



Ingeniería Eléctrica
Trabajo de grado

2015

Diseño y Construcción de un Generador de Impulsos Recurrentes



Jhon Sebastian Giraldo Castillo

Escuela de Ingeniería Eléctrica y
Electrónica

Laboratorio de Alta Tensión de la
Universidad del Valle

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GENERADOR DE IMPULSOS
RECURRENTES

JHON SEBASTIAN GIRALDO CASTILLO

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
SANTIAGO DE CALI
2015

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GENERADOR DE IMPULSOS RECURRENTES

JHON SEBASTIAN GIRALDO CASTILLO

Trabajo de Grado presentado ante el Programa de Ingeniería Eléctrica como
requisito para optar al título de Ingeniero Electricista

Director
Ferley Castro Aranda
Profesor, Ingeniero Electricista, Ph.D

Director
Diego Fernando Navas
Profesor, Ingeniero Electricista, M.Sc

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
SANTIAGO DE CALI
2015

A mis abuelos Aura María y Eleazar, por su apoyo y consejos brindados durante el tiempo que estuvieron a mi lado.

A mi madre María Eugenia, quien con su esfuerzo, educación, disciplina y amor ha hecho posible este logro.

A mi hermana Laura por sus cuidados y apoyo.

Jhon Sebastian Giraldo Castillo

Universidad del Valle

isebasgc18@gmail.com

2015 – Todos los derechos reservados

AGRADECIMIENTOS

Primero y antes que nada a mi familia, en especial a mis primos que han sido partícipes de mi desarrollo como persona y profesional durante todo el periodo de estudio.

Agradecer al ingeniero Ferley Castro PhD, director del Laboratorio de Alta Tensión y de este proyecto. Por ofrecerme una tesis que cumplió con todas mis expectativas y por la confianza depositada en mí.

Un agradecimiento especial al ingeniero Diego Fernando Navas M. Sc. también director de este proyecto. Por su orientación y tiempo aportado.

Al ingeniero Héctor Góngora, ingeniero de mantenimiento y soporte, a Olga Lucia Sarria, asistente administrativa del Laboratorio de Alta tensión. Por su ayuda y cooperación brindada en la realización de este proyecto.

A la Universidad del Valle y a todos los profesores de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica por su formación académica.

CONTENIDO

pág.

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO UNO	3
1. CONCEPTOS GENERALES	4
1.1 ONDA DE IMPULSO TIPO RAYO.....	5
1.1.1 Definiciones generales de impulsos.	5
1.1.1.1 Impulso de Tensión:	5
1.1.1.2 Impulso de tensión completo tipo rayo:	5
1.1.1.3 Impulso tipo rayo estándar:	5
1.1.1.4 Tiempo de frente:	5
1.1.1.5 Tiempo a valor medio o cola:.....	5
1.1.2 Tolerancias.	6
1.2 GENERACIÓN DE LA ONDA DE IMPULSO TIPO RAYO EN EL RSG.....	6
1.2.1 Circuito generador de impulsos.	7
1.2.2 Análisis matemático del circuito generador de impulsos.	8
1.2.3 Eficiencia.	12
1.2.4 Dimensionamiento de los elementos del circuito.....	13
1.2.5 Tiempos de frente y cola.	14
1.3 CIRCUITO PARA EL CONTROL DE LA RECURRENCIA	15
CAPÍTULO DOS	16
2. ESTUDIOS PRELIMINARES PARA EL DISEÑO DE UN RSG	17
2.1 GENERADOR DE IMPULSOS DE ALTA TENSION DEL LAT	17
2.1.1 Elementos que forman parte del GIAV	18

2.1.1.1	Capacitores.	18
2.1.1.2	Resistencias de cola y frente.....	18
2.1.1.3	Resistencias de carga.	18
2.1.1.4	Resistencias para descargar.	19
2.1.1.5	Capacitor de chequeo.	19
2.1.2	Operación del GIAT del LAT.....	20
2.1.3	Circuito equivalente	21
2.1.4	Análisis de las variantes del circuito	27
2.2	CÁLCULO DE LOS VALORES DE LAS RESISTENCIAS.....	30

CAPÍTULO TRES 3 2

3. DISEÑO DEL GENERADOR DE IMPULSOS RECURRENTE (RSG) 3 3

3.1	CONDENSADORES Y RESISTENCIAS.....	33
3.1.1	Resistencias de frente (R_f) y cola (R_c)	33
3.1.2	Condensadores (C_s)	34
3.2	FUENTE DE ALIMENTACIÓN	35
3.2.1	Determinación de la tensión de fuente.	36
3.2.2	Carga del arreglo de condensadores.	37
3.2.3	Resistencia de carga	39
3.3	SISTEMA DE CONTROL	40
3.3.1	Control de carga.....	43
3.3.2	Control de disparo.	44

CAPÍTULO CUATRO 4 8

4. PROCESO DE CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS 4 9

4.1	PROTOTIPO INICIAL.....	49
4.1.1	Implementación	49
4.1.2	Pruebas preliminares.....	50
4.2	CONSTRUCCIÓN DE LOS CIRCUITOS IMPRESOS.....	52
4.2.1	Distribución de los circuitos	52

4.2.2	Circuitos impresos	53
4.3	PRUEBAS DE EQUIVALENCIA	55
4.3.1	Pruebas 1 etapa	57
4.3.2	Pruebas 2 etapas	59
4.3.3	Pruebas de 3 y 4 etapas.....	61
4.4	DISEÑO FINAL.....	63
4.4.1	Montaje final.	64
4.4.2	Lista de materiales.	65
4.4.1	Especificaciones.....	66
4.4.2	Pruebas finales de funcionamiento.....	67

CONCLUSIONES	69
---------------------------	-----------

RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS .	70
---	-----------

BIBLIOGRAFÍA	71
---------------------------	-----------

ANEXOS	72
---------------------	-----------

Anexo A. Código de programación del Arduino Nano.	73
Anexo B. Esquemático y circuito impreso del sistema de control, acoplamiento de señal y fuentes reguladas de DC.....	74
Anexo C. Esquemático y circuito impreso de la fuente de alimentación, elementos de potencia y arreglo de condensadores.....	76
Anexo D. Esquemático y circuito impreso del arreglo de resistencias de frente y cola.	77
Anexo E. Diseño del panel de control y posterior.....	78

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Resultados para las constantes $(1/\alpha_1)$ y $(1/\alpha_2)$	14
Tabla 2. Valores de capacitancias máximas de objetos de prueba.	31
Tabla 3. Valores de resistencias de frente y cola onda 1,2/50 μ s.....	31
Tabla 4. Especificaciones Arduino nano.	41
Tabla 5. Características principales del transistor de potencia.	44
Tabla 6. Principales especificaciones del TRIAC.....	46
Tabla 7. Comparación de la onda experimental con la simulación.	51
Tabla 8. Mediciones de las ondas de impulso de la Figura 44.	58
Tabla 9. Mediciones de las ondas de impulso de la Figura 45.	59
Tabla 10. Mediciones de las ondas de impulso de la Figura 46.....	60
Tabla 11. Mediciones de las ondas de impulso de la Figura 47.....	61
Tabla 12. Mediciones de las ondas de impulso de la Figura 48.....	62
Tabla 13. Mediciones de las ondas de impulso de la Figura 49.....	62
Tabla 14. Lista de materiales y costo total.....	65

LISTA DE FIGURAS

pág.

Figura 1. Circuito del Generador Recurrente de impulsos.	4
Figura 2. Impulso tipo rayo completo.	6
Figura 3. Circuito generador de impulso (a) y (b) de una etapa.	7
Figura 4. Circuito de impulso transformado al dominio de la frecuencia.	9
Figura 5. Impulso de tensión y sus componentes de acuerdo al circuito “b” de la Figura 3.	11
Figura 6. Eficiencia en función de la relación C_2 / C_1	13
Figura 7. Generador de impulsos de alta tensión del LAT.	17
Figura 8. Resistencias y capacitores del GIAV.	18
Figura 9. Resistencias de carga.	18
Figura 10. Resistencia de descarga.	19
Figura 11. Capacitor de chequeo del impulso.	19
Figura 12. Generador de Impulsos de alto voltaje conexión serie (5 etapas).	20
Figura 13. Circuito eléctrico luego de la activación de las esferas con tres etapas.	22
Figura 14. Circuito en el dominio de Laplace	23
Figura 15. Circuito equivalente GIAT para tres etapas	27
Figura 16. Circuito esquemático para la comparación de las ondas.	28
Figura 17. Ondas de impulso del circuito de tres etapas y el equivalente.	28
Figura 18. Acercamiento de las ondas de impulso.	29
Figura 19. Variación entre ondas de impulso.	30
Figura 20. Metodología de diseño.	33
Figura 21. Arreglo de resistencias.	34
Figura 22. Arreglo de condensadores.	35
Figura 23. Esquema de la fuente de alimentación.	35

Figura 24. Eficiencia del RSG para diferentes valores de capacitancia de prueba.	36
Figura 25. Corriente entregada por la fuente sin su desconexión al momento del impulso.	38
Figura 26. Circuito de generación de impulso con dos tipos de interruptores.	39
Figura 27. Potencia disipada en la resistencia de carga.	40
Figura 28. Plataforma de hardware libre Arduino nano.	41
Figura 29. Secuencia de instrucciones para la programación del Arduino Nano. ...	43
Figura 30. Circuito para el control de la carga del arreglo de condensadores.	43
Figura 31. Simulación corriente pico en el TRIAC.	45
Figura 32. Pico de corriente en el TRIAC.	45
Figura 33. Circuito de control del disparo para la generación de los impulsos.	46
Figura 34. Implementación inicial del RSG.	49
Figura 35. Generación de ondas de impulso a 20 Hz.	50
Figura 36. Onda de impulso generada.	51
Figura 37. Disposición de los circuitos impresos.	52
Figura 38. Circuito impreso sistema de control, acoplamiento y fuentes de DC. ...	53
Figura 39. Circuito impreso fuente de alimentación, elementos de potencia y arreglo de condensadores.	54
Figura 40. Circuitos impresos del arreglo resistencias de frente y cola.	54
Figura 41. Montaje para las pruebas de equivalencia.	55
Figura 42. Panel de control inicial para la realización de las pruebas de equivalencia.	55
Figura 43. Montaje del transformador seleccionado.	56
Figura 44. Ondas de impulso obtenidas del RSG Y GIAT para 1 etapa con $R_f 52 \Omega$ y $R_c 68 \Omega$	57
Figura 45. Ondas de impulso obtenidas del RSG Y GIAT para 1 etapa con $R_f 328 \Omega$ y $R_c 68 \Omega$	58
Figura 46. Ondas de impulso obtenidas del RSG ($R_f 104 \Omega$ y $R_c 136 \Omega$) y GIAT ($R_f 52 \Omega$ y $R_c 68 \Omega$ por etapa) para 2 etapas.	59

Figura 47. Ondas de impulso obtenidas del RSG (R_f 324 Ω y R_c 136 Ω) Y GIAT (R_f 162 Ω y R_c 68 Ω por etapa) para 2 etapas.	60
Figura 48. Ondas de impulso obtenidas del RSG (R_f 156 Ω y R_c 204 Ω) Y GIAT (R_f 52 Ω y R_c 68 Ω por etapa) para 3 etapas.	61
Figura 49. Ondas de impulso obtenidas del RSG (R_f 208 Ω y R_c 272 Ω) Y GIAT (R_f 52 Ω y R_c 68 Ω por etapa) para 4 etapas.	62
Figura 50. Montaje final del RSG.	64
Figura 51. Parte posterior del RSG.	64
Figura 52. Ondas de impulso con diferentes tiempos de cola.	67
Figura 53. Ondas de impulso con diferentes tiempos de frente.	67

RESUMEN

El Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad del Valle (Cali-Colombia) cuenta con un generador de impulsos tipo rayo de 1,1 MV, el cual se utiliza para realizar pruebas de aislamiento a equipos eléctricos. En estas pruebas se identificó la necesidad de tener una alternativa que permitirá determinar, antes de la realización de los ensayos, los parámetros del circuito de impulso para generar una forma de onda deseada.

Este proyecto se enfocó a crear dicha alternativa mediante el diseño y construcción de un generador de impulsos recurrentes (RSG). Para llevar a cabo el diseño, se analizó el funcionamiento del circuito del generador de impulsos de alta tensión y posteriormente se determinó un circuito equivalente en baja tensión y con una sola etapa del mismo. Mediante simulaciones en la herramienta computacional Orcad Pspice se verificó la equivalencia del circuito comparando las ondas de impulso generadas, donde se encontró un error entre ellas de aproximadamente el 3%. También se incluyó en el diseño los circuitos de control del disparo, de carga y fuente de alimentación.

Para iniciar la construcción se utilizaron montajes prototipos, con los cuales se evaluó si el equipo cumplía con los requerimientos de funcionamiento y diseño. Luego, se construyeron los circuitos impresos utilizando la herramienta computacional EAGLE, con los cual se realizaron las pruebas de equivalencia. En estas se encontró que el RSG construido emulaba correctamente la respuesta del generador de impulsos de alta tensión para cada una de sus etapas con un error no mayor al 5%. Adicionalmente, se verificó su utilidad como alternativa para obtener los parámetros del circuito de impulso con los cuales generar una onda estándar para una prueba en un transformador.

Palabras claves: generador de impulsos recurrentes, tensiones de alta frecuencia, circuitos generadores de impulsos, control de disparo, tiempo de frente y cola, tensión pico, diseño, construcción.

ABSTRACT

The Laboratorio de Alta Tensión of the Universidad de la Valle (Cali-Colombia) has a lightning impulse generator of 1.1MV, which is used for insulation testing in electrical equipments. During these tests was identified the need for an alternative to determine, prior to the test, suitable impulse generator's setup to achieve voltage waveform.

This project focused in the creation of this alternative through the design and the construction of a Recurrent Surge Generator (RSG). For the designing, the performance of the high voltage lightning circuit was analysed and then an equivalent in low voltage was designed with only one stage. Through the simulation in the Orcad Pspice software, the equivalence of the circuit was tested by the comparison of the lighting waves generated by the circuit, getting an error of approximately 3%. Also, there were added circuits for release, load and power supply in the designed.

To begin the construction prototypes assemblies were used, which assessed whether the equipment met the performance requirements and design. Then, the printed circuit boards were constructed using the EAGLE tool, like the final design, it was used for testing equivalence. These were found to successfully emulated RSG response high voltage lightning impulse generator for each of its stages with an error not more than 5%. In addition, its utility as an alternative was verified to determine the circuit parameters with lightning impulse which generate a standard waveform for a test on a transformer.

Keywords: recurrent surge generator, high frequency voltages, impulse generating circuits, shot control, front and tail time, peak voltage, design, construction.

INTRODUCCIÓN

Los transformadores son los equipos de mayor presencia dentro de las redes eléctricas. Su función juega un papel fundamental en la cadena productiva de energía y las interrupciones en el servicio eléctrico usualmente están asociadas a sus fallas.

Las descargas atmosféricas son uno de los factores que pueden producir fallas al impactar equipos o redes eléctricas, ya que generan sobretensiones de alta frecuencia. En particular, los transformadores cuentan con un aislamiento interno que debe ser capaz de soportar dichas sobretensiones sin presentar interrupción en el servicio. Para verificar la capacidad que tienen los transformadores para soportar este tipo de eventos, en la práctica suelen realizarse ensayos eléctricos en laboratorios. La prueba de impulso es el ensayo por excelencia para verificar esta condición. Este ensayo está normalizado a nivel internacional, e indica que el transformador deber ser sometido a un onda de tensión con tiempos característicos de frente y cola y una amplitud que está asociada a la clase del equipo.

Para llevar a cabo la realización del ensayo se emplea un equipo denominado generador de impulsos de alta tensión, el cual se compone de un circuito conformado por un arreglo de resistores y capacitores que definen, mediante la carga y descarga de los condensadores a través de las resistencias, los tiempos de frente y cola de la onda de impulso. Una vez se conecta el transformador para realizar la prueba, este no solo presenta una capacitancia si no también una inductancia asociada a sus devanados, la cual modifica el arreglo RC y por ende altera la característica de la onda de impulso de salida. Dado que todos los transformadores presentan una impedancia distinta para el sistema de prueba, es una tarea difícil conocer de antemano los valores adecuados de las resistencias del generador, que compensen tal efecto y cumplan con la onda de prueba estándar.

Si se desconocen los valores de resistencias adecuados al momento de realizar la prueba a un transformador, se tienen que hacer modificaciones en la topología del circuito del generador de impulso en el transcurso de la prueba, que pueden traer consigo, un mayor número de impulsos aplicados (aspecto no deseado ya que el aislamiento interno del transformador se puede ver afectado) y una mayor duración del ensayo, debido a que el ajuste de la onda estándar, se convierte en una tarea de ensayo y error que consta de un cambio continuo de los resistores de frente y

cola hasta lograr la onda deseada. La dificultad parte de que los generadores de impulso de alta tensión son generalmente de múltiples etapas, lo que hace que constructivamente alcancen, dependiendo el nivel de tensión máximo que suministren, una altura considerable. Esto implica, que para el ajuste se requiera de un personal que escale varias veces y modifique los elementos, asociando peligros al equipo y al personal de prueba, haciendo con ello que el procedimiento sea ineficiente.

Para mejorar esta práctica, es usual emplear un equipo denominado generador de impulsos recurrentes. Este es una configuración a escala en baja tensión (una sola etapa) y equivalente del generador de impulsos de alta tensión, el cual permite determinar previamente de forma práctica los valores de los resistores a emplear, para probar un equipo o transformador dado. Puesto que este equipo es de un tamaño reducido y de baja tensión, es fácil utilizarlo como herramienta para la prueba y no compromete el aislamiento del transformador.

El Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad del Valle recibió recientemente la donación de un generador de impulsos de alta tensión (GIAT) de 1,1 MV con once etapas. Para mejorar la realización y operación de las pruebas de impulso en transformadores con dicho equipo, es deseable y necesario contar con un generador de impulsos recurrentes de baja tensión que se ajuste a las necesidades propias del laboratorio. Para la realización de este proyecto se definió como objetivo general, diseñar y construir un generador de impulsos recurrentes.

El documento está organizado de la siguiente forma:

En el Capítulo 1, se expone los conceptos generales relacionados con los generadores de impulsos recurrentes.

El Capítulo 2 describe los elementos del generador de impulsos de alta tensión del LAT, su operación, circuito equivalente y simulaciones de su funcionamiento.

El Capítulo 3 presenta el diseño del RSG que incluye el arreglo de resistencias y condensadores, fuente de alimentación y sistema de control.

El Capítulo 4 presenta el proceso de construcción del RSG y las pruebas realizadas con el fin de verificar su equivalencia con el GIAT.

Finalmente, se presenta las conclusiones y trabajos futuros de este trabajo de grado.

CAPÍTULO UNO

“Si buscas resultados distintos, no hagas siempre lo mismo”. **Albert Einstein**

Las descargas atmosféricas son un fenómeno natural que ha maravillado al hombre desde tiempos inmemorables, sin embargo son causantes de sin número de fallas eléctricas en todo el mundo. Por esta razón se han estudiado sus características y formas de reproducirlas en laboratorios a partir de circuitos eléctricos.

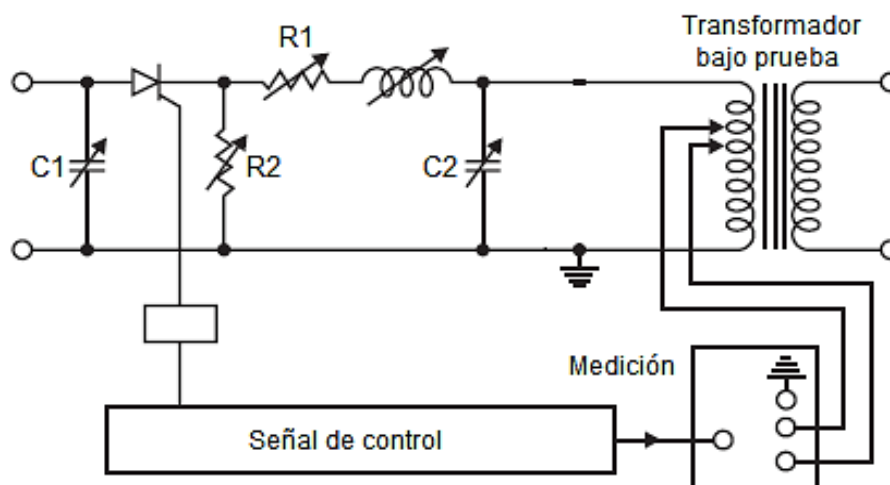
El presente capítulo expone los conceptos generales relacionados con los generadores de impulsos recurrentes, haciendo énfasis en el análisis matemático de la onda de impulso generada por el circuito que los compone.

1. CONCEPTOS GENERALES

Un generador impulsos recurrente (*Recurrent Surge Generator, RSG*) es un equivalente de baja tensión, con una sola etapa, de un generador de impulsos de alta tensión (Haefely High Voltage Test, 2003). Tiene una amplia gama de aplicaciones dentro de las que se encuentran pruebas a diseños de transformadores, estudios de la distribución de la tensión de impulso en prototipos de devanados de máquinas y predeterminación de los parámetros del circuito de prueba de impulso de alta tensión (Wadhwa, 2007).

Un impulso de prueba de baja tensión tiene la misma forma de onda de un impulso de alta tensión y la respuesta de los equipos bajo prueba ante ellos es aproximadamente igual (Wadhwa, 2007). La principal diferencia entre un generador de impulsos de alta tensión (GIAT) y un RSG es la forma como se aplican los impulsos al objeto de prueba. El RSG además de tener una menor tensión, tiene la capacidad de generar impulsos con una frecuencia o recurrencia dada, por lo general entre 10 y 25 Hz. El circuito que permite este comportamiento está conformado por dos etapas, una de potencia y otra de control, como se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Circuito del Generador Recurrente de impulsos.



Fuente: (Wadhwa, 2007).

La etapa de potencia es la encargada de generar la forma del impulso de tensión y la de control envía la señal de disparo al circuito a intervalos de tiempo

establecidos para que se inicie la carga y descarga de los condensadores. Un análisis más amplio es desarrollado respectivamente...en la sección 1.2 y la sección 1.3...de este documento.

En la mayoría de los casos el RSG es usado para obtener una onda de impulso estándar, esta debe cumplir con los lineamientos de las normas internacionales en su forma y característica.

1.1 ONDA DE IMPULSO TIPO RAYO

1.1.1 Definiciones generales de impulsos. Las normas internacionales IEEE STD 4 (IEEE Standards Association, 2013) e IEC 60060-1 (IEC, 2010) presentan, en cuanto a impulsos de tensión para pruebas, las siguientes definiciones:

1.1.1.1 Impulso de Tensión: Transitorio aperiódico de tensión aplicado intencionalmente, que usualmente se eleva rápidamente hasta un valor máximo y luego decae más suavemente a cero.

1.1.1.2 Impulso de tensión completo tipo rayo: Es un impulso de tensión que se eleva a su valor máximo en menos de 20 μs y no es interrumpido por una descarga disruptiva^(*) (ver Figura 2).

