

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
Santiago - Chile



DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE MÉTODO
ALTERNATIVO DE GENERACIÓN DE UN
IMPULSO TIPO MANIOBRA A BAJA TENSIÓN
CONTROLADO POR SEMICONDUCTORES
IGBT Y UTILIZANDO UN TRANSFORMADOR
ELEVADOR DE ALTA FRECUENCIA

JOAQUÍN ANDRÉS PÉREZ TSUKAME

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA

Profesores Guías
PhD. Jorge Ardila Rey
PhD. Antonio Sánchez Squella

2 de julio de 2018

*Si le pides a Dios un árbol
te lo dará en forma de semilla*
-Anónimo.

Agradecimientos

A quienes agradezco primero es a mis padres, Anselmo y Keiko, por creer en mi al emprender esta carrera, por la paciencia, confianza y amor durante todos estos años que demoré, a pesar de las caídas y los momentos de duda, siempre me dieron su apoyo y ánimo para seguir.

A mis hermanos Felipe y Anselmo, con quienes viví y compartí distintos momentos de mi formación académica y con quienes aprendí a vivir acá en Santiago

A Bárbara, mi polola, por su apoyo y paciencia durante los tiempos de estudio, por su amor y compañía durante todos estos años y por ser parte íntegra de mi vida.

A todos mis amigos que pude hacer y conocer por mi paso en la universidad, por ayudarme a resolver dudas, por muy básicas que fueran, y por hacer más llevaderas y amenas las jornadas de estudio, trabajos, informes y laboratorios que tuvimos que realizar. Por los asados, cerritos o por las excusas para simplemente juntarnos y celebrar y por último, por toda su ayuda en el proceso de realización y escritura de mi memoria.

A Romina, Don Gerardo y Carlos, gracias por la ayuda brindada a cada consulta que les hacía y por compartir conmigo sus conocimientos y anécdotas de vida, fueron un gran apoyo mientras trabajaba en el laboratorio.

Y finalmente agradezco a mis profesores guías, Jorge Ardila, por proponerme el tema de mi memoria y darme la oportunidad de trabajar a mis anchas en el laboratorio y a Antonio Sanchez, por confiarme desde el primer día todos los instrumentos y equipos necesarios para la realización de los experimentos, muchas gracias a ambos.

Resumen

El generador tradicional para el ensayo impulso tipo maniobra, requiere de especial cuidado en la sincronización del disparo de los explosores de esferas, los cuales se ven afectados por las condiciones ambientales donde se realiza el ensayo.

El presente trabajo de título tiene por objetivo principal el diseño e implementación de un método alternativo para la generación del ensayo impulso tipo maniobra, consistiendo en generar una señal de baja tensión, controlada por semiconductores IGBT, que posteriormente es elevada a alta tensión por un transformador, el uso de semiconductores aísla al circuito de las condiciones ambientales.

El generador de impulso implementado es analizado por medio de la representación simplificada y lineal del circuito, que permite una estimación de los valores de los componentes del circuito y de la señal de salida. Para operar el circuito un sistema de control para enviar los pulsos de disparo que cambian los estados de conducción de los IGBT's.

El impulso obtenido en el lado de alta tensión del transformador cumple con las exigencias dadas por el norma IEC 60060, concluyéndose la implementación exitosa del circuito, haciendo al circuito generador más compacto, transportable y libre de interferencias causadas por las condiciones ambientales.

Los experimentos se realizaron en el Laboratorio del Departamento de Ingeniería Eléctrica, de la Universidad Técnica Federico Santa María, Campus San Joaquín.

Abstract

The traditional generator circuit for the switching impulse test requires special care in the synchronization of the triggering of the spark gaps, which are affected by the environmental conditions where the test is performed.

The main objective of this title work is the design and implementation of an alternative method for the generation of the switching impulse test, consisting of generating a low voltage signal, controlled by IGBT semiconductors, which is then raised to high voltage by a transformer, the use of semiconductors isolates the circuit from environmental conditions.

The implemented impulse generator is analyzed by means of the simplified and linear representation of the circuit, which allows an estimation of the values of the components of the circuit and of the output signal. To operate the circuit, a control system is used to send triggering pulses that change the driving states of the IGBT's.

The impulse signal obtained on the high voltage side of the transformer complies with the requirements given by IEC 60060, concluding the successful implementation of the circuit, making the generator circuit more compact, transportable and free of interference caused by environmental conditions.

The experiments were carried out in the Laboratory of the Department of Electrical Engineering, Technical University Federico Santa Maria, Campus San Joaquin.

Nomenclatura

$IGBT$: Insulated Gate Bipolar Transistor.

T_p : Time to peak / Tiempo de frente.

T_2 : Time to half-value / Tiempo de cola.

T_d : Time above 90 %.

R_x : Resistencia x.

C_x : Condensador x.

L_m : Inductancia de magnetización.

L_σ : Inductancia de dispersión.

η : Eficiencia de tensión.

AC : Alternating Current.

DC : Direct Current.

Índice general

Lista de figuras	VIII
Lista de tablas	X
1. Introducción	1
2. Revisión Bibliográfica	3
2.1. Ensayo impulso tipo maniobra	3
2.1.1. Impulso tipo maniobra aperiódico	4
2.1.2. Impulso tipo maniobra oscilatorio	5
2.1.3. Tolerancias del impulso tipo maniobra estándar	6
2.2. Métodos de generación del impulso	7
2.2.1. Generación de impulso aperiódico	7
2.2.2. Generación de impulso oscilatorio	10
2.2.3. Método de inicio de descarga del circuito generador	11
2.2.4. Consideraciones ambientales y factores de corrección	12
2.3. Método de generación utilizado	14
3. Modelo matemático del circuito	16
3.1. Modelo matemático del circuito	16
3.2. Sensibilidades del circuito	19
3.2.1. Variación del condensador C_1	20
3.2.2. Variación de la resistencia R_1	21
3.2.3. Variación de la resistencia R_2	22
3.2.4. Variación del condensador C_2	23
3.2.5. Variación de la inductancia magnetizante L_m	24
3.2.6. Parámetros variables	25
3.3. Selección de los elementos del circuito	25
4. Circuito de control	29
4.1. Sistema de control	29
4.1.1. Control digital	29
4.2. Hardware utilizado	31
4.2.1. Semiconductores IGBT	31
4.2.2. Driver	31

4.2.3. Controlador	32
4.3. Ensayos del sistema de control	33
5. Implementación y prototipo construido	36
5.1. Prototipo construido	36
5.2. Transformador elevador	37
5.2.1. Medición de resistencia de devanados	38
5.2.2. Ensayo de Vacío	38
5.2.3. Ensayo de cortocircuito	39
5.2.4. Modelo equivalente del transformador	40
5.3. Circuito generador del impulso	42
5.3.1. Circuito de carga	42
5.3.2. Circuito de Descarga	44
5.4. Prototipo y circuito de control implementados	45
6. Resultados experimentales	47
6.1. Resultados obtenidos	47
6.2. Tensiones fase neutro	49
6.2.1. Desempeño del impulso	51
6.3. Tensiones entre líneas	52
6.3.1. Desempeño del impulso	54
6.4. Comparación entre simulaciones y mediciones	55
6.5. Análisis de resultados obtenidos	57
7. Conclusiones	58
7.1. Trabajos futuros	60
Anexos	63
A. Códigos utilizados	64
A.1. Código de solución numérica al modelo matemático	64
A.2. Código de combinatorias realizadas para encontrar set de parámetros ideales	66
A.3. Código de control digital	69

Índice de figuras

1.1. Circuito generador de Marx.(Fuente: High Voltage Engineering, C. L. Wadhwa)	1
2.1. Señal de impulso tipo maniobra de tipo aperiódico y sus tiempos característicos.(Fuente: Norma IEC 60060-3)	4
2.2. Señal de impulso tipo maniobra oscilatorio y sus tiempos característicos.(Fuente: Norma IEC60060-3)	5
2.3. Circuito de una etapa para la generación del ensayo impulso.	7
2.4. Circuito Marx de 4 etapas. (Fuente:Técnicas de alta tensión, técnicas y aplicaciones)	9
2.5. Circuito de generación de impulso maniobra oscilatorio.	10
2.6. Esquema de electrodo auxiliar en el explosor de esferas.(Fuente: High Voltage Engineering, C.L. Wadhwa)	11
2.7. Circuito generador de impulso tipo maniobra utilizado.	14
2.8. Esquema de los procesos de carga y descarga del circuito generador del impulso.	15
3.1. Circuito completo del método de generación utilizado.	16
3.2. Circuito de impulso reducido para su análisis matemático.	17
3.3. Sensibilidad de la señal de salida con respecto al parámetro C_1	20
3.4. Sensibilidad de la señal de salida con respecto al parámetro R_1	21
3.5. Sensibilidad de la señal de salida con respecto al parámetro R_2	22
3.6. Sensibilidad de la señal de salida con respecto al parámetro C_2	23
3.7. Sensibilidad de la señal de salida con respecto al parámetro L_m	24
3.8. Eficiencia de tensión versus error porcentual de tiempos de subida y bajada para los distintos set de parámetros evaluados.	26
3.9. Eficiencia de tensión versus error porcentual de tiempos de subida y bajada, zona de set escogido.	27
3.10. Señal de tensión del ensayo impulso en la inductancia magnetizante del transformador, referido al lado de baja tensión.	28
4.1. Diagrama de flujo del sistema de control.	30
4.2. Señales de control y señales de pulsos de disparo enviados a los semiconductores.	33

4.3. Señal de disparo para IGBT1 y señal de tensión de carga del condensador C1.	34
4.4. Señal de disparo para IGBT2 y señal de tensión de impulso del condensador C2.	35
5.1. Vista superior del transformador, se aprecian los bornes de alta y baja tensión.	37
5.2. Curva de vacío del transformador utilizado.	39
5.3. Curvas de cortocircuito para los 3 devanado por separado.	40
5.4. Modelo completo del transformador y modelo utilizado.	41
5.5. Esquema del circuito de Carga.	42
5.6. Circuito de Carga, tarjeta prototipo.	43
5.7. Circuito esquemático de descarga.	44
5.8. Circuito de Descarga, tarjeta prototipo.	44
5.9. Circuito generador construido incluyendo los IGBT's.	45
5.10. Prototipo del circuito generador de impulso tipo maniobra implementado.	46
6.1. Conexión del transformador utilizado para la generación del impulso de maniobra.	48
6.2. Señales de tensión del ensayo impulso, lado de alta tensión X1X0 . . .	49
6.3. Señales de tensión del ensayo impulso, lado de alta tensión X2X0 . . .	50
6.4. Señales de tensión del ensayo impulso, lado de alta tensión X3X0 . . .	50
6.5. Señales de tensión del ensayo impulso, lado de alta tensión X1X2 . . .	52
6.6. Señales de tensión del ensayo impulso, lado de alta tensión X3X1 . . .	53
6.7. Señales de tensión del ensayo impulso, lado de alta tensión X3X2 . . .	53
6.8. Impulso simulado y medido para una fase del lado estrella.	55

Índice de tablas

2.1. Tolerancias aceptables con respecto al estándar 250/2500 para un impulso tipo maniobra.	6
2.2. Valores mínimos y máximos para el tiempo de frente y cola del impulso tipo maniobra estándar.	6
3.1. Set de valores iniciales para analizar la sensibilidad de la señal de salida.	19
3.2. Set de parámetros ideales para la generación del impulso maniobra. . .	28
4.1. Características más relevantes del IGBT utilizado.	31
4.2. Valores de tensión del driver utilizado.	32
4.3. Características de tarjeta Arduino utilizada.	32
5.1. Instrumentos utilizados para la realización de los ensayos del transformador.	37
5.2. Medición de resistencias de devanado, lado estrella.	38
5.3. Medición de resistencias de devanado, lado delta.	38
5.4. Valores nominales de vacío del transformador.	38
5.5. Valores nominales para el ensayo de cortocircuito.	39
5.6. Inductancia de dispersión para cada devanado ensayado	39
5.7. Medición de capacitancias a tierra, lado de alta tensión	41
5.8. Medición de capacitancias a tierra, lado de baja tensión	41
5.9. Set de parámetros ideales del circuito generador.	42
5.10. Valores de los componentes utilizados para la implementación del circuito de descarga.	42
5.11. Valores reales de los componentes del circuito de descarga.	45
6.1. Tensiones máximas del devanado de baja y alta tensión del transformador para el ensayo impulso tipo maniobra.	51

Capítulo 1

Introducción

Conocer como se desempeñan los sistemas de aislación de los equipos es fundamental para tener una operación segura y confiable, para ello se realizan los ensayos tipo, con el objetivo de verificar y comprobar que el equipo en cuestión sea capaz de operar en todas las condiciones para las cuales fue diseñado.

El ensayo impulso tipo maniobra es uno de esos ensayos tipo, correspondiente a los ensayos de aislación y es aplicado en diversos equipos tales como: Transformadores, Interruptores, Aisladores de cerámica o vidrio y Bushings entre otros. Su finalidad es comprobar que el material aislante sea capaz de mantener su integridad ante una sobretensión transitoria provocada por la operación de interruptores y seccionadores producto de la conexión o desconexión de algún elemento de la red.

Para generar la señal de tensión, comúnmente se utiliza el circuito generador de Marx, que se muestra en la Figura 1.1.

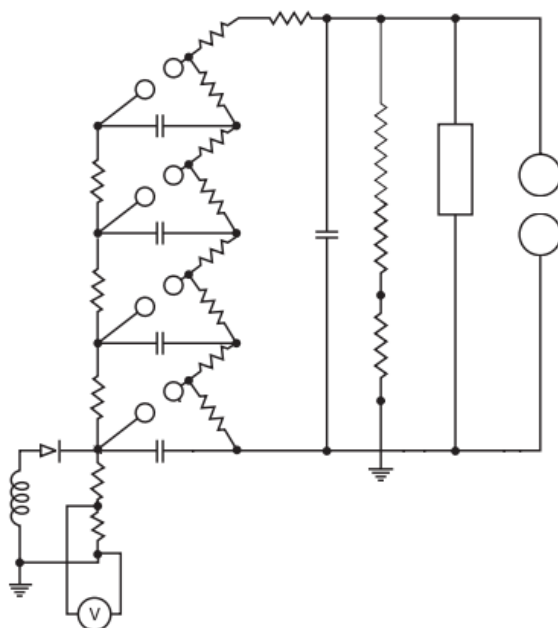


Figura 1.1: Circuito generador de Marx.(Fuente: High Voltage Engineering, C. L. Wadhwa)

Por cada etapa que posea el circuito, se utiliza un explosor de esferas. Estos deben ser accionados para generar de manera correcta el impulso, por lo cual la sincronización de los disparos de cada explosor es de suma importancia. El disparo de los explosores se ve influenciado por las condiciones ambientales a las cuales están expuestos, como viento, partículas en suspensión, humedad del aire, temperatura, presión atmosférica, entre otros. Por ello el poder aislar al circuito generador de todas las condiciones antes nombradas resulta interesante y beneficioso.

En este trabajo de título se diseña e implementa un circuito generador de impulso tipo maniobra que no estaría afecto a las condiciones ambientales, debido a que en vez de utilizar explosores de esferas, se utilizan semiconductores IGBT, además el circuito generador del impulso es operado en baja tensión y luego elevado por medio de un transformador, para así obtener un impulso normalizado en el lado de alta tensión del equipo.

El trabajo tiene la siguiente estructura:

Capítulo 2, se realiza una revisión de los distintos métodos de generación del ensayo y las definiciones dadas por la norma internacional IEC, para luego presentar el método de generación que se implementará.

Capítulo 3, se analiza y se establece un modelo matemático que representa al circuito generador utilizado, para poder predecir la señal de salida según los distintos valores de los componentes.

Capítulo 4, se seleccionan los componentes del sistema de control, requerido para el accionamiento de los IGBT, y se programa la rutina de los procesos para generar el impulso.

Capítulo 5, se seleccionan los componentes del circuito, según el transformador utilizado, dados por el modelo matemático y se construye el prototipo que será utilizado para generar el impulso de tensión.

Capítulo 6, se realizan los ensayos en laboratorio y se registran las señales de tensión en bornes del transformador, comprobando el buen funcionamiento de acuerdo a lo estimado.

Capítulo 7, se recogen las conclusiones generales del trabajo donde se destacan los objetivos cumplidos en este trabajo de título.

Capítulo 2

Revisión Bibliográfica

2.1. Ensayo impulso tipo maniobra

El ensayo impulso maniobra es un tipo de prueba aplicada a una variedad de dispositivos, como aisladores de cerámica y vidrio, bushings, soportes de conductores y transformadores entre otros, que requieran operar y soportar sobretensiones transitorias durante su vida útil. Estos requerimientos son necesarios para equipos sobre $300 [kV]$, los cuales se ven más afectados por este tipo de fenómenos [1].

Un impulso tipo maniobra corresponde a una sobretensión transitoria de frente lento, de corta duración, unidireccional y altamente amortiguado producido por la operación de un interruptor o cambios en la topología de la red generada por fallas en la misma [2].

El tiempo que tarda en llegar al valor máximo (tiempo de frente) es comparativamente menor al tiempo de duración total de la señal. A los impulsos con un tiempo de frente mayor a $20 [\mu s]$, se les denomina impulsos de maniobra [3] y según sea la naturaleza del dispositivo a ensayar, la señal de impulso puede ser aperiódica o bien oscilatoria, esta última se da generalmente cuando hay presente una alta inductancia en el objeto ensayado.

2.1.1. Impulso tipo maniobra aperiódico

La señal de impulso tipo maniobra de característica aperiódica, corresponde a una señal que se eleva rápidamente a su valor máximo y que luego cae lentamente hasta un valor cero.

En la Figura 2.1 se muestra la forma de onda típica para este impulso y la identificación de sus tiempos característicos.

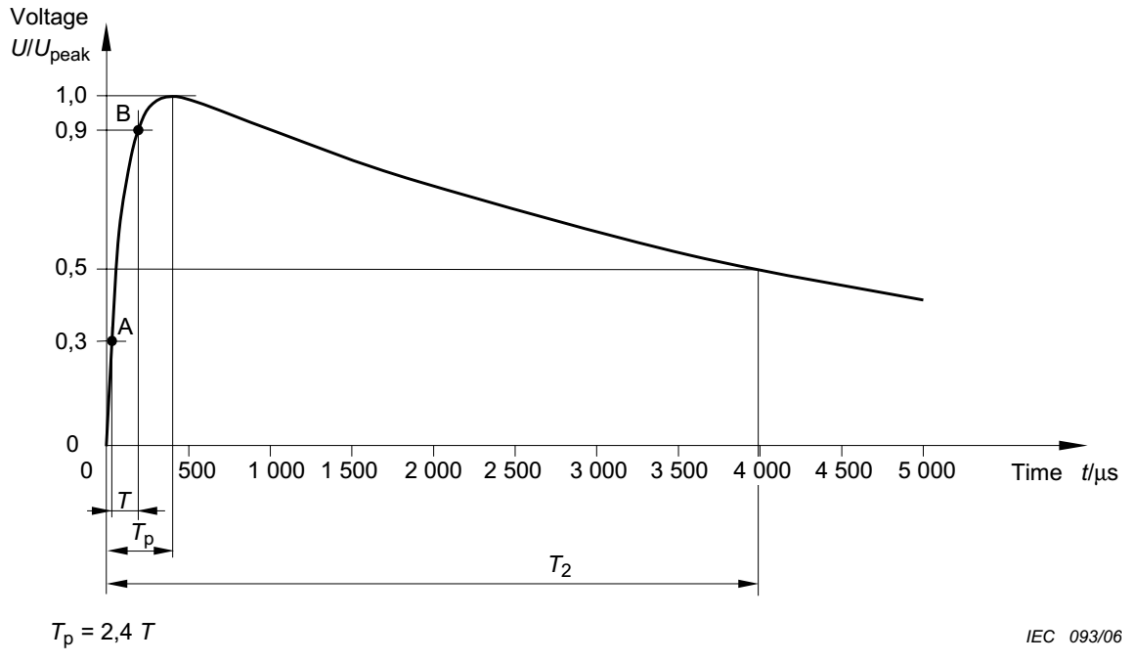


Figura 2.1: Señal de impulso tipo maniobra de tipo aperiódico y sus tiempos característicos. (Fuente: Norma IEC 60060-3)

En la Figura 2.1, se define T_p como el tiempo desde el origen hasta el momento que se alcanza la tensión máxima del impulso y T_2 como el tiempo en el cual una vez que la tensión comienza a decrecer, se alcanza la mitad de la tensión máxima.

Al momento de utilizar un transformador en el circuito generador o como objeto de ensayo, se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones [5]:

- El tiempo de frente debe ser de al menos $100 [\mu s]$.
- El tiempo durante el cual la tensión permanece sobre el 90 % de la tensión máxima (T_d), debe ser de a lo menos $200 [\mu s]$.
- El tiempo en el cual la señal cae hasta un valor cero debe ser como mínimo de $1000 [\mu s]$.

Lo anterior debido a que el ensayo estándar, dado por la norma IEC, no considera un circuito magnético saturable, por lo que incluir estos tiempos mínimos asegura una distribución lineal a lo largo de los devanados.

