita. En el botón GRAFICA, se observa la variación de la relación C_1/C_2 , en cambio al oprimir el botón TABLA se abre una ventana donde están tabulados los valores del impulso a calcular, como se observa en la Figura 51



Figura 51 Comportamiento del Efecto Nabla

Para la verificación del desempeño de las configuraciones del generador (circuitos RC) mediante el simulador, se efectuó un análisis de los parámetros de onda. Para este propósito, se implementa un ejemplo que es, el caso del Impulso $T_1/T_2 = 1,2\mu\text{s}/50\mu\text{s}$ Tipo B, en donde se presentan los resultados en la Interfaz Gráfica y así permite comprobar y validar los resultados de los parámetros de la onda, como de los parámetros resistivos de los circuitos arrojados por el simulador como se muestra en la Figura 52

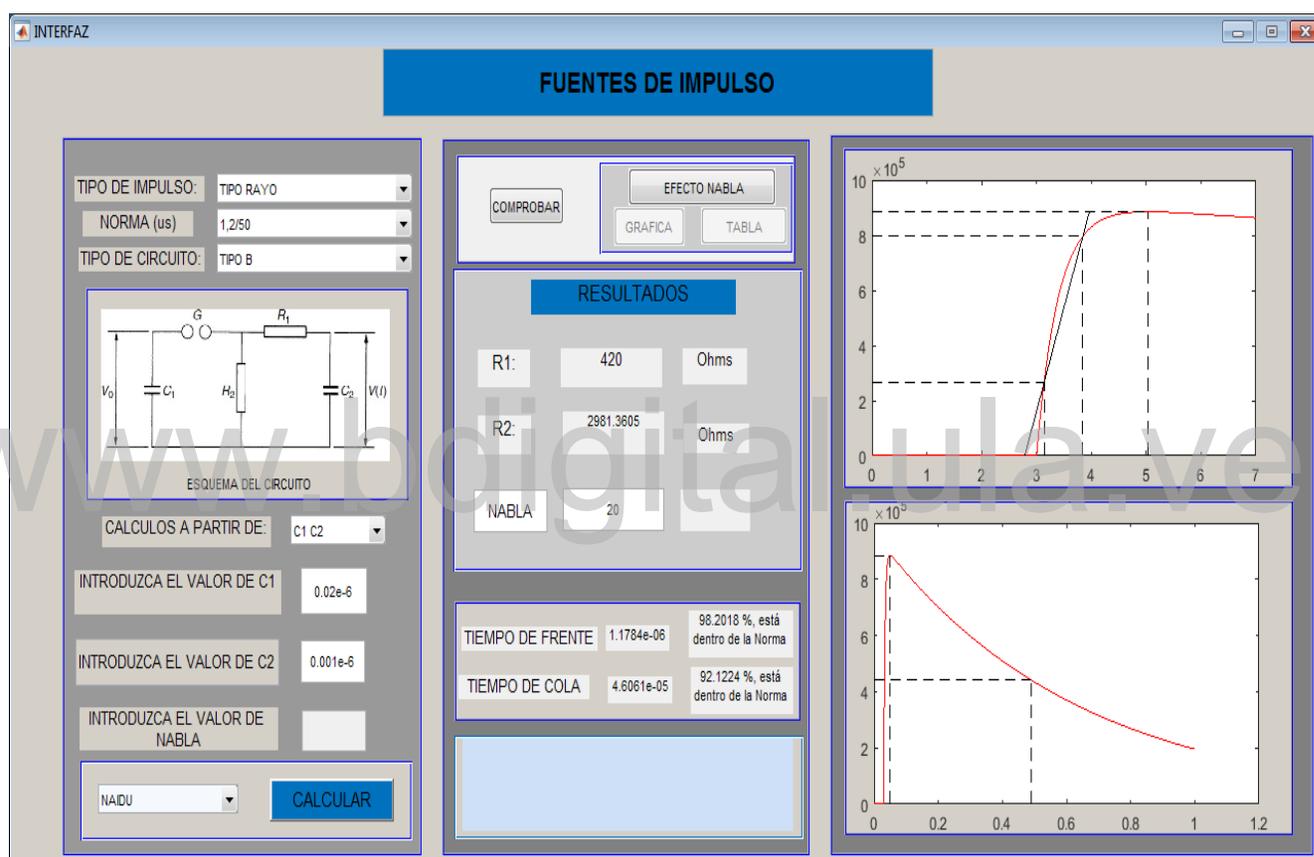


Figura 52 Interfaz Gráfico para el Impulso 1,2/50us Circuito Tipo B

CONCLUSION

Al realizar la investigación y luego de analizar diferentes bibliografías, artículos vía web, revistas y trabajos de grado de diferentes autores de temas relacionados al contenido de alta tensión, fuentes de impulsos tipo rayo y tipo maniobra, se sustentó la teoría a través de tres autores, tales como, M Naidu, Kuffel y Wadhwa, que a pesar que cada uno tiene su propia forma de dar solución al diseño de fuentes de impulso y por una analogía entre sus ecuaciones, se logra establecer parámetros que permiten llegar a la solución correcta.