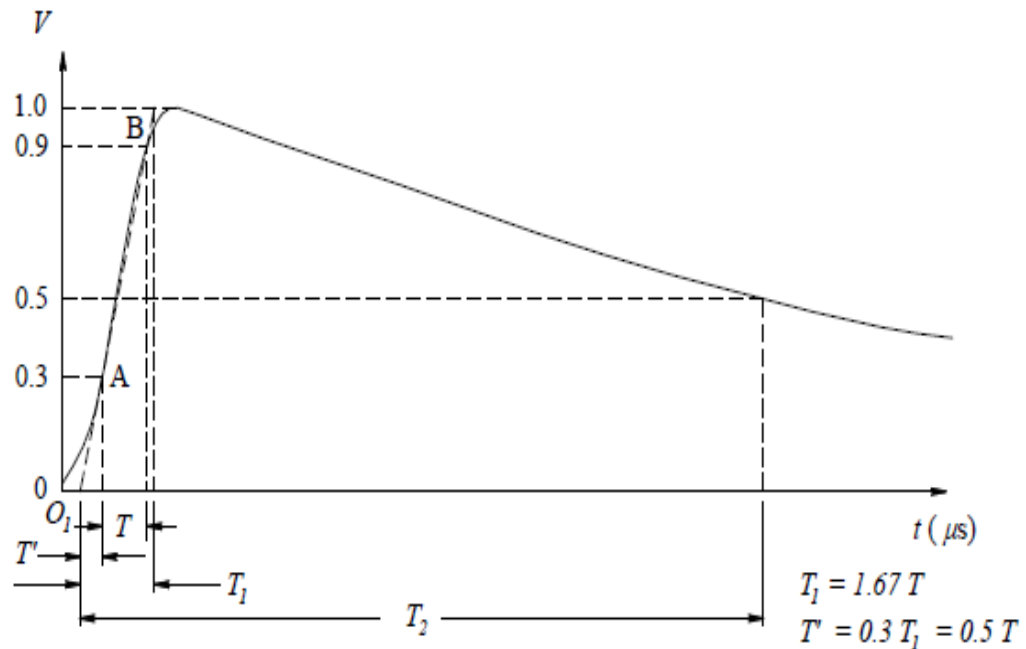
1.1.1.3 Impulso tipo rayo estándar: Es un impulso con un tiempo de frente (T_1) de 1,2 μs y un tiempo de cola, a la mitad de la tensión máxima, de (T_2) 50 μs y se describe como impulso 1,2/50 μs (ver Figura 2).

1.1.1.4 Tiempo de frente: Es un parámetro virtual definido como 1,67 veces el intervalo "T" entre los instantes cuando el impulso está en el 30% y 90% del valor pico de la curva de tensión de prueba (puntos A y B, Figura 2).

1.1.1.5 Tiempo a valor medio o cola: Es un parámetro virtual definido como el intervalo de tiempo (T_2) del origen virtual, O1, y el instante en que la onda de voltaje se ha descendido a la mitad del valor pico.

^(*) Una descarga disruptiva es un paso brusco de corriente entre dos conductores que están sometidos a una diferencia de potencial, dicho de otra forma es la ruptura del dieléctrico de prueba. Al romper el aislamiento se genera un arco o contorno, que emite luz y sonido.

Figura 2. Impulso tipo rayo completo.



Fuente: (IEEE Standards Association, 2013).

1.1.2 Tolerancias. Las siguientes variaciones son aceptadas entre los valores especificados para el impulso estándar y los cálculos a partir de curva de tensión de prueba:

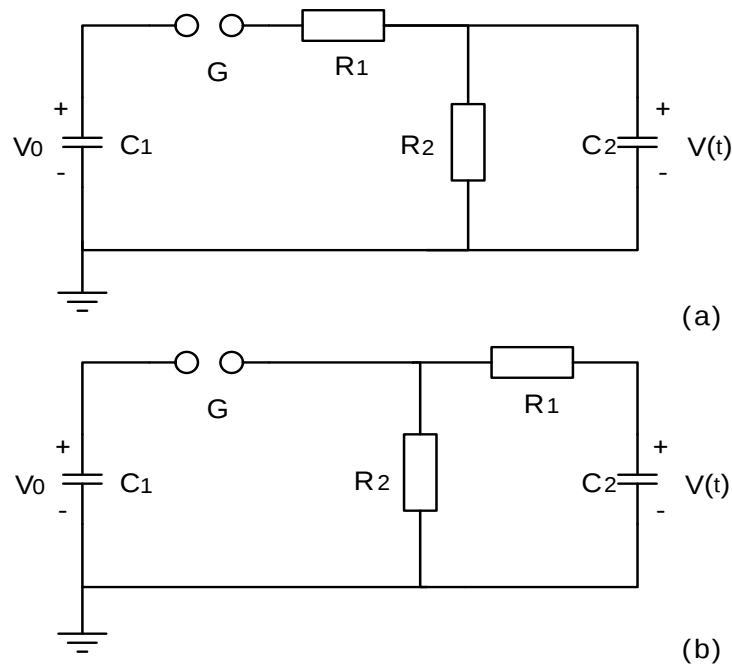
- a) Valor pico $\pm 3\%$
- b) Tiempo de frente $\pm 30\%$
- c) Tiempo de cola $\pm 20\%$

1.2 GENERACIÓN DE LA ONDA DE IMPULSO TIPO RAYO EN EL RSG

El rápido incremento y lenta caída de la onda de impulso de tensión pueden ser generados por circuitos de carga y descarga que incorporen dos elementos de almacenamiento de energía. Generalmente los objetos bajo prueba son predominantemente capacitivos, por tanto ésta puede contribuir como uno de los elementos de almacenamiento de energía. Una segunda fuente de energía puede provenir de un capacitor, el cual permite de acuerdo a la configuración del circuito una descarga rápida (Kuffel, Kuffel, & Zaengl, 2000).

1.2.1 Circuito generador de impulsos. Aunque existen varias topologías de circuitos generadores de impulso de tensión, hay dos que son básicas y simplificadas pero a la vez muy prácticas para la generación de ondas de este tipo (Wadhwa, 2007), estas son mostradas en la Figura 3. Una característica importante es que los generadores de impulso de alta tensión con varias etapas generalmente pueden ser simplificados a uno de estos dos circuitos.

Figura 3. Circuito generador de impulso (a) y (b) de una etapa.



El capacitor principal “ C_1 ” se conecta a una fuente de corriente directa, y se carga a un valor de tensión dado. El interruptor “ G ” suele ser en un GIAT dos esferas que al estar a una separación dada, permiten el cierre del circuito cuando se tiene un nivel de tensión en “ C_1 ”. Para circuitos de baja tensión, como el del RSG, se utilizan interruptores de alta frecuencia como transistores, triacs o tiristores, debido a que el accionamiento de las esferas a estos niveles de tensión es difícil de manipular.

El capacitor “ C_2 ” está relacionado con el objeto bajo prueba. La onda de salida resulta ser la tensión entre los terminales de “ C_2 ”, es decir “ $V(t)$ ”. El capacitor “ C_1 ” siempre debe tener una capacitancia mayor que “ C_2 ” (Kuffel et al., 2000).

Mediante las resistencias “R₁” y “R₂” se trasfiere la energía de los condensadores y también se disipa, comportamiento que permite obtener la forma de onda deseada. Los tiempos de frente y cola de la onda de impulso están directamente relacionados con dichas resistencias, en apartados posteriores se explicará sus respectivos efectos en los tiempos característicos del impulso. Los dos circuitos de la Figura 3, presentan un comportamiento de carga y descarga de tipo exponencial, que al sumarse generan la onda de impulso de salida. La diferencia entre los dos circuitos está, en que la tensión pico de salida del circuito “a” se reduce en un porcentaje mayor que la del circuito “b”, con respecto a la tensión de carga de “C₁” (Wadhwa, 2007)...en la sección 1.2.3...se desarrolla esta característica.

1.2.2 Análisis matemático del circuito generador de impulsos. Un parámetro importante de estos circuitos es la capacidad máxima de almacenamiento de energía, la cual se calcula a partir de la ecuación (1).

$$W = \frac{1}{2} C_1 (V_0)^2 \quad (1)$$

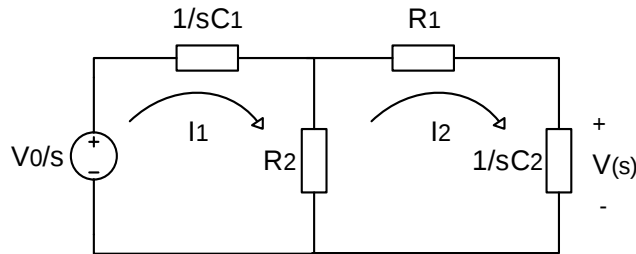
Donde V_0 representa la tensión máxima de carga.

El análisis se realiza para el circuito “b” de la Figura 3. El estudio para el circuito “a” se hace de forma similar. Se aplica la Transformada de Laplace al circuito, las condiciones iniciales para $t < 0$ son: el condensador C_1 está cargado a la tensión V_0 y el interruptor “G” está abierto. Para $t > 0$ el interruptor “G” está cerrado.

Es de interés conocer la expresión $V(s)$ del circuito de la Figura 4 en términos de los demás elementos, puesto que ésta representa la onda de impulso de salida en el dominio de la frecuencia, por lo tanto queda expresada en la ecuación (2).

$$V(s) = I_2 * \frac{1}{sC_2} \quad (2)$$

Figura 4. Circuito de impulso trasformado al dominio de la frecuencia.



Aplicando Ley de Kirchhoff de Tensiones (LKT) a la malla 1 del circuito, se obtiene la ecuación (3).

Malla 1:

$$-\frac{V_0}{s} + \frac{1}{sC_1}I_1 + R_2(I_1 - I_2) = 0 \quad (3)$$

Despejando I_2 resulta la ecuación (4),

$$I_2 = -\frac{V_0}{s} + \left(\frac{1 + sR_2C_1}{sR_2C_1} \right) I_1 \quad (4)$$

Ahora aplicando LKT a la malla 2 del circuito, se obtiene la ecuación (5).

Malla 2:

$$R_2(I_2 - I_1) + R_1I_2 + \frac{1}{sC_2}I_2 = 0 \quad (5)$$

Despejando I_1 resulta la ecuación (6),

$$I_1 = \left(\frac{sR_2^2C_2 + sR_1R_2C_2 + R_2}{sR_2^2C_2} \right) I_2 \quad (6)$$

Remplazando la ecuación (6) en la ecuación (4) y aplicando algebra resulta la ecuación (7) que corresponde a la corriente de la malla 2.

$$I_2 = \frac{V_0}{R_1} \left(\frac{s}{s^2 + \left(\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_1 C_2} \right) s + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \right) \quad (7)$$

Teniendo en cuenta la ecuación (2), la expresión en el dominio de la frecuencia de $V(s)$ está dada por la ecuación (8).

$$V(s) = \frac{V_0}{R_1 C_2} \left(\frac{1}{s^2 + \left(\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_1 C_2} \right) s + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \right) \quad (8)$$

Reescribiendo la anterior ecuación se nombra las siguientes constantes,

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

Se reescribe entonces, dando como resultado la ecuación (9).

$$V(s) = \frac{V_0}{K} \left(\frac{1}{s^2 + as + b} \right) \quad (9)$$

La expresión cuadrática del denominador posee dos raíces reales α_1 y α_2 , que permiten factorizar el término de segundo orden en dos de primer orden. Aplicando fracciones parciales se obtiene la ecuación (10).

$$V(s) = \frac{V_0}{K(\alpha_2 - \alpha_1)} \left(\frac{1}{s + \alpha_1} - \frac{1}{s + \alpha_2} \right) \quad (10)$$

Donde,

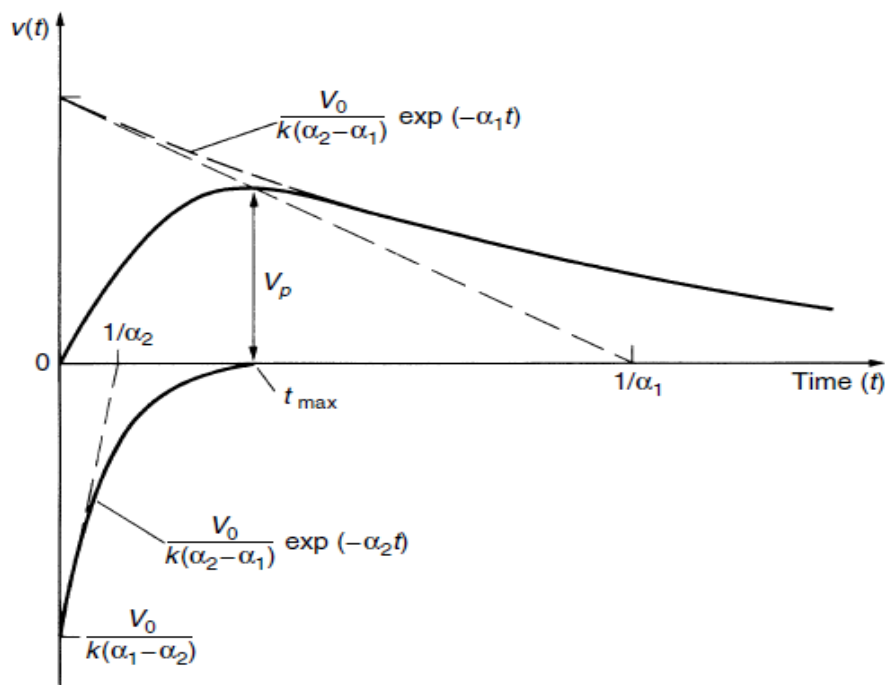
$$\alpha_1, \alpha_2 = \frac{a}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{a}{2} \right)^2 - b}$$

Aplicando la Trasformada Inversa de Laplace se obtiene la ecuación (11) que representa en el dominio del tiempo la onda de impulso de tensión.

$$V(t) = \frac{V_0}{K(\alpha_2 - \alpha_1)} (e^{-\alpha_1(t)} - e^{-\alpha_2(t)}) \quad (11)$$

De acuerdo a la ecuación (11), la salida de tensión ($V(t)$) está compuesta por la superposición de dos funciones exponenciales de diferente signo. Un gráfico de esta expresión, es el mostrado en la Figura 5.

Figura 5. Impulso de tensión y sus componentes de acuerdo al circuito “b” de la Figura 3.



Fuente: (Kuffel et al., 2000).

Como se observa en la Figura 5, en el instante que inicia el impulso la suma de las dos exponenciales resulta ser igual a cero, luego, la exponencial negativa decae rápidamente a cero hasta el punto que su valor es despreciable, en ese momento se considera que la onda ha llegado a su valor pico y de ahí en adelante el descenso del impulso depende en gran medida de la exponencial positiva. Es importante notar en la Figura 5, que la tensión pico del impulso (V_p) es menor que

la tensión de carga (V_0). El tiempo donde se alcanza el valor pico es $t_{\max}$ y puede ser hallado de acuerdo a la ecuación (12).

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

1.2.3 Eficiencia. La eficiencia para los circuitos generadores de impulso en general, está dada por la relación entre la tensión pico del impulso y la de carga, como se muestra en la ecuación (13).

$$\eta = \frac{V(t_{\max})}{V_0} \quad (13)$$

Para aproximar la eficiencia del circuito “a” y “b” de la Figura 3 se considera que la capacitancia interna del generador de impulsos y la capacitancia del objeto de prueba cumple la relación $C_1 \gg C_2$, esto permite hallar una expresión más simplificada de la eficiencia para cada circuito, ecuación (14) y ecuación (15). Más información disponible en la literatura (Kuffel et al., 2000; Ryan, 2001).

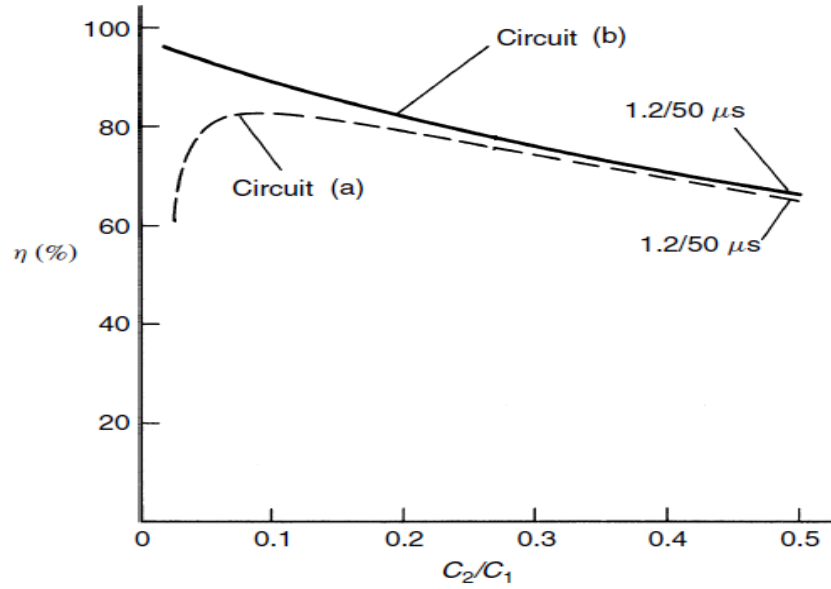
Para el circuito “a” la eficiencia es,

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{C_2}{C_1}} * \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_2}} \quad (14)$$

Para el circuito “b” la eficiencia es,

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{C_2}{C_1}} \quad (15)$$

Figura 6. Eficiencia en función de la relación C_2 / C_1 .



Fuente: (Kuffel et al., 2000).

De acuerdo a la Figura 6, para una onda de impulso estándar de $1,2/50 \mu s$ el circuito "b" resulta en todo momento más eficiente que el circuito "a" (Farouk, Rick, & Giao, 2014).

1.2.4 Dimensionamiento de los elementos del circuito. Generalmente el valor del capacitor " C_1 " es conocido, para el caso de C_2 depende del objeto bajo prueba (aislador, transformador, etc.). C_1 es la capacitancia interna del RSG, por lo tanto la complejidad está en que C_2 se desconoce lo cual dificulta encontrar los valores de R_1 y R_2 para obtener una onda de impulso normalizada.

Para determinar los valores de las resistencias se utiliza la ecuación (16) y la ecuación (17) (Kuffel et al., 2000), en donde los términos $(1/\alpha_1)$ y $(1/\alpha_2)$ deben ser hallados dependiendo de los tiempos de frente y cola del impulso que se quieran obtener, para luego encontrar los valores de R_1 y R_2 .

$$R_1 = \frac{1}{2C_2} \left(\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) - \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_1 + C_2)}{\alpha_1 \alpha_2 C_1}} \right) \quad (16)$$

$$R_2 = \frac{1}{2(C_1 + C_2)} \left(\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_1 + C_2)}{\alpha_1 \alpha_2 C_1}} \right) \quad (17)$$

Existe un único valor para cada uno de estos términos ($1/\alpha_1$) y ($1/\alpha_2$) que genera una onda de impulso estándar. Matemáticamente se debe relacionar las expresiones de tiempo de frente, cola y tiempo máximo con la ecuación (11) para luego emplear un método numérico para hallar dichos valores, de acuerdo a la Tabla 1, para un impulso estándar las constantes son aproximadamente 68,2 μs y 0,405 μs respectivamente (Kuffel et al., 2000; Li, Kuffel, & Janischewskyj, 1993; Wang & Zhang, 2006).

Tabla 1. Resultados para las constantes ($1/\alpha_1$) y ($1/\alpha_2$).

$T_1 / T_2 [\mu s]$	$1/\alpha_1 [\mu s]$	$1/\alpha_2 [\mu s]$
1,2/5	3,48	0,80
1,2/50	68,2	0,405
1,2/200	284	0,381
250/2500	2877	104

Fuente: (Kuffel et al., 2000).

1.2.5 Tiempos de frente y cola. Estos tiempos ya definidos en la...sección 1.1.1...dependen principalmente de los elementos del circuito y en particular del objeto bajo de prueba. Suponiendo que (C_2) tiene un efecto netamente capacitivo, se obtiene la ecuación (18) y la ecuación (19) las cuales son aproximaciones para los tiempos de frente y cola de un impulso a partir del circuito “b” de la Figura 3 (IEC, 2002; Ryan, 2001).

$$T_1 \approx 2,96R_1 \left(\frac{(C_1 C_2)}{C_1 + C_2} \right) \quad (18)$$

$$T_2 \approx 0,73R_2(C_1 + C_2) \quad (19)$$

Cuando el impulso se pretende aplicar a un transformador, el circuito del generador no experimenta una carga netamente capacitiva y por tanto entran a evaluarse otros factores que modifican los términos de la ecuación (18) y la ecuación (19). Esta es la razón por la cual encontrar los parámetros que cumplan con la forma de

onda estándar cuando el objeto de prueba es un transformador, se convierte en una tarea más compleja. Dependiendo del transformador, la impedancia de sus devanados puede causar diferentes efectos como oscilaciones y modificación de los tiempos característicos, esto causa que las resistencias del circuito, en ocasiones, tengan que aumentarse de valor en dos y hasta diez veces del inicial (IEC, 2002).

1.3 CIRCUITO PARA EL CONTROL DE LA RECURRENCIA

La señal de control del RSG cumple con la función de cerrar el circuito de potencia mediante el accionamiento de un dispositivo de cierre rápido (transistor, triac). Para el caso de la Figura 3, éste reemplaza al interruptor “G” y se acciona al recibir el pulso de control permitiendo que la energía almacenada en el condensador (C_1) se trasfiera al resto del circuito en un tiempo dado, generando así la onda de impulso. Para que esta se desarrolle completamente el tiempo de activación del dispositivo de cierre debe ser mayor al tiempo de duración de la misma, aproximadamente tres veces el tiempo de cola. En el tiempo de apagado del dispositivo, el condensador (C_1) se debe carga a través de una resistencia ajena al circuito generador de impulso. Una vez esté cargado el ciclo empieza nuevamente. Este comportamiento se repite a una frecuencia determinada por el circuito de control.

El circuito de control debe ser diseñado cumpliendo los requerimientos de funcionamiento del circuito de potencia. Una alternativa es utilizar un circuito generador de onda cuadrada que permita variar el ancho del pulso en estado alto y bajo de la señal de control.

CAPÍTULO DOS

“Nuestros sentidos nos permiten percibir sólo una pequeña porción del mundo exterior”. **Nikola Tesla**

Las simulaciones de circuitos eléctricos en herramientas computacionales permiten estimar resultados que en ocasiones sin ayuda de ellas sería imposible hallar. Sin embargo se debe tener un buen conocimiento del tema para poder interpretar y obtener un buen resultado.

El presente capítulo describe los elementos del generador de impulsos de alta tensión del LAT, su operación, circuito equivalente y simulaciones de su funcionamiento. Adicionalmente se presentan algunos parámetros iniciales para el diseño del RSG.

2. ESTUDIOS PRELIMINARES PARA EL DISEÑO DE UN RSG

El diseño de un generador de impulsos recurrente (RSG), de acuerdo a su definición, depende de las características constructivas de un generador de impulsos de alta tensión (GIAT), puesto que es un equivalente del mismo. Este capítulo presenta la identificación y análisis del funcionamiento del GIAT del Laboratorio de Alta Tensión (LAT) de la Universidad del Valle, con el fin de obtener los parámetros iniciales de diseño del RSG.

2.1 GENERADOR DE IMPULSOS DE ALTA TENSIÓN DEL LAT

El equipo mostrado en la Figura 7 es un generador de impulsos tipo Marx con la capacidad de generar sobre tensiones de alta frecuencia hasta 1100 kV. Es utilizado en el LAT para realizar las pruebas de impulso las cuales buscan comprobar el soporte del aislamiento de los equipos eléctricos ante tensiones de este tipo.

Figura 7. Generador de impulsos de alta tensión del LAT.



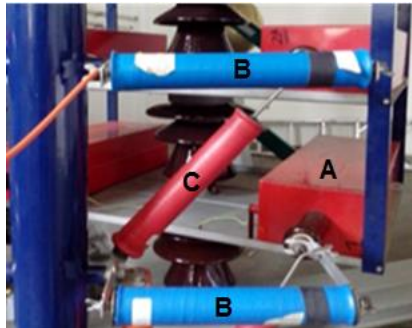
Está construido en once etapas, cada una aporta 100 kV con una energía de 5 kJ. Alcanza una altura de 5,5 m y un peso de aproximadamente 2000 kg.

2.1.1 Elementos que forman parte del GIAT. A continuación se enuncian cada uno de ellos:

2.1.1.1 Capacitores. Cada etapa cuenta con dos condensadores de 2 μF conectados en serie, contruidos a base de aceite y placas metálicas. Están contenidos en un recipiente metálico de color rojo, elemento “A” de la Figura 8.