2.1.2. Impulso tipo maniobra oscilatorio

Un impulso oscilatorio corresponde a una señal que rápidamente crece a un valor peak y luego decae oscilando amortiguadamente hasta un valor cero. La frecuencia de oscilación que presenta debe estar entre $1 [kHz]$ y $15 [kHz]$ [4], ejemplo de ello se observa en la Figura 2.2.

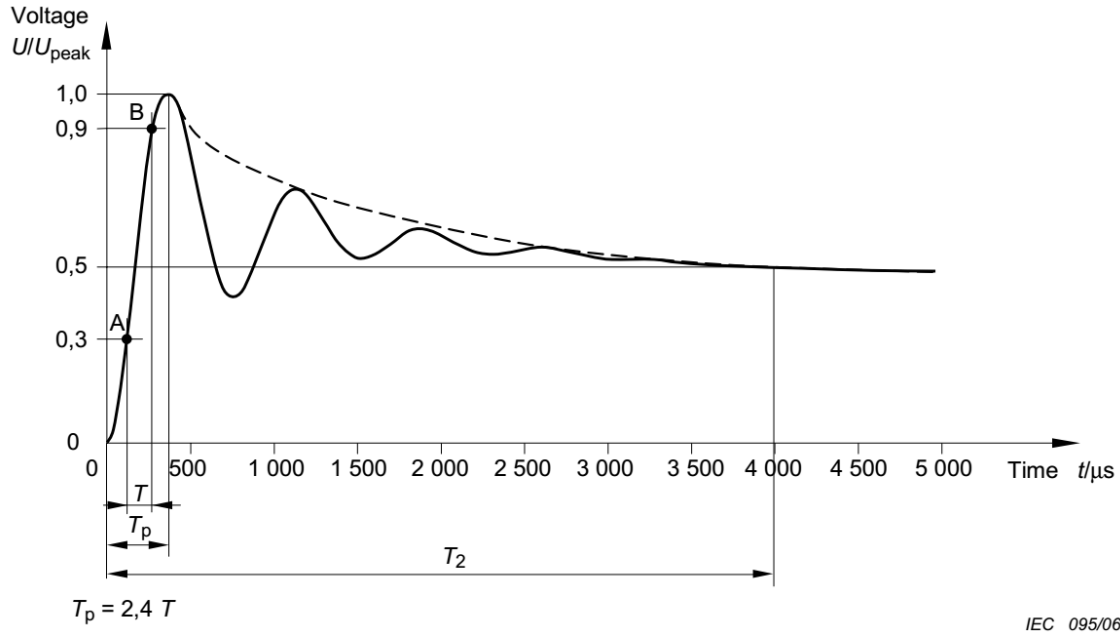


Figura 2.2: Señal de impulso tipo maniobra oscilatorio y sus tiempos característicos. (Fuente: Norma IEC60060-3)

Para este tipo de impulso los tiempos característicos (T_p , T_2 y T_d), son medidos de igual forma que para el impulso aperiódico, solo que para este caso se realizan con respecto a la envolvente de la señal.

2.1.3. Tolerancias del impulso tipo maniobra estándar

El impulso tipo maniobra estándar dado por la norma internacional IEC 60060 define un tiempo de frente de $250 [\mu s]$ y un tiempo de cola de $2500 [\mu s]$, dando también cotas para el valor máximo de tensión, tiempo de frente y tiempo de cola [3], como se muestra en la Tabla 2.1:

Valor de tensión	$\pm 3 \%$
Tiempo de frente	$\pm 20 \%$
Tiempo de cola	$\pm 60 \%$

Tabla 2.1: Tolerancias aceptables con respecto al estándar 250/2500 para un impulso tipo maniobra.

Los valores extremos para el tiempo de frente y cola admisibles se presentan en la Tabla 2.2:

	Valor mínimo $[\mu s]$	Valor máximo $[\mu s]$
Tiempo de frente	200	300
Tiempo de cola	1000	4000

Tabla 2.2: Valores mínimos y máximos para el tiempo de frente y cola del impulso tipo maniobra estándar.

2.2. Métodos de generación del impulso

La norma IEC 60060-1 define dos tipos de impulso maniobra, aperiódico y oscilatorio, los cuales tienen distintos métodos de generación. A continuación se revisarán las topologías que permiten generar estos impulsos de tensión.

2.2.1. Generación de impulso aperiódico

Para la generación de este tipo de impulso se utiliza un arreglo de condensadores y resistencias, una fuente de alta tensión continua y un explosor de esferas, como se muestra a continuación en la Figura 2.3.

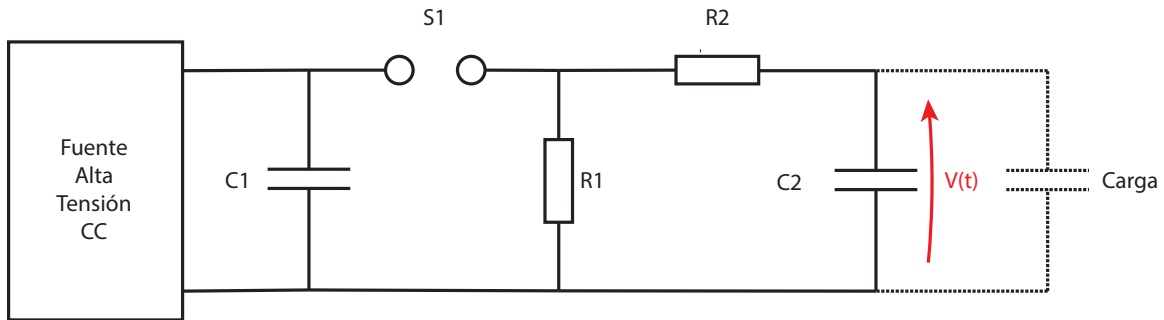


Figura 2.3: Circuito de una etapa para la generación del ensayo impulso.

Para este tipo de topología, la fuente de alta tensión esta compuesta por un transformador y un puente rectificador para alimentar con alta tensión continua al circuito generador.

El funcionamiento del circuito generador de una etapa es el siguiente:

1. **Etapa de Carga:** El condensador $C1$ es cargado por medio de la fuente de alta tensión continua hasta la tensión específica para el ensayo. Para evitar la conducción eléctrica en el explosor ($S1$), se fija una distancia entre los electrodos, tal que, no haya conducción en el dieléctrico que separa los electrodos.
2. **Conducción del explosor:** Cargado ya el condensador $C1$, es necesario energizar el resto del circuito y generar el impulso deseado. Para iniciar la conducción eléctrica a través del dieléctrico, se eleva la tensión, se disminuye la distancia entre electrodos o bien se excita al explosor de esferas por medio de un circuito externo que provoca el inicio de la conducción.
3. **Etapa de Descarga:** El explosor de esferas entra en estado de conducción, el condensador $C1$ energiza el resto del circuito y las resistencias $R1$ y $R2$ dan la dinámica requerida a la tensión de salida que se manifiesta en terminales del condensador $C2$.

Generador impulso de una etapa

El circuito consta de una fuente de alta tensión continua, un circuito de carga y descarga separados por el explosor de esferas y un objeto de ensayo, representado comúnmente como una capacitancia pura, como el mostrado en la Figura 2.3.

La fuente de alimentación de corriente continua, típicamente está constituida por un transformador monofásico, diodos de alta tensión para rectificar la señal y sus correspondientes resistencias limitadoras de corriente. La fuente es conectada al condensador C1 para cargarlo y además el condensador ayuda alisar la señal de tensión, obteniendo un menor ripple.

Una vez que el capacitor C1 (condensador de carga) está completamente cargado a la tensión deseada, el explosor (S1) es accionado, de manera mecánica o eléctrica, para energizar el circuito de descarga y así obtener la señal impulso deseada en los bornes del condensador C2 [6].

La dinámica de la señal de tensión en C2 se describe como la suma de dos señales exponenciales de distintos tiempos de decaimiento, la primera de ellas corresponde a la dinámica del condensador C2 y la resistencia de frente R1, con lo cual se determina el tiempo de llegada al valor máximo de tensión de la señal de salida. La segunda componente exponencial está determinada por la resistencia R2 y corresponde al tiempo de decaimiento de la señal, una vez que ha alcanzado su valor máximo.

Generador impulso de múltiples etapas

Este tipo de generador es requerido para trabajar con tensiones sobre los 300 [kV], su funcionamiento es bastante similar al generador de una etapa, la mayor diferencia está en la estructura física y las precauciones que deben tenerse al momento de su operación.

La topología del circuito se muestra en la Figura 2.4, los condensadores de las distintas etapas son cargados de manera simultánea a una fracción de la tensión deseada para el ensayo.

Una vez cargados los condensadores, el primer explosor de esferas (S1) es accionado provocando un efecto en cascada de la activación de los demás explosores, quedando todos los condensadores en serie y sumando las tensiones individuales de cada uno de ellos.

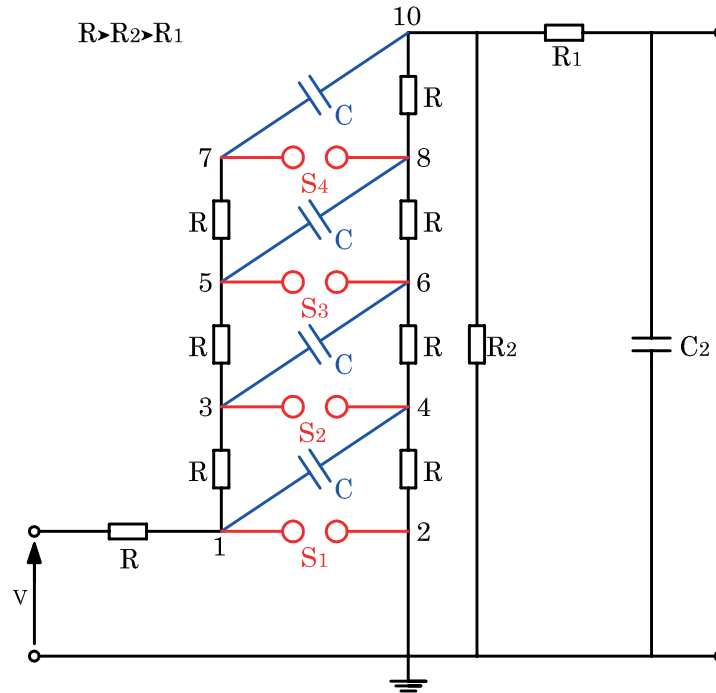


Figura 2.4: Circuito Marx de 4 etapas. (Fuente: Técnicas de alta tensión, técnicas y aplicaciones)

Durante el proceso de carga del circuito mostrado en la Figura 2.4, los terminales impares tienen una diferencia de potencial igual a la de la fuente de alimentación y los terminales pares a la tensión de tierra. Así una vez que se activa el primer espinterómetro (S_1), la tensión en el explosor S_2 corresponde a 2 veces la tensión de fuente y entra en conducción, esto ocurre de manera sucesiva con todas las etapas que le siguen. Una vez que todos los explosores son activados se alcanza un nivel de tensión en C_2 igual a la tensión de carga de los condensadores multiplicada por la cantidad de etapas que el circuito posea.

La buena sincronización de los explosores asegura la calidad del ensayo, es por esto que es necesario que sean accionados de manera secuencial, las condiciones ambientales en las cuales el equipo es utilizado afectan el desempeño de la sincronización, por ejemplo, el material particulado en suspensión puede provocar la acción errática de los explosores y las condiciones ambientales provocan variaciones en la tensión de ruptura del aire, por lo que deben tomarse en cuenta estos factores al momento de operar el circuito.

2.2.2. Generación de impulso oscilatorio

Para la generación de este tipo de impulso es necesaria la inclusión de una inductancia, la cual genera una respuesta oscilatoria en la señal de salida de tensión. La envolvente de esta señal que decae oscilante en el tiempo, posee la forma del impulso maniobra tradicional. En estos casos se utiliza una inductancia capaz de provocar una resonancia dentro de los límites de frecuencia de $1 [kHz]$ a $15 [kHz]$.

Un circuito para la obtención del impulso oscilatorio se muestra en la Figura 2.5. Con el fin de obtener el nivel de tensión requerido para el ensayo, se utiliza un transformador, alimentándolo en el lado de baja tensión y obteniendo la señal de impulso en el lado de alta tensión [7].

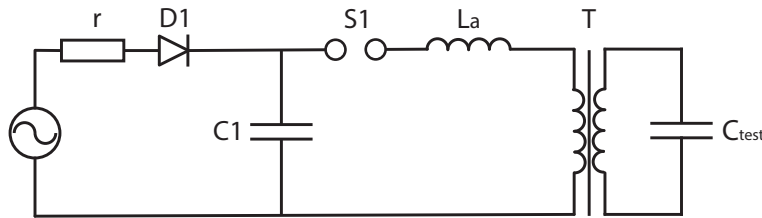


Figura 2.5: Circuito de generación de impulso maniobra oscilatorio.

En la Figura 2.5, r corresponde a la resistencia limitadora, $D1$ es el diodo rectificador de alta tensión, $C1$ es el condensador de carga, $S1$ es el explosor de esferas, L_a es la inductancia adicional, T el transformador y C_{test} es el objeto de ensayo.

El procedimiento para generar el impulso consiste en descargar un condensador en el devanado de baja tensión, al cual se le conecta una inductancia adicional para ajustar la frecuencia de oscilación y en el lado de alta tensión se evalúa el desempeño del bushing y aislación del equipo ante la señal impulso.

En esta topología también se utiliza un explosor de esferas como elemento seccionador del circuito, por lo que se debe ajustar la distancia de las esperas según las condiciones ambientales en las cuales el ensayo es realizado.

2.2.3. Método de inicio de descarga del circuito generador

Para los tipos de impulsos revisados en la sección anterior, así como para las diferentes topologías, es necesario controlar el momento y nivel de tensión al cual se produce la descarga del circuito, para así controlar la tensión del ensayo. A continuación se presentan las metodologías típicas del accionamiento del explosor de esferas que permiten controlar el momento de su entrada en conducción.

Descarga natural

La descarga del circuito se produce por la conducción del dieléctrico en el explosor de esferas, para una descarga natural los métodos ocupados son los siguientes:

- Ajustando la separación de las esferas a una distancia superior a la cual se inicia la descarga para la tensión alimentación del generador y luego disminuyendo la separación, para que entre en conducción.
- Ajustar la distancia de las esferas a la tensión de carga del circuito y luego elevar la tensión hasta que ocurra la ruptura para la distancia fijada.

Descarga con sistema auxiliar

Para tener un mayor control del momento en el cual el explosor entra en conducción, a una de las esferas se le agrega internamente un electrodo aislado que inicia la descarga del circuito, como se observa en la Figura 2.6.

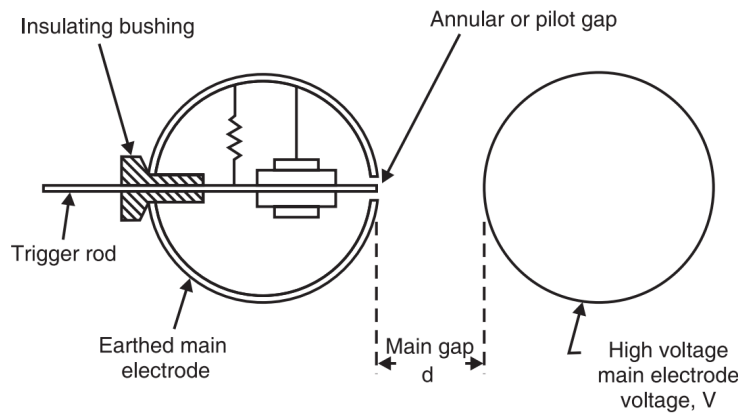


Figura 2.6: Esquema de electrodo auxiliar en el explosor de esferas. (Fuente: High Voltage Engineering, C.L. Wadhwa)

El electrodo aplica una diferencia de tensión, generalmente de 5 [kV], provocando la avalancha electrónica en el espacio entre las esferas, causando la ruptura del dieléctrico y posterior conducción eléctrica a través del aire.

2.2.4. Consideraciones ambientales y factores de corrección

Como se vio anteriormente, el explosor de esferas es un elemento común a todos los métodos de generación mencionados. El funcionamiento de este elemento depende de las condiciones ambientales en las cuales se realiza el ensayo, tales como: temperatura, humedad, viento e incluso partículas en suspensión.

Todos estos factores conllevan una corrección de la tensión de ruptura del aire dados por la norma IEC 60052. A continuación se presentan las influencias de estos factores:

Influencia de partículas de polvo

Cuando entre los electrodos del explosor hay presencia de partículas de polvo, pueden ocurrir disrupciones eléctricas erráticas. Las partículas se adhieren a los electrodos y son cargados con la misma polaridad de los terminales, acortando la distancia efectiva y provocando la conducción eléctrica a una tensión menor a la esperada.

Corrección por densidad del aire

Los cambios de temperatura y presión del aire crean variaciones de la densidad de este fluido, por lo cual debe aplicarse el siguiente factor de corrección [9]:

$$\delta = \frac{b}{b_0} \cdot \frac{273 + t_0}{273 + t} \quad (2.1)$$

Donde:

δ : Factor de corrección por densidad del aire.

b : Presión ambiental en kPa.

b_0 : Presión según condiciones estándar de ensayo en kPa.

t_0 : Temperatura según condiciones estándar de ensayo en °C.

t : Temperatura del laboratorio en °C.

Corrección por humedad

Los cambios en la humedad traen consigo un cambio en la rigidez dieléctrica del aire, por lo cual el factor de corrección para la humedad es [9]:

$$k = 1 + (0,002 \cdot (\frac{h}{\delta} - 8,5)) \quad (2.2)$$

Donde:

h : Humedad absoluta del ambiente en g/m^3 .

δ : Factor de corrección por densidad del aire.

Finalmente la tensión de ruptura del aire para las condiciones de temperatura, presión y humedad absoluta distintas a las estándares es:

$$U = U_0 (\delta \cdot k) \quad (2.3)$$

Donde:

U : Tensión de ruptura corregida.

U_0 : Tensión de ruptura en condiciones atmosféricas estándares.

δ : Factor de corrección por densidad del aire.

k : Factor de corrección por humedad.

Por las consideraciones antes mencionadas, la aplicación de ensayos de impulso en terreno es de especial atención, dado que en estos espacios las condiciones ambientales no son controlables al nivel que se puede obtener en laboratorio. Por esta razón es de gran interés poder aislar al circuito generador de impulso de toda interferencia externa.

2.3. Método de generación utilizado

El método de generación que se implementa en este trabajo utiliza un transformador elevador para obtener la señal impulso normalizada en bornes de alta tensión y generarla en el lado en baja tensión, todo el proceso controlado por electrónica de potencia a través de un sistema de control de lazo abierto.

En este circuito la señal impulso es generada en el lado de baja tensión del transformador y posteriormente es elevada a alta tensión. Los IGBT's utilizados cumplen la función de elementos seccionadores del circuito, emulando el funcionamiento del explorador de esferas en el circuito generador tradicional, y de controlar el proceso de generación del impulso.

El circuito propuesto es similar al presentado en [11] y se muestra en la Figura 2.7.

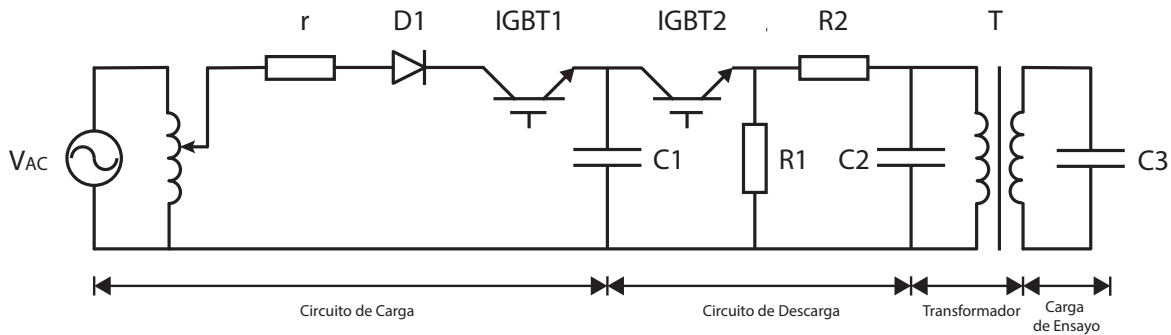


Figura 2.7: Circuito generador de impulso tipo maniobra utilizado.

En la Figura 2.7 se reconocen etapas o partes del circuito, la primera corresponde al circuito de carga, donde se distingue la fuente de tensión alterna y el circuito de rectificación, posteriormente se encuentra el circuito de descarga constituido por los condensadores $C1$ y $C2$ y las resistencias $R1$ y $R2$, seguido de esto se encuentra el transformador elevador y finalmente en terminales de alta tensión del transformador se tiene la señal de impulso deseada en el objeto de ensayo $C3$.

El proceso de generación del impulso para el circuito mostrado se describe a continuación:

1. Carga del condensador $C1$, por medio de un rectificador de media onda se genera una tensión DC y el condensador ($C1$) suaviza la señal tensión. El $IGBT1$ está en estado de conducción durante este proceso y el semiconductor de la derecha ($IGBT2$), se mantiene en estado de bloqueo en esta etapa.
2. Para iniciar la descarga del condensador $C1$ y energizar el circuito de descarga, el $IGBT1$ debe pasar a estado de bloqueo y así detener el proceso de carga. Inmediatamente el $IGBT2$ pasa al estado de conducción, comenzando proceso de descarga.
3. En terminales de baja tensión del transformador, se genera una tensión impulso que es amplificada por el transformador.

