

DISEÑO DE RESISTENCIAS DE ALTA TENSIÓN PARA UN GENERADOR DE IMPULSOS TIPO MANIOBRA

DESIGN OF HIGH VOLTAGE RESISTANCES FOR A SWITCHING TYPE IMPULSE GENERATOR

Yesica Gabriela Vargas Camacho

Universidad Distrital Francisco José de Caldas, GISE3-UD, Colombia
ygvargasc@udistrital.edu.co

Yefer Estiven Cuesta Diaz

Universidad Distrital Francisco José de Caldas, GISE3-UD, Colombia
yecuestad@udistrital.edu.co

Herbert Enrique Rojas Cubides

Universidad Distrital Francisco José de Caldas, GISE3-UD, Colombia
herojasc@udistrital.edu.co

Recepción: 6/noviembre/2024

Aceptación: 27/diciembre/2024

Resumen

Los impulsos de alta tensión son esenciales para probar materiales dieléctricos y equipos en sistemas eléctricos de potencia. Se generan en laboratorios especializados mediante circuitos con condensadores y resistencias que producen tensiones con distintos tiempos de frente y cola, clasificadas como normalizadas (tipo rayo, maniobra o cortado) o no normalizadas. Este trabajo presenta el diseño de dos resistencias de alta tensión para generar impulsos tipo maniobra, seleccionando elementos individuales y configurando arreglos o módulos. Para lo anterior, se aplican conceptos teóricos y se sustenta la toma de decisiones realizando simulaciones de ATP/EMTP. Además, utilizando Fusion 360®, se abordan criterios de diseño como aislamiento, encapsulamiento y disposición física de las resistencias, asegurando su adecuada integración con los demás elementos del Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (LAT-UD).

Palabras Clave: Alta tensión, ATP/EMTP, Impulso tipo maniobra, Resistencias de alta tensión, Simulaciones.

Abstract

High-voltage impulses are essential for testing dielectric materials and equipment in power systems. They are generated in specialized laboratories using circuits with capacitors and resistors that produce voltages with different front and tail times, classified as standardized (lightning, switching, or chopped) or non-standardized. This work presents the design of two high-voltage resistors to generate switching-type impulses, selecting individual elements and configuring arrays or modules. Theoretical concepts are applied, and decisions are supported by ATP/EMTP simulations. Additionally, using Fusion 360®, design criteria such as insulation, encapsulation, and physical arrangement of the resistors are addressed, ensuring their proper integration with other elements of the High Voltage Laboratory of the Universidad Distrital Francisco José de Caldas (LAT-UD).

Keywords: ATP/EMTP, High voltage, High voltage resistors, Simulations, Switching type impulse.

1. Introducción

El Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (LAT-UD) es un espacio dedicado a la formación de estudiantes de diversos niveles (pregrado, maestría y doctorado), y el desarrollo de actividades de investigación, capacitación y extensión. En dicho espacio, se realizan pruebas eléctricas especializadas a partir de la generación de altas tensiones en corriente alterna (HV-AC), en corriente continua (HV-DC) e impulsos (HV-Imp). De manera particular, los impulsos de tensión se caracterizan por su forma de onda y sus características temporales, siendo los tiempos de frente (pico) y de cola los que determinan si son impulsos normalizados (rayo o maniobra) o no normalizados. Puntualmente, el tiempo de frente corresponde al lapso que tarda el impulso desde su inicio hasta alcanzar la tensión máxima o pico, mientras que el tiempo de cola es medido entre el inicio y el punto en que la tensión decae a la mitad del valor pico. Este tipo de tensiones, que emulan o representan sobretensiones típicas y condiciones transitorias, son empleadas frecuentemente en los diversos ensayos especializados que se realizan sobre materiales aislantes, herramientas o

dispositivos y sobre aquellos equipos que componen los sistemas eléctricos de potencia, tales como transformadores, interruptores, cables, aisladores, pararrayos y descargadores, entre otros. Todos ellos, aunque con funciones específicas, proporcionan mayor confiabilidad al sistema y garantizan la entrega de energía de forma segura y confiable [Kuffel, 2000].

Para generar impulsos de alta tensión en laboratorios especializados se usan circuitos (bajo diversas configuraciones) compuestos principalmente por elementos almacenadores de energía (condensadores), algunas resistencias y un interruptor controlado por tensión (espinterómetro o spark gap), el cual permite la transferencia de energía en función de la distancia entre sus electrodos y las características dieléctricas del gas que los separa. De esta manera, la forma de onda del impulso será resultado de los procesos de carga y descarga de los condensadores que, al combinarse con diversos valores de resistencias y una adecuada configuración del espinterómetro, permiten generar tensiones con diferentes amplitudes y características temporales (tiempos de frente y cola) [Kuffel, 2000], [Wadhwa, 2007]. Aunque el LAT-UD es un espacio versátil que permite el desarrollo de múltiples pruebas de esfuerzo dieléctrico, aislamiento eléctrico y compatibilidad electromagnética usando impulsos normalizados tipo rayo ($1.2 \mu s \pm 30\%$ en el frente y $50 \mu s \pm 20\%$ en la cola), actualmente posee una limitación en la generación de impulsos de tensión normalizados tipo maniobra. Esto se debe a que no cuenta con una combinación de condensadores y resistencias que permita obtener un tiempo de frente de $250 \mu s \pm 20\%$ y un tiempo de cola de $2500 \mu s \pm 60\%$, señalados para este tipo de impulso según normas como la IEC 60060-1 (2010) [IEC, 2010], la IEEE St. 4 (2013) [IEEE, 2013] y la NTC 4591 (1999) [NTC, 1999].