2.1.1.2 Resistencias de cola y frente. Estas permiten modificar la forma de onda de salida. Las de cola son de color azul con valores entre 68 y 70 Ω y las de frente son de color rojo con valores entre 5 y 52 Ω . Estas resistencias tienen una baja inductancia que no afecta el circuito RC del GIAT. Se pueden identificar como los elementos “B” y “C” respectivamente de la Figura 8.

Figura 8. Resistencias y capacitores del GIAT.



2.1.1.3 Resistencias de carga. Permiten la interconexión de las etapas y la respectiva carga de todos los condensadores, tienen un valor de aproximadamente 4,8 k Ω , ver Figura 9.

Figura 9. Resistencias de carga.



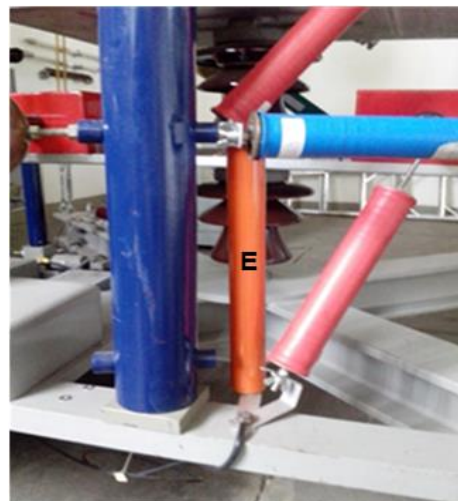
2.1.1.4 Resistencias para descargar. Están conectadas entre las etapas y permiten llevar la carga de los condensadores a tierra cuando se finalice un impulso o por seguridad. Tienen un valor de aproximadamente $0,8 \text{ M}\Omega$. Corresponde al elemento “D” de la Figura 10.

Figura 10. Resistencia de descarga.



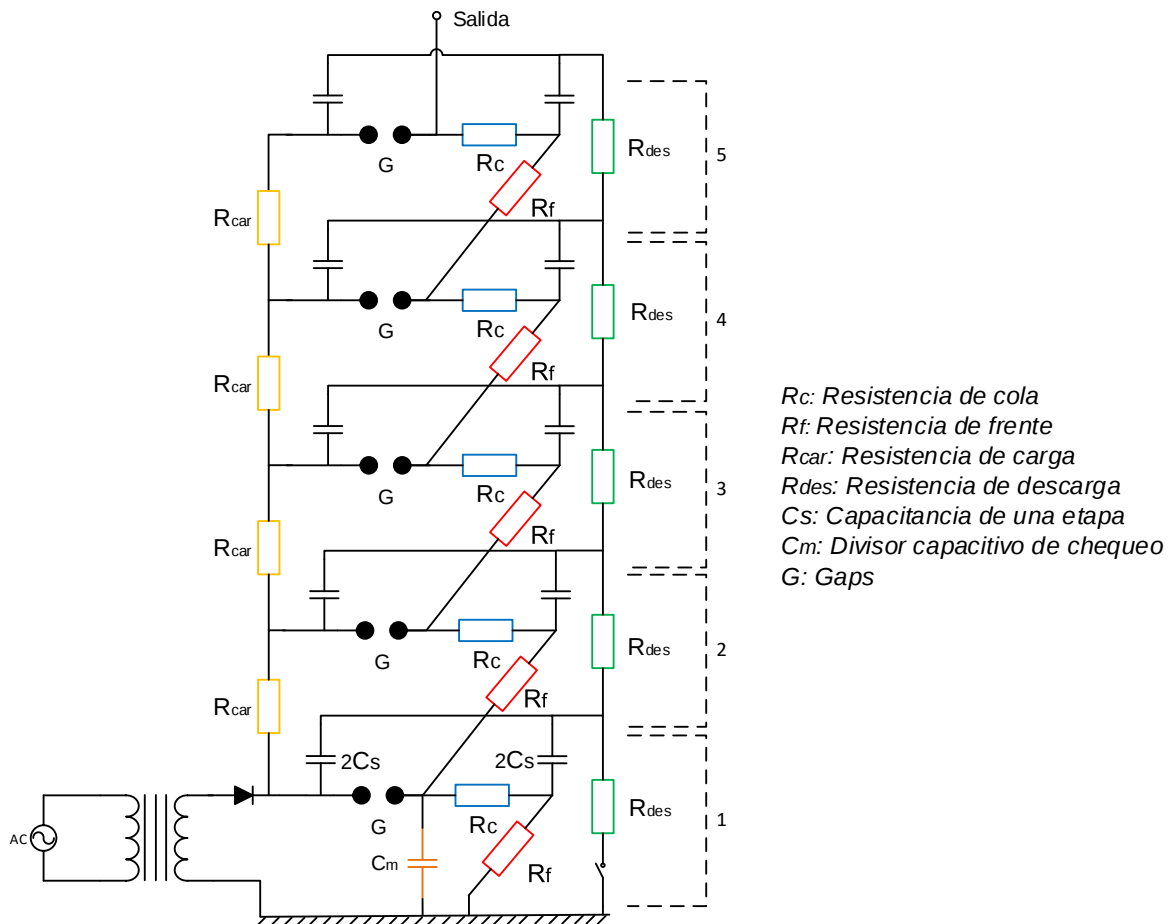
2.1.1.5 Capacitor de chequeo. Es un divisor capacitivo que detecta la activación del impulso y envía la información de este evento al sistema de control. Tiene un valor de $0,21 \text{ nF}$ y está conectado a la primera etapa. Corresponde al elemento “E” de la Figura 11.

Figura 11. Capacitor de chequeo del impulso.



2.1.2 Operación del GIAT del LAT. El GIAT tiene cuatro posibles configuraciones de servicio: 1) conexión en serie, 2) serie reducida, 3) serie paralelo y 4) paralelo (Haefely High Voltage Test, 2012). Cada configuración permite diferentes niveles de tensión y energía en el impulso de salida. Para el caso del LAT, la conexión en serie, mostrada en la Figura 12 (solo 5 etapas), es la utilizada para realizar las pruebas a los equipos dado que es la única que permite obtener 1100 kV con todas las etapas trabajando. Es por ello que en los siguientes apartados, se analizará su operación bajo dicha configuración al igual que el circuito equivalente de sus etapas.

Figura 12. Generador de Impulsos de alto voltaje conexión serie (5 etapas).



Este equipo se alimenta de una tensión en de corriente alterna que mediante un transformador elevador y un diodo rectificador se convierte en alta tensión en corriente directa. Dependiendo de la posición del diodo el impulso de salida puede ser de polaridad positiva o negativa. Como se muestra en la Figura 12, las etapas

están conectadas en paralelo con el fin de cargar los condensadores a un mismo nivel de tensión. Cabe resaltar que las etapas más altas se cargan a una velocidad menor ya que la resistencia de carga (R_{car}) involucrada es mayor.

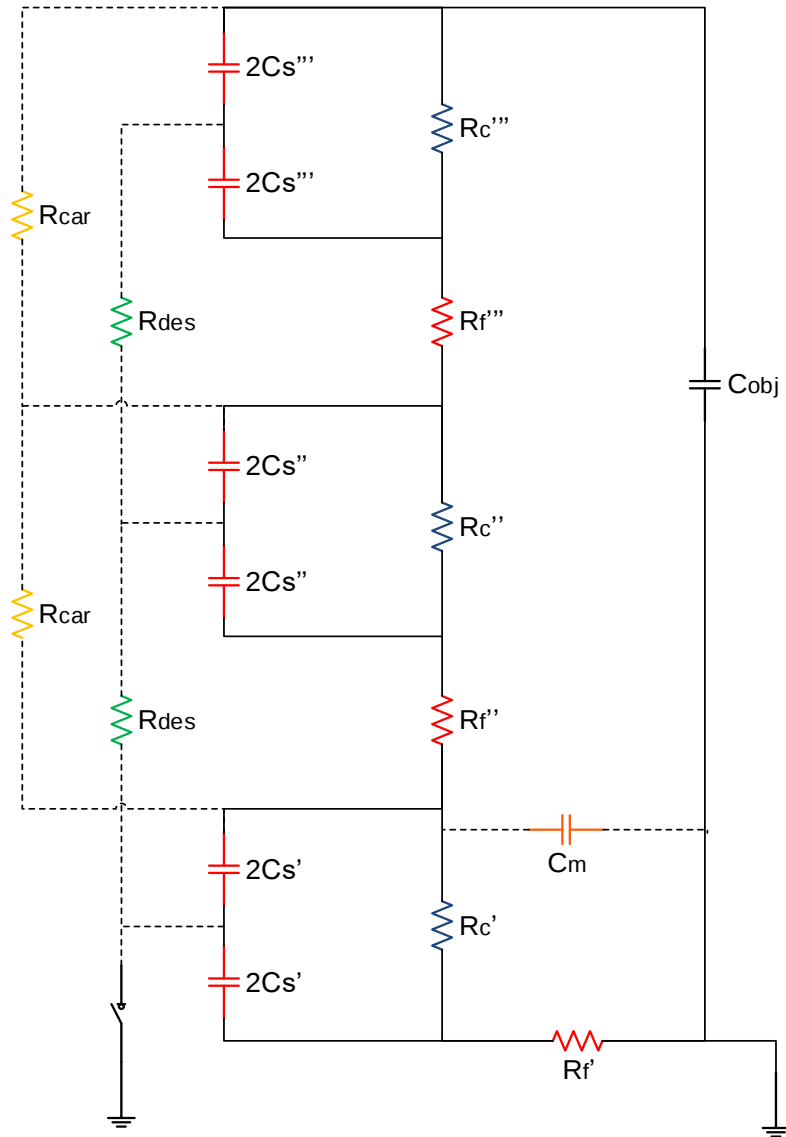
Mientras se eleva la tensión de carga que alimenta los condensadores, las esferas están separadas una distancia tal que no permite la circulación de corriente, a su vez entre ellas, se crea una diferencia de potencial que al irse aumentando produce la ionización del aire hasta el punto que ocurre su ruptura dieléctrica. En ese momento la topología de conexión de las etapas cambia de paralelo a serie y la tensión pico de salida será la suma del tensión de carga de cada una de las etapas. Dependiendo de la capacitancia que tenga el objeto de prueba y las resistencias de frente y cola, la onda de impulso tendrá una forma determinada.

2.1.3 Circuito equivalente. El circuito del GIAT opera bajo dos estados. El primero cuando se cargan los condensadores y el segundo al momento que se descargan. El análisis de la descarga es muy importante puesto que permite determinar tanto el circuito equivalente del GIAT que se utiliza como base en diseño del RSG, como las relaciones con las cuales se refieren los elementos pasivos desde un circuito a otro, en concordancia con el número etapas que se empleen. Sin embargo, también se deben tener en cuenta en el diseño otros parámetros que intervienen indirectamente en la generación del impulso como lo son R_{carga} , $R_{descarga}$, y C_m de la Figura 12. El efecto de estos será estudiado en apartados posteriores.

En la Figura 13, asumiendo que cada condensador ha alcanzado un mismo nivel de carga, se muestra el circuito eléctrico de tres etapas del GIAT después de la activación de las esferas. En esta figura se observan elementos que tienen sus conexiones con línea punteada haciendo referencia a que dichos elementos no son determinantes en la generación del impulso pero se encuentran presentes.

Para determinar el circuito equivalente de estas tres etapas se realiza en primera instancia un análisis considerando solo los elementos determinantes en la generación del impulso, es decir, los de línea continua de la Figura 13. Posteriormente, a los demás elementos se les analizará sus efectos en la onda de salida y si es el caso, se agregaran modificaciones al circuito equivalente.

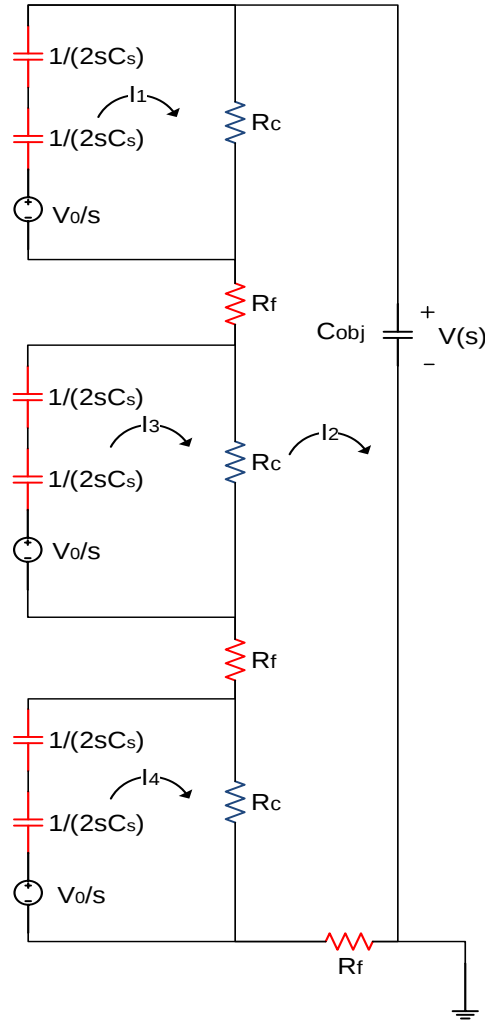
Figura 13. Circuito eléctrico luego de la activación de las esferas con tres etapas.



(') Referencia los elementos de la etapa 1, (') etapa 2 y (') etapa 3

Para el análisis el circuito se convierte al dominio de la Laplace, como se muestra en la Figura 14, y se determina la expresión de la tensión en la capacitancia del objeto bajo prueba (C_{obj}).

Figura 14. Circuito en el dominio de Laplace



Aplicando un análisis de Kirchhoff por mallas al circuito de la Figura 14, se tiene:

Malla 1,

$$-\frac{V_0}{S} + \left(\frac{1}{2C_s S} + \frac{1}{2C_s S} + R_C \right) \cdot I_1 - R_C \cdot I_2 = 0 \quad (20)$$

Despejando I_1 de la ecuación (20) se obtiene la ecuación (21),

$$I_1 = \frac{\left(\frac{V_0 + (R_C s) \cdot I_2}{s} \right)}{\left(\frac{1 + R_C C_S s}{C_S s} \right)} = \frac{V_0 C_S + (R_C s) \cdot I_2}{1 + R_C C_S s} \quad (21)$$

Malla 2,

$$\left(3R_f + 3R_C + \frac{1}{C_{obj} s} \right) \cdot I_2 - R_C I_1 - R_C I_3 - R_C I_4 = 0 \quad (22)$$

Malla3,

$$-\frac{V_0}{s} + \left(\frac{1}{2C_S s} + \frac{1}{2C_S s} + R_C \right) \cdot I_3 - R_C \cdot I_2 = 0 \quad (23)$$

Despejando I_3 de la ecuación (23) se obtiene la ecuación (24),

$$I_3 = \frac{\left(\frac{V_0 + (R_C s) \cdot I_2}{s} \right)}{\left(\frac{1 + R_C C_S s}{C_S s} \right)} = \frac{V_0 C_S + (R_C s) \cdot I_2}{1 + R_C C_S s} \quad (24)$$

Malla 4,

$$-\frac{V_0}{s} + \left(\frac{1}{2C_S s} + \frac{1}{2C_S s} + R_C \right) \cdot I_3 - R_C \cdot I_2 = 0 \quad (25)$$

Despejando I_4 de la ecuación (25) se obtiene la ecuación (26),

$$I_4 = \frac{\left(\frac{V_0 + (R_C s) \cdot I_2}{s} \right)}{\left(\frac{1 + R_C C_S s}{C_S s} \right)} = \frac{V_0 C_S + (R_C s) \cdot I_2}{1 + R_C C_S s} \quad (26)$$

La tensión en la capacitancia de prueba es igual a:

$$V(s) = \left(\frac{1}{C_{obj} s} \right) \cdot I_2 \quad (27)$$

Teniendo en cuenta la ecuación (27), se halla la expresión de la corriente I_2 reemplazando la ecuación (21), ecuación (24) y ecuación (26) en la ecuación (22).

$$\left(3R_f + 3R_c + \frac{1}{C_{obj} s} \right) \cdot I_2 - R_c \cdot \left(\frac{V_0 C_s + (R_c s) \cdot I_2}{1 + R_c C_s s} \right) - R_c \left(\frac{V_0 C_s + (R_c s) \cdot I_2}{1 + R_c C_s s} \right) - R_c \left(\frac{V_0 C_s + (R_c s) \cdot I_2}{1 + R_c C_s s} \right) = 0$$

$$\left(3R_f + 3R_c + \frac{1}{C_{obj} s} \right) \cdot I_2 - 3R_c \cdot \left(\frac{V_0 C_s + (R_c s) \cdot I_2}{1 + R_c C_s s} \right) = 0$$

Se despeja I_2 ,

$$\left(\frac{3R_f C_{obj} s + 3R_c C_{obj} s + 1}{C_{obj} s} - \frac{3(R_c)^2 C_s s}{1 + R_c C_s s} \right) \cdot I_2 = \frac{3V_0 (R_c C_s)}{1 + R_c C_s s}$$

$$\left(\frac{3R_f C_{obj} s + 3R_f R_c C_s C_{obj} s^2 + 3R_c C_{obj} s + 3R_c^2 C_s C_{obj} s^2 + 1 + R_f C_s s - 3R_c^2 C_s C_{obj} s^2}{C_{obj} s(1 + R_c C_s s)} \right) \cdot I_2 = \frac{3V_0 (R_c C_s)}{1 + R_c C_s s}$$

$$I_2 = \frac{3V_0}{3R_c R_f C_s C_{obj}} \cdot \left(\frac{R_c C_s C_{obj} s}{s^2 + \left(\frac{1}{R_f C_s} + \frac{1}{R_c C_s} + \frac{1}{3R_f C_{obj}} \right) \cdot s + \frac{1}{3R_c R_f C_s C_{obj}}} \right) \quad (28)$$

Ahora reemplazando la ecuación (28) en la ecuación (27) se obtiene la expresión de $V(s)$ mostrada en la ecuación (29).

$$V(s) = \frac{3V_{0\text{tres etapas}}}{3R_f C_{\text{obj}}} \cdot \left(\frac{1}{s^2 + \left(\frac{1}{R_f C_S} + \frac{1}{R_C C_S} + \frac{1}{3(R_f C_{\text{obj}})} \right) \cdot s + \frac{1}{3R_C R_f C_S C_{\text{obj}}}} \right) \quad (29)$$

Si se realiza una comparación entre la ecuación (29) y la ecuación (8) del Capítulo 1...en la sección 1.2.2...se puede evidenciar una similitud de términos entre ellas. A raíz de esto, se proponen los siguientes cambios de variables o constantes de transformación para igualarlas; cabe resaltar que la ecuación (8) del Capítulo 1 está relaciona con un circuito generador de impulso de una sola etapa.

$$V_{0\text{Tres etapas}} = \frac{V_{0\text{Una etapa}}}{3} \quad R_f = \frac{R_1}{3} \quad R_C = \frac{R_2}{3} \quad C_S = 3 \cdot C_1 \quad C_2 = C_{\text{obj}}$$

Remplazando los términos en la ecuación (29) se obtiene la siguiente expresión.

$$V(s) = \frac{3 \cdot \frac{V_{0\text{Una etapa}}}{3}}{3 \cdot \frac{R_1}{3} \cdot C_2} \cdot \left(\frac{1}{s^2 + \left(\frac{1}{\frac{R_1}{3} \cdot 3C_1} + \frac{1}{\frac{R_2}{3} \cdot 3C_1} + \frac{1}{3(\frac{R_1}{3} \cdot C_2)} \right) \cdot s + \frac{1}{3\left(\frac{R_1}{3} \cdot \frac{R_2}{3} \cdot 3C_1 \cdot C_2\right)}} \right)$$

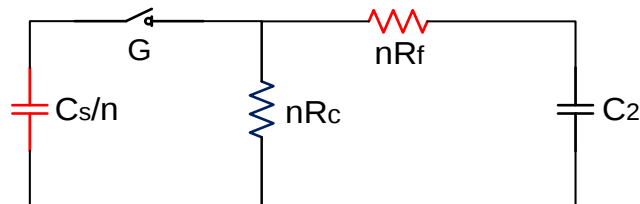
Aplicando algebra y simplificando se obtiene la ecuación (30).

$$V(s) = \frac{V_{0\text{Una etapa}}}{R_1 C_2} \cdot \left(\frac{1}{s^2 + \left(\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_1 C_2} \right) \cdot s + \frac{1}{(R_1 R_2 C_1 C_2)}} \right) \quad (30)$$

Nótese que, partiendo de la ecuación (29) de un circuito con tres etapas, se llegó a la ecuación (30) que corresponde a un circuito de una etapa, hallando así un equivalente circuital.

Se demuestra que el circuito de tres etapas del GIAT del Laboratorio de Alta Tensión puede ser reducido a uno de una etapa aplicando las constantes de transformación mencionadas anteriormente. La Figura 15 muestra el circuito equivalente de tres etapas del GIAT.

Figura 15. Circuito equivalente GIAT para tres etapas



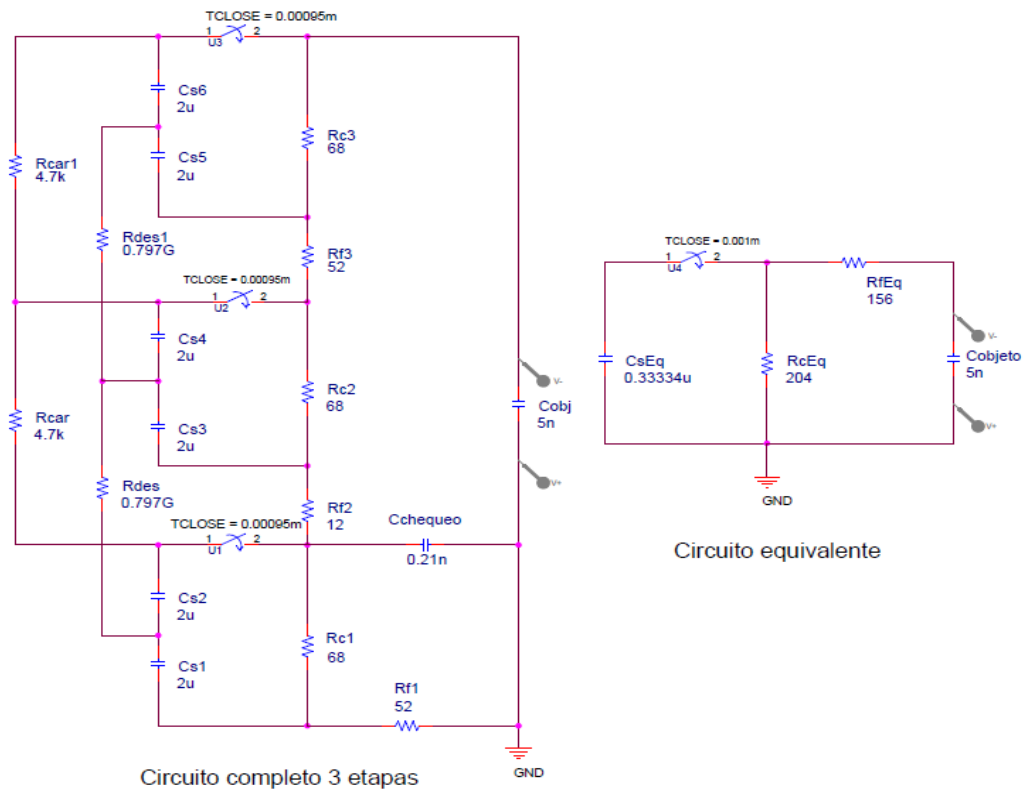
Siendo $n=3$

El circuito equivalente para un número diferente de etapas se puede determinar siguiendo un procedimiento similar y obteniendo como resultado que la variable “ n ” equivale al número de etapas que se requieran. Este circuito es la base para la generación de los impulsos del RSG, por otro lado la tensión de salida del circuito equivalente es un parámetro que no influye en la forma de la onda, por tal razón puede ser de una magnitud conveniente para el diseño (Wadhwa, 2007).