4. En terminales de alta tensión del transformador se induce una tensión de impulso maniobra con la amplitud, tiempo de frente y tiempo de cola correspondientes al impulso estándar 250/2500.

El proceso antes descrito es ilustrado en la Figura 2.8.

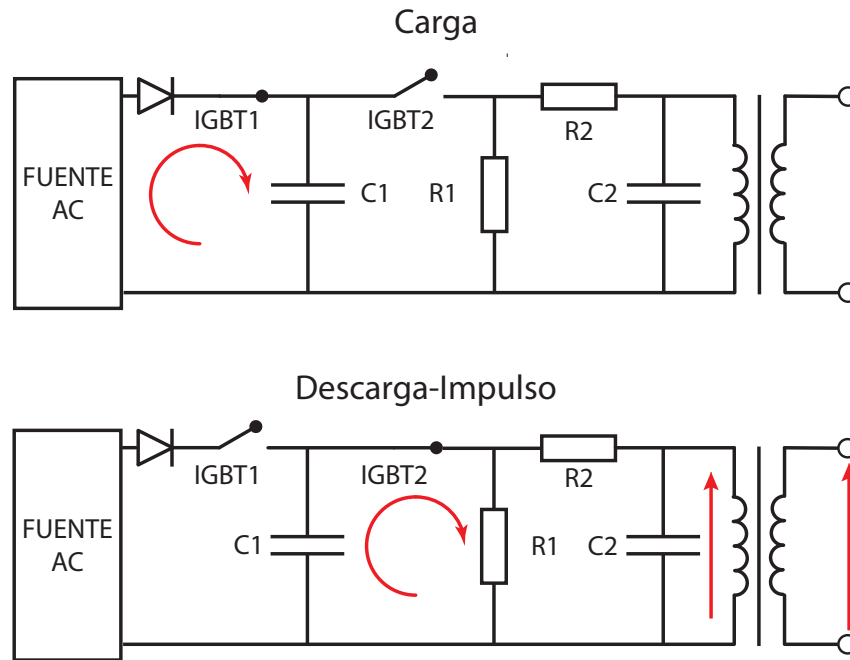


Figura 2.8: Esquema de los procesos de carga y descarga del circuito generador del impulso.

Capítulo 3

Modelo matemático del circuito

3.1. Modelo matemático del circuito

El circuito generador completo de la Figura 3.1, compuesto por una serie de elementos distintos que en conjunto generan el impulso deseado, puede analizarse de manera separada según sea el proceso de interés. Es así que para analizar la señal de tensión de salida del circuito, impulso maniobra en baja tensión, sólo se requiere del circuito de descarga, el transformado y el objeto de ensayo. A este modelo completo se le realizan una serie de simplificaciones y consideraciones para su representación matemática y de esa manera poder estimar la forma de onda de la señal de salida del circuito.

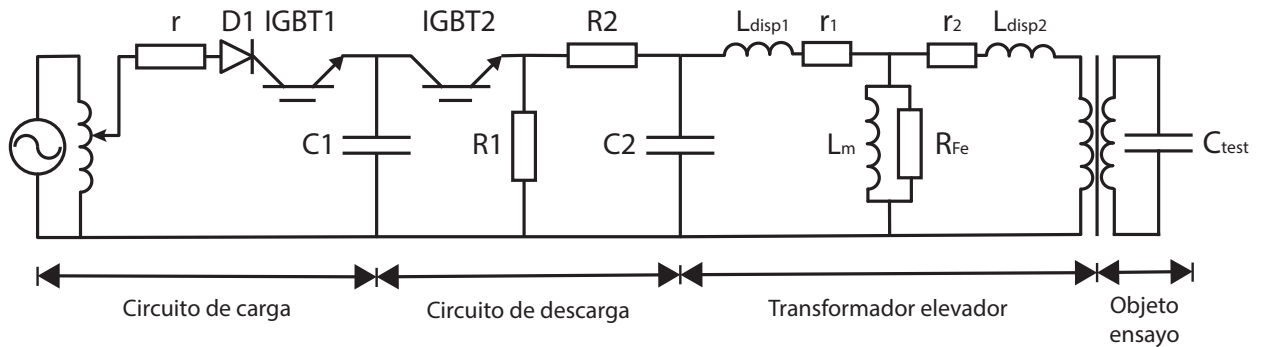


Figura 3.1: Circuito completo del método de generación utilizado.

Las simplificaciones aplicadas para el análisis del circuito son:

- Utilización de parámetros concentrados para representar cada elemento del circuito.
- Se desprecia la componente resistiva de los devanados del transformador.
- Se desprecia la componente resistiva que representa las pérdidas del núcleo ferromagnético.
- Se considera un comportamiento lineal del transformador.

- Se desprecia la capacitancia existente entre fase-neutro y entre fases en el lado de alta tensión del transformador.
- Se desprecia el lado derecho del modelo T del transformador, correspondiente a la resistencia e inductancia de dispersión, ya que se considera un funcionamiento en vacío del equipo.

Considerando las simplificaciones mencionadas anteriormente, la Figura 3.2 muestra el circuito a analizar.

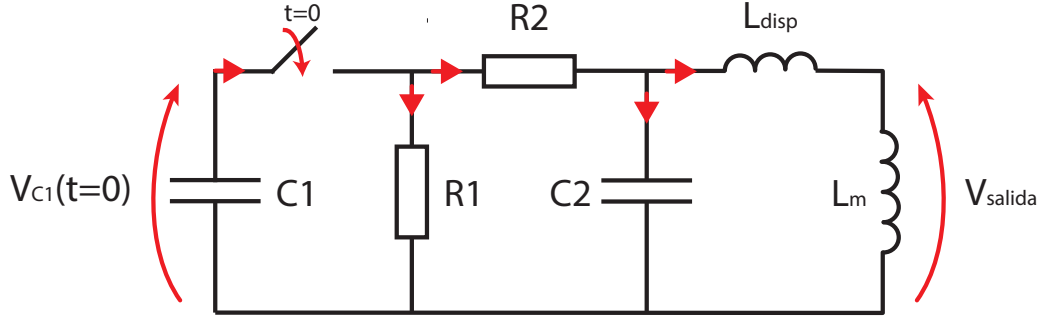


Figura 3.2: Circuito de impulso reducido para su análisis matemático.

El circuito de la Figura 3.2, que posee 2 condensadores y 1 inductancia, se puede modelar por una ecuación diferencial de tercer grado. La ecuación en función de la corriente de la inductancia magnetizante es:

$$\frac{d^3 i_L}{dt^3} \cdot R_2 C_1 C_2 L + \frac{d^2 i_L}{dt^2} \cdot \left(C_1 L + \frac{L R_2 C_2}{R_1} + C_2 L \right) + \frac{d i_L}{dt} \cdot \left(R_2 C_1 + \frac{L}{R_1} \right) + i_L \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) = 0 \quad (3.1)$$

Donde $L = L_m + L_{disp}$

Las condiciones iniciales de la ecuación 3.1 son:

$$i_{L_m}(t = 0) = 0 \quad (3.2)$$

$$\frac{d i_{L_m}}{dt}(t = 0) = 0 \quad (3.3)$$

$$\frac{d^2 i_{L_m}}{dt^2}(t = 0) = \frac{V_{carga}}{C_2 L R_2} \quad (3.4)$$

Para obtener la solución numérica de la ecuación diferencial [12] [13], se utiliza la función *ode45* de Matlab (El código utilizado para obtener la solución puede verse en el Anexo A.1), que entrega como solución un arreglo de 3 vectores con los valores de la corriente y sus dos derivadas, la solución obtenida es de la forma que se muestra a continuación:

$$y = \begin{bmatrix} i_L & \frac{d i_L}{dt} & \frac{d^2 i_L}{dt^2} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Para obtener la tensión en el lado de baja tensión del transformador, se debe expresar como la diferencia de potencial de una inductancia y para la tensión del lado de alta corresponde a la tensión de la inductancia magnetizante multiplicada por la relación de vueltas de los devanados.

$$V_{ImpulsoLV} = L \cdot \frac{di_L}{dt} \quad (3.6)$$

$$V_{ImpulsoHV} = \frac{N_{HV}}{N_{LV}} \cdot L_m \cdot \frac{di_L}{dt} \quad (3.7)$$

3.2. Sensibilidades del circuito

La señal de salida del circuito generador se ve afectada por los valores de los componentes del circuito, estos son los condensadores C_1 y C_2 , las resistencias R_1 y R_2 y la inductancia magnetizante L_m . Para evidenciar los efectos que estos causan sobre la señal de salida, se realizan cambios a los valores de los componentes del circuito y se grafican para ver como la señal es modificada.

Para ello se toma un set de valores iniciales de los elementos del circuito que en conjunto generan un impulso acorde a los tiempos de frente y cola, realizando variaciones de un parámetro a la vez, para reconocer los cambios en la señal de salida y en qué medida estos afectan al impulso.

Los valores iniciales utilizados son los siguientes:

C_1	R_1	R_2	C_2	L_σ	L_m
7,5 [μF]	1000 [Ω]	65 [Ω]	0,9 [μF]	0,13026 [mH]	1,3244 [H]

Tabla 3.1: Set de valores iniciales para analizar la sensibilidad de la señal de salida.

Estos valores corresponden los utilizados para la implementación del circuito, en conjunto generan un impulso lo más cercano posible al estándar 250/2500. La selección detallada de cada elemento se muestra en los siguientes capítulos.

Cabe destacar que el parámetro de inductancia de dispersión no se toma como una variable dado que el valor de esta es del orden de los 10^{-4} [H] a 10^{-3} [H], por lo cual no provoca una influencia considerable y no presenta variabilidad notoria entre distintos equipos.

3.2.1. Variación del condensador C_1

Se realizan variaciones del valor del condensador C_1 , mostrado en la Tabla 3.1, multiplicando este por 4, 2, 1, 0,5 y 0,25. Los resultados para los distintos casos se muestran en la Figura 3.3:

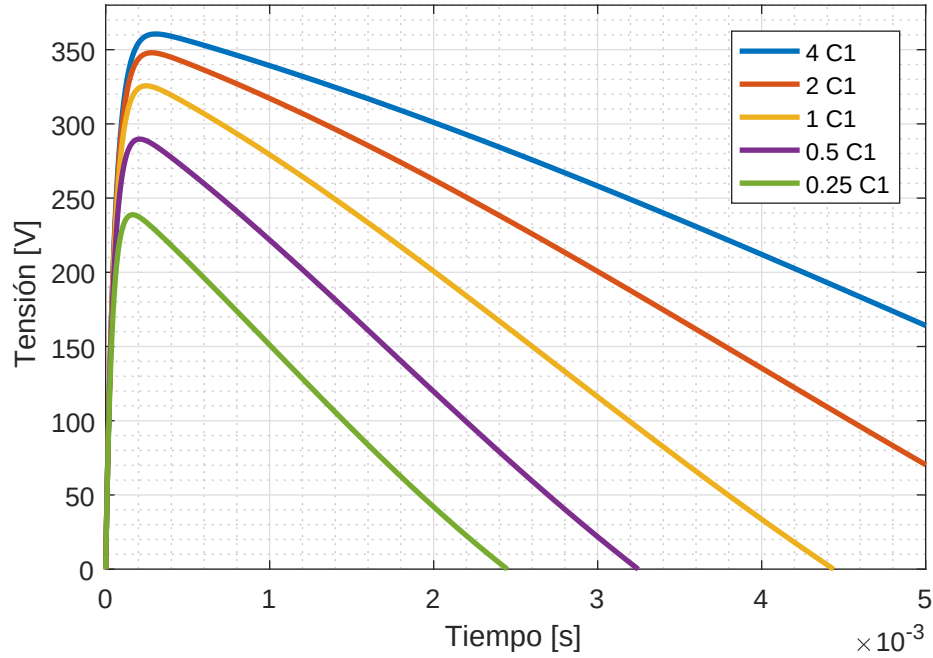


Figura 3.3: Sensibilidad de la señal de salida con respecto al parámetro C_1 .

Como se ve en la Figura 3.3 a medida que el valor de la capacitancia aumenta, la tensión peak del impulso y el tiempo de cola y frente aumentan, caso contrario si el valor del condensador disminuye, la tensión máxima, tiempo de frente y tiempo de cola también lo hacen.

Los tiempos de subida y bajada son los que presentan mayor variabilidad, por lo cual, se puede establecer que el aumento de la capacitancia para obtener un valor peak mayor trae consigo el aumento de los tiempos de frente y cola del impulso.

El aumento en los tiempos son consecuencia de una mayor energía almacenada por el condensador, ya que la tensión a la cual se carga no presenta variación, la energía que este almacena es directamente proporcional al valor de la capacitancia, como se evidencia en la siguiente ecuación.

$$E_C = \frac{1}{2} C \cdot V_{carga}^2 \quad (3.8)$$

Este aumento de la energía requiere también un mayor tiempo para que sea disipada por el circuito, de esta manera los tiempo de subida y bajada son más extensos.

3.2.2. Variación de la resistencia R_1

Se realizan variaciones del valor de la resistencia R_1 , mostrada en la Tabla 3.1, multiplicándola por 4, 2, 1, 0,5 y 0,25. Los resultados para los distintos casos se muestran en la Figura 3.4:

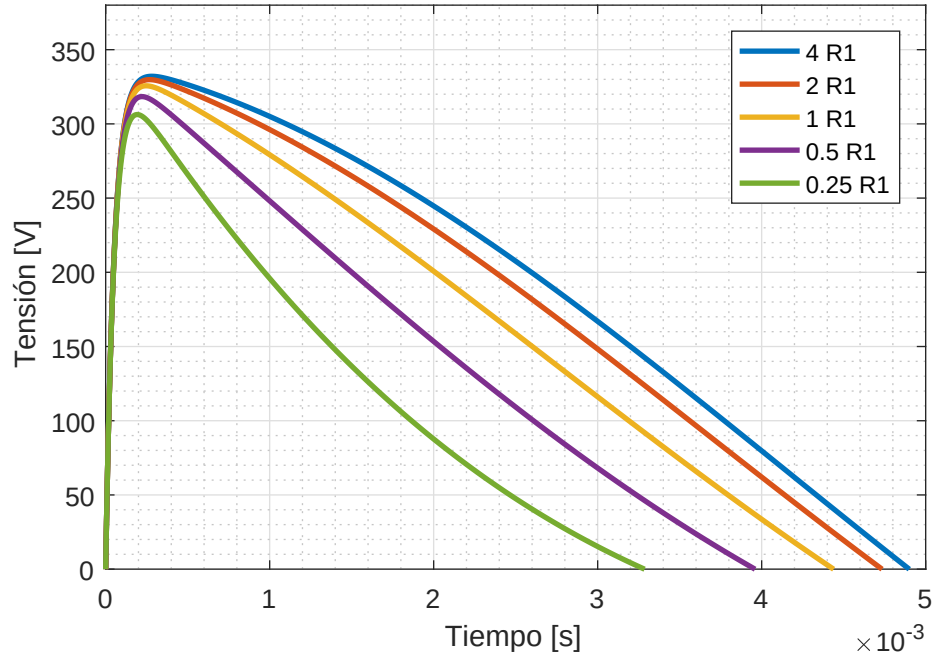


Figura 3.4: Sensibilidad de la señal de salida con respecto al parámetro R_1

Esta resistencia en el circuito generador tradicional del ensayo impulso es denominada *resistencia de cola*, debido a que posee una influencia determinante en el tiempo T_2 . En la Figura 3.4, a medida que la resistencia aumenta, el tiempo de cola también lo hace. Por el contrario si es que la resistencia disminuye, el tiempo de cola también lo hará.

Por su parte, el tiempo de frente y el valor máximo de la señal no se ven afectados en gran medida con los cambios del valor de la resistencia R_1 .

3.2.3. Variación de la resistencia R_2

Se realizan variaciones del valor de la resistencia R_2 , mostrada en la Tabla 3.1, multiplicándola por 4, 2, 1, 0,5 y 0,25. Los resultados para los distintos casos se muestran en la Figura 3.5:

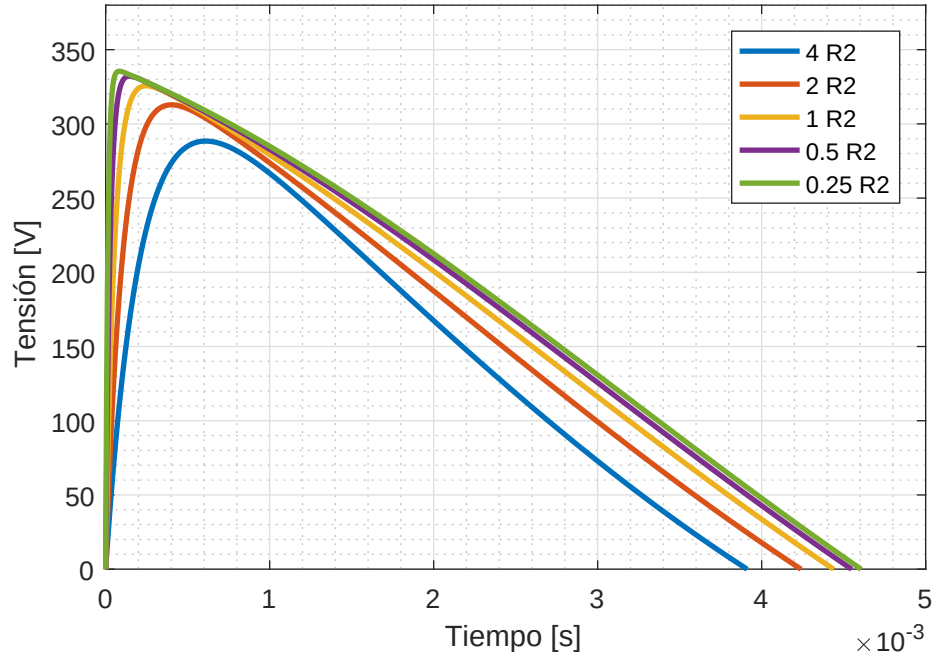


Figura 3.5: Sensibilidad de la señal de salida con respecto al parámetro R_2

El cambio de magnitud de la resistencia R_2 provoca un cambio considerable en el tiempo de frente, a medida que la resistencia disminuye el tiempo de frente disminuye también, caso contrario si la resistencia aumenta, el tiempo de frente aumenta. Por esto es que a esta resistencia se le conoce como resistencia de frente.

Otra consecuencia provocada por la variación de este parámetro es el cambio de la tensión máxima, debido a que mientras mayor sea la resistencia, mayor es la caída de tensión en el elemento y por consecuencia, menor es la tensión en el condensador C_2 e inductancia L_m .

3.2.4. Variación del condensador C_2

Se realizan variaciones del valor del condensador C_2 , mostrada en la Tabla 3.1, multiplicándolo por 4, 2, 1, 0,5 y 0,25. Los resultados para los distintos casos se muestran en la Figura 3.6:

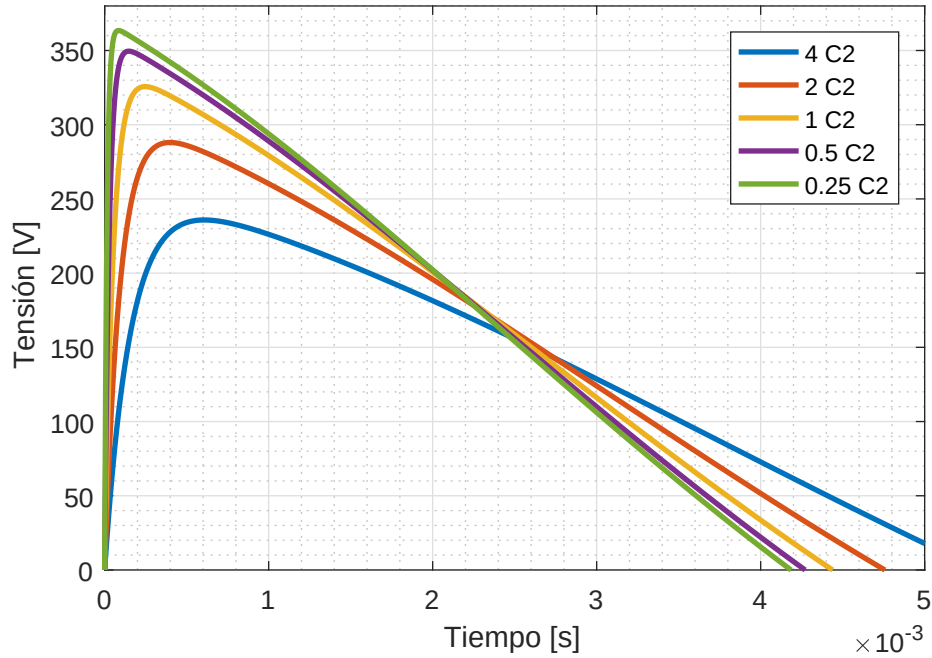


Figura 3.6: Sensibilidad de la señal de salida con respecto al parámetro C_2

La primera consecuencia observable es la variación de la magnitud máxima del impulso, a medida que el valor de capacitancia aumenta, la tensión máxima disminuye, por el contrario si la capacitancia posee un valor menor, la tensión aumenta.