Esta limitación en cuanto a la variedad de resistencias y condensadores disponibles en el LAT-UD, junto a la falta de otros elementos necesarios para la generación y medición de altas tensiones, y la elevada inversión económica que se requiere para adquirir elementos comerciales con dichas especificaciones, ha motivado históricamente a estudiantes, docentes e investigadores de la Universidad Distrital a construir componentes y equipos, usando diseños propios o ya referidos en la literatura que cumplan tanto con los requisitos técnicos, como de seguridad.

De esta manera, motivados en la posibilidad de ampliar la capacidad del LAT-UD, y siguiendo la filosofía del Grupo de investigación en sistemas eléctricos y eficiencia energética (GISE3) y de otros investigadores enfocada en construir elementos confiables y de bajo costo, en este artículo se describe la etapa de diseño de dos resistencias que serán empleadas para la generación de impulsos de tensión tipo maniobra a partir de los condensadores disponibles en el laboratorio. De esta forma, a lo largo de este trabajo se presenta la estimación y validación de los valores que tendrán dichos elementos para conseguir los tiempos frente y cola requeridos, se expone el proceso de diseño eléctrico (cantidad de resistencias, módulos, configuración, valores y especificaciones técnicas) a partir de elementos disponibles en el comercio, así como el diseño del encapsulamiento (carcaza) y demás conectores que permitan su implementación e interacción con los demás componentes del circuito de generación.

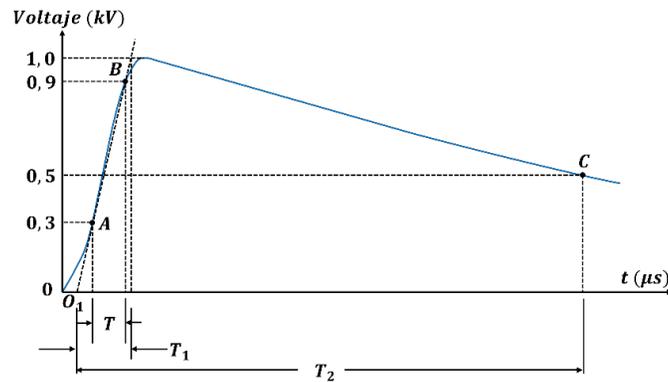
2. Métodos

Impulsos normalizados

Los impulsos normalizados que se generan en los laboratorios de alta tensión son una representación de las sobretensiones, tanto de origen interno como externo, que se pueden presentar en los sistemas eléctricos de potencia (distribución y transmisión). El estándar IEEE-4, así como otras normas nacionales e internacionales, definen el comportamiento para cada tipo de sobretensión, principalmente para los impulsos normalizados tipo rayo y tipo maniobra.

En la Figura 1, se muestra un impulso normalizado tipo rayo que se caracteriza por un tiempo de frente T_1 de $1.2 \mu s$ y un tiempo de cola T_2 de $50 \mu s$, y es identificado en la literatura como un impulso de $1.2/50 \mu s$.

Con el fin de tener flexibilidad experimental y garantizar la reproducibilidad en laboratorio de este impulso, tal como se mencionó en la introducción, se establecen tolerancias en los tiempos y en la amplitud de la onda. De esta manera, el pico debe mantenerse dentro de una variación de hasta $\pm 3\%$ del valor nominal, el tiempo de frente no debe exceder el $\pm 30\%$ de $1.2 \mu s$, y el tiempo de cola no debe exceder el $\pm 20\%$ de $50 \mu s$ [IEEE, 2013].



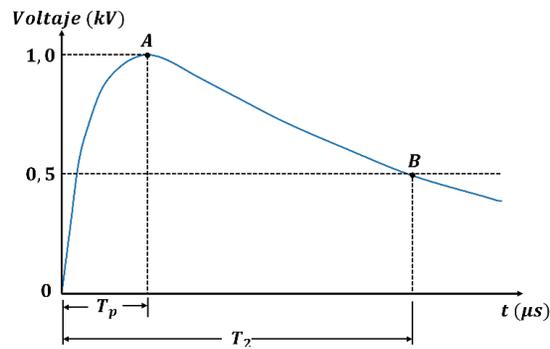
Fuente: adaptado de [IEEE, 2013].

Figura 1 Forma de onda típica de un impulso tipo rayo.

Para determinar los tiempos de frente (T_1) y cola (T_2) según la Figura 1, se cuentan con cuatro puntos clave: A que corresponde al 30% del valor pico del impulso, B es la magnitud al 90%, O_1 es la abscisa de la recta conformada por los puntos A y B que cruza al eje horizontal y C es el punto donde la tensión disminuye al 50%. De esta forma, el tiempo de frente se determina por la diferencia entre los tiempos de los puntos B y A , identificado como intervalo T , multiplicado por 1.67, es decir, $T_1 = 1.67 T$. Por otra parte, el tiempo de cola (T_2) corresponde a la diferencia entre los tiempos registrados en los puntos C y O_1 .