2.1.4 Análisis de las variantes del circuito. De acuerdo a la...sección 2.1.3...el circuito equivalente de la Figura 15 debe arrojar exactamente la misma forma de onda que generan las tres etapas del GIAT. En la práctica esto no es del todo cierto, ya que existen elementos como la resistencia de carga, descarga y el capacitor de chequeo que en el análisis teórico no fueron considerados. Para cuantificar y cualificar el efecto de estos parámetros sobre la forma de la onda, se simuló ambos circuitos y se compararon sus respuestas de salida.

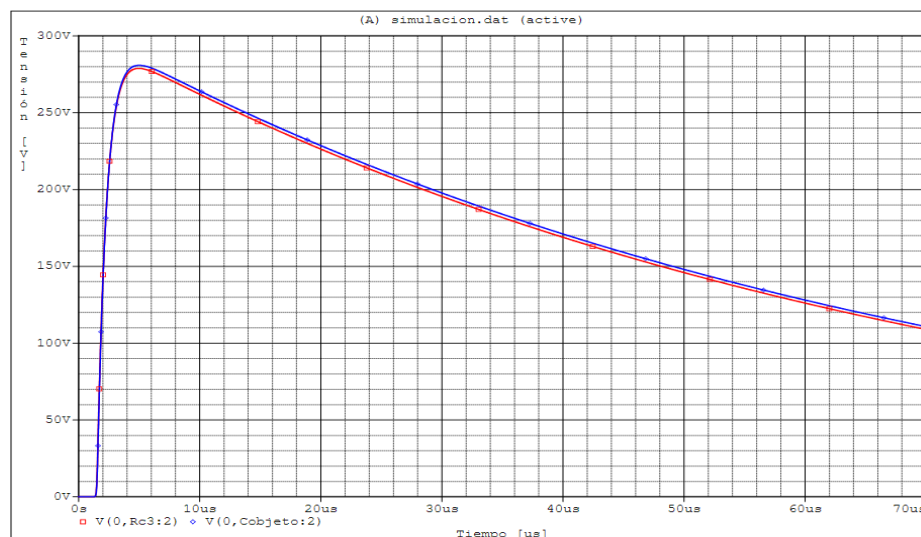
Para la simulación se utilizó la herramienta computacional “Orcad Pspice”. La Figura 16 muestra el diagrama esquemático de los circuitos; los datos ingresados para cada elemento en el software fueron valores obtenidos experimentalmente en el LAT.

Figura 16. Circuito esquemático para la comparación de las ondas.



Las ondas de salida se muestran en la Figura 17.

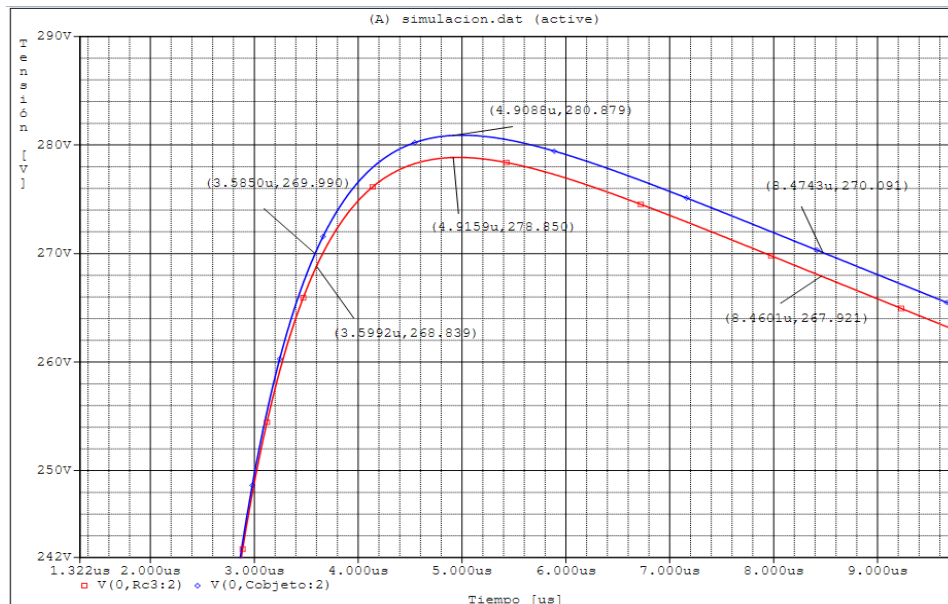
Figura 17. Ondas de impulso del circuito de tres etapas y el equivalente.



En la Figura 17 se observan las dos ondas de salida. La gráfica de azul es la respuesta del circuito de tres etapas y la de rojo es la del circuito equivalente de la Figura 15. Como se puede observar, se obtuvo una pequeña diferencia entre ellas debido a que la simulación incluyó los elementos que no se tuvieron en cuenta en el cálculo teórico.

De acuerdo a los resultados de la simulación, la respuesta de los dos circuitos es aproximadamente igual, el tiempo de frente prácticamente es el mismo para ambas ondas, sin embargo el valor pico y el tiempo de cola cambia unos microsegundos entre ellas. La Figura 18 muestra un acercamiento de las ondas para determinar en qué cantidad difirieren.

Figura 18. Acercamiento de las ondas de impulso.

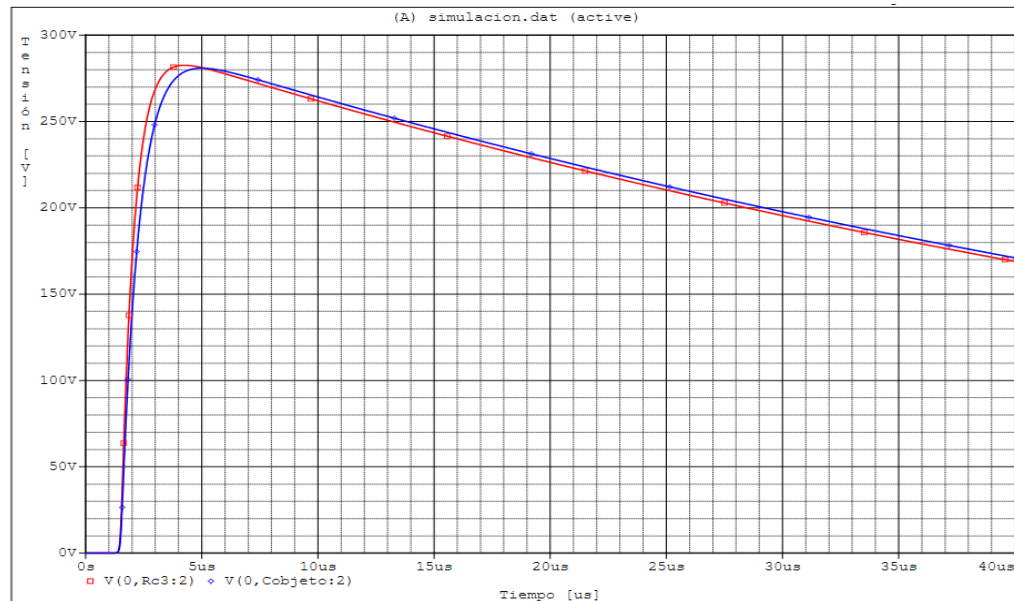


La variación del valor pico de tensión entre las ondas es de aproximadamente 1%. Teniendo en cuenta que la magnitud de tensión del impulso no cambia los tiempos característicos, este es un porcentaje inocuo. En cuanto al tiempo de cola la variación es del 3,4%. De acuerdo a la norma IEEE Std 4 (IEEE Standards Association, 2013) la tolerancia del tiempo de cola es del 20%, es decir, que este porcentaje cumple con los requerimientos de norma y el circuito equivalente hallado no necesita modificaciones adicionales.

Es importante notar que los valores de los elementos del circuito de tres etapas de la Figura 16 deben ser iguales entre cada etapa, con el fin de disminuir los errores

en equivalencia del circuito hallado. La Figura 19 corresponde a las ondas de impulso de la misma simulación de la Figura 16 pero asumiendo que el operario que realiza el montaje de las resistencias al generador comete un error y cambia la resistencia de frente de la segunda etapa de $52\ \Omega$ por una de $12\ \Omega$.

Figura 19. Variación entre ondas de impulso.



En la Figura 19 se observa una diferencia considerable entre las ondas. Por tanto para que el circuito equivalente funcione con el menor error posible se debe tratar de que las resistencias del generador de impulsos de alta tensión entre cada etapa tenga valores iguales o similares.

2.2 CÁLCULO DE LOS VALORES DE LAS RESISTENCIAS

Puesto que los tiempos de frente y cola del RSG depende de la capacitancia bajo prueba, cada que ésta cambie será necesario modificar el valor de las resistencias para mantener los tiempos de la onda dentro de los valores de la norma o si es el caso en un valor diferente que se requiera. De acuerdo a lo anterior se debe calcular el rango de resistencias alrededor de valores típicos de capacitancias de objetos bajo prueba.

En Tabla 2 se muestran valores de capacitancias máximas de objetos de prueba.

Tabla 2. Valores de capacitancias máximas de objetos de prueba.

Equipo	Capacitancia [nF]
Aisladores	0,025
Bujes pasatapas	0,150 a 0,4
Transformadores de corriente	0,2 a 0,6
Transformadores hasta 1 MVA	1 a 5
Transformadores hasta 50 MVA	10
Transformadores sobre 100 MVA	30

Fuente: (Wadhwa, 2007).

Se observa que los valores de capacitancias varían aproximadamente de 0,1 nF a 30 nF. Por esta razón el cálculo de las resistencias de frente y cola para una onda 1,2/50 μ s se realizó para éste rango de valores, como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Valores de resistencias de frente y cola onda 1,2/50 μ s.

Equivalente para una etapa del GIAT onda de impulso (1,2/50) μ s			
Capacitancia del RSG [μ F]	Capacitancia del Objeto de prueba [nF]	Resistencia de frente [Ω]	Resistencia de cola [Ω]
1	0,1	4050,41	68,19
1	0,5	810,41	68,17
1	1	405,41	68,13
1	5	81,41	67,86
1	10	40,91	67,52
1	15	27,41	67,19
1	20	20,66	66,85
1	25	16,61	66,53
1	30	13,91	66,20

Para el cálculo de las resistencias se utilizó el procedimiento descrito...en la sección 1.2.4...del Capítulo 1. La capacitancia propia del RSG varía dependiendo el número de etapas del GIAT que se requieran emular. La Tabla 3 contiene los resultados de los cálculos para una etapa, los mismos cálculos se realizaron para las diez etapas restantes. El resultado obtenido para el rango de valores de la resistencia de frente y cola fue de 0 Ω a 10k Ω .

CAPÍTULO TRES

“Que algo no funcione como tú esperabas no quiere decir que sea inútil.”. Thomas Alva Edison

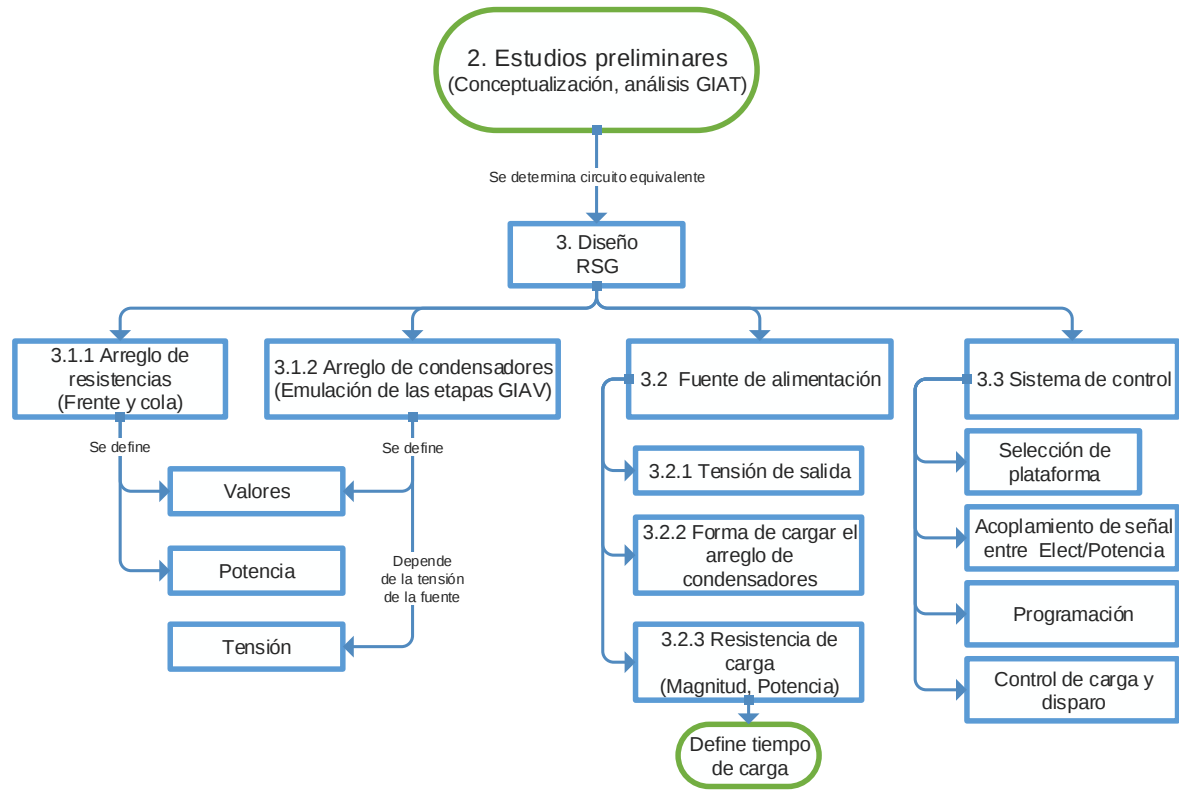
La utilización de la electrónica en las diferentes disciplinas alrededor del mundo, hace de ésta una rama de la ingeniería muy importante, aún más cuando los dispositivos de control se integran de tal manera que pueden ser utilizados por personas con conocimientos básicos. Un ejemplo de esto son las plataformas denominadas Arduino.

En este capítulo se presenta el diseño del RSG que incluye el arreglo de resistencias y condensadores, fuente de alimentación y sistema de control. De igual manera, se incluyen simulaciones de su funcionamiento.

3. DISEÑO DEL GENERADOR DE IMPULSOS RECURRENTE (RSG)

La metodología que fue desarrollada para realizar el diseño del RSG es la mostrada en la Figura 20.

Figura 20. Metodología de diseño.



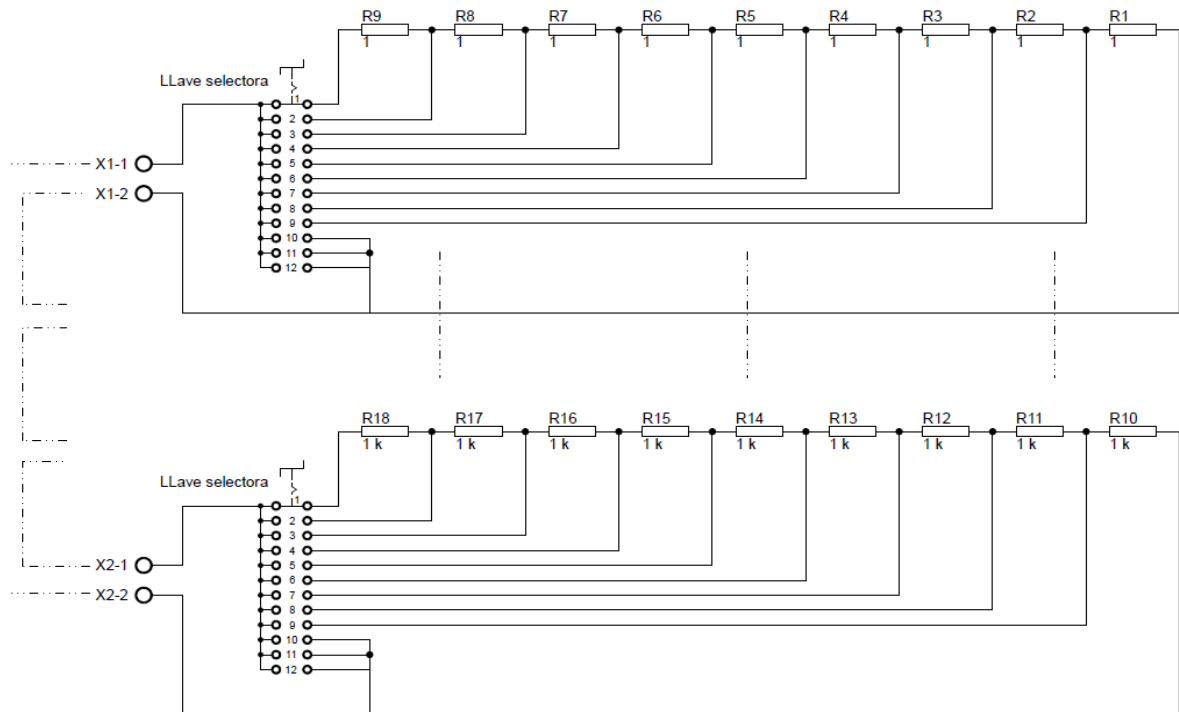
3.1 CONDENSADORES Y RESISTENCIAS

Un RSG está conformado por dos elementos responsables de generar la onda de impulso. El dimensionamiento de cada uno de ellos se enuncia a continuación:

3.1.1 Resistencias de frente (R_f) y cola (R_c). Se diseñó un arreglo de resistencias que permitiera variar su valor entre el rango determinado...en la sección 2.2...del Capítulo 2. En el arreglo se dispuso de nueve resistencias en serie conectadas a una llave selectora, luego cuatro de estos arreglos se conectaron en serie donde cada uno tenía un valor de diez veces el anterior, de esta manera se obtuvo un valor final de resistencia que podía variar entre 0-9 Ω , 0-90 Ω , 0-900 Ω y 0-9000 Ω , con pasos de 1 Ω , 10 Ω , 100 Ω y 1000 Ω .

respectivamente. Este arreglo permite cambiar los tiempos de frente y cola de la onda de impulso de una forma rápida y continua. La Figura 21 muestra el arreglo de resistencias.

Figura 21. Arreglo de resistencias.

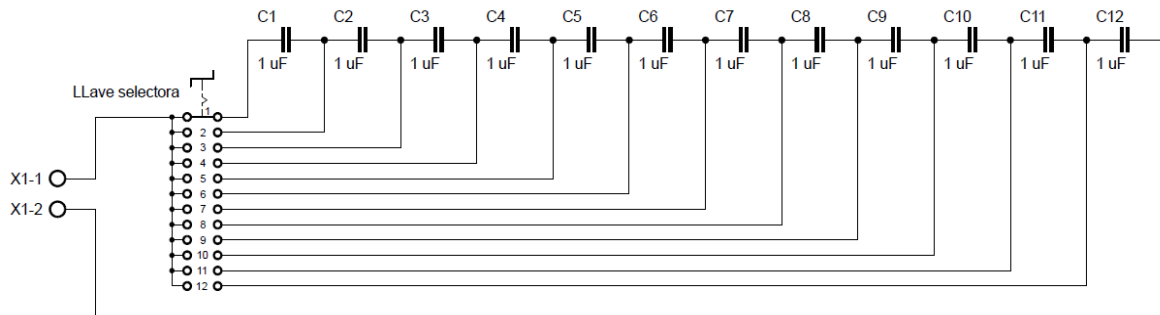


La potencia que disipan las resistencias no se presenta constante en el tiempo. Realmente existen picos cada que se aplica un impulso con una duración de microsegundos. Con el fin de determinar la potencia de las resistencias se realizaron pruebas de calentamiento en donde estas fueron sometidas a impulsos para obtener la temperatura máxima de estabilización. Los resultados arrojaron que las resistencias de 5 W permitían el correcto funcionamiento del equipo sin tener calentamientos excesivos, adicional a esto debían tener un inductancia despreciable, por tanto se seleccionaron cerámicas de carbón.

3.1.2 Condensadores (C_s). De acuerdo al análisis...de la sección 2.1.3...del Capítulo 2 donde se determinó el circuito equivalente del GIAT, se tiene que la capacitancia del RSG debe variar al momento de emular el número de etapas. Para lograr lo anterior, se diseñó un arreglo de doce condensadores conectados en serie (once que emulan cada una de las etapas del GIAT y uno para ampliar el rango de capacitancia) conectados a una llave selectora. El valor de cada

condensador es igual al de cada etapa del GIAT, es decir, 1 μF (ver Capítulo 2, sección 2.1.1) a una tensión de 400 V la cual en apartados posteriores se explicará su criterio de selección. El diagrama de este arreglo sigue la misma topología del arreglo de resistencias y se muestra en la Figura 22.

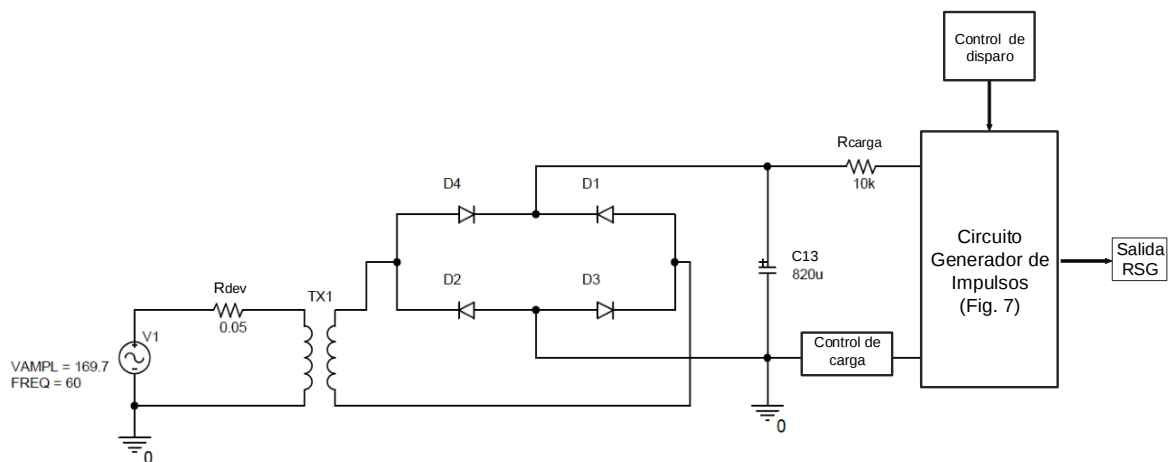
Figura 22. Arreglo de condensadores.



3.2 FUENTE DE ALIMENTACIÓN

La fuente de alimentación tiene como función cargar el arreglo de condensadores del circuito generador de impulsos con una tensión continua. Para ello se diseñó el circuito de la Figura 23, en él se muestra el esquema de los elementos de la fuente. En este circuito se observa que la red eléctrica es representada por una fuente de tensión alterna monofásica "V1" que alimenta el transformador elevador "TX1", a su vez el puente rectificador de onda completa y el condensador "C1" se encargan de entregar una tensión continua al arreglo de condensadores.

Figura 23. Esquema de la fuente de alimentación.