La razón entre los dos condensadores del circuito, $\frac{C_1}{C_2}$ tiene directa relación al desempeño del impulso, que se manifiesta en la tensión máxima del impulso generado, mientras menor sea el valor de esta razón, menor será también la tensión máxima de la señal de salida del circuito. Por el contrario mientras mayor sea la razón entre los capacitores, mayor será también la tensión peak del impulso generado. Para el circuito tradicional del generador impulso, esta relación es utilizada para determinar la eficiencia de tensión del circuito como se muestra a continuación [14]:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{C_1}{C_2}} \quad (3.9)$$

Otro efecto provocado por la variación del condensador son los tiempos de subida y bajada, al tener un condensador de capacitancia menor, el tiempo de frente y cola disminuye, caso contrario si es que la capacitancia aumenta, los tiempos mencionados también aumentan. Para el tiempo de cola, si la capacitancia C_2 aumenta, el tiempo de cola también lo hace y si disminuye, el tiempo de cola lo hace de igual manera.

3.2.5. Variación de la inductancia magnetizante L_m

El objetivo de analizar el efecto de la inductancia magnetizante es constatar si un set de parámetros puede generar un impulso adecuado en tiempo y tensión ante distintos valores de L_m . Este parámetro es intrínseco al transformador en sí y depende mayoritariamente de la construcción del mismo.

Se realizan variaciones del valor de la inductancia magnetizante L_m , mostrada en la Tabla 3.1, multiplicándola por 4, 2, 1, 0,5 y 0,25. Los resultados para los distintos casos se muestran en la Figura 3.7:

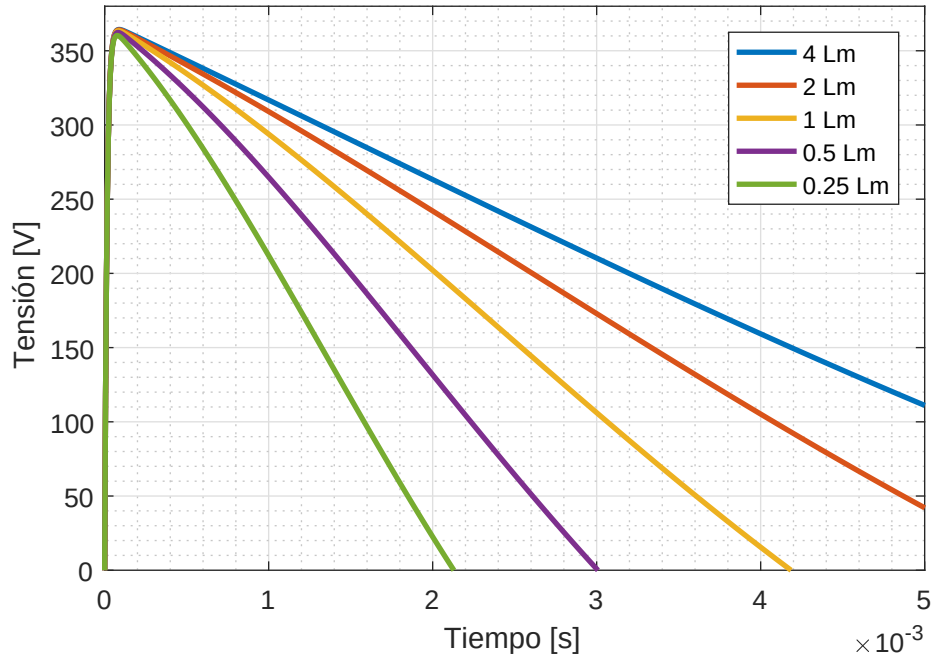


Figura 3.7: Sensibilidad de la señal de salida con respecto al parámetro L_m

En la Figura 3.7, independiente del valor de inductancia magnetizante, el tiempo de frente y valor máximo de tensión no se ven afectados, en comparación al tiempo de decaimiento del impulso, por otro lado, el tiempo de cola presenta la mayor modificación ante la variación de un elemento del circuito.

Mientras menor sea la inductancia magnetizante del transformador, menor será el tiempo de cola de la tensión de salida, por otro lado, si la inductancia aumenta el tiempo que tarda el impulso en llegar a un valor cero es mayor. Por lo que se tiene una relación directa entre el tiempo de cola y el valor de la inductancia.

3.2.6. Parámetros variables

Como se mencionó anteriormente, el valor de inductancia magnetizante del transformador no depende de los otros componentes del circuito, sino que es un valor dado por la manufactura del equipo, por lo tanto, dependiendo del valor de la inductancia es que el resto de los elementos del circuito deben ser escogidos.

Con el objetivo de obtener un impulso estándar 250/2500 con una eficiencia de tensión aceptable, se varían los valores de R_2 y C_2 , dado que entre ambos elementos se pueden modificar el tiempo de subida, el tiempo de cola y la tensión máxima la señal.

Una consideración dentro de la selección de los parámetros es tener una relación aproximadamente de 10 entre la capacitancia C_1 y C_2 ($\frac{C_1}{C_2} \approx 10$), esta razón asegura una buena eficiencia para el circuito generador.

3.3. Selección de los elementos del circuito

Como se vio en la sección anterior, cada elemento que compone el circuito puede modificar los tiempos de frente, tiempo de cola o la tensión máxima del impulso, debido a esto, es necesario encontrar el conjunto de valores para los componentes, tal que, el impulso generado posea un nivel de tensión acorde al ensayo y unos tiempos de frente y cola acordes a los estipulados en la norma internacional IEC 60060.

La eficiencia de tensión es definida como la razón entre la tensión máxima de salida del circuito de descarga (V_{peakLV}), es decir, la tensión máxima de la señal impulso en terminales de baja tensión del transformador, y la tensión de carga el circuito (V_{carga}).

Por lo mostrado en la sección anterior, los cambios en la tensión máxima del impulso trae consigo la variación del tiempo de frente o de cola o de ambos, por lo tanto, existe un compromiso entre la tensión peak del impulso y la precisión en los tiempos característicos, es decir, poseer una eficiencia de tensión alta trae consigo desviaciones de los tiempos estándares, en caso contrario, unos tiempos cercanos a los estándares trae consigo valores de eficiencias menores.

Para visualizar esto, se evalúan diversos casos con distintos valores de los componentes del circuito, en específico se realizan variaciones de la resistencia R_2 y del condensador C_2 .

Para la resistencia R_2 se efectúan variaciones desde 30 $[\Omega]$ a 80 $[\Omega]$ en pasos de 5 $[\Omega]$ cada uno y para el condensador C_2 su valor inicial es de 0,5 $[\mu F]$ llegando hasta 2 $[\mu F]$ con pasos de 0,1 $[\mu F]$. Generándose 176 set de parámetros diferentes en los cuales se evalúan la suma de los errores absolutos con respecto a los tiempos de subida y bajada estándares y la eficiencia de tensión del circuito.

Los indicadores que se utilizan para evaluar la calidad de la solución, tal como se muestra en [11], son los siguientes:

$$Error = \left| \frac{t_p - T_p}{T_p} \right| \cdot 100 + \left| \frac{t_2 - T_2}{T_2} \right| \cdot 100 \quad (3.10)$$

$$\eta = \frac{V_{peakLV}}{V_{carga}} \quad (3.11)$$

Donde:

t_p : Tiempo de frente para la señal simulada.

T_p : Tiempo de frente estándar ($250\mu s$).

t_2 : Tiempo de cola para la señal simulada.

T_2 : Tiempo de cola estándar ($2500\mu s$).

V_{peakLV} : Tensión máxima del impulso en terminales de baja tensión del transformador.

V_{carga} : Tensión de carga del condensador C_1 .

Estos dos parámetros de evaluación del desempeño del impulso permiten distinguir qué set de valores de elementos del circuito es mejor que otro, el objetivo es encontrar el set que genera un impulso con los tiempos de subida y bajada más cercanos al estándar 250/2500 exigido por la norma.

Se grafican los 176 casos evaluados, el error acumulado en el eje vertical y la eficiencia de tensión en el eje horizontal (el código utilizado para obtener esto puede verse en Anexo A.2). Los resultados se muestran en la Figura 3.8:

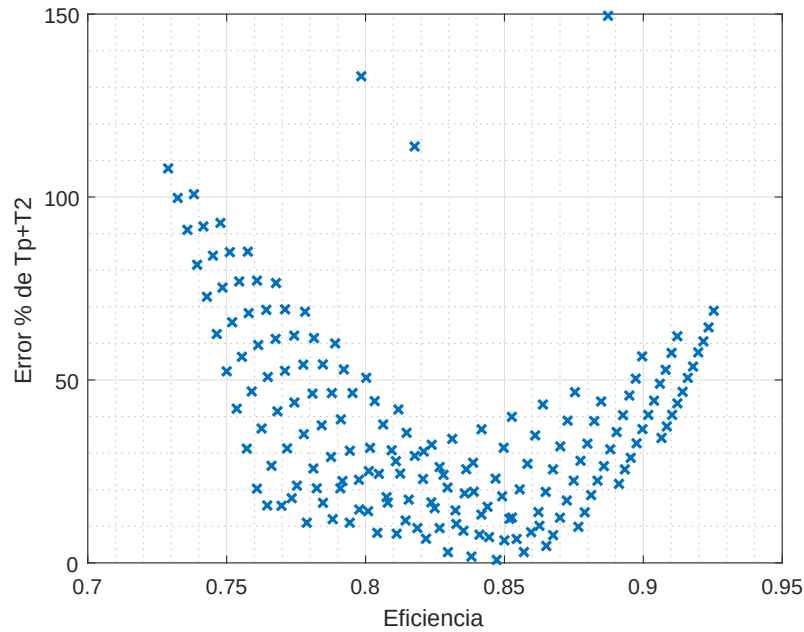


Figura 3.8: Eficiencia de tensión versus error porcentual de tiempos de subida y bajada para los distintos set de parámetros evaluados.

La Figura 3.8 presenta el comportamiento mencionado anteriormente, esto es, una alta eficiencia de tensión trae consigo altos errores en los tiempos característicos. Por otro lado, bajos errores en los tiempos presentan eficiencias de tensión menores. Además los resultados poseen una tendencia a concentrar errores bajos en el entorno de eficiencias de tensión entre 0,8 y 0,87, lo que es especialmente conveniente a la hora de escoger el set de parámetros a utilizar.

Teniendo en cuenta el compromiso entre eficiencia de tensión y errores en los tiempos, se opta por un criterio conservador e inclinado a obtener un impulso con un tiempo de frente y tiempo de cola, lo más cercanos posible al estándar, asegurando una eficiencia de tensión mínima de 85 %. La eficiencia (η) ronda entre 75 % a 90 % para circuitos generadores del impulso maniobra, esto está relacionado con el valor de la razón entre los condensadores del circuito, $\frac{C_1}{C_2}$, este cociente varía entre los valores de 6 - 106,5 [15], por lo que una razón mayor a 6 implicaría una eficiencia de tensión cercana a la deseada.

Debido a que el nivel de tensión del impulso es posible de corregir de manera más sencilla que los tiempos característicos, los tiempos característicos dependen de los 4 elementos principales mientras que la tensión peak es corregible con dos de ellos. Así el objetivo es tener un circuito con una eficiencia de tensión aceptable y tiempos característicos lo más cercanos posible a los tiempos a los ideales del impulso, los set de parámetros que cumplen con los requisitos expuestos se muestran en la Figura 3.9.

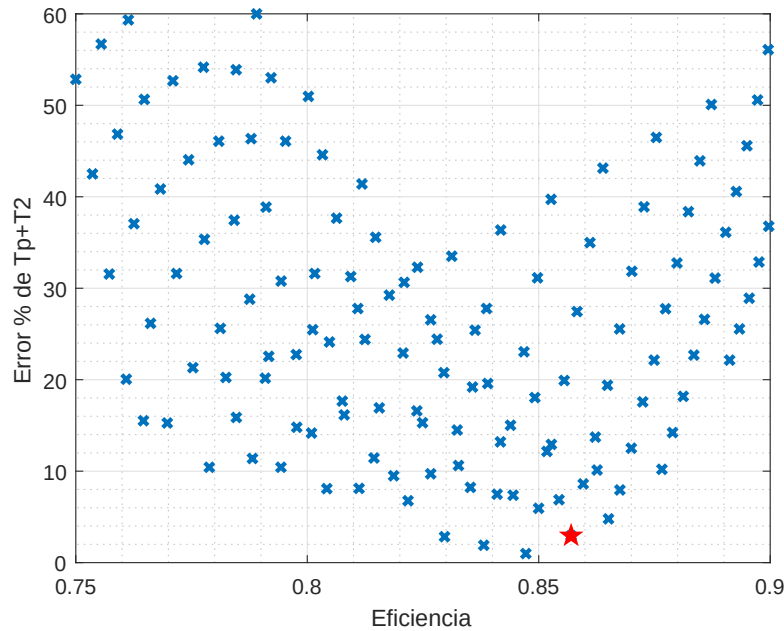


Figura 3.9: Eficiencia de tensión versus error porcentual de tiempos de subida y bajada, zona de set escogido.

En la zona baja de la Figura 3.9 se observa que cercano al valor de eficiencia de 0,85 los errores acumulados de los tiempos característicos son bajos e incluso llegando a valores muy cercanos al cero por ciento. Es por esto que esta zona es de sumo interés

a la hora de seleccionar el set de valores ideales, porque entrega un nivel de tensión aceptable para la señal de tensión en el lado de baja del transformador y los tiempos característicos son muy cercanos a los ideales exigidos por la norma.

El set escogido (estrella roja de la Figura 3.9), corresponde al punto con una eficiencia de 0,857 y un error total en los tiempos de 2,961 % , los valores de los elementos son:

C_1	R_1	R_2	C_2	L_σ	L_m
7,5 [μF]	1000 [Ω]	65 [Ω]	0,9 [μF]	0,13026 [mH]	1,3244 [H]

Tabla 3.2: Set de parámetros ideales para la generación del impulso maniobra.

Los valores de los elementos de la Tabla 3.2, en conjunto con una tensión de carga de 380 [V], generan un impulso tipo maniobra en el lado de baja tensión del transformador como la que se muestra en la Figura 3.10:

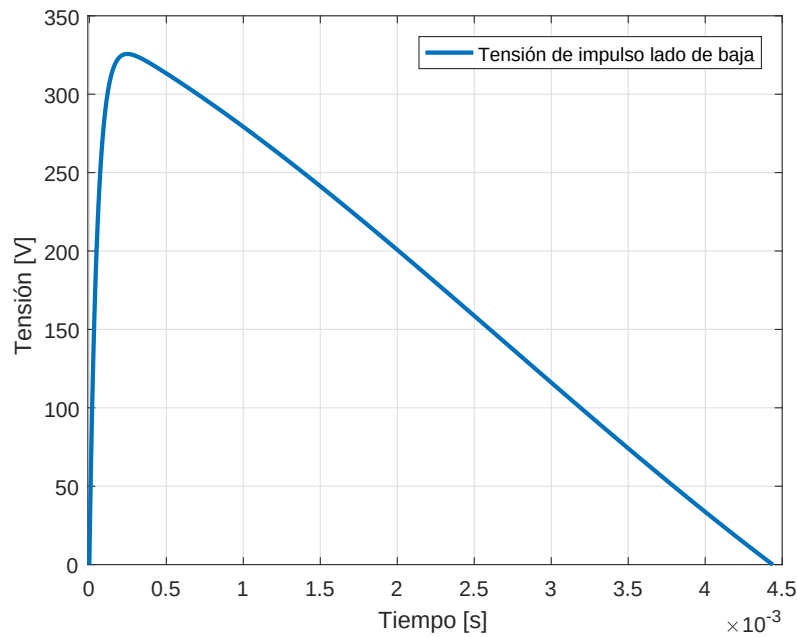


Figura 3.10: Señal de tensión del ensayo impulso en la inductancia magnetizante del transformador, referido al lado de baja tensión.

El impulso generado posee una tensión máxima de 325,7 [V], tiempo de frente de 247,6 [μs] y tiempo de cola de 2451 [μs], por lo tanto, el tiempo de frente y cola cumplen con los tiempos normados y el impulso es considerado correcto.

Bajo el supuesto de un transformador ideal, si el impulso generado en el lado de baja tensión del transformador corresponde a un impulso estándar, el impulso que se genera en el lado de alta tensión también lo será, ya que solo se escala la magnitud de la tensión según la razón de transformación del equipo.

Capítulo 4

Circuito de control

4.1. Sistema de control

La función primordial del circuito de control implementado es llevar a cabo de manera segura y eficiente la carga y descarga del circuito para la realización del ensayo impulso tipo maniobra.

Para ello es necesario realizar un control sobre los elementos del circuito que se encargan de conmutar entre el proceso de carga y descarga del circuito. Estos elementos son los IGBT1 y IGBT2, donde el primero de ellos realiza la carga del condensador C_1 y el segundo la descarga del mismo para que se genere la forma de onda de tensión en bornes del lado de baja tensión del transformador.

Para la realización de este control es necesario la utilización de 3 componentes que en conjunto constituyen el sistema de control y accionamiento.

$$\textit{Control digital} \implies \textit{Driver} \implies \textit{IGBT}$$

Es necesario la utilización de un equipo intermedio entre el sistema de control y los IGBT's, esto para aislar al circuito de control del circuito general, sumando confiabilidad y seguridad al proceso.

4.1.1. Control digital

El control digital tiene como propósito la conducción alternada de ambos IGBT's, es decir, que cuando se realiza el proceso de carga, el IGBT1 este en estado de conducción y el IGBT2 en estado de bloqueo, mientras que cuando se realiza el proceso de descarga, el IGBT1 se encuentre en estado de bloqueo y el IGBT2 en estado de conducción, finalmente mantener ambos semiconductores en estado de bloqueo mientras no sea necesario.

Para la realización de esto, es necesario conocer los tiempos característicos de los procesos de carga y descarga. El proceso de carga tarda alrededor 1 segundo, correspondiente a aproximadamente 5 veces el tiempo característico del rectificador ($R_1 C_1 = 0,19 [s]$), aún así el tiempo de carga se extiende para asegurar un nivel de tensión estable en el capacitor C_1 . Se programa un tiempo de carga de 15 segundos, durante este tiempo el IGBT1 permanece en estado de conducción y el IGBT2 en estado de bloqueo.

Por otro lado, el proceso de descarga tiene una duración considerablemente menor que el proceso de carga, la energización del circuito tiene una duración de 10 [ms] , ya que de esta manera se genera una señal impulso adecuada y con la menor sobretensión en sentido negativo para la señal de salida. Durante este proceso el IGBT1 se encuentra en estado de bloqueo y el IGBT2 en estado de conducción, asegurando la aislación entre el circuito de carga y descarga.

Para que los procesos de carga y descarga se lleven a cabo, antes debe enviarse una señal externa de inicio al sistema de control. Esta señal de excitación es análoga a la señal de trigger para iniciar la descarga en el explosor de esferas del circuito tradicional. El proceso no vuelve a ocurrir hasta que nuevamente el pulsador sea accionado, de esta manera se tiene una operación segura y confiable.

En la Figura 4.1, se muestra el diagrama de flujo del funcionamiento del sistema de control.

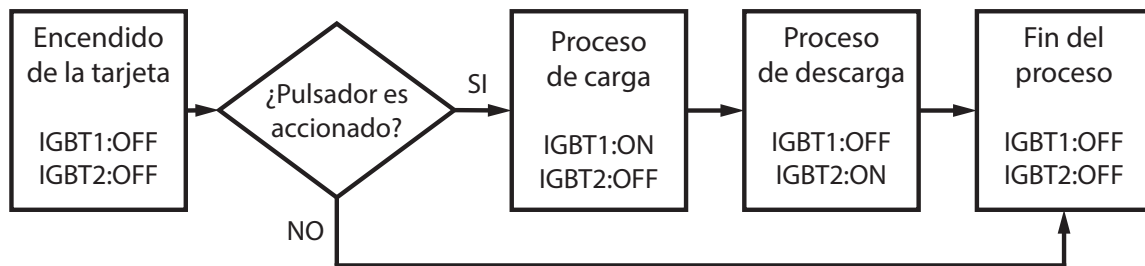


Figura 4.1: Diagrama de flujo del sistema de control.

El código utilizado para el control digital puede verse en el Anexo A.3.

4.2. Hardware utilizado

4.2.1. Semiconductores IGBT

Los primeros componentes a seleccionar son los semiconductores (IGBT), dos dispuestos en serie, como los utilizados normalmente en puentes de rectificación u otros accionamientos típicos de la electrónica de potencia. Físicamente estos dos semiconductores se presentan como un componente monolítico, lo que es sumamente conveniente, ya que facilita su instalación y montaje.

Los aspectos importantes a la hora de trabajar con este elemento son:

- **Tiempo de encendido y apagado:** La relación entre el tiempo de encendido (t_{on}) y tiempo de apagado (t_{off}) del IGBT y los tiempos de subida y bajada del impulso característico son muy relevantes. Los tiempos de encendido y apagado deben ser considerablemente menores a los tiempos característicos del impulso de tensión, para así no tener interferencias en el funcionamiento del circuito.

Para el caso del impulso tipo maniobra, el tiempo de frente mínimo corresponde a $0,2 [ms]$, el cual comparado con t_{on} y t_{off} comunes de semiconductores de este tipo, que son del orden de los nanosegundos, no afectan a la dinámica del impulso, por lo tanto, la utilización de estos semiconductores es correcta y apropiada.