De forma similar, la Figura 2 muestra el impulso tipo maniobra normalizado que posee un tiempo en el frente de onda T_p de 250 μs y un tiempo de cola T_2 de 2500 μs , referido generalmente como impulso de 250/2500 μs . Al igual que con el impulso tipo rayo, se definen tolerancias para este tipo de prueba, asegurando que el pico de tensión se mantenga dentro de $\pm 3\%$ de su valor máximo, el tiempo de frente no supere $\pm 20\%$ de la referencia mencionada, y el tiempo de cola se mantenga dentro de $\pm 60\%$ de 2500 μs [IEEE, 2013].

De acuerdo con la Figura 2, el punto A corresponde al pico del impulso y B es aquel donde la magnitud del impulso disminuye al 50%. De esta manera, y considerando que este tipo de pulsos es mucho más lento que el tipo rayo, el tiempo de frente (T_p) puede ser estimado a partir de la diferencia entre el tiempo del punto A y el origen del impulso, mientras que el tiempo de cola (T_2) corresponde a la diferencia entre el tiempo en el punto B y el origen del impulso.

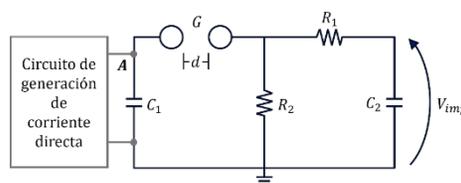


Fuente: adaptado de [IEEE, 2013].

Figura 2 Forma de onda de impulso maniobra.

Circuitos para la generación de impulsos

Por lo general, los circuitos de generación de impulsos de alta tensión requieren de una fuente de corriente directa y se configuran usando dos condensadores y dos resistencias que permiten su carga y descarga. Estos procesos de almacenamiento y transferencia de energía permiten obtener las formas de onda característica de los impulsos [Wadhwa, 2007]. La Figura 3 muestra un circuito típico empleado para la generación de impulsos de tensión. En este esquema, el condensador C_1 se carga a cierta tensión de corriente directa (fuente o circuito de generación) hasta que se alcanza la tensión de ruptura del espinterómetro (G), la cual dependerá de la separación (d) entre las dos esferas que lo componen y el material dieléctrico que las separa (generalmente aire). Posteriormente, el condensador C_2 se carga a través de R_1 (resistencia de frente) produciendo el frente del impulso, y luego C_1 y C_2 se descargan a través de R_2 (resistencia de cola), formando así la cola del impulso [Kuffel, 2000].



Fuente: elaboración propia

Figura 3 Circuito típico usado para la generación de impulsos de tensión.

En este circuito los tiempos de frente y de cola están relacionados directamente con las resistencias y los condensadores dispuestos, así pues, al cambiar uno o más de

estos elementos, las características temporales del impulso generado se verán afectadas. Puntualmente, el LAT-UD cuenta con dos condensadores de 25 y 2 nF que pueden ser usados como C_1 . Por otra parte, cuenta con un condensador de 1200 pF y un divisor capacitivo amortiguado de 1227 pF que pueden ser usados como C_2 . Adicionalmente, el espinterómetro posee dos esferas con radio de 60 mm, lo que permite generar impulsos hasta de 150 kV, incluyendo las pérdidas del circuito y diversos ajustes por condiciones ambientales y altitud.

Formas constructivas de resistencias de alta tensión

En el área de la alta tensión, las resistencias son elementos esenciales y frecuentemente utilizados. Dependiendo de su finalidad, éstas pueden ser resistencias limitadoras de corriente, resistencias para medición indirecta (divisores de tensión o resistencias shunt) o resistencias para la generación de impulsos. Para cumplir con esta última tarea los valores requeridos pueden ir desde algunas centenas de ohmios hasta algunos megohmios, y al revisar la literatura se pueden distinguir dos métodos constructivos:

- Resistencias de alambre enrollado
- Resistencias compuestas por módulos o varios elementos individuales.

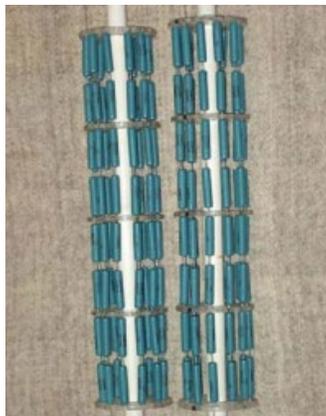
Las resistencias de alambre enrollado, como la que se muestra en la Figura 4, consisten en un hilo metálico cubierto de esmalte aislante, enrollado alrededor de un núcleo plástico que da forma y soporte. Generalmente, el hilo utilizado es de una aleación de nicrom (níquel-cromo) o manganina (cobre-níquel-manganeso) ya que estas aleaciones proporcionan una alta resistencia a la corriente eléctrica y operan a elevadas temperaturas. Este tipo de resistencias poseen una baja inductancia parásita, lo que las convierte en una buena opción para generar impulsos sin deformar la forma de onda [Castro, 2016].



Fuente: tomado de [Castro, 2016].

Figura 4 Resistencia de alambre enrollado.

Por otro lado, las resistencias compuestas por módulos o unidades individuales, como la que se puede apreciar en la Figura 5, se diseñan de manera que el equivalente de todas las unidades (pueden tener conexiones en serie y en paralelo) resulte en el valor de resistencia requerido. Dichos elementos individuales pueden ser resistencias de película delgada, película gruesa o alambre enrollado [Gélvez, 2008]. Comúnmente, se utilizan resistencias de película delgada, ya que cada una puede soportar hasta 25 kV, alcanzando hasta 5 M Ω , son altamente lineales y por su manera de construir son no-inductivas.