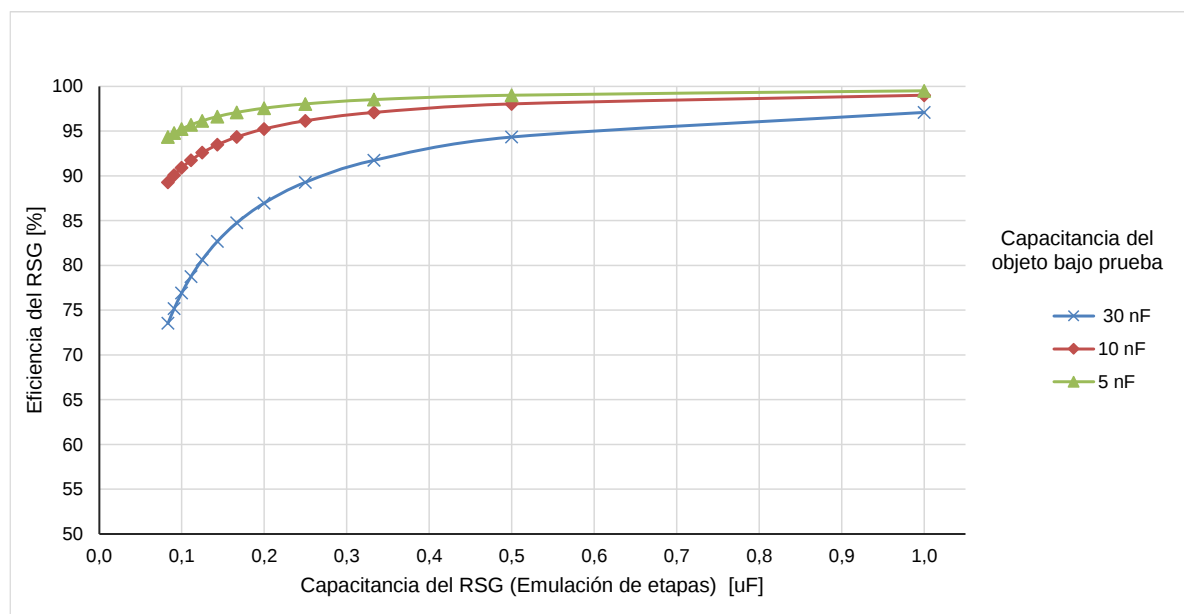


3.2.1 Determinación de la tensión de fuente. La forma de onda de impulso del RSG no depende de la magnitud de tensión del mismo (Wadhwa, 2007), además es un equipo de baja tensión. Partiendo de lo anterior, la tensión que debe tener la fuente queda determinada solo por la eficiencia del RSG la cual depende de la capacitancia de arreglo de condensadores y del objeto bajo prueba. Como criterios de diseño se definió que la tensión pico mínima en el objeto bajo prueba debía ser de 200 V y la máxima hasta 400 V, esta última con el fin de poder registrar las ondas directamente con la punta del osciloscopio que se utiliza en el LAT.

A pesar de que no existe una norma dedicada a este tipo de equipos, la IEC 61000-4-5 (IEC, 2014) se ocupa de pruebas de compatibilidad electromagnética en equipos eléctricos utilizando generadores de impulsos recurrentes, ésta menciona que los generadores de este tipo deben tener una tensión de salida entre 0.5 kV a 4 kV para realizar las pruebas que trata dicha norma. Teniendo en cuenta que el RSG no se está diseñando para este tipo de aplicaciones, se toman estos valores solo como una referencia de los niveles de tensión que podría tener la fuente de un RSG.

Para determinar la menor eficiencia del RSG se utiliza la Ecuación 15 del Capítulo 1 y las capacitancias más altas del objeto de prueba de la Tabla 2 del Capítulo 2.

Figura 24. Eficiencia del RSG para diferentes valores de capacitancia de prueba.



En la Figura 24, se observa que la menor eficiencia es de aproximadamente del 73 %, es decir, que el arreglo de condensadores debe recibir una tensión de la fuente mayor a 274 V para cumplir con el criterio de diseño de 200 V en el objeto bajo prueba.

Se realizó la selección de la fuente teniendo en cuenta los aspectos anteriores, donde se obtuvo que la máxima tensión de esta debía ser de aproximadamente 320 V DC, puesto que es comercialmente viable obtenerla y el costo de los materiales para esta tensión se encontraban dentro del presupuesto establecido.

Para tener una tensión de alimentación del circuito generador de impulsos de 320V DC, se utilizó un transformador monofásico de 200 VA con relación de 110/220 V AC. La tensión de 220 V RMS alimenta el puente rectificador, el cual rectifica la onda y el filtro (C13, Figura 23.) se carga al valor pico de la misma obteniendo un nivel de tensión igual a $220 * \sqrt{2} = 311,1$ V DC, sin embargo la tensión de los tomas está por encima de 110 V, esto hace que en promedio la tensión de salida esté en 320 V DC.

3.2.2 Carga del arreglo de condensadores. En el diseño del RSG fue importante determinar de qué manera la fuente cargaría el arreglo de condensadores. Se tenían dos posibilidades: 1) dejar la fuente permanentemente conectada al circuito de generación de impulsos, 2) aislar la fuente un instante antes de la generación de cada impulso, es decir, cargar el arreglo de condensadores a su tensión máxima, luego desconectarse y volver a conectarse en el momento que fuera necesario cargarlos nuevamente.

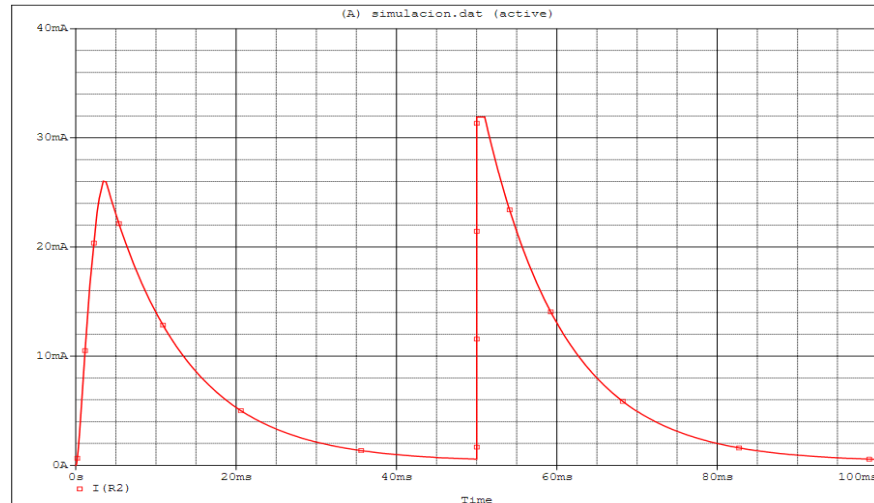
Se escogió la opción dos, y se diseñó un control de carga con el fin de desconectar la fuente al momento de la generación de un impulso. Esto se hizo por medio de un circuito acompañado de un transistor de potencia que en apartados posteriores se explicará con más detalle.

Para la opción uno se encontró lo siguiente, la fuente estaría constantemente entregando corriente al circuito y esto hace que deba tener una capacidad mayor y que la resistencia de carga (Ver Figura 23, R_{carga}) disipe más potencia. En este caso, la ventaja es que no se requiere diseñar un circuito que controle la conexión y desconexión de la fuente.

La Figura 25 muestra la corriente suministrada por la fuente al circuito de generación de impulsos con la opción uno, medida en la resistencia " R_{carga} " de la

Figura 23. Se observa un pico de corriente inicial el cual corresponde a la carga inicial del arreglo de condensadores. El otro pico a los 50 ms, es debido a la presencia de la fuente durante la generación del impulso.

Figura 25. Corriente entregada por la fuente sin su desconexión al momento del impulso.



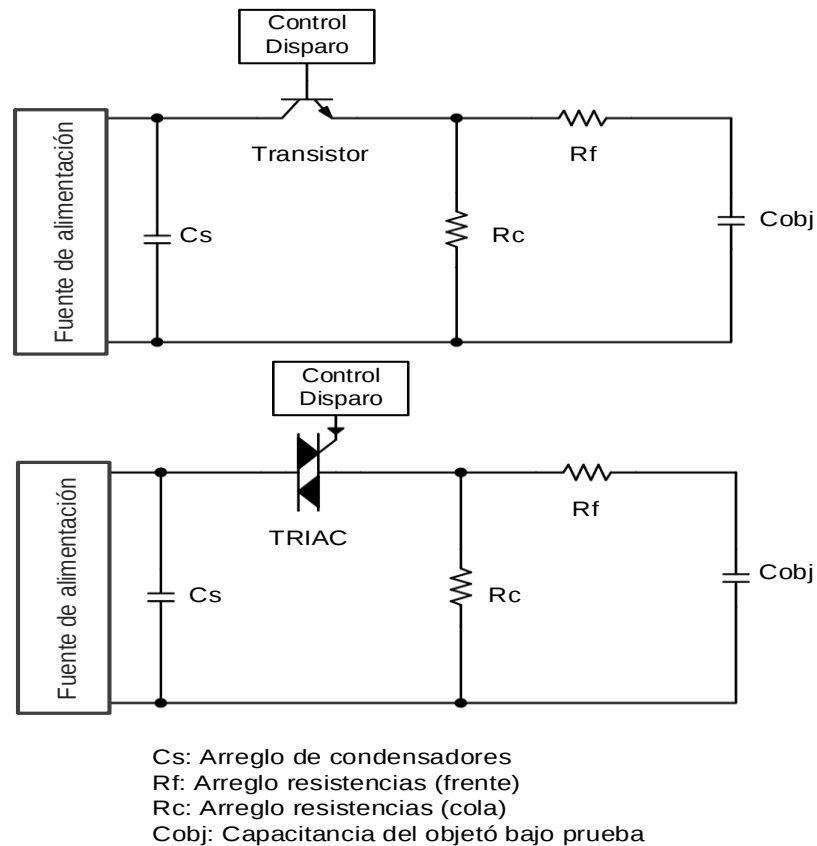
El disparo del impulso, como se mencionó en el Capítulo 1, debe ser controlado por un elemento semiconductor, principalmente un transistor ó TRIAC. De acuerdo a las simulaciones realizadas y teniendo presente que la fuente está en todo momento conectada, se encontró que dichos dispositivos no funcionaban correctamente bajo esta condición.

La Figura 26 muestra el circuito de generación de impulsos del RSG hallado...en la sección 2.1.3...del Capítulo 2, el interruptor “G” es remplazado en primer lugar por un transistor, el cual al entrar en saturación trasfiere la carga del arreglo de condensadores al resto del circuito. Sin embargo, entre sus terminales (Colector-Emisor) se genera una resistencia de conducción que ocasiona la modificación del circuito equivalente generando ondas de impulsos no deseadas, es por esta razón que este dispositivo no funcionaba correctamente.

Por otro lado, se cambió interruptor “G” por un TRIAC, este es un elemento que se activa inyectando una corriente por su compuerta, luego de cerrarse, la única forma de ser abierto es anulando o reduciendo la corriente que está circulando a través de él a una menor a la de mantenimiento (Malvino, 2000). Como la fuente para este caso siempre estaba conectada al circuito de generación de impulsos, el TRIAC luego de su primera activación no tenía la posibilidad de abrirse para dar

paso a los demás impulsos, ya que la fuente permanecía entregándole siempre una corriente que no dejaba que eso ocurriera, por tanto a la salida solo se observaba un impulso, cabe resaltar que este dispositivo al activarse no presenta una resistencia entre sus terminales que modifique el circuito.

Figura 26. Circuito de generación de impulso con dos tipos de interruptores.



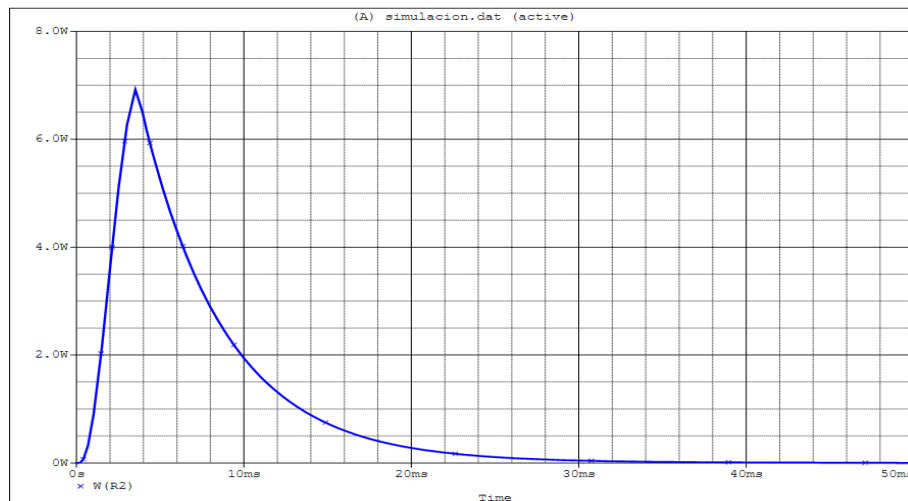
Por tanto con el control de carga el TRIAC podía dar el disparo de los impulsos correctamente sin quedar enganchado por la corriente de la fuente, adicionalmente tanto la corriente entregada por la fuente como la potencia disipada por la resistencia de carga “Rcarga” se redujeron al no tener el segundo pico de corriente de la Figura 25.

3.2.3 Resistencia de carga. El tiempo de carga del arreglo de condensadores depende de la resistencia de carga “Rcarga” de la Figura 23 y del número de etapas que se tenga seleccionado en el arreglo. De igual manera, es necesario estar en concordancia con la frecuencia a la que se aplican los impulsos.

La frecuencia del RSG con la que se aplican los impulsos, como se mencionó en el Capítulo 1, es de aproximadamente 20 Hz, es decir, que el arreglo de condensadores debe cargarse a su tensión máxima en menos de 50 ms. La capacitancia que tarda más en cargarse se obtiene al emular una etapa del GIAT, la cual representa 1 uF, de esta manera se escogió una resistencia de carga de 10 k Ω , con la cual se obtiene un tiempo de carga de 40 ms ($t=4*R*C$). Los 10 ms restantes son para el desarrollo del impulso.

La potencia de esta resistencia se determinó con las simulaciones en la herramienta computacional “Orcad Pspice”. De acuerdo a la Figura 27, la potencia tiene un pico de 7 W, por tanto se tomó un valor de 10 W dándole un rango adicional.

Figura 27. Potencia disipada en la resistencia de carga.



3.3 SISTEMA DE CONTROL

El RSG debe tener un panel de control donde el operario pueda dar inicio a la generación de los impulsos y a la parada de los mismos por medio de dos pulsadores (start, stop). Adicionalmente, en el diseño se han involucrado dispositivos como el TRIAC para el disparo de los impulsos y el transistor para el control de carga del arreglo de condensadores. Para generar su activación, cada uno de estos necesita de una señal de control independiente.

De acuerdo a lo anterior, la función del sistema de control es detectar las señales digitales de entrada (pulsador de start y stop) y mediante la programación activar o desactivar las señales de salida (control de carga y disparo de impulsos). Para llevar a cabo esta labor, se utilizó una plataforma de hardware libre de bajo costo denominada Arduino nano, la cual tiene incorporado un microcontrolador que permite ser programado desde cualquier puerto USB. Esta plataforma fue construida para facilitar el uso de la electrónica digital en proyectos multidisciplinarios (Arduino, 2015).

La Figura 28 muestra el Arduino nano. Este es una de las placas más pequeñas y versátiles que se han creado en el mercado, en la actualidad existen muchas aplicaciones donde el control es realizado con este tipo de hardware, desde robots hasta equipos de aviación (Valle, 2010).

Figura 28. Plataforma de hardware libre Arduino nano.



Fuente: (Arduino, 2015).

El Arduino nano cuenta con catorce pines digitales que cumplen la función de señales de entrada o salida dependiendo como sean programados. Para el caso de este proyecto se tomaron los pines dos (start) y tres (stop) como entradas, seis (control de carga) y diez (disparo impulsos) como salidas. La Tabla 4 muestra las características principales de la plataforma.

Tabla 4. Especificaciones Arduino nano.

Principales características Arduino nano	
Microcontrolador	Atmel Atmega 328
Entrada de voltaje	7-12 V
Pines Digitales E/S	14
Corriente DC E/S	40 mA
Ancho	18 mm

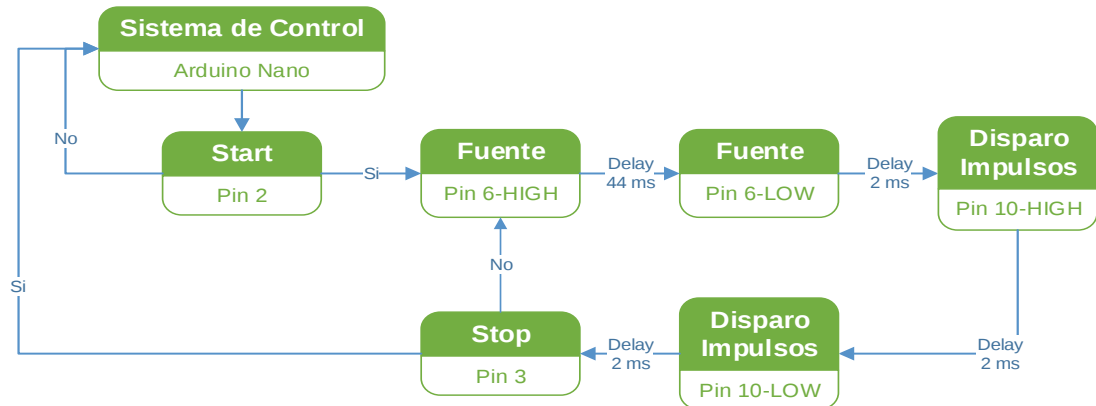
Principales características Arduino nano	
Largo	45 mm
Peso	5 g

Fuente: (Arduino, 2015).

El sistema de control funciona de la siguiente manera: se programan las instrucciones necesarias para llevar acabo el control del RSG, luego el Arduino carga y almacena el programa en su memoria interna, así cada vez que se encienda correrá el último programa cargado. Por defecto los pines siempre están a 0 V y al momento de activarse toman el valor de 5 V. Estas señales son transmitidas a través de optoacopladores a los dispositivos de potencia (TRIAC, Transistor). En apartados posteriores se explicará más en detalle cada uno de estos.

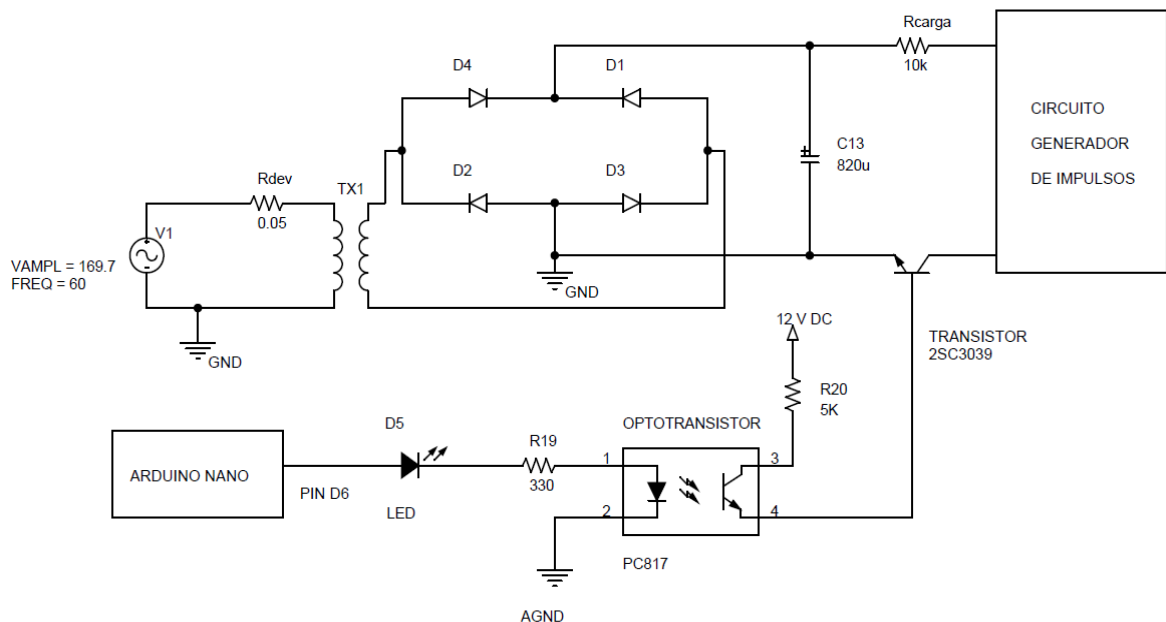
La Figura 29, muestra las instrucciones que se programaron en el Arduino Nano. Como se puede observar el sistema de control está a la espera de la señal del pin 2 (start), al ser activada, se enciende el pin 6 (fuente) y el arreglo de condensadores empiezan a cargarse, de acuerdo a lo mencionado...en la sección 3.2.3...esta carga debe tener un tiempo mínimo de 40 ms. Luego transcurridos 44 ms se llega a la tensión máxima de carga, el pin 6 se apaga y la fuente se desconecta. Luego de esperar 2 ms, se enciende el pin 10 (disparo de impulsos) durante 2 ms para generar la onda de impulso a la salida y lograr la descarga del arreglo de condensadores transfiriendo su energía al circuito. Después de 2 ms si no se ha activado el pin 3 (stop) el ciclo vuelve a empezar, de lo contrario se deja nuevamente a la espera de la activación del pin 2 (start). En el Anexo A se muestra el código de programación.

Figura 29. Secuencia de instrucciones para la programación del Arduino Nano.



3.3.1 Control de carga. Para controlar la carga del arreglo de condensadores se seleccionó un transistor que soportará más de 320V DC entre colector emisor, puesto que esta es la tensión de carga máxima determinada...en la sección 3.2.1... El transistor de potencia seleccionado fue el “NPN 2SC3039” y está conectado como se muestra en la Figura 30. Este permite dar apertura o cierre al circuito de la fuente.

Figura 30. Circuito para el control de la carga del arreglo de condensadores.



El circuito funciona de la siguiente manera: al activarse el pin 6 se enciende tanto el LED de indicación como el del optotransistor “PC817”; este último envía una

señal óptica a la base de su transistor el cual se satura y permite el paso de corriente desde la fuente de 12V DC hacia la base del transistor de potencia (2SC3039).

La resistencia “R20” de la Figura 30 fue dimensionada para garantizar que la corriente que ingresa por la base del transistor de potencia, de acuerdo a su hoja de especificaciones, lo sature permitiendo el cierre y la carga del arreglo de condensadores del circuito generador de impulsos. La Tabla 5 muestra las características principales del transistor de potencia.

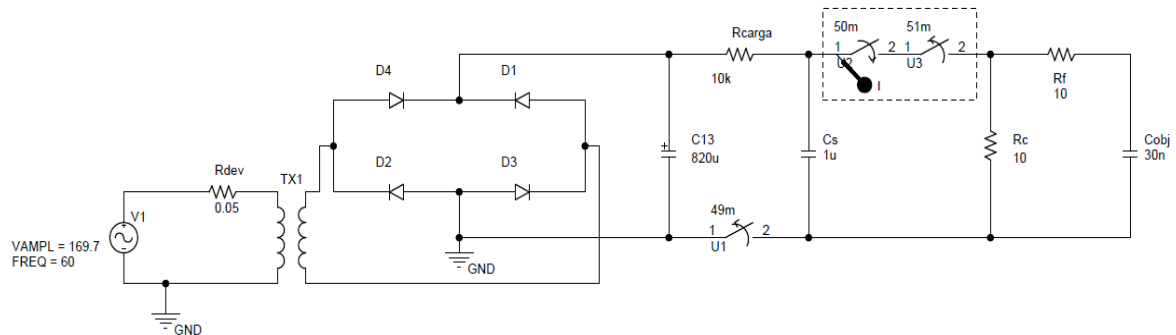
Tabla 5. Características principales del transistor de potencia.

Transistor de potencia 2SC3039 Valores máximos		
Tensión colector-emisor		400 V
Corriente de colector	continua	7 A
	Pico	14 A
Corriente de base		3 A
Tiempo de encendido y apagado		1 μ s

3.3.2 Control de disparo. De acuerdo a lo mencionado...en la sección 3.2.2...la generación de los impulsos es controlada por un TRIAC, el cual debe cumplir con dos condiciones de funcionamiento: 1) soportar más de 320 V DC entre sus terminales, 2) soportar picos de corriente generados por las variaciones bruscas de tensión en los condensadores.