- **Nivel de tensión y corriente:** El nivel de tensión con el cual se trabaja es de $400 [V]$, nivel de tensión típico en la industria para los cuales los IGBT están diseñados y los niveles de corriente a los cuales es sometido el circuito son de corta duración (del orden de los milisegundos), por lo que no representa una solicitud exigente al equipo. Los IGBT seleccionados son utilizados en puentes rectificadores y soportan corrientes del orden de 100 amperes en estado estacionario, nivel de corriente mucho mayores a los esperados para el circuito implementado.
- **Señal de disparo:** La magnitud de los pulsos de disparo que requiere el semiconductor para poder cambiar su estado de conducción o bloqueo según corresponda, deben ser conocidos para la utilización correcta del driver.

El semiconductor utilizado es el *SKM145GB066D* de la marca *SEMIKROM*, posee las características que se muestran en la Tabla 4.1.

Tensión nominal	Corriente nominal	Tiempo encendido	Tiempo apagado	Tensión de bloqueo	Tensión de conducción
600 [V]	150-195 [A]	150 [ns]	490 [ns]	-8 [V]	15 [V]

Tabla 4.1: Características más relevantes del IGBT utilizado.

4.2.2. Driver

Este dispositivo tiene como función llevar a cabo sobre los IGBT las acciones dadas por el sistema de control, además de ofrecer aislación eléctrica entre ambos y proporcionar seguridad en la operación.

El driver escogido es el modelo *SKHI22 AR* del mismo fabricante que el IGBT, por lo cual tiene una compatibilidad inmediata para ser utilizado con los semiconductores.

Este equipo funciona de la siguiente manera, el driver recibe desde la tarjeta programable pulsos de tensión (0 y 5 [V]), estas señales del control son recibidas y convertidas a pulsos de disparo (-7 y +15 [V]), para bloquear o hacer conducir al semiconductor.

Las características más relevantes del driver utilizado se muestran en la Tabla 4.2.

Tensión control	Tensión salida ON	Tensión salida OFF	Tensión alimentación
0-5 [V]	+15 [V]	-7 [V]	15 [V]

Tabla 4.2: Valores de tensión del driver utilizado.

4.2.3. Controlador

El control a implementar ya se describió en la sección 4.1, corresponde a un control digital accionado por un pulsador que opera de manera alternada los IGBT's para generar el impulso de maniobra. Este control es sencillo y no requiere gran poder de cálculo o memoria digital para llevarse a cabo.

Las señales de control requeridas por el driver son señales de tensión de 0 y 5 [V], valores estándar para tarjetas programables básicas.

La tarjeta utilizada es *Arduino UNO*, disponible en el laboratorio del departamento, posee un lenguaje de programación sencillo y cumple con los niveles de tensión requeridos por el driver.

Además de utilizar la tarjeta para enviar señales de control, se incluyen luces piloto para indicar el proceso realizado (proceso de carga-proceso de descarga), de esta manera se reconoce de manera visual si el circuito está energizado.

Las características de la tarjeta utilizada para el control digital se muestran en la Tabla 4.3.

Tensión alimentación	Pines digitales	Entradas análogas	Tensión salida	Memoria flash
7-12 [V]	14	6	0-5 [V]	32 KB

Tabla 4.3: Características de tarjeta Arduino utilizada.

4.3. Ensayos del sistema de control

Para comprobar el buen funcionamiento del sistema de control, se registran las señales de control, los pulsos de disparo del driver, la tensión de carga y la tensión de impulso del lado de baja tensión del transformador. Debido a la diferencia temporal de los procesos, estos deben registrarse de manera separada.

Para corroborar el funcionamiento del driver, se registran las señales de control enviadas desde la tarjeta Arduino y los pulsos de disparo generados para la conducción o bloqueo de los semiconductores, los resultados se muestran a continuación en la Figura 4.2.

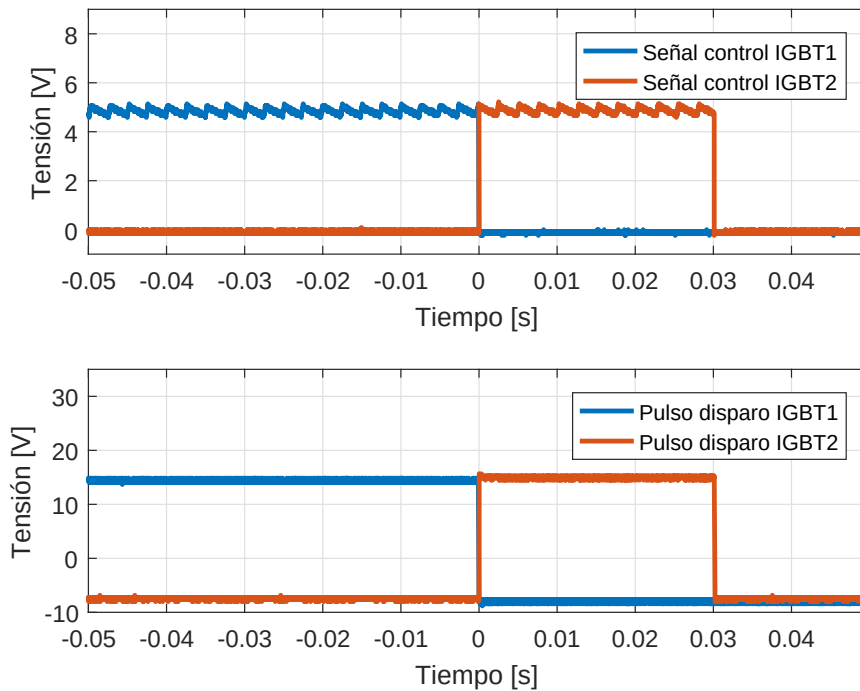


Figura 4.2: Señales de control y señales de pulsos de disparo enviados a los semiconductores.

En la Figura 4.2 se aprecia el cambio de estado de los semiconductores, los tiempos de conducción programados son de 15 [s] para el IGBT1 y de 30 [ms] para el IGBT2, se corrobora el valor de tensión de las señales de control, 0[V] para indicar el bloqueo del IGBT y 5[V] para la conducción. Al recibir las señales de control, el driver genera pulsos de disparo de conducción y bloqueo a los IGBT's, cuando el control envía una señal de conducción (5 [V]), el driver envía un pulso de 15 [V] al IGBT, en cambio, cuando se requiere que el semiconductor no conduzca, el control envía una señal de valor 0 [V] y el driver para cumplir con ello genera un pulso de -7 [V] para el bloqueo del semiconductor.

Comprobado ya el funcionamiento del driver, se procede a registrar el funcionamiento de los IGBT's y las señales de tensión consecuencia de la acción de estos, es decir, para la conducción del IGBT1 se registra la señal de tensión de carga del condensador C_1 y para la conducción del IGBT2 se registra la señal de tensión en el lado de baja tensión del transformador. En las Figuras 4.3 y 4.4 se muestran las señales de disparo para cada IGBT y la señal de tensión respectiva.

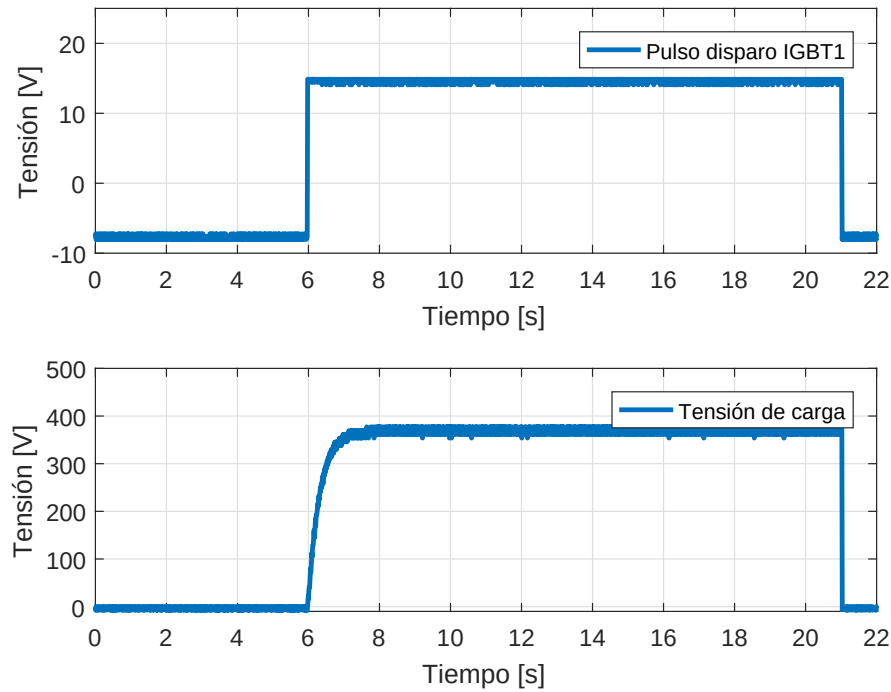


Figura 4.3: Señal de disparo para IGBT1 y señal de tensión de carga del condensador C_1 .

En la Figura 4.3 se observa como al actuar el IGBT1 la tensión de carga del condensador C_1 aumenta hasta alcanzar un valor estable, como ya se dijo antes el tiempo de carga programado es mayor al tiempo que tarda en llegar a un estado estacionario para asegurar una tensión lo más continua y estable posible.

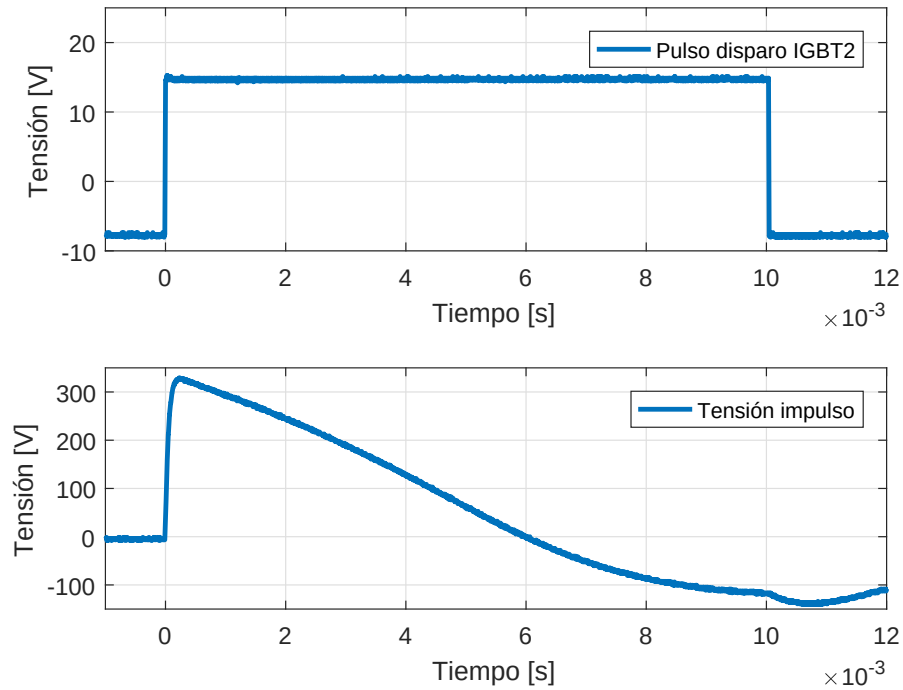


Figura 4.4: Señal de disparo para IGBT2 y señal de tensión de impulso del condensador C2.

En la Figura 4.4 se observa como el pulso de disparo para el IGBT2 inicia la generación del impulso de baja tensión y al terminar el tiempo de conducción, se genera una sobretensión en sentido negativo, momento en el cuál la alimentación del circuito de descarga es desconectada y la topología del circuito cambia y la tensión decae oscilando hasta un valor cero. La elección del tiempo de conducción del IGBT2 es tal que genera una sobretensión en sentido negativo lo más pequeña posible.

Capítulo 5

Implementación y prototipo construido

5.1. Prototipo construido

El circuito generador construido puede separarse en tres secciones de manera casi independiente, estas son: **Circuito de carga**, correspondiente a un rectificador de media onda con condensador de alisamiento, **Circuito de descarga**, correspondiente al arreglo de resistencias y condensadores que determinan la forma de la señal de salida y finalmente el **Transformador elevador**.

Como se mencionó en capítulos anteriores, el elemento del circuito que determina el valor de los otros componentes es el transformador. Por ello se ensaya el equipo para obtener los parámetros y su modelo equivalente y con esto escoger los valores de R_1 , R_2 , C_1 y C_2 y lograr el impulso tipo maniobra estándar 250/2500.

Una vez que se tiene el set de valores de todos los elementos requeridos para generar un impulso, es necesario contrastarlos con la disponibilidad del mercado y asegurar la compra de aquellos que se acerquen lo más posible a los valores deseados.

En las secciones siguientes se muestran los ensayos realizados al transformador y la construcción del circuito generador que se utilizará para producir el impulso tipo maniobra.

5.2. Transformador elevador

El transformador utilizado corresponde a uno trifásico de tipo seco, conexión Ynd1 de 10 kVA y razón de transformación 380/660 V con taps de $\pm 5\%$ ubicados en el lado de baja tensión. En la Figura 5.1, se aprecia una vista superior del equipo, sus bornes y taps.

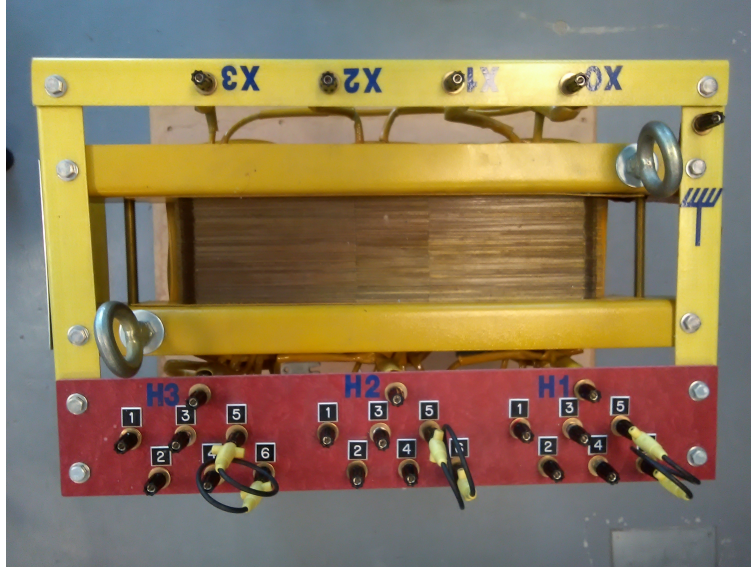


Figura 5.1: Vista superior del transformador, se aprecian los bornes de alta y baja tensión.

Como el propósito del equipo es elevar tensión, se utiliza el transformador en el tap que genere la mayor razón de transformación, esta corresponde el tap 5 dando como resultado una razón de transformación de 360/660 [V].

Se realizan una serie de pruebas al transformador para determinar su circuito equivalente tipo T , para ello se realiza la medición de resistencia de los devanados, el ensayo de vacío y el ensayo de cortocircuito. Los instrumentos utilizados en los ensayos realizados para determinar los parámetros del circuito equivalente son los siguientes:

Instrumento	Marca	Modelo
Multímetro	Agilent	U1242B
Multímetro	UNIT-T	UT71b
Amperímetro de tenaza	Extech	380942
Analizador de redes	Fluke	1735

Tabla 5.1: Instrumentos utilizados para la realización de los ensayos del transformador.

5.2.1. Medición de resistencia de devanados

Para la realización de este ensayo se somete cada devanado a una tensión continua y posteriormente se registra la corriente circulante para obtener la resistencia en corriente continua de los devanados.

Los resultados obtenidos se muestran en las tablas 5.2 y 5.3, presentadas a continuación.

Devanado	Tensión [V]	Corriente [A]	Resistencia [Ω]
X0X1	1,38	2,66	0,518
X0X2	1,34	2,61	0,513
X0X3	1,34	2,60	0,515

Tabla 5.2: Medición de resistencias de devanado, lado estrella.

Devanados	Tensión [V]	Corriente[A]	Resistencia [Ω]
H1H2	1,26	2,74	0,459
H2H3	1,28	2,71	0,472
H1H3	1,27	2,70	0,470

Tabla 5.3: Medición de resistencias de devanado, lado delta.

De las mediciones mostradas se calculan los promedios y se obtiene la resistencia de cada devanado, para el devanado estrella la resistencia es de 0,513 [Ω] y para el devanado delta 0,234 [Ω].

5.2.2. Ensayo de Vacío

Alimentando el devanado de baja tensión, desde cero hasta un 110% de la tensión correspondiente al tap que resulta en la mayor razón de transformación, es decir, 360/660 [V], se registra la tensión, corriente y potencia entre otros.

Los valores medidos para la tensión nominal se muestran a continuación en la Tabla 5.4.

U_{2vacio} [V]	U_{1vacio} [V]	I_a [A]	I_b [A]	I_c [A]	P_{loss} [kW]
361,11	663	0,504	0,5	0,723	0,034

Tabla 5.4: Valores nominales de vacío del transformador.

De los datos mostrados en la Tabla 5.4, se calcula la inductancia de magnetización y la resistencia equivalente del núcleo ferromagnético, dando como resultado 1,3244 [H] y 3835,3 [Ω] respectivamente.

Con las mediciones registradas para este ensayo, se construye la curva de vacío del transformador, que se muestra a continuación en la Figura 5.2.

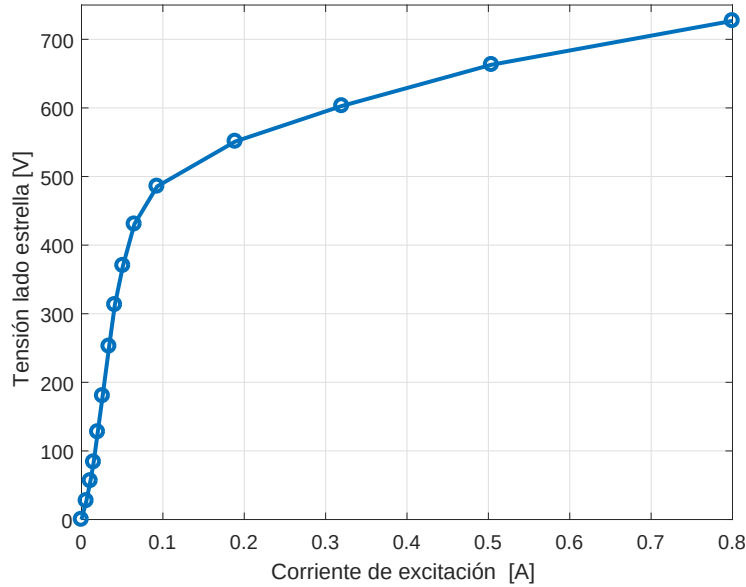


Figura 5.2: Curva de vacío del transformador utilizado.

5.2.3. Ensayo de cortocircuito

Para la realización de este ensayo se cortocircuitaron los terminales de alta tensión y se alimentó con tensión reducida cada fase del delta de baja tensión del transformador, obteniéndose 3 curvas de cortocircuito. Los valores registrados para cada fase del delta se muestran en la Tabla 5.5.

<i>Devanado</i>	U_{CC} [V]	I_a [A]	I_b [A]	I_c [A]	P_{loss} [kW]
H1H2	13,61	16,18	15,6	15,98	0,218
H1H3	12,95	15,11	14,73	14,97	0,194
H2H3	12,92	15,25	14,88	15,2	0,197

Tabla 5.5: Valores nominales para el ensayo de cortocircuito.

Así para cada uno de los tres devanados se obtienen 3 valores de inductancia de dispersión:

Devanado	Inductancia de dispersión L_σ
H1H2	0,378365 [mH]
H1H3	0,356135 [mH]
H2H3	0,047058 [mH]
Promedio	0,260519 [mH]

Tabla 5.6: Inductancia de dispersión para cada devanado ensayado

Utilizando el promedio entre las 3 mediciones se calcula la inductancia de dispersión para cada devanado de baja tensión, siendo $0,13026[mH]$ el valor obtenido.

Graficando las mediciones realizadas para este ensayo, se genera la curva de cortocircuito para cada devanado, las curvas pueden verse en la Figura 5.3.

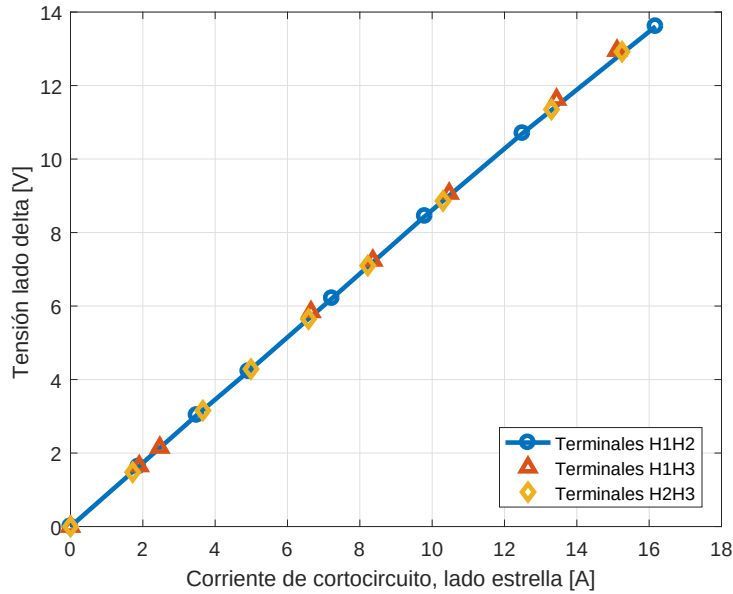


Figura 5.3: Curvas de cortocircuito para los 3 devanados por separado.