Fuente: tomado de [Gélvez, 2008].

Figura 5 Resistencia de alta tensión compuesta de unidades individuales.

Aunque ambos tipos de resistencia pueden emplearse para la generación de impulsos, las asociadas al segundo tipo presentan una ventaja significativa en términos de construcción y mantenimiento. Las unidades individuales se encuentran con mayor facilidad en el mercado, se dispone mayor cantidad de opciones para su selección, y su organización modular permite que, en caso de fallar una o varias de ellas, sea posible reemplazarlas sin mayores complicaciones.

3. Resultados

Una vez descrito el funcionamiento del circuito de generación de impulsos, y luego de exponer la importancia de las resistencias de frente y de cola (R_1 y R_2), se realizó inicialmente la estimación de los valores de las resistencias. Dichos cálculos se realizaron teniendo en cuenta los condensadores disponibles en el LAT-UD y las

constantes temporales necesarias para los impulsos normalizados. Posteriormente, se presentará el proceso de diseño y configuración de cada resistencia.

Estimación de las resistencias de frente y de cola

Los valores de las resistencias de frente y de cola en un circuito de generación de impulsos dependen del circuito elegido y de las constantes de tiempo asociadas a sus características temporales [Kuffel, 2000]. En la Tabla 1 se sintetizan algunos los tiempos empleados como referencia, incluyendo las constantes temporales $1/\alpha_1$ y $1/\alpha_2$, de los cuales dependerá la forma de onda. Es importante indicar que, para impulsos rápidos, como el tipo rayo, se usa la relación T_1/T_2 , mientras que la relación T_p/T_2 es empleada para impulsos lentos, como el tipo maniobra.

Tabla 1 Constantes de tiempo para algunas formas de onda.

T_1/T_2 (μs)	T_p/T_2 (μs)	$1/\alpha_1$ (μs)	$1/\alpha_2$ (μs)
1.2/5	-	3.48	0.80
1.2/50	-	68.2	0.405
1.2/200	-	284	0.381
250/2500	-	2877	104
-	250/2500	3155	62.5

Fuente: tomada de [Kuffel, 2000]

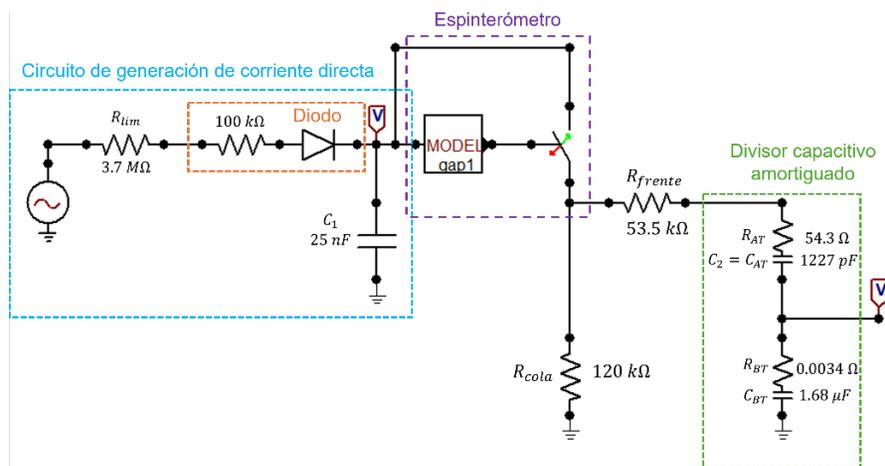
Ajustando el modelo teórico, y considerando que el LAT-UD tiene a disposición los condensadores $C_1 = 25 \text{ nF}$ y $C_2 = 1227 \text{ pF}$, se procedió a calcular el valor de las resistencias R_1 y R_2 para el circuito mostrado en la Figura 3. En dicho proceso, se emplearon las Ecuaciones 1 y 2 que relacionan los condensadores y las constantes temporales del impulso tipo maniobra ($1/\alpha_1 = 3155 \mu s$ y $1/\alpha_2 = 62.5 \mu s$). De esta manera, se obtuvieron los valores teóricos $R_1 = R_f = 53.49 \text{ k}\Omega$ y $R_2 = R_c = 120.18 \text{ k}\Omega$ para la resistencia de frente y de cola, respectivamente.

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

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

Una vez estimados los valores teóricos, se usó el software ATP/EMPT para replicar el circuito de generación completo y analizar las características del impulso generado. Es importante mencionar que para C_2 se usó el condensador dispuesto en la rama de alta tensión de un divisor capacitivo amortiguado. De esta forma, es posible generar y hacer medición del impulso de manera simultánea sin modificar las características del circuito, ni afectar las constantes temporales.

El circuito simulado se muestra en la Figura 6. Inicialmente, en el cuadro azul se tiene el circuito de generación de corriente directa, compuesto por una fuente de corriente alterna, equivalente al transformador elevador usado para las pruebas experimentales, una resistencia limitadora que protege los elementos y limita la corriente suministrada por la fuente, un diodo que posee una resistencia de protección, y el condensador C_1 .