La simulación del circuito de la Figura 31 fue realizada con la herramienta computacional “OrcadPspice” con el fin de obtener la magnitud de corriente que debe soportar el TRIAC, el recuadro con línea punteada indica la posición del TRIAC. Debido a que los valores de resistencia y capacitancia del circuito de impulso varían, se tomaron para este caso, los que generan un pico de corriente más alto.

Figura 31. Circuito para determinar la corriente pico en el TRIAC.



En la Figura 32 se puede observar el pico de corriente que debe soportar el TRIAC, aproximadamente 48 A. Teniendo en cuenta estos resultados se seleccionó el “BTA 06”, el cual cumple con las condiciones de funcionamiento establecidas. La Tabla 6 muestra las principales especificaciones del TRIAC.

Figura 32. Pico de corriente en el TRIAC.

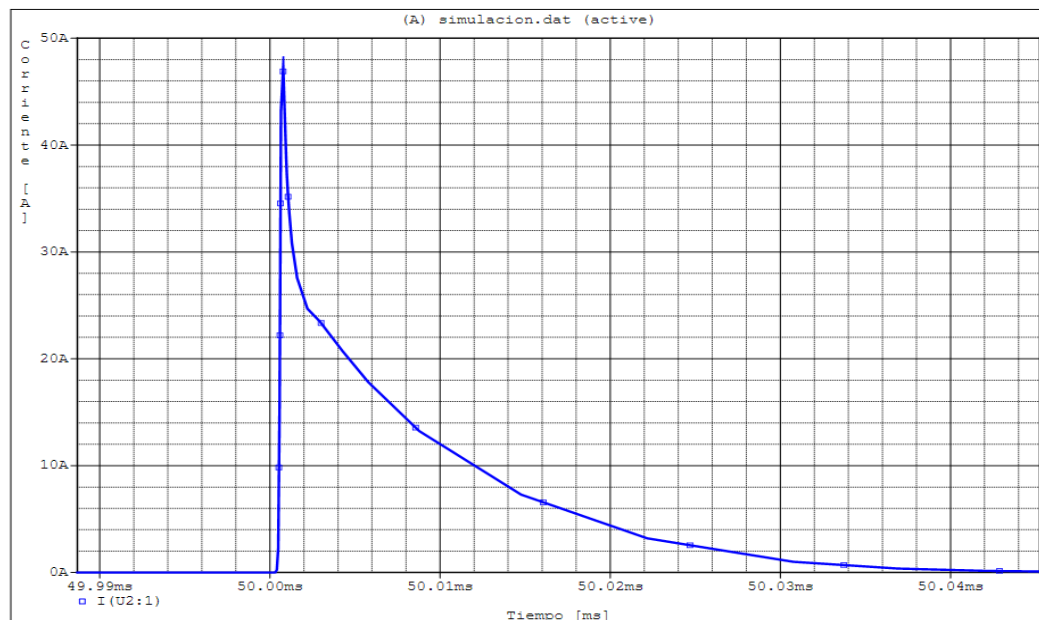


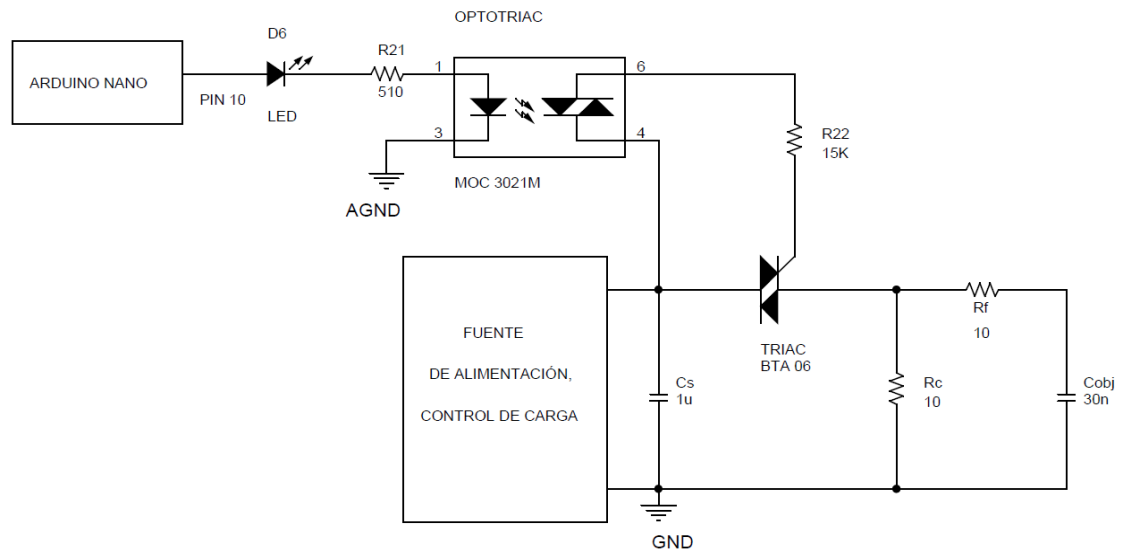
Tabla 6. Principales especificaciones del TRIAC.

TRIAC BTA 06 Valores máximos		
Voltaje DRM		600 V
Corriente	continua	6 A
	pico	60 A
Corriente por compuerta		35 mA
Variación de la corriente		50 A/ μ s
Variación del voltaje		400 V/ μ s

Se puede observar que este tipo de TRIAC cumple con las condiciones de diseño con 600 V de tensión entre terminales y 60 A de corriente pico, también permite variaciones rápidas de corriente y tensión una característica importante para el buen funcionamiento del equipo.

La Figura 33, muestra el circuito de control de disparo. El funcionamiento es similar al explicado en el caso del control de carga, sin embargo el acoplamiento de la señal de control se hizo por medio de un optotriac de referencia MOC 3021 el cual soporta una tensión entre los terminales de salida de 400 V. La corriente que ingresa a la compuerta del TRIAC es limitada por la resistencia “R22” de 15 k Ω la cual fue dimensionada para cumplir los límites de corriente de la compuerta del TRIAC.

Figura 33. Circuito de control del disparo para la generación de los impulsos.



Al activarse el pin 10 tanto el LED indicador como el del optotriac se encienden. Este último permite que haya paso de corriente hacia la compuerta del TRIAC y que se cierre con el fin de transferir la energía del arreglo de condensadores al resto del circuito.

CAPÍTULO CUATRO

"Una mirada hacia atrás vale más que una hacia adelante". Arquímedes

En el proceso de construcción de un equipo eléctrico es fundamental llevar a cabo un prototipo inicial con el cual se validen los circuitos diseñados. De esta manera se tiene una mayor certeza sobre el comportamiento real del equipo y las diferentes variantes que puedan surgir.

En este capítulo se presenta el proceso de construcción del RSG y las pruebas realizadas con el fin de verificar su equivalencia con el GIAT.

.

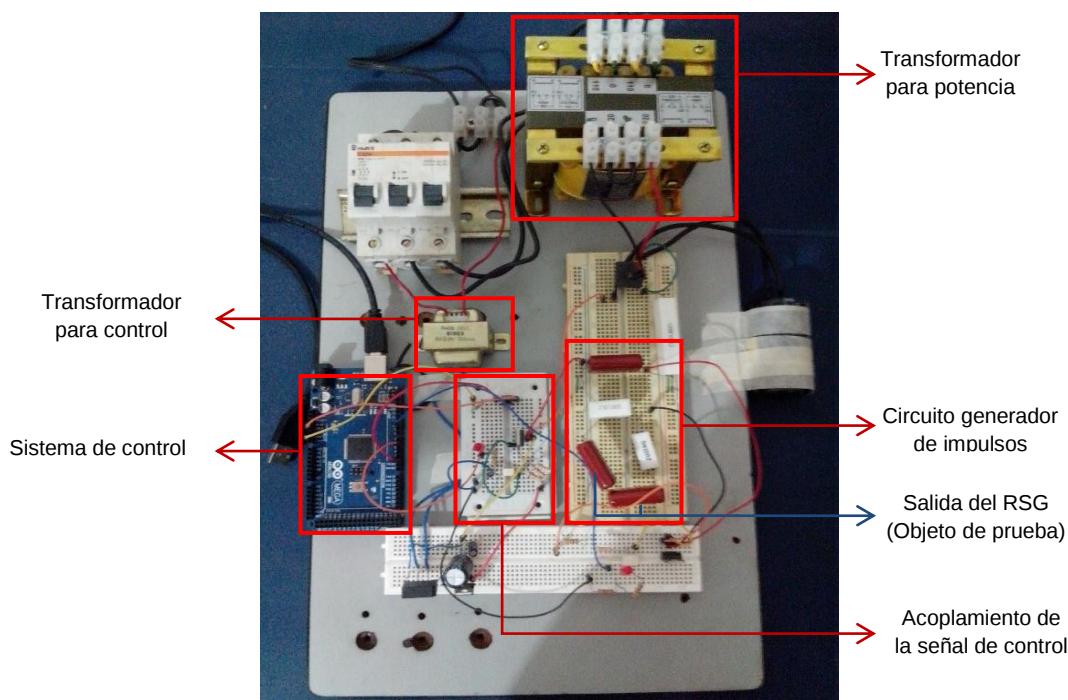
4. PROCESO DE CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS

El presente capítulo tiene como objetivo evidenciar el proceso de construcción y las pruebas realizadas al RSG. En primer lugar, los diseños fueron implementados en protoboard con el fin de realizar las pruebas preliminares de funcionamiento; luego se construyeron los circuitos impresos con los cuales se realizaron las pruebas de equivalencia entre el RSG y GIAT y posteriormente se construyó el diseño final.

4.1 PROTOTIPO INICIAL

4.1.1 Implementación. El prototipo inicial fue implementado en protoboard, como se muestra en la Figura 34, este estaba compuesto por los diferentes circuitos de control y generación de las ondas de impulso.

Figura 34. Implementación inicial del RSG.



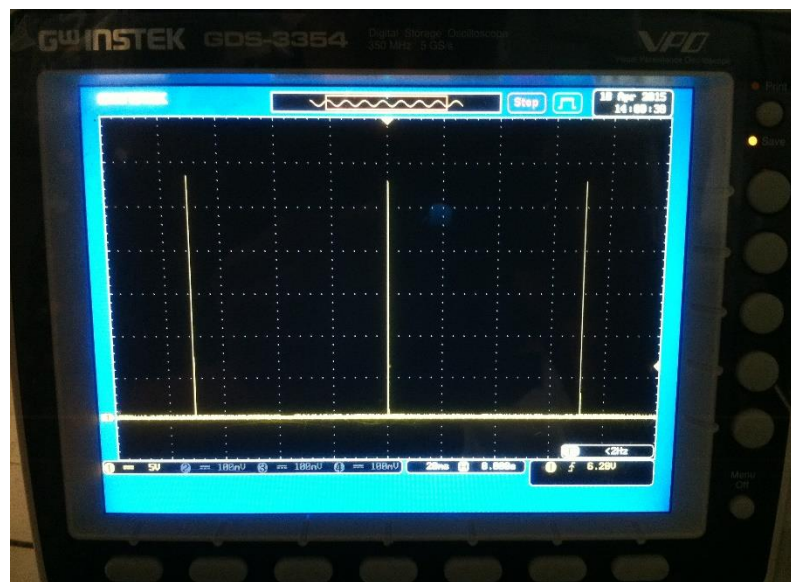
Se puede observar en la Figura 34 el circuito generador de impulso (Figura 26, Capítulo 3), los transformadores para potencia y control, el acoplamiento de la señal y el sistema de control. Cabe resaltar que en este montaje no fueron utilizados los arreglos de resistencias y condensadores, debido a que por el

momento no era necesario variar los tiempos de frente y cola de las ondas generadas. Sin embargo se utilizaron valores fijos de resistencia y capacitancia los cuales en el siguiente apartado son detallados.

Este montaje permitió realizar las pruebas preliminares con las cuales se verificó el diseño del sistema de control y los elementos asociados a él, descritos en el Capítulo 3. La verificación consistió en dos cosas, primero observar a la salida del prototipo una generación de ondas de impulsos a una frecuencia dada por el sistema de control, segundo medir los tiempos de la onda y compararlos con la simulación de este circuito.

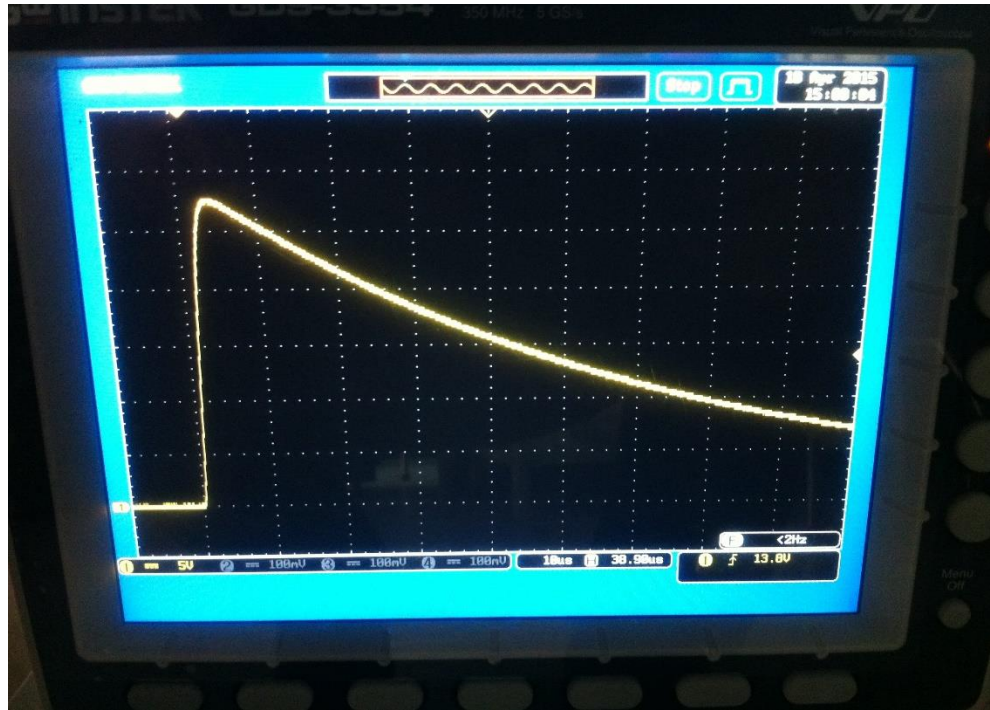
4.1.2 Pruebas preliminares. Las ondas fueron registradas con el osciloscopio “GW INSTEK”. La señal obtenida se muestra en la Figura 35 en la cual se puede apreciar la generación de los impulsos con una frecuencia de 20 Hz.

Figura 35. Generación de ondas de impulso a 20 Hz.



La forma de la onda no puede ser apreciada en la Figura 35 debido a que la escala del tiempo del osciloscopio está en el rango de milisegundos y la duración de esta es del orden de los microsegundos. Por tanto, luego de verificar la frecuencia de repetición de los impulsos, se procede a mostrar en la Figura 36 la forma de la onda generada y los tiempos característicos de la misma.

Figura 36. Onda de impulso generada.



Los valores de los elementos de circuito generador de impulso para la pruebas preliminares fueron: Capacitancia propia (C_s) 1 μF , resistencia de frente (R_f) 20 Ω , resistencia de cola (R_c) 60 Ω y capacitancia del objeto de prueba (C_{obj}) 0.05 μF .

Los tiempos de la onda de la Figura 36 fueron medidos y comparados con los datos que arrojó la simulación del mismo circuito, la Tabla 7 muestra los resultados obtenidos.

Tabla 7. Comparación de la onda experimental con la simulación.

Onda de impulso	Tensión pico [V]	Tiempo [μS]			
		90%	30%	Frente	Cola
Experimental	275,5	2,20	0,75	2,42	48,50
Simulación	281,5	2,30	0,86	2,40	49,00

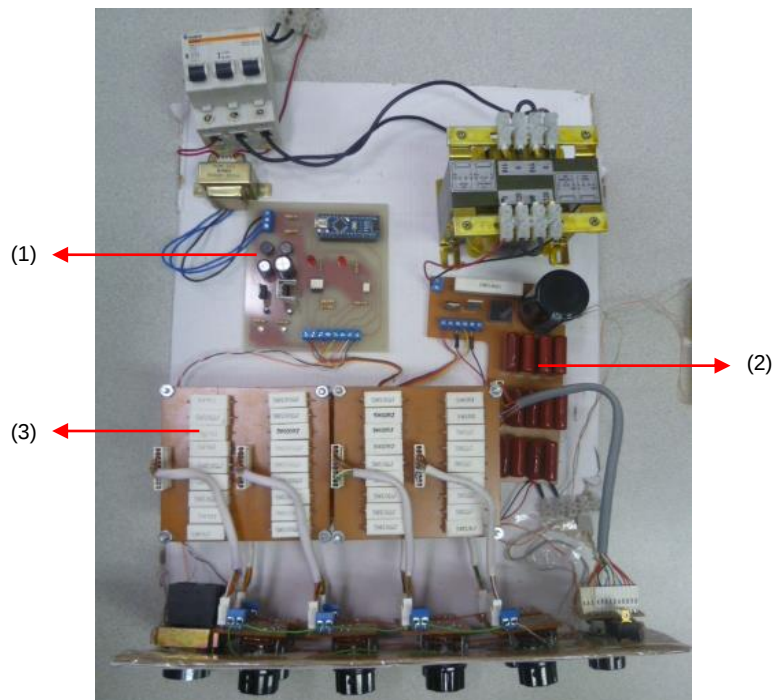
Teniendo en cuenta los resultados de la Tabla 7, se verificó que el circuito generador de impulso funcionaba correctamente con un error del 0.82% en el tiempo de frente y 0,1% en el tiempo de cola.

4.2 CONSTRUCCIÓN DE LOS CIRCUITOS IMPRESOS

Partiendo de los resultados de las pruebas preliminares, se procedió a construir los circuitos impresos con el fin de realizar posteriormente las pruebas de equivalencia entre el RSG y GIAT.

4.2.1 Distribución de los circuitos. Pensando en la optimización del espacio y la modularidad de cada parte del RSG, se distribuyeron los circuitos en tres partes de la siguiente forma: 1) El sistema de control junto con el acoplamiento de señal y dos fuentes reguladas de corriente continua, una de 12 V utilizada para la polarización del transistor de potencia del circuito control de carga y la otra de 7 V para la alimentación del Arduino Nano, 2) La fuente de alimentación para la carga del arreglo de condensadores, los elementos de potencia (TRIAC, transistor de potencia) y el arreglo de condensadores, 3) El arreglo de resistencias de frente y cola se dispusieron en cuatro plaquetas dos para cada una. La Figura 37 muestra cómo se dispusieron los circuitos impresos nombrados anteriormente.

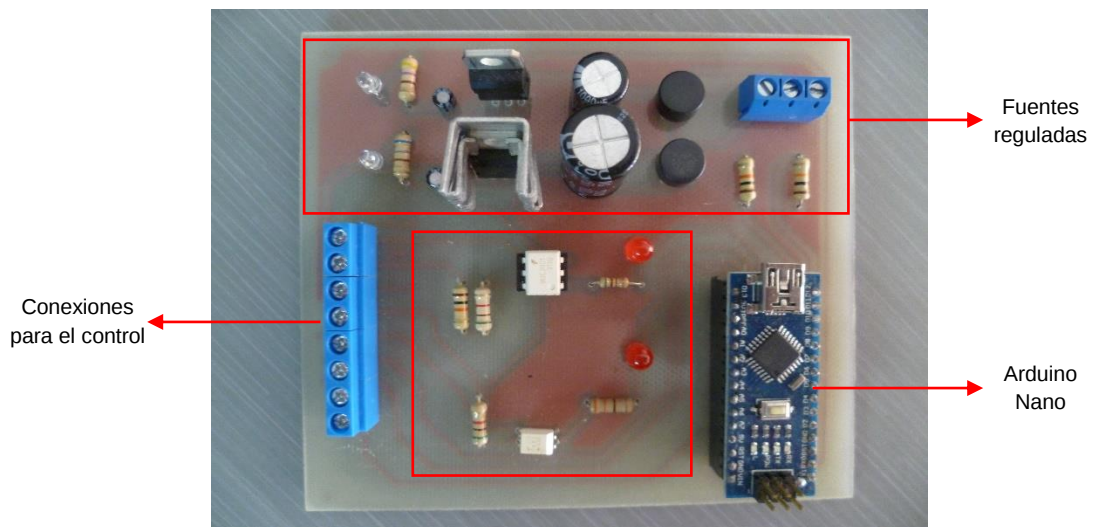
Figura 37. Disposición de los circuitos impresos.



4.2.2 Circuitos impresos. A continuación se detallan los diferentes circuitos impresos, para su elaboración se empleó la herramienta computacional “Eagle 7.1.0”.

En la Figura 38 se observa el circuito impreso del sistema de control, acoplamiento de señal y fuentes reguladas de DC, cabe resaltar que el Arduino Nano está montado sobre una base permitiendo que sea retirado fácilmente, también se tienen una bornera de tres conexiones la cual permite conectar el transformador de control a la plaqueta y una bornera de ocho conexiones de donde se obtienen todas las señales de control. El esquemático de este circuito es el mostrado en el Anexo B.

Figura 38. Circuito impreso sistema de control, acoplamiento y fuentes de DC.



La Figura 39 muestra el circuito impreso de la fuente de alimentación, los elementos de potencia y el arreglo de condensadores. En esta se observa una bornera de dos conexiones la cual permite conectar el transformador de la fuente de alimentación, también se tiene una bornera de seis conexiones donde se conecta el arreglo de resistencias y se reciben las señales de control. Para realizar la selección de la etapas que se requieran emular se varía la capacitancia del arreglo de condensadores por medio de una llave selectora como se muestra en la Figura 39. El esquemático de este circuito es el mostrado en el Anexo C.

4.3 PRUEBAS DE EQUIVALENCIA

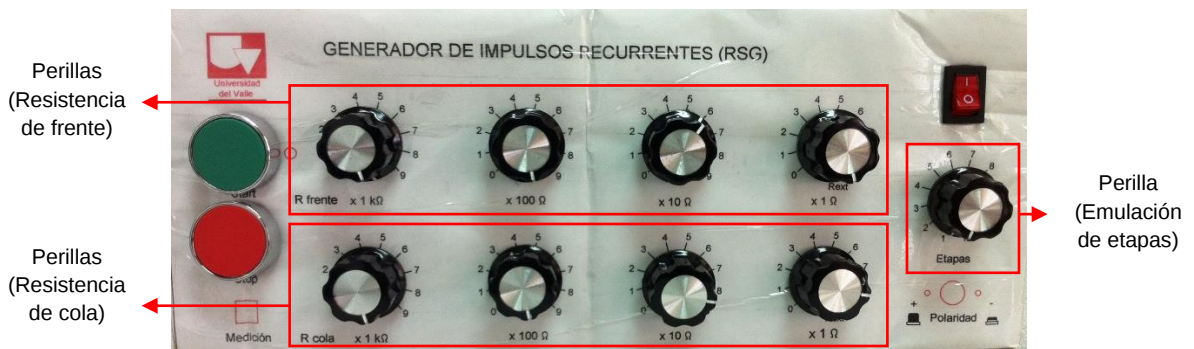
Las pruebas fueron realizadas con dos finalidades: verificar que 1) el RSG al emular un número de etapas del GIAT, efectivamente generará una onda de impulso equivalente y 2) conocer para un determinado objeto de prueba (transformador) que valores de resistencias de frente y cola se debían colocarse en cada una de las etapas del GIAT con el fin de obtener una onda estándar ($1,2 \pm 30\% \mu s \times 50 \pm 20\% \mu s$).