5.2.4. Modelo equivalente del transformador

El modelo utilizado por diferentes autores ([7], [10], [11] y [16]) coinciden en representar al transformador por un equivalente de su inductancia de dispersión, inductancia de magnetización y la capacitancia de los terminales del transformador.

Considerando que el transformador operará sin carga en sus terminales de alta tensión, el modelo T tradicional se reduce a uno Γ , ya que no circulará corriente por la rama del lado derecho, correspondiente al lado de alta tensión.

Para este trabajo, el modelo utilizado no considera relevante el valor de la capacitancia de terminales del equipo, ya que su valor en comparación a la del condensador C_2 es bajo, el valor de la capacitancia del transformador es despreciable frente a esta e incluirla no produce efectos relevantes.

Los valores de las capacitancias medidas en el lado de alta y baja tensión del transformador se muestran en la Tabla 5.7 y Tabla 5.8.

Terminales	X1-Tierra	X2-Tierra	X3-Tierra	X0-Tierra
Capacitancia [pF]	433,5	429,1	437,6	431,1

Tabla 5.7: Medición de capacitancias a tierra, lado de alta tensión

Terminales	H1-Tierra	H2-Tierra	H3-Tierra
Capacitancia [pF]	155,3,5	161,4	160,7

Tabla 5.8: Medición de capacitancias a tierra, lado de baja tensión

Comparando con el valor de capacitancia del condensador C_2 , del orden de μF , se determina que no hay mayor influencia al no considerarlas, dado que son 3 órdenes de magnitud menores a la de C_2 .

En la Figura 5.4, que se muestra a continuación, se observa el modelo completo del transformador y el modelo utilizado.

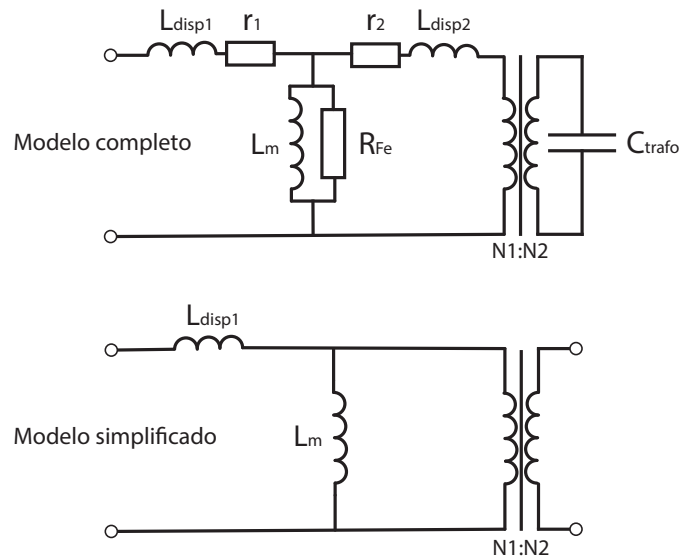


Figura 5.4: Modelo completo del transformador y modelo utilizado.

Para el modelo simplificado mostrado de la Figura 5.4, los valores de inductancia de magnetización e inductancia de dispersión son $L_m = 1,3244[H]$ y $L_{disp1} = 0,13026[mH]$.

5.3. Circuito generador del impulso

Teniendo ya los valores del circuito equivalente del transformador, se obtienen los valores ideales para el circuito generador, como se muestra en la Sección 3.3. Los valores ideales para los componentes del circuito generador son:

Condensador C_1	Resistencia R_1	Resistencia R_2	Condensador C_2
7,5 [μF]	1000 [Ω]	65 [Ω]	0,9 [μF]

Tabla 5.9: Set de parámetros ideales del circuito generador.

Es necesario contrastar los valores deseados con los disponibles en el mercado, por lo que, se optó por comprar todos los componentes a un solo proveedor y debido a ello no se pudo acceder a todos los valores deseados, pero si unos que de igual manera aseguran un funcionamiento adecuado, debido a que los valores no difieren en gran medida de los que se calcularon y además en conjunto también generan un impulso maniobra con tiempos de frente y cola dentro de los márgenes permitidos por la norma. Los valores de los componentes utilizados en la implementación son:

Condensador C_1	Resistencia R_1	Resistencia R_2	Condensador C_2
7,5 [μF]	1000 [Ω]	60 [Ω]	1 [μF]

Tabla 5.10: Valores de los componentes utilizados para la implementación del circuito de descarga.

5.3.1. Circuito de carga

Esta sección del circuito esta constituida por la fuente de alimentación AC regulable, resistencia limitadora de corriente (r), Diodo rectificador (D1) e IGBT1. Como se muestra a continuación en la Figura 5.5.

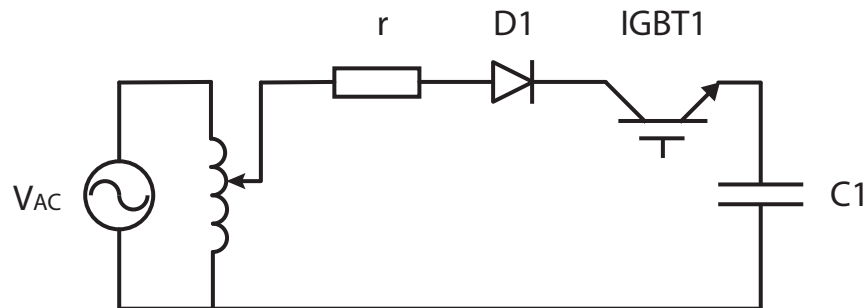


Figura 5.5: Esquema del circuito de Carga.

Como se mencionó con anterioridad, el nivel de tensión de trabajo es de 400 [V], por lo que todos los componentes son seleccionados para tal nivel de tensión. El elemento que requiere mayor cuidado en la operación es el diodo, por ello, la resistencia utilizada asegura que la corriente circulante durante el proceso de carga no provoque un calentamiento excesivo del dispositivo y lo dañe.

La resistencia limitadora (r), tiene un valor de $25 [k\Omega]$ y el condensador C_1 de $7,5 [\mu F]$, este valor es logrado al conectar dos capacitores de $15 [\mu F]$ en serie.

Con esto, el tiempo característico del circuito de carga es de $0,1875 [s]$, por lo que pasado aproximadamente 5 veces este tiempo ($0,9375 [s]$) el condensador se encontrará prácticamente cargado, aún así el tiempo de carga se extiende hasta los 15 segundos. El circuito de carga se aprecia en la Figura 5.6, destacado en un recuadro rojo.

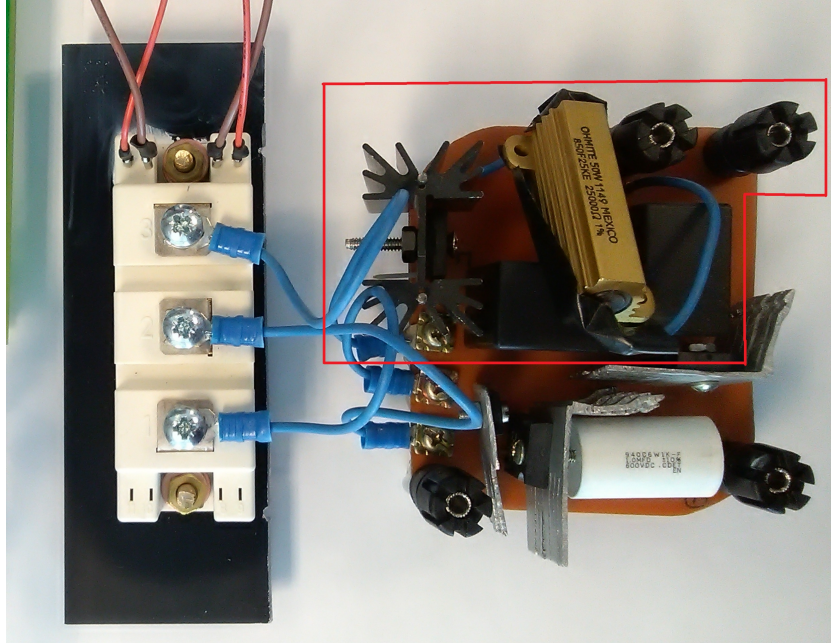


Figura 5.6: Circuito de Carga, tarjeta prototipo.

5.3.2. Circuito de Descarga

Esta parte del circuito generador esta compuesta por: Condensador de Descarga (C_1), IGBT2, Resistencia de frente (R_1), Resistencia de cola (R_2) y Condensador de Carga (C_2), como se muestra a continuación, en la Figura 5.7.

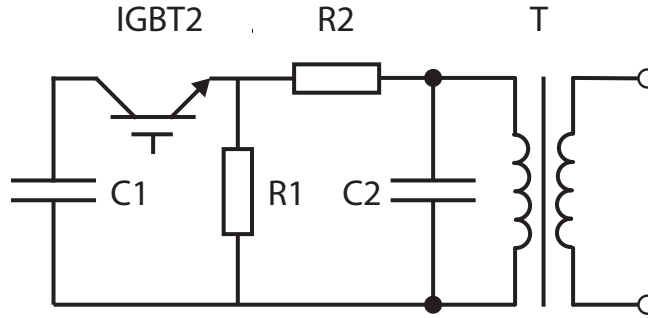


Figura 5.7: Circuito esquemático de descarga.

Los valores de los elementos utilizados en la construcción del circuito son: Condensador C_1 de $7,5[\mu F]$ (dos capacitores de $15[\mu F]$ en serie), resistencia R_1 de $1,000[\Omega]$, resistencia R_2 de $60[\Omega]$ (resistencias de $50[\Omega]$ y $10[\Omega]$ conectadas en serie) y condensador C_2 de $1[\mu F]$.

La disposición de los elementos dentro de la tarjeta en la cual se monta el circuito se muestra en la Figura 5.8.

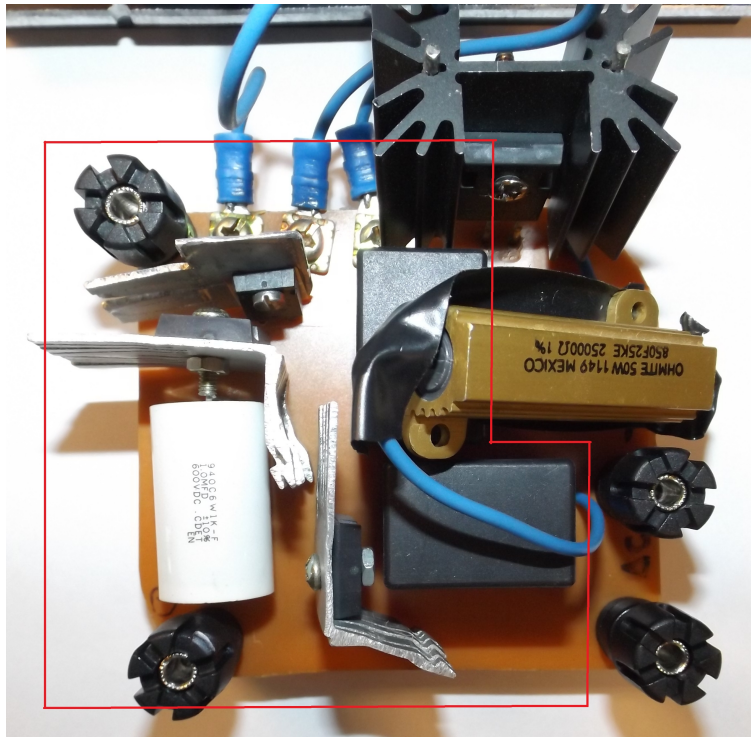


Figura 5.8: Circuito de Descarga, tarjeta prototipo.

En la Figura 5.8 destacado en rojo se observan la disposición de los elementos y los terminales en los cuales se conecta el transformador que es utilizado para elevar tensión.

Al momento de construir el circuito se miden los valores reales de cada componente para conocer con exactitud el valor de cada elemento, que finalmente determina los tiempos característicos y tensión máxima del impulso. Los valores medidos para cada elemento son:

Condensador C_1	Resistencia R_1	Resistencia R_2	Condensador C_2
7,39 [μF]	998 [Ω]	59,7 [Ω]	0,978 [μF]

Tabla 5.11: Valores reales de los componentes del circuito de descarga.

5.4. Prototipo y circuito de control implementados

El prototipo construido incluye en una misma tarjeta impresa, el circuito de carga y descarga, cuenta con terminales para la conexión de la fuente de alimentación alterna, terminales de conexión para los semiconductores y terminales para la conexión del transformador elevador. En tarjetas independientes se encuentran el control digital, con sus luces piloto y pulsador y el driver para los IGBT's.

El circuito generador incluyendo los semiconductores se presenta a continuación en la Figura 5.9.

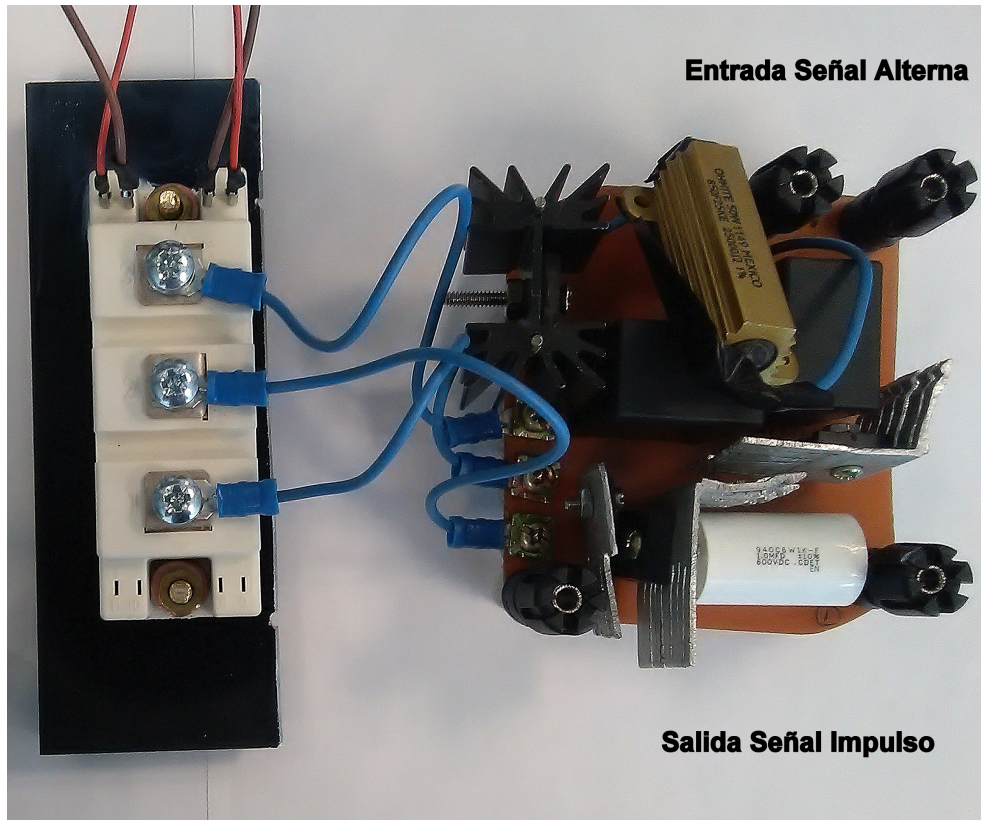


Figura 5.9: Circuito generador construido incluyendo los IGBT's.

El circuito generador que incluye tarjeta de control (con sus luces piloto y pulsador), driver, IGBT's y la tarjeta impresa donde se implementó el circuito de carga y descarga se muestra en la Figura 5.10.

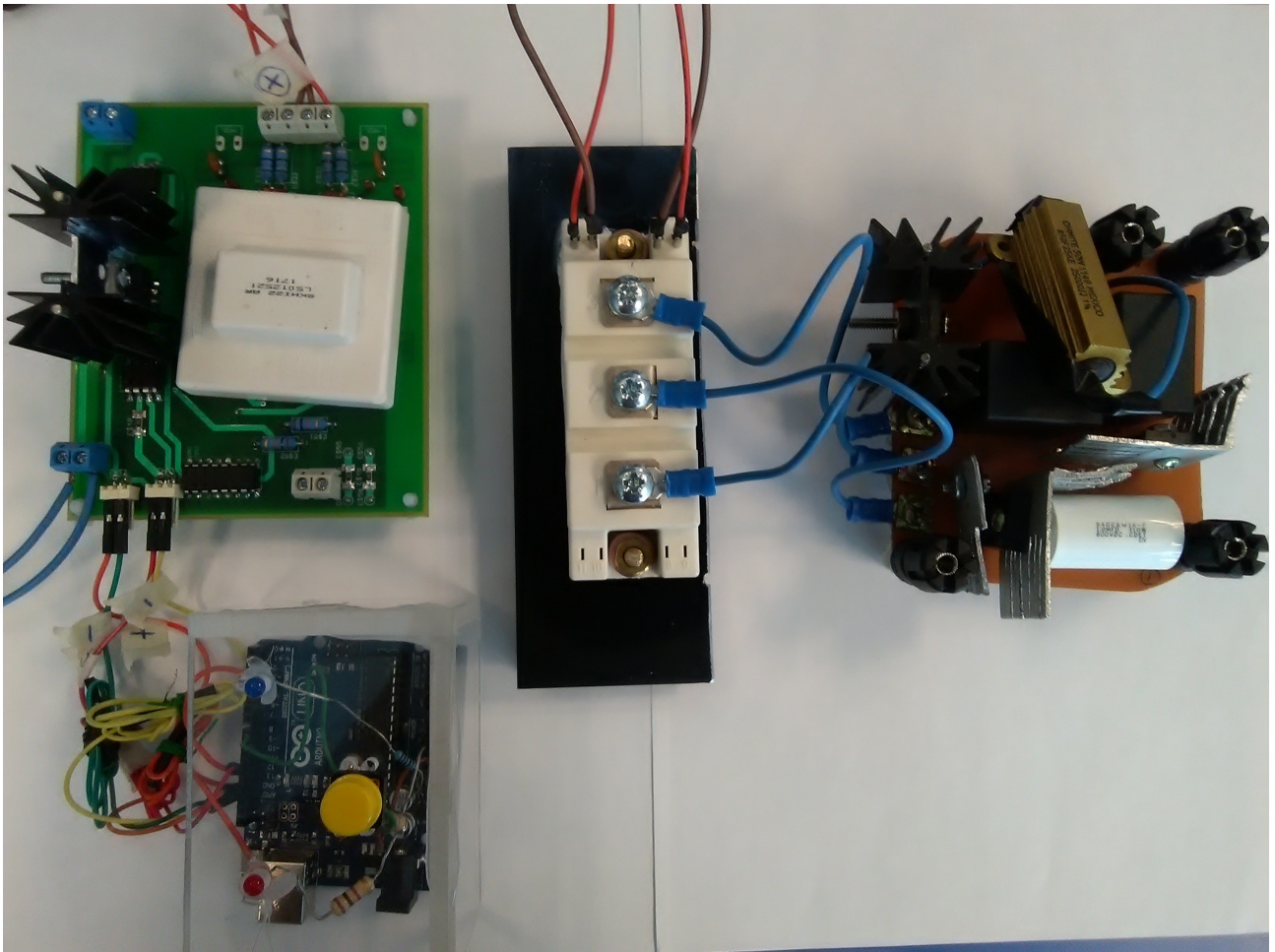


Figura 5.10: Prototipo del circuito generador de impulso tipo maniobra implementado.

Capítulo 6

Resultados experimentales

6.1. Resultados obtenidos

Una vez construida la tarjeta en la cual los distintos componentes del circuito son montados, se procede a la realización de las pruebas de laboratorio del generador de impulso, donde el sistema de control, driver, IGBT's, tarjeta del circuito generador y el transformador son utilizados en conjunto para generar el impulso tipo maniobra.

Algunas de las consideraciones al momento de realizar el ensayo son:

- La tensión de carga del condensador C_1 es de 391 [V].
- El tiempo de carga es de 15 [s] y el tiempo que permanece energizado el circuito de descarga es de 10 [ms].
- El transformador se encuentra sin carga en bornes del lado de alta tensión.
- Se considera una razón de transformación entre un devanado del lado delta y uno del lado estrella, con lo que se obtiene la siguiente razón de transformación.

$$\frac{660/\sqrt{3}_Y}{360_\Delta} \approx \frac{380}{360} \approx 1,055 \quad (6.1)$$

La conexión utilizada para la realización del ensayo corresponde a la mostrada en la Figura 6.1, donde uno de los devanados del delta está cortocircuitado y otro aterrizado. De esta forma en los devanados del lado estrella se generan tensiones en solo dos de los tres devanados y las tensiones inducidas son de sentidos opuestos entre ellas. [7].