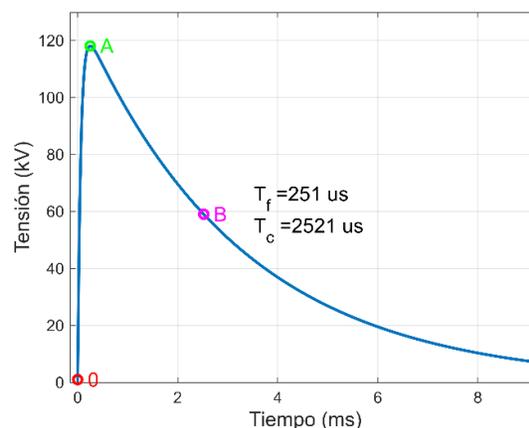


Fuente: elaboración propia

Figura 6 Simulación en ATP/EMTP del impulso maniobra con los valores teóricos.

Luego, en el cuadro morado, se encuentra el espinterómetro, modelado como un interruptor controlado por tensión (model gap1). Este modelo se basa en la ley de Paschen y calcula la tensión de ruptura dieléctrica que ocurrirá entre las dos esferas separadas por aire. Durante su implementación, se incluyen parámetros como presión atmosférica, temperatura, distancia entre electrodos y otras constantes del gas. De esta forma, cuando la fuente de corriente directa alcanza la tensión de ruptura del modelo, el interruptor se cierra, iniciando la generación del impulso y

propiciando la interacción entre R_f , R_c y C_2 . Por último, la medición del impulso de tensión se realiza usando un divisor capacitivo amortiguado, el cual se compone de una rama de alta tensión ($C_2 = C_{AT}$ y R_{AT}) y una rama de baja tensión (C_{BT} y R_{BT}). Por su parte, el pulso registrado a la salida del generador (medido sobre C_2) se puede apreciar en la Figura 7, resaltando los puntos de interés (0, A y B) y señalando los tiempos respectivos, $T_p = 251 \mu s$ y $T_c = 2521 \mu s$. Este resultado es una buena aproximación a los tiempos teóricos de un impulso tipo maniobra y se encuentran dentro de las tolerancias permitidas por las normas.



Fuente: elaboración propia

Figura 7 Impulso maniobra con los valores calculados.

Diseño eléctrico y configuración de las resistencias

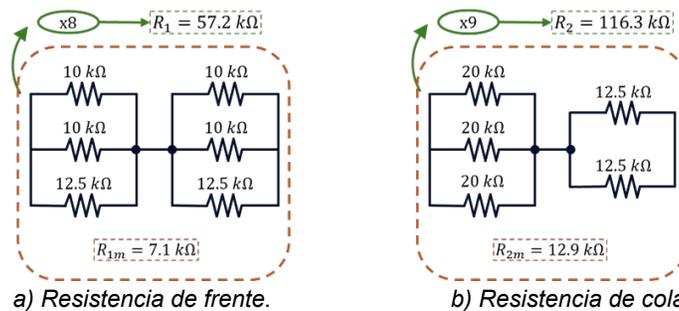
A partir de lo descrito en la sección 2, para este trabajo se decidió diseñar las resistencias de alta tensión a partir de arreglos con elementos individuales. Esto dará flexibilidad al proceso de construcción, permitirá hacer pruebas de validación y de ajuste por etapas, y posteriormente, facilitará el mantenimiento o reparación de cada resistencia al disponer de módulos en lugar de un solo elemento resistivo.

Para determinar la cantidad de elementos individuales necesarios para R_1 y R_2 , se tuvieron en cuenta varias consideraciones: la tensión de operación de las unidades completas (resistencias finales), el tipo de resistencia (elemento individual) y los valores disponibles en el mercado con costos moderados. En el caso de la tensión de operación, los condensadores C_1 y C_2 operan a una tensión máxima de $140 \text{ kV} - \text{pico}$, por lo tanto, las resistencias deberán operar en este rango.

Entre tanto, con el fin de usar la menor cantidad de resistencias individuales, se buscó que estas operaran a tensiones mayores a $5\text{ kV} - \text{pico}$ y que, adicionalmente, fuesen no-inductivas para evitar respuestas oscilatorias (debido a circuitos RLC) y la deformación de la forma onda del impulso. En este caso, y como se mencionó previamente, las resistencias de película delgada son una buena opción. Consultando proveedores especializados sobre este tipo de resistencias se encontraron en la web tres valores (10 , 12.5 y $20\text{ k}\Omega$) que operan a una tensión máxima de 10 kV y disipan hasta 2 W . Para estas opciones, se reportó un valor por pieza que oscila en 3.5 y 6 dólares americanos (USD).

A partir de los valores identificados y disponibles en el mercado, se planteó la construcción de módulos (combinación de resistencias individuales) cuya conexión en serie resultase en los valores finales de cada resistencia de alta tensión. De esta forma, y luego de simular varias alternativas, se decidió que cada módulo fuera el resultado de dos bloques conectados en serie, y cada bloque, a su vez, se configurara con dos o tres resistencias en paralelo. De esta forma, la conexión en serie permite repartir la tensión del módulo, mientras que la conexión en paralelo disminuye la corriente que fluirá por las resistencias individuales, lo que permite distribuir la potencia y la energía disipada a lo largo del arreglo.

De esta forma, la resistencia de frente (R_1) tendrá ocho módulos como los mostrados en la Figura 8a.