Además, se pudo crear un software que permite simular y representar, el comportamiento de los distintos impulsos de acuerdo a la norma establecida, bien sea tres casos que corresponden al impulso tipo rayo y uno que corresponde a la norma de impulso tipo maniobra.

Conjuntamente, se pudo evaluar de manera teórica y comprobar las normas estudiadas, se puede decir que, son solo una pequeña parte de una gran variedad de normas y dentro de las cuales se desprenden otras, que dependen del tipo de trabajo en el cual se va aplicar la norma específica.

Los resultados obtenidos del software computacional MATLAB®, son:

- El cálculo de los parámetros R_1 , R_2 , NABLA, tiempo de frente y tiempo de cola, de acuerdo a la topología del circuito, Circuito Tipo A o Circuito Tipo B, eso depende de la norma que se esté calculando.
- También se logra indicar al usuario, que luego de calculado los parámetros de tiempo de frente y tiempo de cola, si la relación C_1/C_2 permite que, sus respuestas se encuentren dentro de la norma establecida.
- En las variaciones de los parámetros y dependiendo del impulso que se esté calculando, se puede decir que, en el impulso tipo rayo y maniobra la respuesta del tiempo de subida y del tiempo de bajada solo depende del impulso que se esté trabajando.

- Los métodos aproximados son muy útiles a la hora de solucionar problemas que teóricamente son muy complicados de resolver, se comprueba su fácil aplicación y solución efectiva.

www.bdigital.ula.ve

RECOMENDACIONES

En cuanto a las recomendaciones, se hace referencia a lo más importante de la investigación del trabajo de grado que a futuro se pueda realizar.

- Se sugiere ampliar otro interfaz gráfico, para otros tipos de impulsos que establecen diversas normas de la IEEE y otros entes normativos.
- Se recomienda, que se realice una herramienta educativa para los impulsos tipo rayo y tipo maniobra, basados en el comportamiento, que puede generar los parámetros en función de la corriente.
- Se propone que, de acuerdo al impulso a experimentar, se realice un estudio de las protecciones de acuerdo a las restricciones que la norma se lo indique.
- Se requiere, en nuestra Escuela de Ingeniería Eléctrica más trabajos de grados que tengan relación al tema de Fuentes de Impulsos, específicamente impulso tipo rayo y tipo maniobra. Así mismo, implementos de circuitos en alta tensión.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] P. S, 20 Abril 2016. [En línea]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=2546>. [Último acceso: 16 Enero 2019].
- [2] B. Maylen, «Fuente resonante y de impulso para laboratorio de Alta Tension,» Universidad de los Andes, Merida, 2016.
- [3] IEEE, «IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing,» IEEE Standards Board, New York, 1995.
- [4] C. Wadhwa, High Voltage Engineering, Cochin: University of Delhi, 2002.
- [5] M. N. V. Kamaraju, High Voltage Engineering, New York: McGraw-Hill, 1995.
- [6] L. Kelvin, «wikipedia,» 5 junio 2012. [En línea]. Available: <https://www.aiteco.com/lo-que-no-se-mide/>. [Último acceso: 23 junio 2019].
- [7] D. J. H. D. Vosloo, «Extra High Voltage AC Transmission Engineering,» 2006. [En línea]. Available: https://www.europeana.eu/portal/en/record/09404/id_oai_www_dbc_wroc_pl_3458.html. [Último acceso: febrero 2019].
- [8] W. Z. J. K. E. Kuffel, High Voltage Engineering, New Delhi: Planta Tree, 2000.
- [9] K. M, High Voltage Engineering, Marcel Dekker, 1990.
- [10] «Quality Control Reasearch. Buenos Aires Argentina,» 2014. [En línea]. Available: <https://www.upwork.com/l/ar/quality-control-freelancers-in-buenos-aires/>. [Último acceso: 24 3 2019].
- [11] C. Wadhwa, High Voltage Engineering, New Delhi: New Age International (P) Limited, Publishers, 2007.
- [12] R. D. Begamudre, Extra High Voltage, New Delhi: New Age International (P) Limited, Publishers, 2006.

www.bdigital.ula.ve