Para realizar las pruebas de equivalencia se realizó el montaje de la Figura 41, en esta se puede observar el RSG en funcionamiento y las onda registradas con el osciloscopio. También se aprecian las perillas para seleccionar las resistencias de frente, cola y la etapa que se desea emular, al igual que los pulsadores de inicio y parada. La Figura 42 muestra el panel de control construido para estas pruebas.

Figura 41. Montaje para las pruebas de equivalencia.



Figura 42. Panel de control inicial para la realización de las pruebas de equivalencia.



El objeto bajo prueba seleccionado fue un transformador monofásico de 15 kVA, 7620/240-120 V e impedancia de cortocircuito de 3%, marca Rymel propiedad del LAT el cual es mostrado en la Figura 43, en esta también se observan las conexiones que fueron realizadas para llevar acabo las pruebas en el devanando de alta tensión.

Figura 43. Montaje del transformador seleccionado.



Antes de mostrar los resultados de las pruebas se deben explicar los siguientes aspectos:

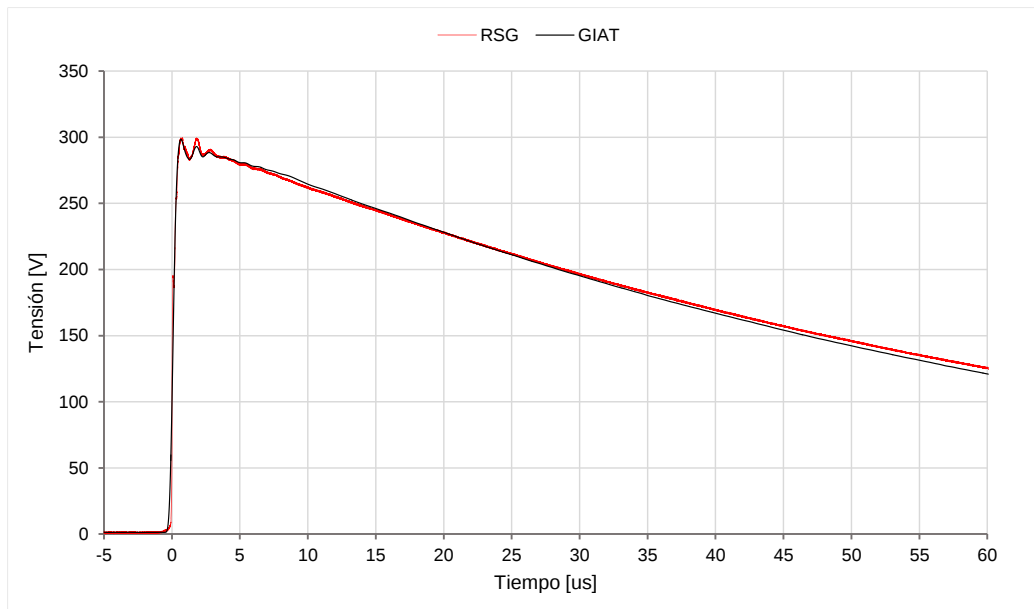
- Se deben dividir los valores de resistencia de frente y cola seleccionados con las perillas del RSG por el número de etapas que se estén emulando (Ver Capítulo 2, sección 2.1.3), el resultado de esta división son los valores de resistencias que deben colocarse por cada etapa en el GIAT para que se genere una onda equivalente entre los dos equipos.
- En un principio en el RSG se puede seleccionar cualquier valor de resistencias dentro del rango con el que fue diseñado, sin embargo al momento de referir estos valores al GIAT, se consideró que este no cuenta con gran variedad de resistencias y además sus valores son fijos. Por esta razón las pruebas fueron realizadas de manera que las resistencias resultantes existieran en LAT y de esta manera tener un menor grado de error.

- Con el fin de realizar una comparación visual entre las dos ondas, se aplicó un factor de amplitud en cada prueba, de tal manera que el pico de tensión del GIAT coincidiera con el del RSG. Cabe aclarar que como se ha mencionado antes (Ver capítulo 3, sección 3.2.1), la forma de la onda no depende de la tensión, es decir que al aplicar este factor no se cambia los tiempos de frente ni de cola.
- Las ondas registradas en el RSG se dibujaron en color rojo y las del GIAT en color negro.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en las pruebas de equivalencia. Para cada una de ellas el RSG se conectó al transformador y se registró la onda de impulso. Luego de referir los valores de resistencias obtenidas, se conectó el GIAT y se aplicaron los impulsos de alta tensión.

4.3.1 Pruebas 1 etapa. Se ajustaron por medio de las perillas del RSG una resistencia de frente de 52Ω y una de cola de 68Ω , de igual forma se seleccionó con la perrilla de emulación de las etapas “1 etapa”. Las ondas obtenidas se muestran en la Figura 44.

Figura 44. Ondas de impulso obtenidas del RSG Y GIAT para 1 etapa con $R_f 52 \Omega$ y $R_c 68 \Omega$.



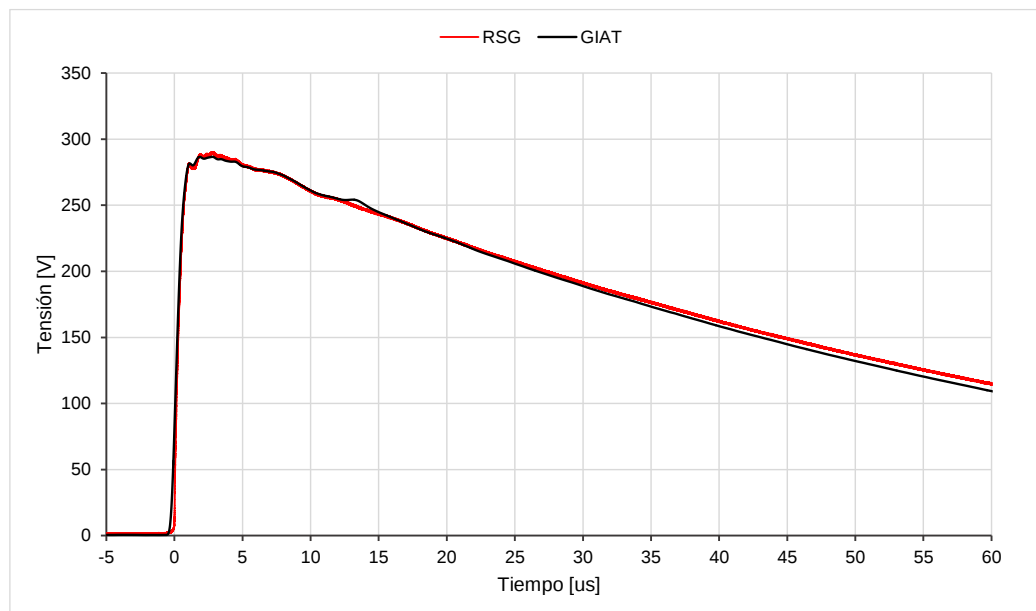
En la Figura 44 se puede apreciar como las ondas describen un comportamiento muy aproximado. De acuerdo a la Tabla 8 los errores entre las ondas fueron: en el tiempo de frente 2,7% y en el de cola 3,3%.

Tabla 8. Mediciones de las ondas de impulso de la Figura 44.

Equipo	Tensión pico [V]	Tiempo [uS]			
		90%	30%	Frente	Cola
RSG	297,5	0,620	0,260	0,601	51,02
GIAT	29050	0,760	0,390	0,618	49,30

El tiempo de cola estuvo próximo a 50 μ s, sin embargo el de frente necesito corregirse. Por esta razón se procedió a aumentar la resistencia de frente de RSG hasta encontrar una onda con un tiempo de frente de 1,2 μ s. Las ondas obtenidas se muestran en la Figura 45.

Figura 45. Ondas de impulso obtenidas del RSG Y GIAT para 1 etapa con R_f 328 Ω y R_c 68 Ω .



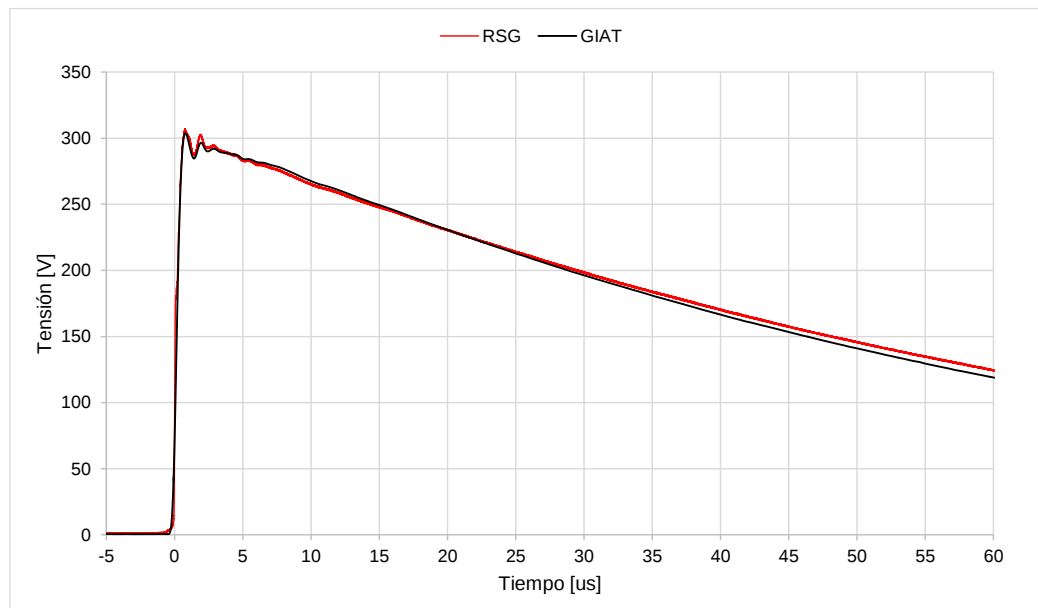
Como se observa en la Tabla 9, los tiempos de frente y cola de las ondas se aproximaron a los de una onda estándar, adicionalmente las ondas fueron equivalentes entre ellas como puede apreciar en la Figura 45.

Tabla 9. Mediciones de las ondas de impulso de la Figura 45.

Equipo	Tensión pico [V]	Tiempo [uS]			
		90%	30%	Frente	Cola
RSG	286	1,090	0,360	1,220	47,80
GIAT	28550	1,070	0,370	1,170	46,20

4.3.2 Pruebas 2 etapas. Se ajustaron con las perillas una resistencia de frente 104Ω y de cola de 136Ω , como se requería emular dos etapas se seleccionó con la perilla “2 etapas”. Luego en el GIAT se colocaron las resistencias referidas. Las ondas obtenidas para esta prueba son las mostradas en Figura 46.

Figura 46. Ondas de impulso obtenidas del RSG ($R_f 104 \Omega$ y $R_c 136 \Omega$) y GIAT ($R_f 52 \Omega$ y $R_c 68 \Omega$ por etapa) para 2 etapas.



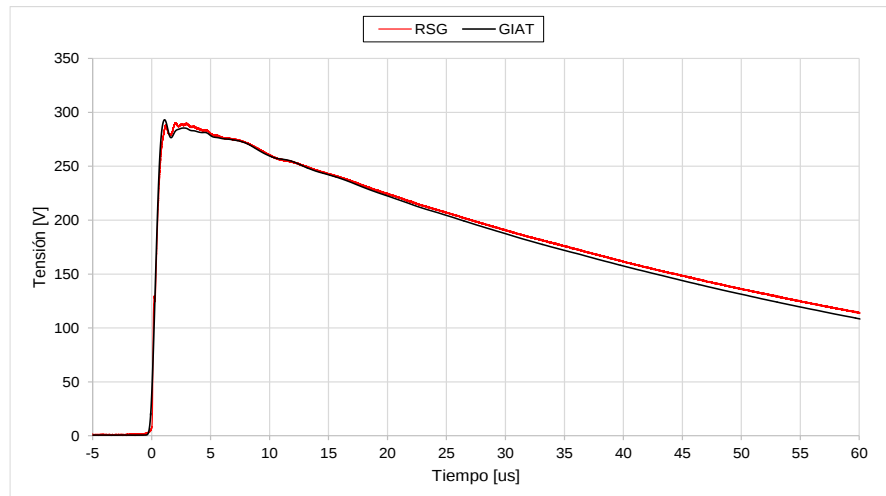
En la Figura 46, se puede observar como las dos ondas siguen un comportamiento muy similar. De acuerdo a la Tabla 10, los errores entre las ondas fueron: en el tiempo de frente 5% y en el de cola 2,7%.

Tabla 10. Mediciones de las ondas de impulso de la Figura 46.

Equipo	Tensión pico [V]	Tiempo [uS]			
		90%	30%	Frente	Cola
RSG	303,5	0,610	0,136	0,792	48,79
GIAT	54800	0,690	0,240	0,752	47,46

De la misma forma que ocurrió con las pruebas con una etapa, fue necesario incrementar la resistencia de frente con el fin de aumentar su tiempo y aproximarlos al de una onda estándar. Por tanto con el RSG se determinó que para obtener una onda cercana a la estándar con dos etapas, se debía seleccionar una resistencia de frente de 414 Ω y de cola en 136 Ω , obteniendo así un tiempo de 1,207 μs x 46,12 μs . Por tanto, en el GIAT se debía colocar por etapa 207 Ω y 68 Ω , sin embargo no se tenía un valor de 207 Ω ni cercanos a este. Por esta razón se cambió por una resistencia de 162 Ω por etapa en el GIAT, es decir 324 Ω en el RSG. Las ondas de impulso obtenidas son las mostradas en la Figura 47.

Figura 47. Ondas de impulso obtenidas del RSG (R_f 324 Ω y R_c 136 Ω) Y GIAT (R_f 162 Ω y R_c 68 Ω por etapa) para 2 etapas.



Como se observa en la Tabla 11, el tiempo de frente fue aumentado a 0,9 μs . Cabe notar que aunque no se alcanzó el 1,2 μs el valor obtenido está dentro del rango de tolerancia del tiempo de frente (0,84 μs – 1,56 μs).

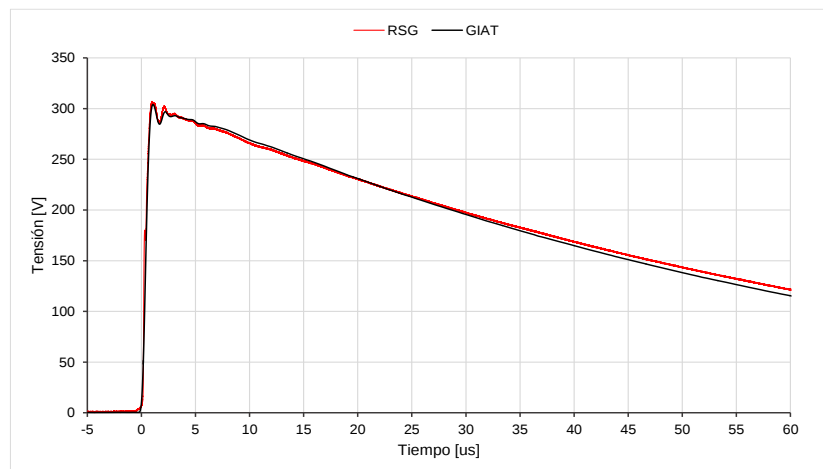
Tabla 11. Mediciones de las ondas de impulso de la Figura 47.

Equipo	Tensión pico [V]	Tiempo [μ S]			
		90%	30%	Frente	Cola
RSG	285,5	0,800	0,210	0,985	45,80
GIAT	51700	0,760	0,220	0,902	44,58

4.3.3 Pruebas de 3 y 4 etapas. En estas pruebas no se pudo corregir la onda obtenida como se hizo para las etapas uno y dos, puesto que los valores de resistencias, como en el caso de 2 etapas, no se tenían en el LAT y tampoco era posible obtenerlos colocando varias de estas en serie.

Debido a lo anterior, se realizaron las pruebas con los valores de resistencias que existían, con el fin de comprobar la equivalencia hasta 4 etapas sin importar que no se generara una onda cercana a la estándar. En la Figura 48 se muestra la comparación de las ondas para 3 etapas.

Figura 48. Ondas de impulso obtenidas del RSG (R_f 156 Ω y R_c 204 Ω) Y GIAT (R_f 52 Ω y R_c 68 Ω por etapa) para 3 etapas.



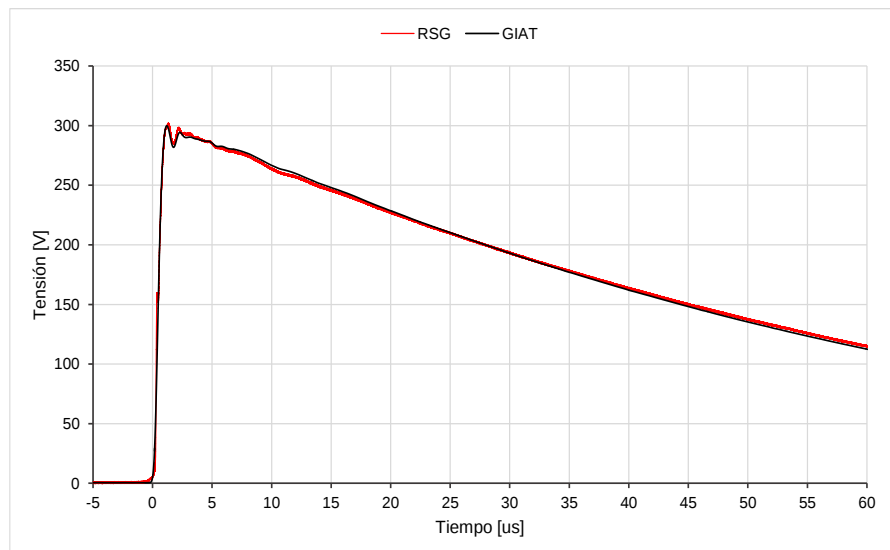
De acuerdo a la Tabla 12, los errores entre las ondas fueron: en el tiempo de frente 4% y en el de cola 0,86%.

Tabla 12. Mediciones de las ondas de impulso de la Figura 48.

Equipo	Tensión pico [V]	Tiempo [uS]			
		90%	30%	Frente	Cola
RSG	304,5	0,748	0,238	0,852	46,10
GIAT	53300	0,820	0,330	0,818	45,70

Las ondas obtenidas en las pruebas de 4 etapas son las mostradas en la Figura 49.

Figura 49. Ondas de impulso obtenidas del RSG ($R_f 208 \Omega$ y $R_c 272\Omega$) Y GIAT ($R_f 52 \Omega$ y $R_c 68 \Omega$ por etapa) para 4 etapas.



De acuerdo a la Tabla 13, los errores entre las ondas fueron: en el tiempo de frente 2,9% y en el de cola 0,14%.

Tabla 13. Mediciones de las ondas de impulso de la Figura 49.

Equipo	Tensión pico [V]	Tiempo [uS]			
		90%	30%	Frente	Cola
RSG	300	0,885	0,339	0,912	45,26
GIAT	67300	0,910	0,380	0,885	45,20

Cabe resaltar, que los valores de resistencia de cola con los que cuenta el LAT están en el rango de $68\ \Omega$ a $70\ \Omega$ por esta razón no existió la posibilidad de aumentarla en ninguna de las pruebas anteriores con el fin de tener un tiempo de cola más cercano a $50\ \mu s$, sin embargo los tiempos de cola obtenidos en las pruebas realizadas estuvieron dentro de las tolerancias (Ver capítulo 1) y cercanos a este valor.

Mediante los resultados obtenidos se verificó la equivalencia del RSG con el GIAT hasta cuatro etapas, este resultado se puede extrapolar para el resto de las etapas. También se encontró que a medida que se aumenta el número de etapas del GIAT, para los mismos valores por cada etapa, el tiempo de frente aumenta y el de cola disminuye.

4.4 DISEÑO FINAL

Teniendo en cuenta el proceso de construcción de los circuitos impresos y las pruebas anteriores con los prototipos iniciales, se realizaron algunas mejoras en el diseño tales como:

- Se decidió tener terminales externos para la conexión de resistencias de frente y cola, con el fin de darle más versatilidad al RSG.
- De la misma forma, teniendo en cuenta que el GIAT tiene cuatro posibles configuraciones de funcionamiento, se adicionaron dos terminales para conectar una capacitancia externa en paralelo a la capacitancia del arreglo de condensadores.
- Con el fin de poder cambiar la polaridad de la onda de impulso de salida del RSG, se adicionó al diseño una llave inversora que permitió generar impulsos positivos y negativos.

El RSG se construyó en una carcasa de aluminio de 1,5 mm de espesor, recubierta de pintura electrostática, también se diseñó un soporte en “u” con el fin de darle un apoyo al equipo y comodidad al operario para transportarlo. El diseño del panel de control y posterior son mostrados en el Anexo E.

4.4.1 Montaje final. El RSG quedo construido como se muestra en las siguientes figuras.

Figura 50. Montaje final del RSG.



Figura 51. Parte posterior del RSG.



En el panel frontal se puede apreciar las perillas para aumentar resistencia y seleccionar el número de etapas, los pulsadores de inicio y parada, la toma de medición y el cambiador de polaridad. En la parte posterior se tienen los bornes

para conectar los elementos externos y las conexiones de salida al objeto de prueba.

4.4.2 Lista de materiales. A continuación se muestran los materiales utilizados en la construcción y el costo asociado a estos.

Tabla 14. Lista de materiales y costo total.

	Materiales	Características	Cantidad	Precio
Fuente de alimentación para potencia	Transformador monofásico	220/110, 200 VA	1	\$ 105.000
	Puente Rectificador	600V-2A, REF-KBL06, RS405L	1	\$ 1.800
	Condensador electrolítico	820uF, 400V	1	\$ 17.000
	Fusible+Portafusible	1A	1	\$ 300
Circuito de generación de impulso	Resistencias	1 Ω - 10 Ω - 100 Ω a 1 k Ω 5W	72	\$ 21.600
	Condensadores	Poliéster 1uF a 400V	12	\$ 12.000
Fuente de alimentación circuito de control	Transformador monofásico	120V/18V 12VA	1	\$ 12.000
	Puente rectificador	B40C1500 40V-1,5A	2	\$ 2.000
	Condensador electrolítico	1000 uF 25V	2	\$ 1.800
	Condensador electrolítico	10uF 16V	2	\$ 1.400
	Regulador de voltaje	LM 7807	1	\$ 1.100
	Regulador de voltaje	LM 7812	1	\$ 1.100
Circuito de Control	Arduino Nano	Atmega 328	1	\$ 25.000
	Resistencias	1/4 W	10	\$ 500
	Condensador cerámico	0,010uF	2	\$ 500
	Condensador electrolítico	47uF 16V	2	\$ 800
	Optotransistor	PC 817	1	\$ 1.800
	Optoacoplador	MOC3021	1	\$ 2.000
	Transistor de potencia	C3039	1	\$ 3.200
	Triac	BTB06-400V-6A	1	\$ 1.800
Otros	Llave selectora	12 posiciones	9	\$ 35.100
	Carcaza en aluminio		1	\$ 226.000
	Borneras	3 y 2 entradas	10	\$ 5.000
	Elementos para montaje	Borneras, conectores, cables, tornillería, perillas		\$ 60.000
	Total			\$ 538.800

El costo de los materiales del RSG fue de \$ 538.800. Como diseñador y constructor de este equipo, se valora el costo asociado a mano de obra a un valor de \$ 800.000, con lo cual, el costo final del equipo para es de \$ 1'338.800. En el mercado es difícil conseguir equipos con características similares al construido en

este proyecto, sin embargo, en búsqueda realizadas a través de la red, se encontró uno con un precio de \$ 7'500.000. Como se puede observar, el RSG construido tiene un costo aproximado del 18% del RSG comercial.