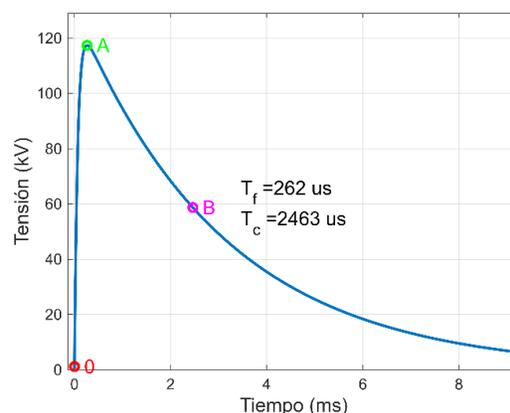
Fuente: elaboración propia

Figura 8 Configuración de un módulo individual de la resistencia de frente y cola.

Cada módulo tiene dos bloques conectados en serie, compuestos a su vez por tres resistencias en paralelo ($10 \parallel 10 \parallel 12.5\text{ k}\Omega$). Con esta combinación se tendrá un

equivalente por módulo de $R_{1m} = 7.14 \text{ k}\Omega$ y el total de la resistencia de frente será de $R_1 = 57.16 \text{ k}\Omega$. Por otro lado, la resistencia de cola (R_2) contará con nueve módulos como los que se aprecian en la Figura 8b. Cada uno de ellos estará compuesto por un bloque de tres resistencias en paralelo de $20 \text{ k}\Omega$ conectado en serie a otro bloque con dos resistencias de $12.5 \text{ k}\Omega$ en paralelo. Lo anterior, resulta en un módulo $R_{2m} = 12.92 \text{ k}\Omega$, y una resistencia total de cola $R_2 = 116.25 \text{ k}\Omega$.

En esta etapa se puede apreciar que las resistencias diseñadas a partir de los valores comerciales ($R_1 = 57.2 \text{ k}\Omega$ y $R_2 = 116.3 \text{ k}\Omega$) se acercan a los valores estimados teóricamente ($R_1 = 53.49 \text{ k}\Omega$ y $R_2 = 120.18 \text{ k}\Omega$). Para validar el diseño se realizó una nueva simulación generando un impulso pico de 120 kV , para lo cual se configuró una tensión de ruptura en el espinterómetro de 140 kV , evidenciando una eficiencia de 86% para todo el circuito. El impulso resultante es mostrado en la Figura 9 y posee un tiempo de frente de $262 \mu\text{s}$ y un tiempo de cola de $2463 \mu\text{s}$. Comparándolos con los valores de referencia ($250/2500 \mu\text{s}$), se tiene una diferencia en el tiempo de pico de $+4.8\%$, mientras que en el tiempo de cola fue de -1.5% . En conclusión, ambos tiempos se encuentran dentro de lo permitido y el impulso podrá ser clasificado como normalizado.



Fuente: elaboración propia

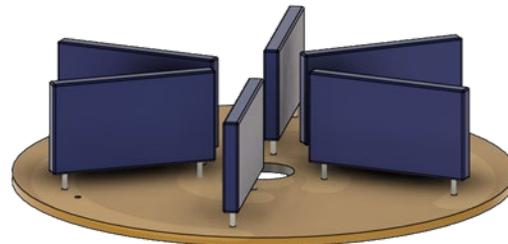
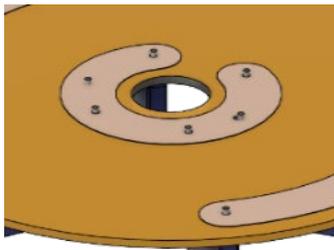
Figura 9 Impulso maniobra con los valores de resistencia diseñados.

Ordenamiento físico y encapsulamiento

Para plasmar físicamente la configuración de los módulos y el ordenamiento de las resistencias se empleó la aplicación computacional de diseño Fusion 360®. En

este caso, se diseñó una baquelita circular de 81 mm de diámetro con tres pistas de cobre: dos exteriores para fijar el punto de entrada y el punto de salida de cada módulo y un anillo parcial ubicado en el centro para la conexión entre resistencias individuales.

Cada baquelita representará un módulo que puede ser usado para resistencia de frente o de cola. La Figura 10a muestra un ejemplo de baquelita para un módulo de resistencia de frente y se puede apreciar que la conexión en paralelo se realiza insertando las resistencias entre una pista exterior y el anillo central. Entre tanto, cada pista exterior conforma un bloque en paralelo que se une en serie mediante anillo central. La disposición física de las resistencias se muestra en la Figura 10b y es importante mencionar que las resistencias deben mantener una distancia mínima respecto a la baquelita para disminuir las capacitancias parásitas, así como una distancia entre sus terminales para evitar una ruptura por aislamiento en el aire. Estas distancias se fijaron a partir de las especificaciones técnicas y constructivas del fabricante.



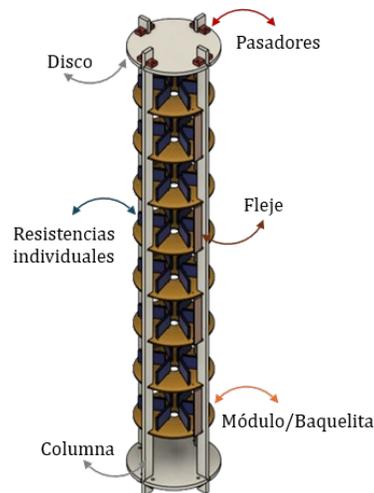
a) Pistas de baquelita para la resistencia de frente. b) Resistencias de un módulo para la resistencia de frente.