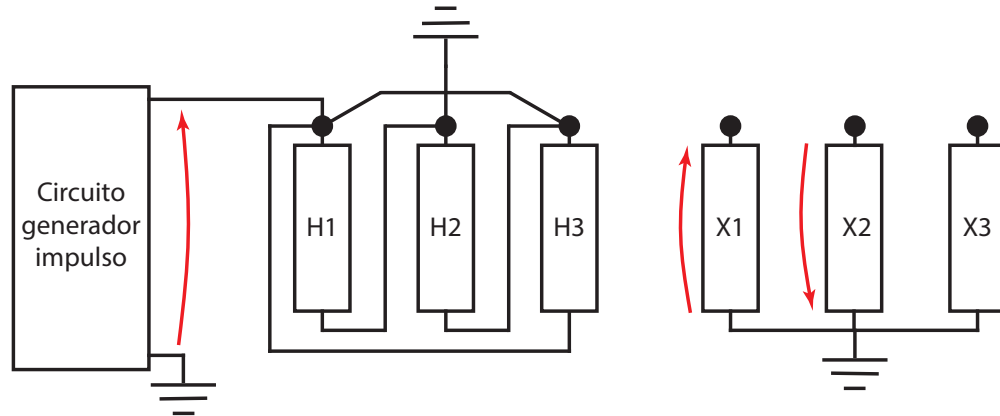


Figura 6.1: Conexión del transformador utilizado para la generación del impulso de maniobra.

En la Figura 6.1, el lado delta se alimenta cortocircuitando una de las fases, produciendo que en el lado de alta sólo dos devanados de la estrella presenten una inducción de tensión. La razón de transformación es proporcional al número de vueltas entre un devanado delta y un devanado estrella y la tensión entre dos fases en el lado de alta corresponde a 2 veces la tensión de fase y neutro debido a la alimentación utilizada.

6.2. Tensiones fase neutro

Realizado el ensayo, se registran las formas de onda de las tensiones fase neutro correspondiente al lado de alta tensión del transformador que posee la conexión de estrella.

Por lo expuesto en [7], en uno de los devanados del lado de alta tensión se genera un impulso en el mismo sentido del impulso de baja tensión, en otro se genera un impulso en sentido contrario y en el tercer devanado no debería inducirse tensión.

Las formas de onda registradas para cada fase se muestran a continuación en las Figuras 6.2, 6.3 y 6.4.

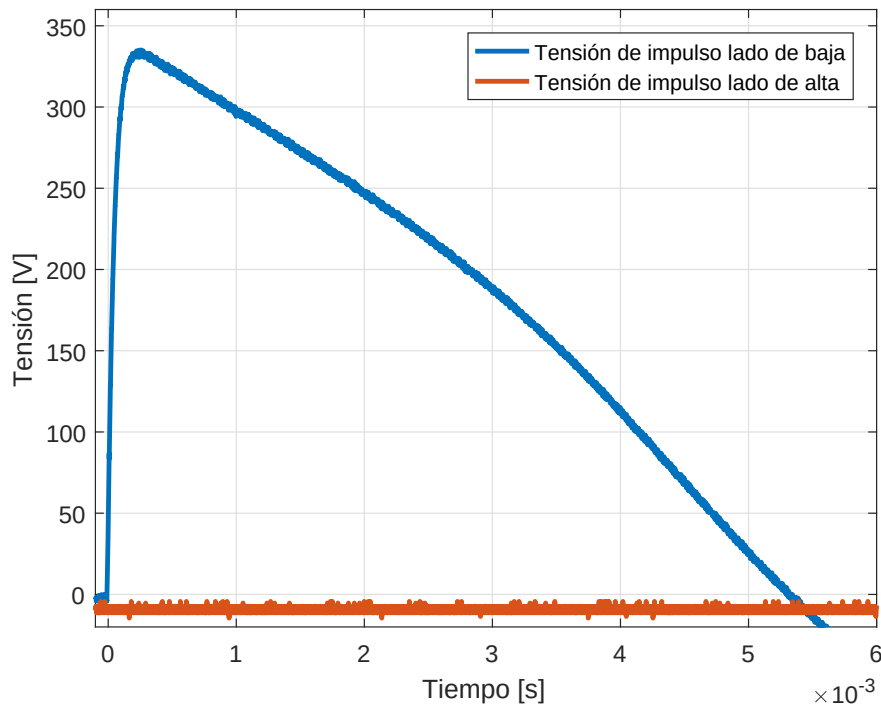


Figura 6.2: Señales de tensión del ensayo impulso, lado de alta tensión X1X0

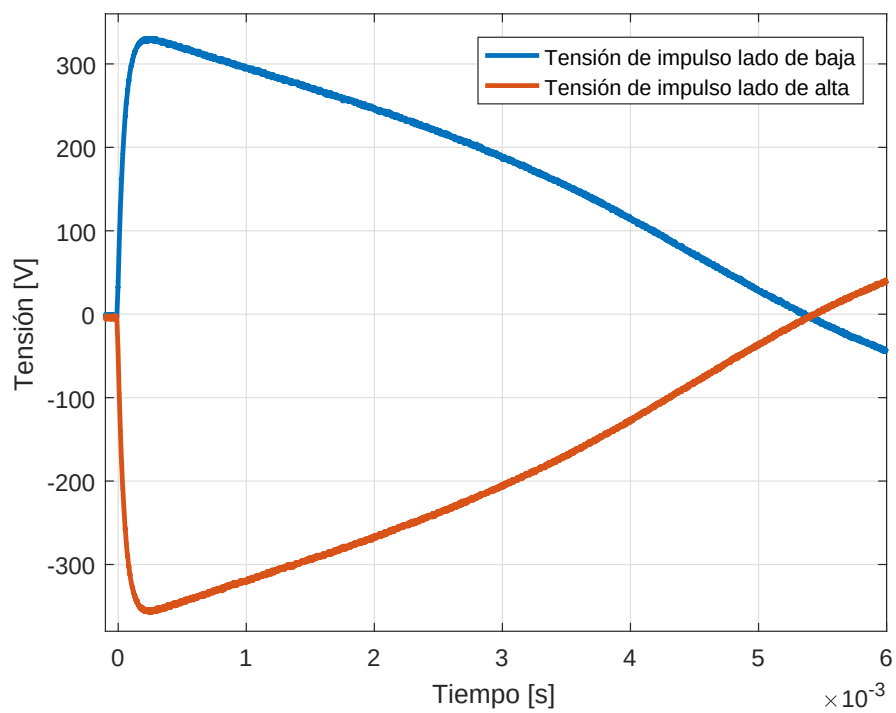


Figura 6.3: Señales de tensión del ensayo impulso, lado de alta tensión X2X0

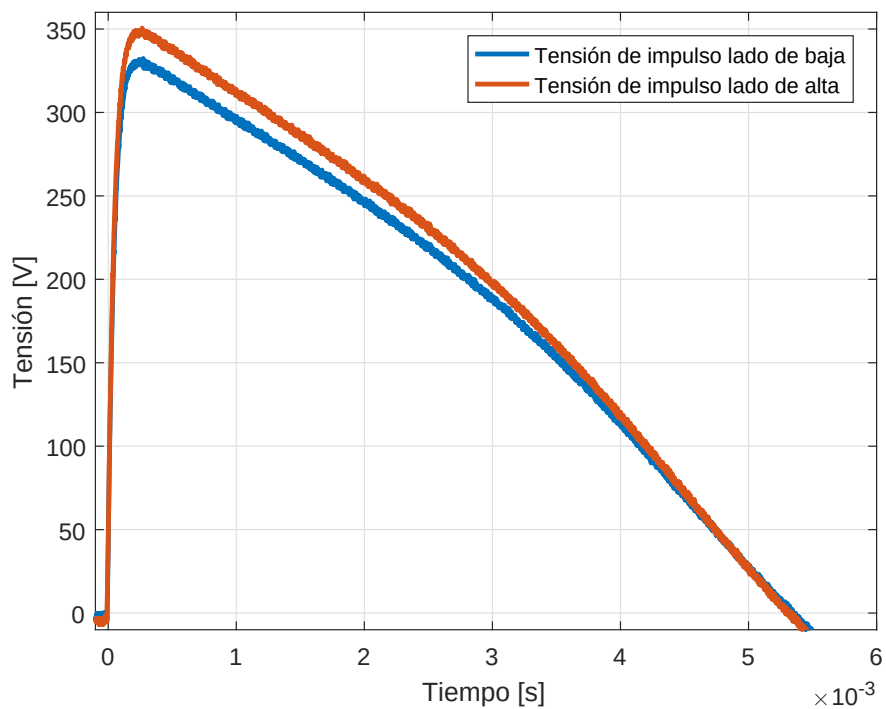


Figura 6.4: Señales de tensión del ensayo impulso, lado de alta tensión X3X0

En las Figuras 6.2, 6.3 y 6.4 se aprecia como en dos de los devanados hay una inducción de tensión con la forma impulso deseado y en el tercer devanado se induce una tensión del orden de los 10 [V], que comparativamente a los otros dos devanados es cerca de 30 veces más pequeña y por lo tanto despreciable, esta tensión es atribuible al desbalance constructivo existente entre las 3 fases del transformador.

Se comprueba la razón de transformación entre devanados, correspondiente a la razón de tensiones entre un devanado delta y una fase de la estrella.

Los resultados para las dos fases con tensión inducida son mostrados en la Tabla 6.1:

Devanado	Tensión HV [V]	Tensión LV [V]	Razón HV/LV	Error Razón
X2X0	357,7	330,7	1,0816	2,5213 %
X3X0	350,6	330,7	1,0602	0,4929 %

Tabla 6.1: Tensiones máximas del devanado de baja y alta tensión del transformador para el ensayo impulso tipo maniobra.

6.2.1. Desempeño del impulso

Para evaluar si los resultados obtenidos son correctos se consideran los indicadores: cociente entre tensión de carga y tensión peak del impulso en el lado de baja tensión, lo que entrega la eficiencia de tensión del circuito, y los tiempos de subida y bajada registrados con sus respectivos errores.

- Devanado X2X0, registra una tensión máxima de 357,7 [V] en el lado de baja tensión, por lo que su eficiencia de tensión de 0,9148.

Los tiempos de frente y cola registrado son de 255,4 [μ s] y 3351 [μ s] respectivamente, teniendo un error con respecto al estándar 250/2500 [μ s] de 2,16 % y 34,04 %, ambos dentro de las tolerancias aceptadas.

- Devanado X3X0, registra una tensión máxima de 350,6 [V] en el lado de baja tensión, por lo que su eficiencia de tensión es de 0,8967.

Los tiempos de frente y cola registrados son de 265,2 [μ s] y 3286 [μ s] respectivamente, teniendo un error con respecto al estándar 250/2500 [μ s] de 6,08 % y 31,44 % siendo también valores dentro de los aceptados como correctos por la normativa.

- Para ambos devanados la razón de transformación de tensión es cercana a la esperada de manera teórica, teniendo un error máximo de 2,52 %.

6.3. Tensiones entre líneas

La tensión entre líneas del lado estrella es particular, debido a que una de las tensiones duplicará en módulo a las tensiones de fase. Por lo tanto, se tiene una razón entre tensión entre líneas y tensiones de fase mayor a la existente en condiciones balanceadas para un sistema trifásico.

Los resultados registrados para las tres tensiones entre líneas se muestran a continuación, en las Figuras 6.5, 6.6 y 6.7.

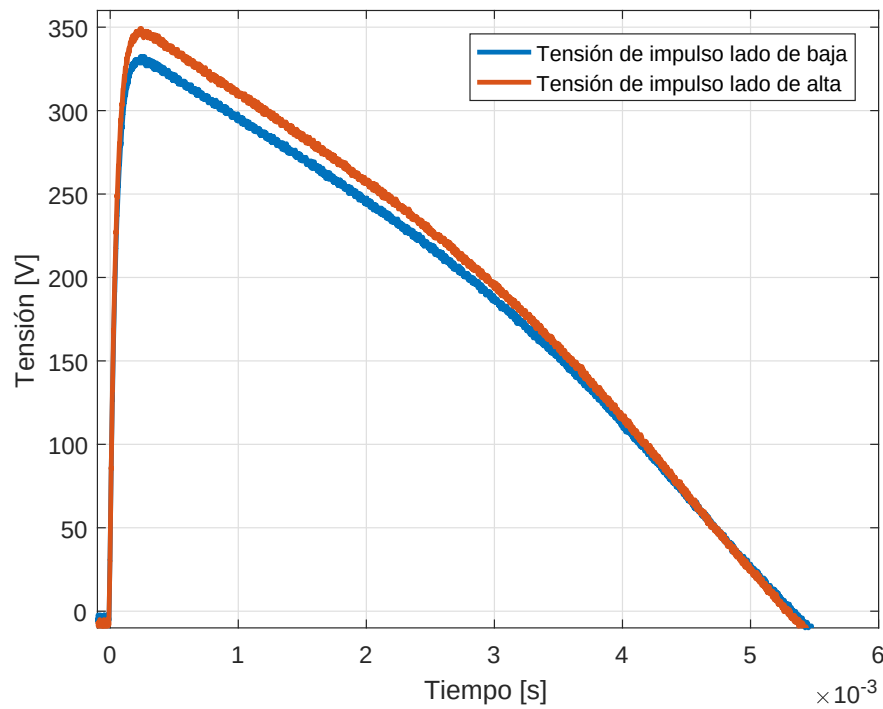


Figura 6.5: Señales de tensión del ensayo impulso, lado de alta tensión X1X2

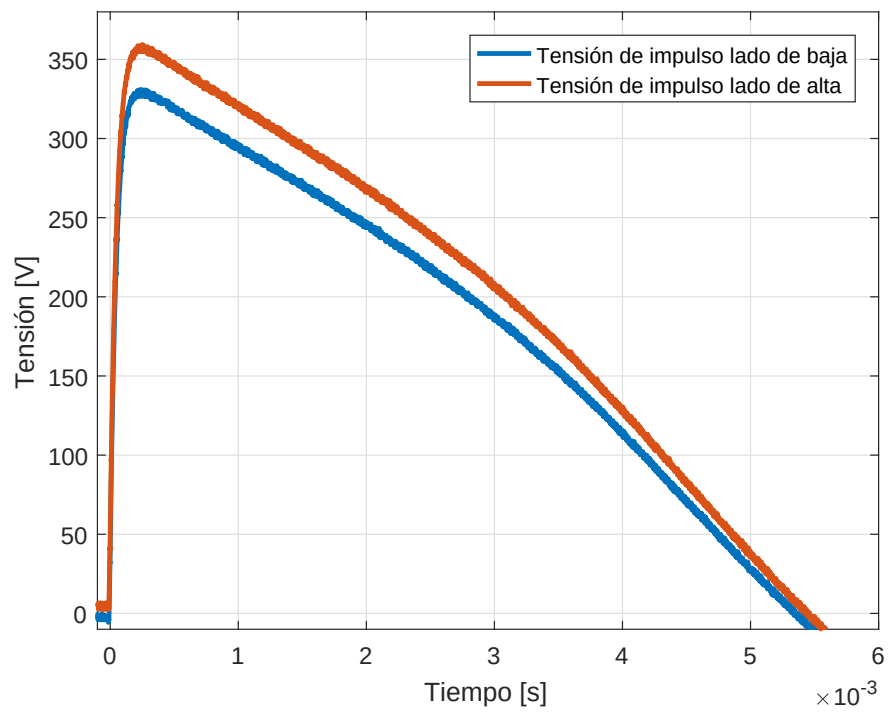


Figura 6.6: Señales de tensión del ensayo impulso, lado de alta tensión X3X1

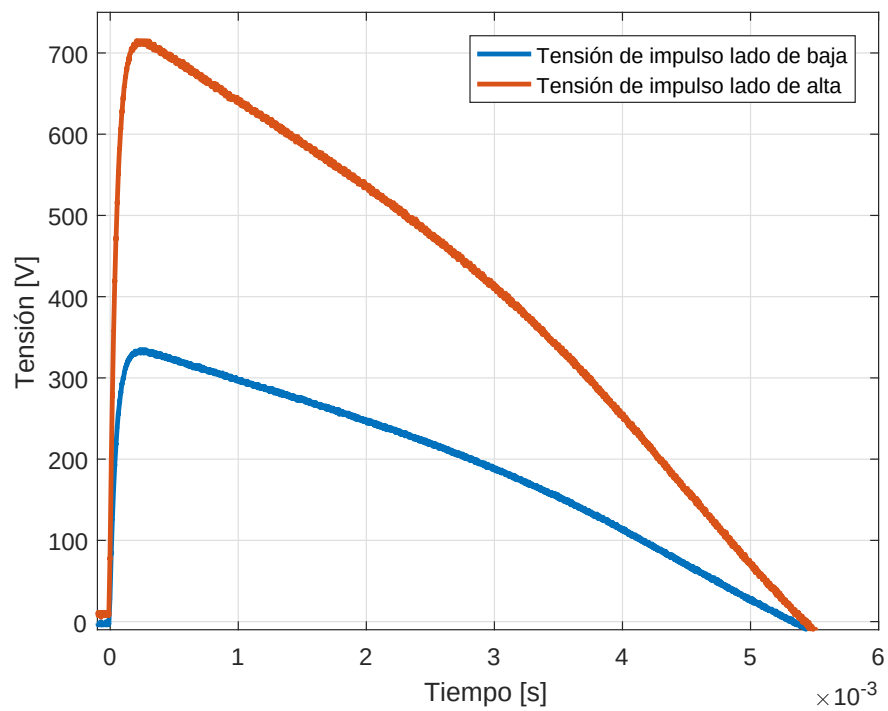


Figura 6.7: Señales de tensión del ensayo impulso, lado de alta tensión X3X2

Como es de esperar las tensiones entre líneas correspondientes a X1X2 y X3X1 poseen valores cercanos entre si, $355,4 [V]$ y $352,6 [V]$ respectivamente, valores parecidos a las tensiones de fase debido a que ambas tienen en común al terminal X1 el cual presenta una tensión de carácter continuo cercana a los $10 [V]$.

Para la tensión restante, el módulo corresponde a la diferencia entre dos señales opuestas, en consecuencia el resultado es la misma señal pero amplificada por dos, registrando un valor máximo de $704,5 [V]$, por lo que se comprueba que la tensión entre líneas generado duplica a la tensión fase neutro inducida.

6.3.1. Desempeño del impulso

Las tensiones de fase neutro cumplen con los tiempos para ser considerados impulsos normados y es de esperar que las tensiones entre líneas también lo sean, ya que corresponden a diferencias entre tensiones que cumplen con los tiempos exigidos por la normativa.

Los resultados para cada una de las tensiones medidas se muestran a continuación:

- Tensión X1X2, posee un valor peak de $355,4 [V]$ y unos tiempos de frente y cola de $244,6 [\mu s]$ y $3281 [\mu s]$, los cuales tienen un error de $2,16 \%$ y $31,24 \%$ respectivamente.
- Tensión X3X1, tiene un valor máximo de $352,6 [V]$ y unos tiempos de frente y cola de $253,8 [\mu s]$ y $3354 [\mu s]$ teniendo errores de $1,52 \%$ y $34,16 \%$ respectivamente.
- Tensión X2X3, con un valor de tensión máxima de $704,5 [V]$ y unos tiempos de subida y cola de $258,4 [\mu s]$ y $3362 [\mu s]$ teniendo un error de $3,36 \%$ y $34,48 \%$ respectivamente.

Las tensiones entre líneas registradas poseen unos tiempos de frente y cola dentro de las tolerancias aceptadas por la normativa para considerarse impulsos tipo maniobra estándares y con desempeños semejantes a los esperados teóricamente.

6.4. Comparación entre simulaciones y mediciones

Para corroborar el modelo utilizado en la determinación de los componentes del circuito generador del impulso, es necesario contrastar las señales de tensión, tanto la simulada como la obtenida experimentalmente. Recordando las condiciones del modelo usado para las simulaciones:

- Modelación de un transformador ideal.
- Se desprecia la capacitancia existente en los devanados del lado de alta y baja tensión del transformador.
- Se considera un funcionamiento en vacío del transformador, no circulando corriente por la rama de alta tensión.

A continuación en la Figura 6.8, se muestran el impulso simulado y el registrado en mediciones para una fase de la estrella del lado de alta tensión del transformador.

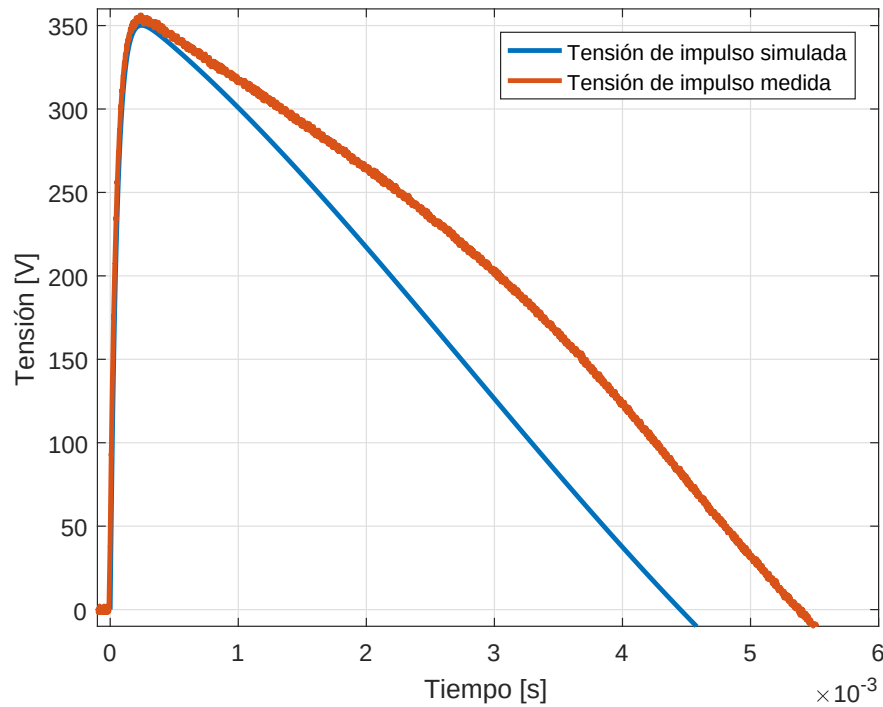


Figura 6.8: Impulso simulado y medido para una fase del lado estrella.