4.4.1 Especificaciones

Tensión de alimentación	110 V AC 60 Hz
Tensión de carga	320 V DC
Tensión de salida	320 V (pico máximo)
Tiempo de frente en vacío aprox.	0,1 μ s a 3 μ s
Tiempo de cola en vacío aprox.	9 μ s a 6800 μ s
Tiempo de frente con carga (10 nF) aprox.	0,1 μ s a 170 μ s
Tiempo de cola con carga aprox. (10 nF)	9 μ s a 4600 μ s
Frecuencia de los impulsos	20 Hz
Capacitancia interna (C_s)	0,083 μ F a 1 μ F
Resistencia de frente (R_f)	0 Ω a 10 k Ω Con pasos de 1, 10, 100, 1000 Ω
Resistencia de cola (R_c)	0 Ω a 10 k Ω Con pasos de 1, 10, 100, 1000 Ω
Polaridad	Positiva / Negativa
Dimensiones	Altura 13 cm; Ancho 32 cm; Profundidad 30 cm.
Peso	2,5 Kg

4.4.2 Pruebas finales de funcionamiento. A continuación se muestran en las Figura 52 y Figura 53 las ondas obtenidas con el RSG para diferentes tiempos de frente y cola. Estas pruebas se realizaron en vacío.

Figura 52. Ondas de impulso con diferentes tiempos de cola.

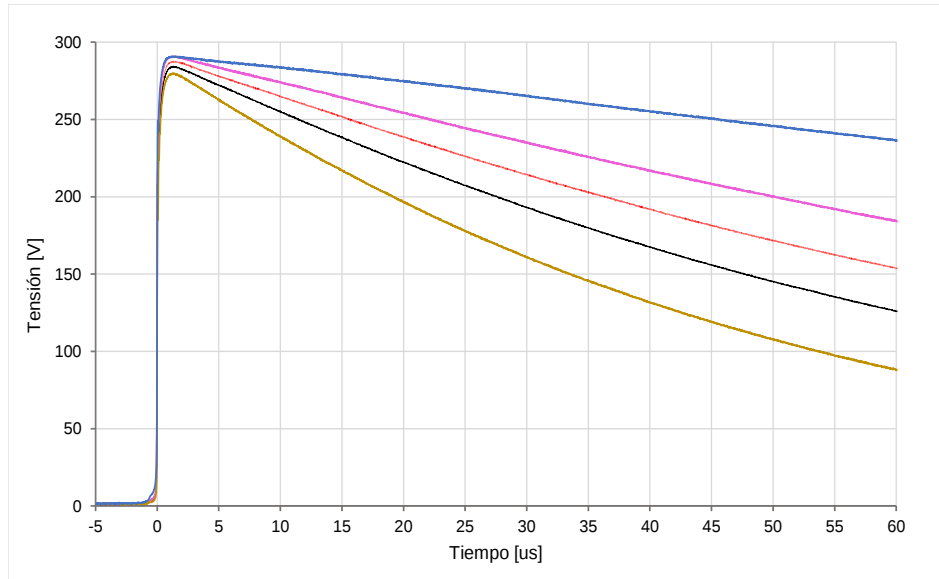
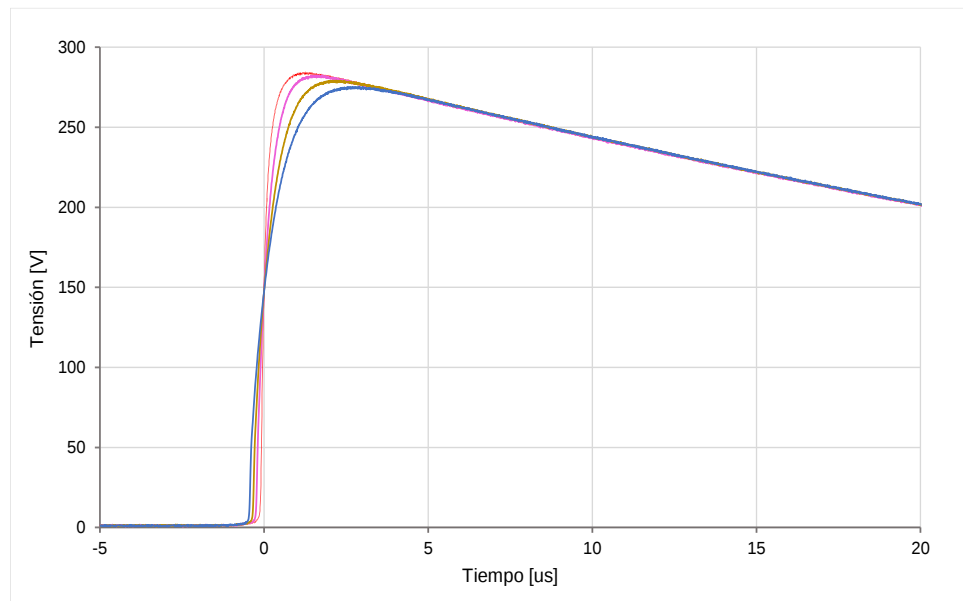


Figura 53. Ondas de impulso con diferentes tiempos de frente.



Las ondas de impulsos de las figuras anteriores corresponden a diferentes valores de resistencia de frente y cola seleccionados en el RSG.

CONCLUSIONES

- Se realizó un análisis matemático para tres etapas del GIAT del LAT, en donde se comprobó que la respuesta de estas podía ser emulada por un circuito equivalente de una sola etapa. A partir de estos resultados, se determinó que variando la capacitancia interna del circuito equivalente se podía emular cualquier número de etapas del GIAT.
- Los resultados de las simulaciones realizadas muestran que mientras se mantengan un balance entre las etapas (resistencia de frente con un mismo valor por cada etapa, al igual que la de cola), las variantes del circuito del GIAT del LAT (resistencia de carga, descarga y capacitor de chequeo) no tienen un efecto relevante sobre la forma de la onda de impulso.
- De acuerdo a los resultados de las pruebas realizadas se verificó que el RSG construido es un equipo equivalente al GIAT del LAT para cualquier número de sus etapas, puesto que el error obtenido entre las ondas no fue mayor al 5%.
- El RSG construido sirve como herramienta para encontrar las resistencias adecuadas para generar una onda de impulso estándar con el GIAT del LAT en una prueba realizada a un transformador.

RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

- Para registrar y medir los tiempos de la onda de impulso que se obtiene del RSG se requiere de un osciloscopio, esto crea una dependencia que podría ser solucionada si se realizan estudios posteriores en donde se implemente un sistema de adquisición de señales que permita la visualización de las ondas de impulso, ya sea, mediante la utilización de una pantalla acoplada al RSG o una interfaz en computador.
- Es importante profundizar en otras aplicaciones con las que cuenta el RSG, en especial las relacionadas con pruebas de compatibilidad electromagnética. Por tanto es deseable hacer una investigación que evalúe la viabilidad de realizar este tipo de pruebas y que cambios en el diseño del RSG deberían hacerse para poder llevarlas a cabo.
- Durante la realización de las pruebas con el GIAT, se encontró que se deben construir más resistencias de frente y cola de diferentes valores, debido que con las que se cuenta en muchas ocasiones no es fácil obtener una onda estándar.

BIBLIOGRAFÍA

- Arduino. (2015). Arduino Nano. Retrieved from <http://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardNano>
- Farouk, A. M., Rick, & Giao, N. T. (2014). *High Voltage Engineering*. Taylor and Francis Group.
- Haefely High Voltage Test. (2003). Recurrent Surge Generator RSG 482. Retrieved from http://www.haefely.com/pdf/LL_RSG482.pdf
- Haefely High Voltage Test. (2012). Impulse voltage generator (Type SGE).
- IEC. (2002). IEC 60076-4 Guide to the lightning impulse and switching impulse testing – Power transformers and reactors.
- IEC. (2010). IEC 60060-1 High-voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements.
- IEC. (2014). IEC 61000-4-5 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-5: Testing and measurement techniques – Surge immunity test.
- IEEE Standards Association. (2013). IEEE Std 4 Standard for High-Voltage Testing Techniques. doi:10.1109/IEEESTD.2013.6515981
- Kuffel, J., Kuffel, E., & Zaengl, W. (2000). *High voltage engineering fundamentals* (Second.). Newnes.
- Li, Y. M., Kuffel, J., & Janischewskyj, W. (1993). Exponential Fitting Algorithms for Digitally Recorded HV Impulse Parameter Evaluation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 8.
- Malvino, A. P. (2000). *Principios de Electrónica* (6th ed.). McGraw-Hill/Interamericana de España.
- Ryan, H. M. (2001). *High Voltage Engineering and Testing* (2nd ed.). The Institution of Electrical Engineers.
- Valle, H. (2010). *Sistema de control y navegación para MAV*. Universidad Politecnica de Cataluña.
- Wadhwa, C. L. (2007). *High Voltage Engineering*. New York (Vol. 177).
- Wang, J., & Zhang, X. (2006). Double-Exponential Expression of Lightning Current Waveforms. *Paper Presented at the Proceedings Fourth Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics, CEEM'2006*.

ANEXOS

Anexo A. Código de programación del Arduino Nano.

```
int pulso40=6;
int pulso2=10;
int start=2;
int aux0=0;
int stop0=3;

void setup() {
  pinMode(pulso40,OUTPUT);
  pinMode(pulso2,OUTPUT);
  pinMode(start,INPUT);
  pinMode(stop0,INPUT);
}

void loop() {

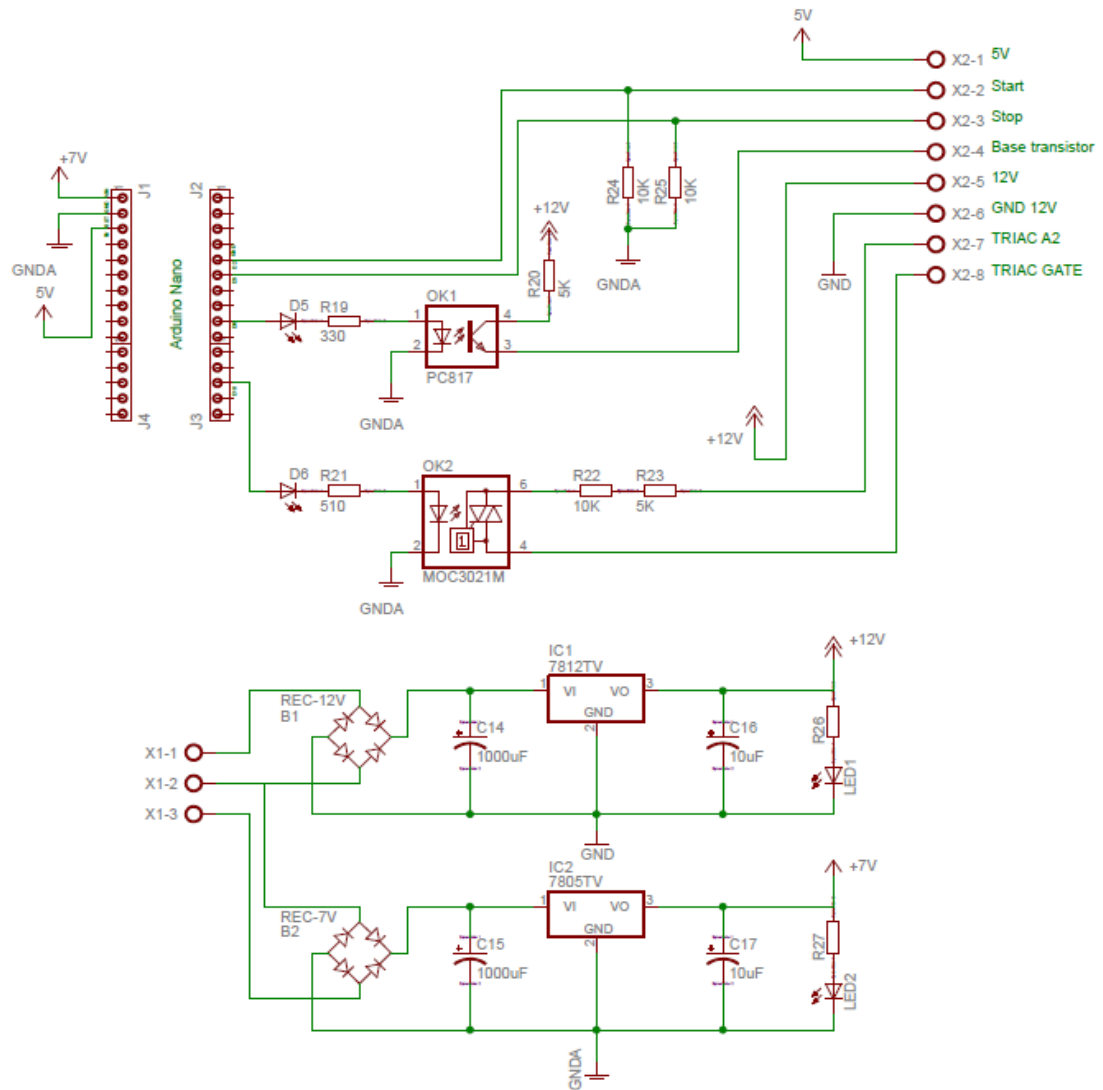
  if(digitalRead(start)==HIGH){
    aux0=1;
  }

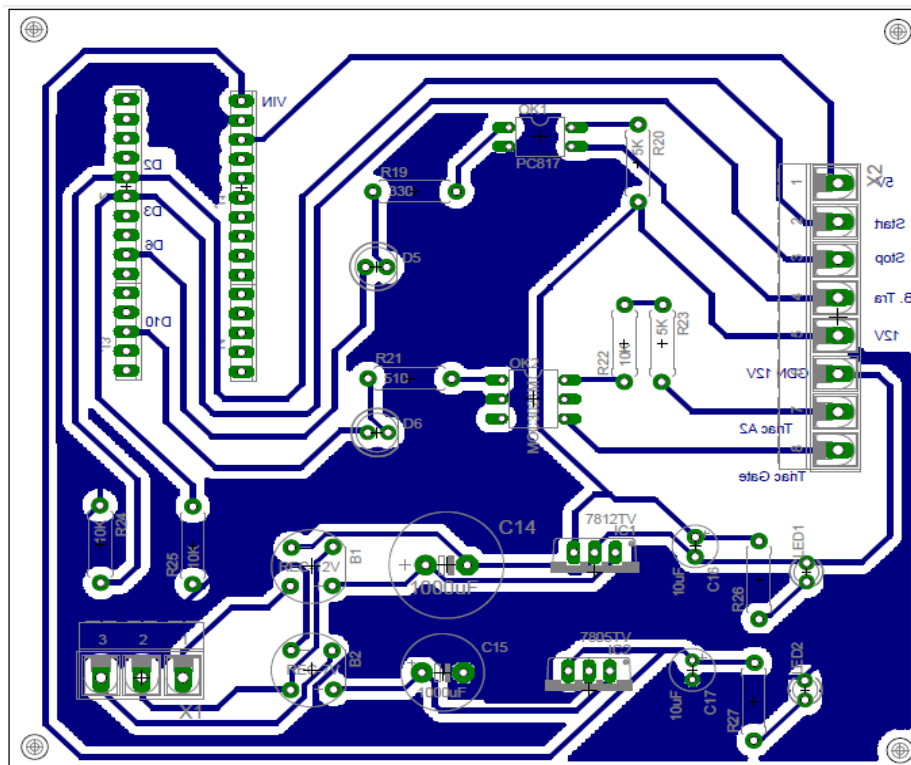
  while(aux0==1&&digitalRead(stop0)==LOW){
    digitalWrite(pulso40,HIGH);
    delay(44);
    digitalWrite(pulso40,LOW);
    delay(2);
    digitalWrite(pulso2,HIGH);
    delay(2);
    digitalWrite(pulso2,LOW);
    delay(2);
  }

  if(digitalRead(stop0)==HIGH){
    aux0=0;
  }

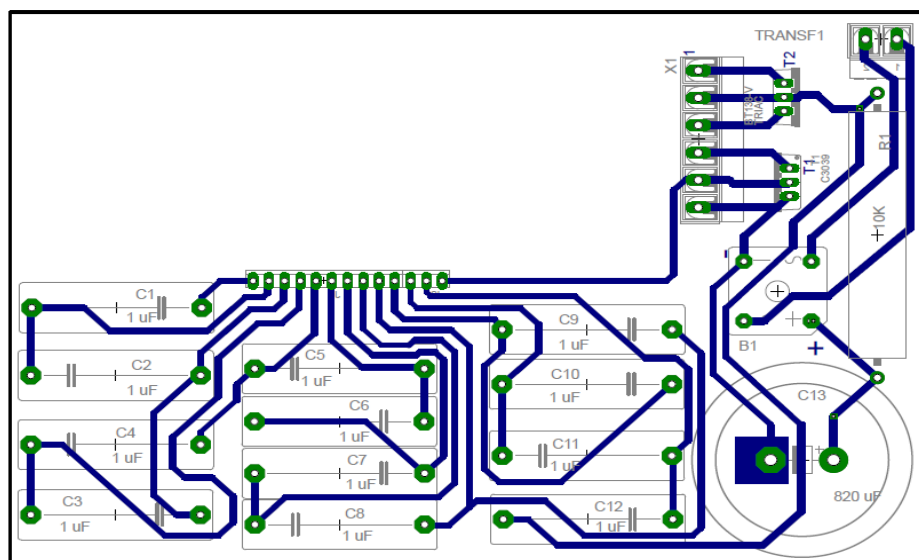
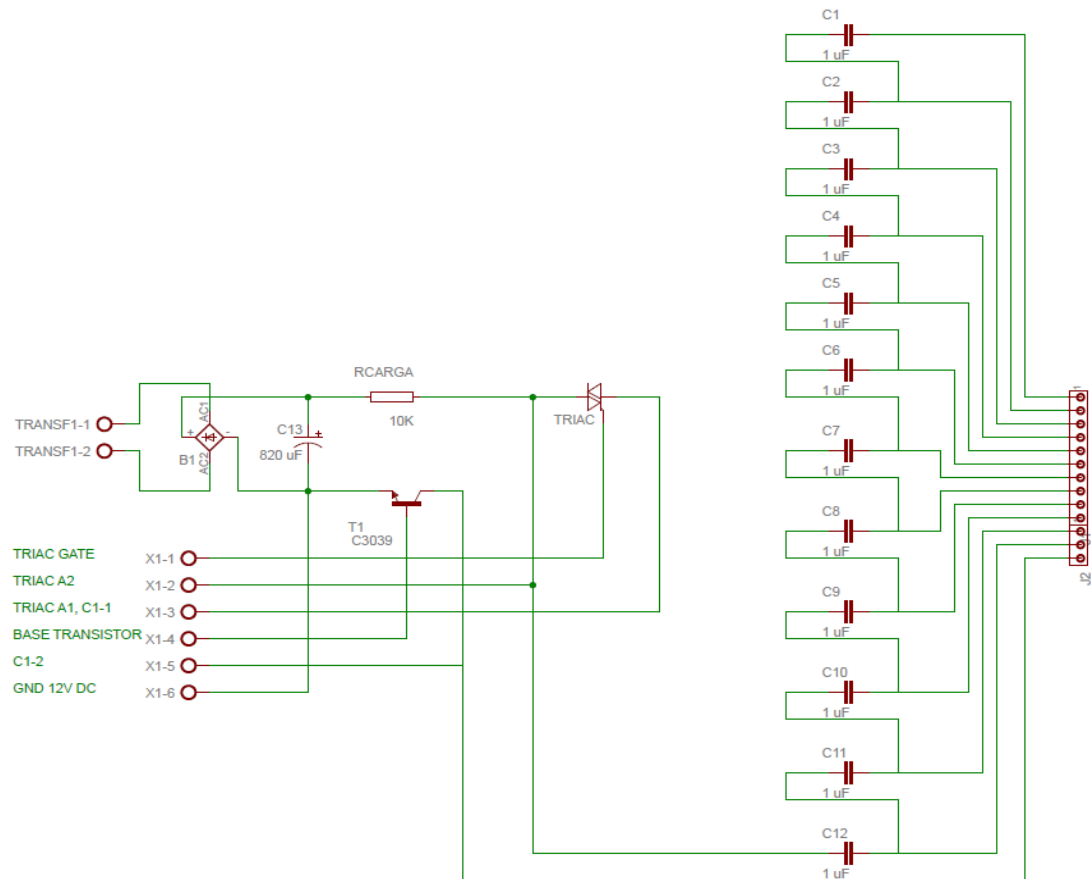
}
```

Anexo B. Esquemático y circuito impreso del sistema de control, acoplamiento de señal y fuentes reguladas de DC.

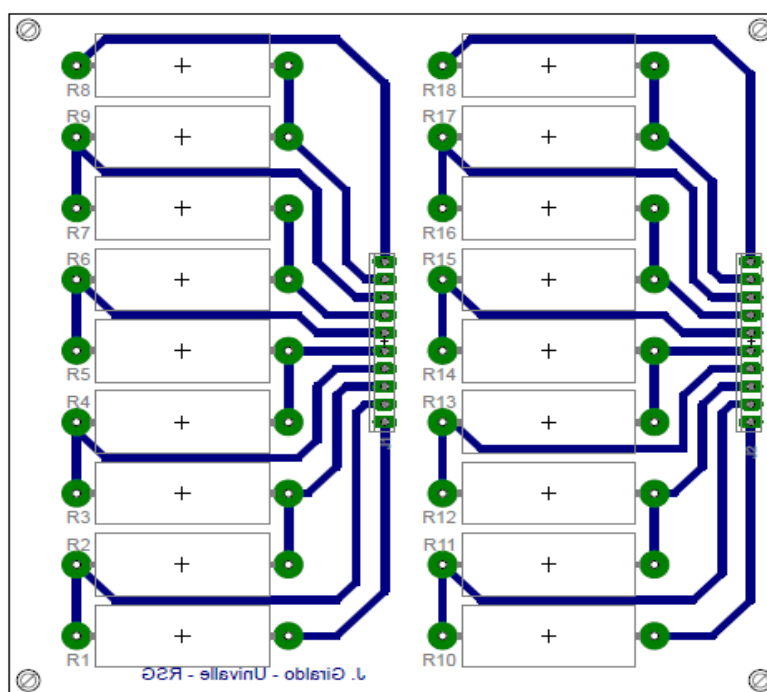
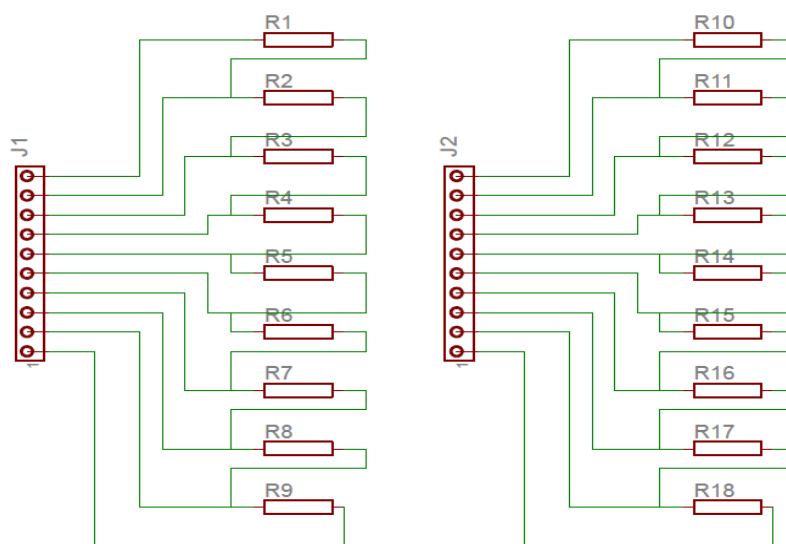




Anexo C. Esquemático y circuito impreso de la fuente de alimentación, elementos de potencia y arreglo de condensadores.



Anexo D. Esquemático y circuito impreso del arreglo de resistencias de frente y cola.



Anexo E. Diseño del panel de control y posterior.