Fuente: elaboración propia

Figura 10 Baquelita de módulo de resistencia de frente.

Completando el diseño, y en función de su disposición física, los módulos de cada resistencia se montarán de forma vertical soportados por cuatro columnas de acrílico de 540 mm y estarán espaciadas horizontalmente cada 54 mm en la resistencia de frente, y cada 49 mm en la resistencia de cola. Adicionalmente, para asegurar las columnas y tener una estructura más firme, estas se fijarán a un disco inferior y otro superior de 94 mm de diámetro. Cada columna se deberá asegurar con un pasador y dos tornillos, junto con sus respectivas tuercas y arandelas.

Finalmente, para unir los módulos y realizar la conexión en serie definida durante el diseño, se seleccionaron flejes de cobre para unir la pista salida de cada baquelita con la entrada de la siguiente. De este modo, la resistencia total está dispuesta entre la pista de entrada de la baquelita inferior y la pista de salida de la baquelita superior. El ordenamiento de los módulos, la disposición de las columnas y los discos de soporte, así como los pasadores y demás accesorios empleados se muestran con detalle en la Figura 11.



Fuente: elaboración propia

Figura 11 Disposición de módulos, soportes y accesorios para las resistencias diseñadas

Es importante recordar en este punto que el LAT-UD posee diversos componentes usados para el montaje de los circuitos de prueba (resistencias, condensadores, diodos, divisores, aisladores, etc.). En este sentido, para dar mayor flexibilidad, conservar la simpleza en las conexiones y proporcionar mayor seguridad, se procura que dichos elementos mantengan dimensiones similares en su encapsulamiento (carcazas), especialmente en el largo o alto (570 mm aprox.). Un ejemplo de esto se aprecia en la Figura 12 donde se incluye una resistencia de 350 Ω cuyo ancho es de 4". Considerando lo anterior, y para asegurar que las resistencias de frente y de cola puedan ser utilizadas sin restricción, se procedió a diseñar un encapsulamiento adecuado empleando Fusion 360®. Para esto, se seleccionó un tubo de PVC de presión de 570 mm de largo y 4" de ancho, y

recubierto con una delgada capa de resina epóxica de tono rojo óxido que proporcionará dureza, resistencia a golpes y una presentación similar a los demás componentes del laboratorio.

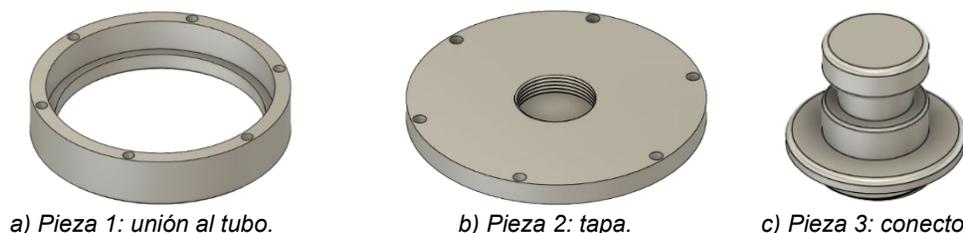


Fuente: tomado de [Gélvez, 2008]

Figura 12 Resistencia de frente disponible en LAT-UD.

Sumado al encapsulamiento descrito se deben sumar dos conectores metálicos, uno a cada extremo de la resistencia. Uno de estos estará unido mediante un fleje a la pista de salida del módulo superior y el otro será conectado a la pista de entrada del módulo inferior. De esta forma, cualquier medición o prueba que se realice entre ambos conectores será efectuada sobre el valor total de la resistencia.

En cuanto al diseño final, se utilizarán tres piezas de aluminio macizo para la conexión y cierre de cada resistencia. La primera de ellas, mostrada en la Figura 13a, tiene la función de asegurar el conector al tubo, ejerciendo presión entre ambas superficies. Esta pieza cuenta con seis orificios donde se insertarán tornillos Bristol que la unirán a la segunda pieza que actúa como tapa (Figura 13b). Dicha tapa tendrá un orificio roscado en el centro que permite insertar la tercera pieza o conector (Figura 13c), el cual se usa para montar fijamente los elementos en el laboratorio y hacer unión entre varios de ellos.



a) Pieza 1: unión al tubo.

b) Pieza 2: tapa.

c) Pieza 3: conector.

Fuente: elaboración propia

Figura 13 Piezas de conector de aluminio.

Para terminar el diseño, se insertó el arreglo de resistencias soportado en la estructura de acrílico (mostrado en la Figura 11) dentro del tubo de resina. Luego,

se realizaron las conexiones de los módulos inferior y superior con los conectores de aluminio. De esta forma, en la Figura 14 se muestra la resistencia de frente y de cola completamente ensamblada.