La primera impresión al ver ambas señales es que el impulso generado difiere del simulado, pero si se analiza por puntos particulares se tienen coincidencias ventajosas.

- El nivel de tensión máxima alcanzado es semejante para ambos impulsos, diferenciándose en 6,3 [V], el impulso simulado tiene un valor máximo de 350,1 [V] y el registrado en la medición es de 356,4 [V], presentando una diferencia porcentual de 1,7 % aproximadamente.

- El tiempo de frente (T_p) de ambos impulsos es casi idéntico, para el impulso simulado este tiempo es de $235,2 [\mu s]$ y para el impulso medido es de $240,7 [\mu s]$, diferenciándose por $5,5 [\mu s]$ lo que se traduce en una diferencia porcentual de $2,3$ puntos.
- El tiempo de cola (T_2) es el parámetro que más diferencia presentan ambos, para el impulso simulado este tiempo es de $2467 [\mu s]$ y para el impulso registrado es $3365 [\mu s]$, teniendo una diferencia de $36,4 \%$ correspondiente a $898 [\mu s]$.

Esta diferencia es causada por la histéresis del núcleo ferromagnético, provocando un comportamiento no lineal del transformador [17]. Es así como el transformador no presenta el mismo comportamiento durante la energización y desenergización del sistema, una vez que se llega al valor cresta del impulso y la tensión comienza a decaer, el núcleo ferromagnético mantiene una magnetización residual que se traduce en un punto de trabajo diferente al que se tenía al momento de la energización, por consecuencia el tiempo de cola se ve aumentado y desviado con respecto a lo planteado teóricamente. Aún así el tiempo de cola no está fuera de las cotas válidas, ya que este tiempo presenta una tolerancia holgada ($\pm 60 \%$), obteniendo un resultado correcto de todas maneras.

6.5. Análisis de resultados obtenidos

Teniendo ya los resultados experimentales para el circuito generador impulso que utiliza un transformador trifásico de potencia como elemento elevador de tensión, se concluye lo siguiente:

- Es posible la realización satisfactoria de un impulso tipo maniobra el cual utiliza el mismo transformador como elemento elevador de tensión para que el impulso en bornes de alta tensión tenga la forma de onda y tiempos de frente y cola acordes a los requeridos por la normativa.
- Teniendo una tensión de carga de 391 [V], se logra obtener una eficiencia de tensión sobre el mínimo establecido de 85 %, llegando a tensiones peak en el lado de baja tensión del transformador de 350,6 [V] y 357,7 [V] a las cuales le corresponden las eficiencias de 89,67 % y 91,48 % respectivamente.
- Se obtiene una razón de transformación de tensión satisfactoria para el transformador Yd1 utilizado, con un error máximo de 2,52 % para las tensiones máximas entre el lado de alta y baja tensión.
- Se logra generar un impulso del lado de alta tensión del transformador de manera correcta, lográndose una tensión máxima de 357,7 [V] para las tensiones fase neutro y una tensión máxima de 704,5 [V] para la tensión entre líneas, la conexión utilizada en el transformador logra generar que la tensión entre líneas sea dos veces la magnitud de la tensión inducida en los terminales fase neutro, esto es una razón de tensión mayor a la que es posible de generar en régimen estacionario con una alimentación trifásica balanceada.
- Los tiempos de subida y bajada para todos los resultados mostrados cumplen con los estándares exigidos por la norma y por lo tanto, se consideran correctos. Los errores máximos aceptados son de ± 20 % para el tiempo de frente y ± 60 % para el tiempo de cola, de los resultados obtenidos los errores máximos registrados son de 6,08 % para el tiempo de frente y 34,48 % para el tiempo de cola.
- Se registran diferencias considerables entre el impulso simulado y el impulso registrado en las mediciones, debido a la polarización que sufre el núcleo ferromagnético del transformador, el cual no presenta un comportamiento lineal y extiende el tiempo de cola más allá de lo estimado teóricamente. A pesar de ello, la diferencia obtenida se encuentra dentro del rango aceptado para que el impulso generado sea válido.
- Los tiempos de frente y tensión máxima de los impulsos son bastante cercanos a los estimados, estos aceptan una tolerancia menor a la del tiempo de cola y por lo tanto, se debe dedicar mayor atención a obtener resultados más precisos en estos parámetros ya que su desviación de los valores esperados trae consigo un riesgo mayor de volver inválido el ensayo.

Capítulo 7

Conclusiones

El objetivo principal de este trabajo es diseñar e implementar un circuito de generación para el ensayo impulso tipo maniobra, el circuito tiene la particularidad de generar la señal impulso en baja tensión, controlada por medio de IGBT's que cargan y descargan los acumuladores del circuito. La señal de tensión es elevada por medio de un transformador y en terminales de alta tensión se obtiene el impulso tipo maniobra acorde a los estándares exigidos por la norma internacional IEC 60060.

Para el diseño del circuito, se utiliza la representación por medio de ecuaciones diferenciales, permitiendo obtener sensibilidades de la señal de salida con respecto a los elementos que componen el circuito. Con esto es posible programar una combinatoria de los valores de cada elemento y escoger un set de ellos que generen la señal impulso con el menor error respecto al estándar 250/2500 y una eficiencia de tensión superior a 85 %. El modelo tiene como entradas el circuito equivalente del transformador, la capacitancia C_1 y la resistencia R_1 , por lo que realizando modificaciones de los valores de C_2 y R_2 es que se obtiene el set ideal para el circuito generador.

Se concluye la implementación exitosa del sistema de control del circuito generador, constituido por: tarjeta programable para el control digital, driver para la aislación entre señales de control y fuerza y los semiconductores. El sistema permite operar de manera segura el circuito, cambiando el estado de conducción de cada IGBT en los procesos de carga y descarga.

El circuito generador construido consta de tres partes, estas son: circuito de carga, circuito de descarga y el transformador elevador. El circuito de carga, corresponde a un rectificador de media onda que genera la señal de tensión continua, alisada por el condensador de carga C_1 , el tiempo de operación de este proceso es definido en la programación del sistema de control. A fin de proteger los componentes durante la carga, que tarda 15 segundos, es que la resistencia limitadora utilizada es del orden de los kilohms para asegurar una baja corriente y evitar un sobrecalentamiento de los componentes.

Los valores de los componentes del circuito de descarga aseguran generar un impulso que está dentro de los límites establecidos por la norma internacional.

Finalmente el transformador utilizado es un transformador de poder trifásico, conexión

Yd1, de razón de transformación 330/660 [V] para el tap número 5, la utilización esta derivación es generar la máxima razón de transformación de tensión.

Se concluye que el circuito generador construido, es capaz obtener en terminales de alta tensión del transformador una señal de tensión impulso del tipo maniobra, es decir, el impulso generado posee un tiempo de frente y tiempo de cola acordes a los exigidos por la normativa internacional para ser considerado un impulso maniobra estándar. Así la tensión máxima entre fases registrada es de 704,5 [V], con un tiempo de frente de 258,4 [μ s] y un tiempo de cola de 3362 [μ s]. Por lo tanto, el resultado es acorde a los tiempos previstos y a los exigidos por la norma.

Al comparar los resultados esperados con los experimentales, se destacan tres puntos: el primero, la relación de transformación de tensión es acorde al supuesto lineal planteado en el modelo matemático, obteniendo un error máximo de 2,521 %. En segundo lugar, el tiempo de frente también presenta resultados cercanos a los esperados, teniendo una diferencia de 5,5 [μ s], lo que corresponde a un error de 2,3 %. Finalmente, el tiempo de cola es donde la diferencia entre lo esperado y lo medido poseen una diferencia considerable, se registra un error del 36,4 %, consecuencia de no considerar el comportamiento no lineal del transformador ante la magnetización, es decir, la histéresis magnética propia del núcleo. A pesar de ello, el resultado obtenido es correcto, porque la norma da una holgura de ± 60 % con respecto al valor estándar de 2500 [μ s], teniendo como cota superior los 4000 [μ s].

Los supuestos establecidos en el modelo matemático del circuito permiten predecir tanto la tensión máxima del impulso y el tiempo que tarda en llegar a ese valor (tiempo de frente), pero el tiempo cola no es posible determinarlo bajo el supuesto de un transformador lineal. Aún así, la tolerancia permitida para el tiempo de cola es holgada y a pesar de no considerar un comportamiento lineal, el resultado obtenido es satisfactorio y otorga un tiempo de cola aceptable.

Con los resultados obtenidos, se concluye que:

- La generación de un impulso tipo maniobra, utilizando la topología sugerida en este trabajo, da como resultado una señal de tensión acorde a los requerimientos de la norma IEC 60060.
- La utilización de semiconductores IGBT's emulando la función de los explosores de esferas del circuito tradicional, aseguran una operación libre de correcciones debido a las condiciones ambientales en las que se desarrolla el ensayo.
- Generar el impulso en baja tensión y luego elevar este a alta tensión por medio del transformador, disminuye la sollicitación eléctrica del circuito a un solo elemento, traduciéndose en seguridad en la operación.
- La utilización de electrónica de potencia para controlar el funcionamiento del circuito, trae consigo mayor confiabilidad en la operación y una reducción en el tamaño del generador, lo que facilita su traslado.

7.1. Trabajos futuros

El trabajo mostrado destaca los beneficios de utilizar un circuito generador controlado por IGBT's y utilizando un transformador elevador. Es posible mejorar tanto el modelo matemático utilizado, haciéndolo más real, o bien, utilizar equipos para tener un mejor desempeño.

Dentro del planteamiento teórico del circuito generador se sugiere:

- Considerar un modelo completo del transformador, incluyendo las capacitancias de los devanados y la histéresis del núcleo ferromagnético.
- Utilizar un método de optimización en la búsqueda de los parámetros ideales del circuito.

Para realizar mejoras en la implementación:

- Reemplazar la fuente de alimentación DC utilizada, por una fuente DC basada en electrónica de potencia, reduciendo aún más el tamaño del equipo completo.
- Utilizar en el sistema de control, hardware que permita modificar los tiempos de carga y descarga sin la necesidad de modificar el código del programa.
- Utilizar terminales removibles para todos los componentes del circuito, para así adaptarlo a diversas condiciones de trabajo.
- Utilizar un transformador que posea una memoria magnética menor, como lo son el metal amorfo o la ferrita, para disminuir la histéresis de núcleo.

Bibliografía

- [1] E. KUFFEL, W. S. ZAENGL, J. KUFFEL, *Testing with switching impulses*. En su: *High Voltage Engineering Fundamentals*, segunda edición, 2000, pp.6.
- [2] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, *C62.82.1-2010 - IEEE Standard for Insulation Coordination—Definitions, Principles, and Rules*. IEEE Std C62.82.1-2010, USA, 2011. pp.6.
C62.82.1-2010 - IEEE Standard for Insulation Coordination—Definitions, Principles, and Rules
- [3] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, *High-voltage test techniques-Part 1: General definitions and test requirements*. IEC60060-3. Switzerland, 2010. pp.36-38.
- [4] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, *High-voltage test techniques-Part 3: Definitions and requirements for on site testing*. IEC60060-3. Switzerland, 2000. pp.7-12.
- [5] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, *High-voltage test techniques-Part 1: General definitions and test requirements*. IEC60060-3. Switzerland, 2010. pp.36-37.
- [6] JUAN LUIS DINAMARCA, *10.3 Generación de ATCC*. En su: *Técnicas de Alta Tensión. Teoría y aplicaciones* 2010. pp.85-92.
- [7] L. THIONE, A. SPINELLI, A. BOSSI, E. SESTO, G. SIGUADI, A. BABARE. *Switching impulse test of EHV and UHV transformers*. En *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* (March/April 1980). pp.779-789.
- [8] C.L. WADHWA, *Generation of Impulse Voltages and Currents*. En su: *High Voltage Engineering*, segunda edición, 2007, pp.100.
- [9] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, *Voltage measurement by means of standard air gaps*. IEC60052. Switzerland, 2002. pp.19-23.
- [10] H. ANIS, N. GIAO TRINH, D. TRAIN. *Generation of Switching Impulse Using High Voltage Testing Transformers*. En *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* (March/April 1975). pp.779-789.

- [11] MING REN, CHONGXING ZHANG, MING DONG, RIXIN YE, RICARDO ALBARACÍN. *A New Switching Impulse Generator Based on Transformer Boosting and Insulated Gate Bipolar Transistor Trigger Control*. En *Energies*(9) (August 2016).
- [12] CHISATO SUZUKI. *Two-Stage Sand-Runge-Kutta Methods Powerful for Non-linear Equations with Multiple Solutions*. En *2009 Computation World: Future Computing, Service Computation, Cognitive, Adaptive, Content, Patterns* (Greece, 15–20 November 2009).
- [13] PAOLO MAFFEZZONI, LORENZO CODECASA. *Time-Domain Simulation of Non-linear Circuits Through Implicit Runge–Kutta Methods*. En *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap* (2007).
- [14] C.L. WADHWA, *Generation of Impulse Voltages and Currents*. En su: *High Voltage Engineering*, segunda edición, 2007, pp.94.
- [15] M. S. NAIDU Y V. KAMARAJU, *Restrictions on the ratio of the generator and load capacitances, C_1/C_2 on the circuit performance*. En su: *High Voltage Engineering*, segunda edición, pp.133-134.
- [16] JIANFENG LIANG, LIANG ZHANG, JUNHAO LI Y YANMING LI. *Study on Oscillating Switching Impulse Voltage Generation for Power Transformer Onsite Test*. En *IEEE Trans. Power Delivery* (October 2014).
- [17] A. ÄLGBRANT, A. E. BRIERLEY, N. HYLTÉN-CAVALLIUS Y D. H. RYDER. *Switching surge testing of transformers*. En *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems* (January 1966).

Anexos

Apéndice A

Códigos utilizados

A.1. Código de solución numérica al modelo matemático

Código de Matlab empleado para solucionar el sistema matemático y graficar la solución obtenida:

```
%Parámetros del circuito
R1=1000;
C1=7.5E-6;
R2=65;
C2=9E-7;
Ldisp=3.561E-4;
Lm=1.3244;
L=Ldisp+Lm;
V0=380;
%%
A=(R2*L*C1*C2);
B=(L*C1)+((L*R2*C2)/R1)+(L*C2);
C=(R2*C1)+(L/R1);
D=(R2+R1)/R1;
%Condiciones iniciales
y_iniciales=[0,0,(V0)/(C2*L*R2)];
%tiempo de simulación y número de pasos
t_simulacion=linspace(0,0.0055,1000);
%función que resuelve el sistema de ecuaciones
%diferenciales de primer grado
[t,y]=ode45(@(t,y) funcion(t,y,R1,R2,C1,C2,L),t_simulacion,y_iniciales);
%gráfico tensión del inductor
plot(t,Lm*y(:,2))
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Tensión [V]')
```

```
xlim([0 0.005])
ylim([0 380])
grid on
grid minor
hold on
%función que define el sistema de ecuaciones
%diferenciales de primer grado
function yp=funcion(t,y,R1,R2,C1,C2,L)
A=(R2*L*C1*C2);
B=(L*C1)+((L*R2*C2)/R1)+(L*C2);
C=(R2*C1)+(L/R1);
D=(R2+R1)/R1;
yp=zeros(3,1);
yp(1)=y(2);
yp(2)=y(3);
yp(3)=(-D/A)*y(1)-(C/A)*y(2)-(B/A)*y(3);
end
```

A.2. Código de combinatorias realizadas para encontrar set de parámetros ideales

Código de Matlab que presenta los 176 casos evaluados para encontrar el set de parámetros del circuito generador de impulso.

```
%Código de combinatoria de set de parámetros%
%%Declaración de parámetros
R1=1000;
C1=7.5E-6;
Ldisp=3.561E-4;
Lm=1.3244;
L=Ldisp+Lm;
V0=380;
V_lv=330;
V_hv=660;
T_p=250E-6;
T_2=2500E-6;
contador=0;
sol=zeros(176,10);
% Variación de parámetros R2 y C2
for R2=30:5:80 %11 valores
    for C2=0.5E-6:0.1E-6:2E-6 %16 valores
        contador=contador+1;
        n=contador;
%Coeficientes de la ecuación diferencial
A=(R2*L*C1*C2);
B=(L*C1)+((L*R2*C2)/R1)+(L*C2);
C=(R2*C1)+(L/R1);
D=(R2+R1)/R1;
y_iniciales=[0,0,(V0)/(C2*L*R2)];%condiciones iniciales
t_simulacion=linspace(0,0.0055,4000);%tiempo de simulación
[t,y]=ode45(@(t,y) funcion(t,y,R1,R2,C1,C2,L),t_simulacion,y_iniciales);
%% Identificar los valores y tiempos de frente y cola
%tiempo de frente
V_l=Lm*y(:,2);
MAX=max(V_l);
pos_p=find(V_l==MAX);
tiempo_p=t(pos_p);
format shortG
t_p=[MAX, tiempo_p];
t_p_error=100*abs(T_p-tiempo_p)/T_p;
%tiempo de cola
V_2=V_l-MAX/2;
ubicacion_2=min(abs(V_2));
```

```

pos_2=find(abs(V_2)==ubicacion_2);
tiempo_2=t(pos_2);
t_2=[MAX/2, tiempo_2];
t_2_error=100*abs(T_2-tiempo_2)/T_2;
%Eficiencia entre tensión de salida y carga
efi=MAX/V0;
% Vector de resultados
sol(n,1)=R1;
sol(n,2)=C1;
sol(n,3)=R2;
sol(n,4)=C2;
sol(n,5)=MAX;
sol(n,6)=efi;
sol(n,7)=tiempo_p;
sol(n,8)=t_p_error;
sol(n,9)=tiempo_2;
sol(n,10)=t_2_error;
    end
end
%% Gráficos de los resultados obtenidos
g=[1:1:176];%Número total de casos
m=transpose(g);
%gráfico de combinatoria vs eficiencia de tensión
figure(1)
plot(m,sol(:,6),'o')
xlabel('Número de combinatoria')
ylabel('Eficiencia %')
%gráfico combinatoria vs error t_p
figure(2)
plot(m,sol(:,8),'-o')
xlabel('Número de combinatoria')
ylabel('Error % de Tp')
%gráfico combinatoria vs error t_2
figure(3)
plot(m,sol(:,10),'-o')
xlabel('Número de combinatoria')
ylabel('Error % de T2')
%gráfico combinatoria vs error t_2+tp
figure(4)
plot(m,sol(:,10)+sol(:,8),':')
xlabel('Número de combinatoria')
ylabel('Error % de Tp+T2')
%gráfico combinatoria vs error t_2+tp
figure(5)

```

```

plot(sol(:,6),sol(:,10)+sol(:,8),'x','LineWidth',1.5)
xlabel('Eficiencia')
ylabel('Error % de Tp+T2')
grid on
grid minor
%gráfico combinatoria vs error t_2+tp ZOOM
figure(6)
P=plot(sol(:,6),sol(:,10)+sol(:,8),'x',0.857,2.941,'rp','LineWidth',2)
P(2).LineWidth = 2;
axis([0.75 0.9 0 60])
xlabel('Eficiencia')
ylabel('Error % de Tp+T2')
grid on
grid minor
%% Función que permite crear el sistema de ecc de primer grado para ode45
function yp=funcion(t,y,R1,R2,C1,C2,L)
A=(R2*L*C1*C2);
B=(L*C1)+((L*R2*C2)/R1)+(L*C2);
C=(R2*C1)+(L/R1);
D=(R2+R1)/R1;
yp=zeros(3,1);
yp(1)=y(2);
yp(2)=y(3);
yp(3)=(-D/A)*y(1)-(C/A)*y(2)-(B/A)*y(3);
end

```

A.3. Código de control digital

El código Arduino utilizado para el control digital es el siguiente:

```
int estado=0;
int estado_ant=0;
int salida=0;
void setup() {
  pinMode(8,INPUT);
  pinMode(13,OUTPUT);
  pinMode(12,OUTPUT);
}
void loop() {
  estado = digitalRead(8);
  if((estado == HIGH) && (estado_ant==LOW)){
    salida=1-salida;
    delay(10);
  }
  estado_ant=estado;
  if(salida==1){
    digitalWrite(13, HIGH);//encender pin 13-5V
    delay(15000);
    digitalWrite(13,LOW);
    digitalWrite(12, HIGH);//encender pin 13-5V
    delay(10);
    digitalWrite(12,LOW);
    salida=0;
  }
  else{
    digitalWrite(13,LOW);
    digitalWrite(12,LOW);
  }
}
```