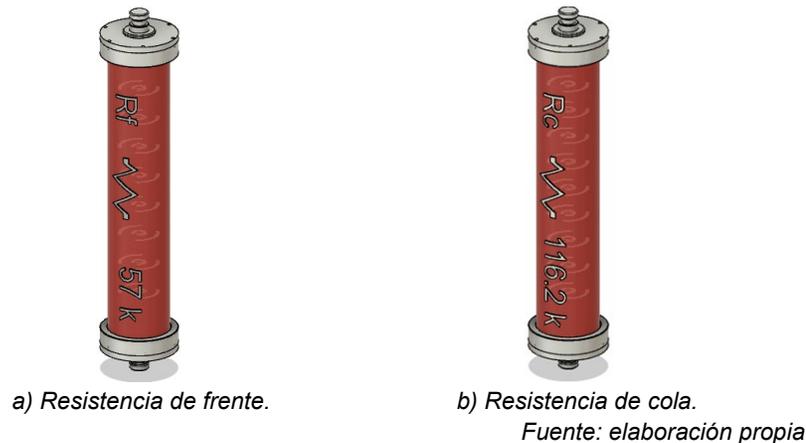


Figura 14 Vista final de las resistencias de frente y colas diseñadas.

4. Discusión

A lo largo de este trabajo se ha presentado una metodología para el diseño y validación de dos resistencias de alta tensión para la generación de impulsos de tensión tipo maniobra en el LAT-UD. Inicialmente, se realizó el cálculo teórico de la resistencia de frente y la de cola, considerando algunas constantes temporales referidas en literatura especializada y los condensadores disponibles en el laboratorio, cuyo costo de adquisición es muy elevado.

A partir de dichas estimaciones, se simuló en ATP/EMTP el circuito de generación de impulsos, incluyendo las resistencias calculadas, y se comprobó que el impulso resultante se ajusta perfectamente a los tiempos de pico y de cola establecidos por las normas (nacionales e internacionales). De esta manera, se asegura que, previo a su construcción y validación experimental, el nuevo circuito cumpla las condiciones para generar impulsos de alta tensión tipo maniobra.

Posteriormente, considerando resistencias disponibles en el mercado, se optó por la construcción de resistencias robustas a partir de unidades individuales (2 W y 10 kV cada una). Este diseño permitirá construir la resistencia de frente y de cola usando pocas unidades (configuradas en arreglos serie y paralelo), lo que brindará

simplicidad, versatilidad y modularidad. Finalmente, se diseñó el encapsulamiento teniendo en cuenta como patrón los elementos disponibles en el LAT-UD, asegurando así uniformidad de formas y tamaño. Todo esto, con el propósito de garantizar su correcta conexión y la adecuada interacción con los demás elementos que componen el circuito de generación.

5. Conclusiones

Las conclusiones de este trabajo son:

- El enfoque de diseño modular, utilizando elementos individuales para formar las resistencias de alta tensión, proporciona una gran flexibilidad en la construcción y ajuste de los componentes. Este proceso permite realizar pruebas y modificaciones a una o varias etapas, así como facilitar el mantenimiento y la sustitución de partes específicas sin necesidad de reemplazar la totalidad de los componentes. Lo anterior, resulta en una solución práctica y eficiente para el laboratorio.
- Las simulaciones realizadas con el software ATP/EMTP y los diseños eléctricos propuestos para las resistencias de frente y de cola mostraron resultados satisfactorios, permitiendo generar impulsos de tensión de hasta 120 kV pico sin deformaciones sustanciales en la forma de onda. Los impulsos resultantes reportaron un tiempo pico de 260 μs y un tiempo de cola de 2463 μs , con una diferencia de 4.8% en el tiempo pico y -1.5% en el tiempo de cola, cumpliendo así con las tolerancias requeridas para los impulsos tipo maniobra según normas como la IEC 60060-1 [IEC, 2010], IEEE St. 4 [IEEE, 2013] y NTC 4591 [NTC, 1999].
- La combinación de modelos teóricos, simulaciones en ATP/EMTP y el uso de herramientas de diseño gráfico permitieron ajustar el diseño de las resistencias de alta tensión. Asimismo, el desarrollo de estas pruebas y la inclusión de consideraciones relevantes como costo, tamaño, formas, materiales, conexiones, requerimientos de aislamiento y de compatibilidad electromagnética, entre otros, reducirá significativamente los tiempos de construcción y permite afinar detalles importantes para el proceso de

implementación experimental y validación. A partir de los resultados presentados en este trabajo, la siguiente tarea es proceder con la construcción de las resistencias y las pruebas de laboratorio para el circuito de generación. Los resultados de esto serán presentados en trabajos futuros.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Castro J. & Jara J, 2016, Modelado Matemático y Construcción de Dos Elementos Resistivos, para el análisis de sobretensiones debido a impulsos tipo maniobra en alta tensión, Guayaquil.
- [2] Gévez C., Martínez J. & Meza E., 2008, Diseño y construcción de las resistencias de frente y de cola para el generador de impulsos de tensión, Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- [3] IEEE Power and Energy Society, 2013, IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques, New York.
- [4] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), 1999, NTC 4591 Técnicas de Ensayo a Alta Tensión. Definiciones Generales y Requisitos de Ensayo, Bogotá D.C.
- [5] International Electrotechnical Commission (IEC), 2010, IEC 60060-1 High-voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements, International Electrotechnical Commission.
- [6] Kuffel E., Zaengl W. & Kuffel J., 2000, High Voltage Engineering, Second edition. Oxford.
- [7] Wadhwa C., 2007, High Voltage Engineering, Second Edition. New Delhi: New Age International Publishers.