

Implementación de un filtro para una onda 1,2/50 μ s (TIPO RAYO).

Elver David Carreño Guevara y Georgy Samuel García Cala

Trabajo de Grado Para Optar al Título De
Ingeniero Electricista

Director

Julio César Chacón Velasco

Magíster En Potencia Eléctrica

Codirector

Hermann Raúl Vargas Torres

Doctor En Ingeniería Eléctrica

Universidad Industrial De Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela De Ingenierías Eléctrica, Electrónica Y De Telecomunicaciones

Bucaramanga

2021

Agradecimientos

Primero gracias a Dios por colocar en mi camino a personas tan maravillosas como lo son mi familia, a los cuales agradezco por confiar en mí, espero contar siempre con su valioso e incondicional apoyo.

Al profesor Julio César Chacón Velasco por ser esa mano guía en el desarrollo de este proyecto, y a todos mis compañeros y profesores no me queda más que agradecerles por brindarme su amistad y aportarme conocimientos durante toda esta hermosa etapa vivida en la Universidad.

ELVER DAVID CARREÑO GUEVARA

Agradecimientos

Dedico y agradezco a dios por todo, por estar siempre a nuestro lado y darnos esta oportunidad.

A mis padres y toda mi familia por darme el apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida.

Agradezco a mi pareja quien a estado en las buenas y en las malas dándome su apoyo incondicional en todo mi trayecto como estudiante universitario.

Agradezco al profesor Julio César Chacón Velasco por ser de gran ayuda en este gran proyecto de grado. Y todos mis compañeros y profesores que fueron parten de este camino de mi vida.

GEORGY SAMUEL GARCIA CALA

Contenido

Introducción	12
1. Obtención de formas de ondas	13
1.1 Parámetros.....	13
1.2 Impulsos atmosféricos (IA) de tensión normalizados.....	15
1.2.1 Onda completa	15
1.2.2 Onda tipo IA recortada en la cola	16
1.3 Equipos de pruebas	18
1.4 Filtro.....	18
2. Procedimiento para calcular los parámetros en los IA con oscilación superpuesta en el pico .	20
2.1 Pasos para calcular los parámetros de una onda tipo IA completa	20
2.2 Impulso tipo IA recortada en la cola.....	27
2.3 Pasos para calcular los parámetros de una onda tipo IA recortada en la cola.	28
3. Diseño de la interfaz	32
3. Diseño de la interfaz	32
3.1 Importación de datos.....	32
3.2 Diagrama de flujo de la interfaz.....	34
3.3 Procedimiento de ejecución.	36
3.4 Manual de usuario.....	38
3.5 Guardar gráficas	40
4. Cálculos realizados	42
4.1 Tipos de filtros	42

<i>4.1.2 Filtro tipo frente recortado en la cola</i>	50
<i>4.1.3 Filtro tipo cola</i>	53
5. Conclusiones	59
6. Recomendaciones	61
Referencias	62
Apéndices	64

Lista De Tablas

Tabla 1. Características del generador de impulsos de la UIS65

Tabla 2. Características del divisor capacitivo de la UIS.67

Lista de Figuras

Figura 1. Impulso tipo rayo completo sin oscilaciones ni sobre impulsos.	15
Figura 2. Impulso tipo rayo recortado en la cola.	17
Figura 3. Curva registrada $V(t)$, Curva base $V_m(t)$ y curva residual $R(t)$	24
Figura 4. Función dependiente de la frecuencia del factor de tensión de prueba $K(f)$	25
Figura 5. Curva registrada $V(t)$, curva de tensión de prueba $V_t(t)$	27
Figura 6. Onda recortada en la cola.	29
Figura 7. Archivo Excel .CSV	33
Figura 8. Archivo Excel “HOJADEPEGADO”	34
Figura 9. Diagrama de flujo	35
Figura 10. Archivos de la herramienta computacional	36
Figura 11. Instrucciones de actualización	37
Figura 12. Portada de la interfaz grafica	38
Figura 13. Partes de la interfaz gráfica	39
Figura 14. Aplicación de la interfaz gráfica.....	40
Figura 15. Guardar graficas	41
Figura 16. Curva registrada $V(t)$, curva base $V_m(t)$ y curva residual $R(t)$	42
Figura 17. Curva registrada $V(t)$	43
Figura 18. Curva base $V_m(t)$	44
Figura 19. Curva residual $R(t)$	45
Figura 20. Filtro virtual $k(f)$	46
Figura 21. Curva residuo filtrada $R_f(t)$	47

Figura 22. Curva de tensión de prueba $V_t(t)$	48
Figura 23. Curva de tensión (antes y después del tratamiento de filtrado).....	49
Figura 24. Curva registrada recortada en la cola.	50
Figura 25. Curva registrada $V(t)$ seccionada para la creación del parche de cola	51
Figura 26. Curva registrada $V(t)$	52
Figura 27. Curva tipo cola registrada $V(t)$	53
Figura 28. Curva tipo cola base $V_m(t)$	54
Figura 29. Curva tipo cola residual $R(t)$	55
Figura 30. Curva tipo cola ajustada $V_t(t)$	56
Figura 31. Curva registrada y Curva de tensión de prueba.....	57
Figura 32. G.I del laboratorio de alta tensión UIS.....	66
Figura 33. Divisor capacitivo amortiguado	68

Lista de Apéndices

Apéndice A. Equipos de laboratorio para la prueba de impulso atmosférico.....	65
Apéndice B. Código Matlab	69

Resumen

TITULO: Implementación de un filtro para una onda 1,2/50 μ s (tipo rayo)*

AUTORES: Elver David Carreño Guevara, Georgi Samuel García Cala.**

PALABRAS CLAVE: Impulso atmosférico (IA), generador de impulsos (G.I), Tensión de prueba (V_t), Curva tensión de prueba ($V(t)$), Curva registrada ($V(t)$), Curva base ($V_{m(t)}$), Curva residuo ($R(t)$), Curva residuo filtrada ($R_f(t)$).

DESCRIPCIÓN

Un equipo eléctrico (sistema eléctrico de potencia, transmisión o distribución) durante su vida útil debe soportar sobretensiones debido a descargas atmosféricas o por maniobras (tipo switcheo), las cuales sobrepasan sus tensiones nominales de operación y por lo tanto se es necesario generar ondas de prueba para investigar la capacidad a soportar sobretensiones que tienen dichos equipos eléctricos. Estas pruebas no pretenden reproducir exactamente las condiciones de operación, pero se puede lograr un criterio basado en la experiencia para obtener unos resultados aproximados a la realidad. Este libro presenta una descripción del filtro virtual creado por medio de una herramienta computacional y de la forma como este atenúa los impulsos atmosféricos.

Para esto, se tiene como criterio que la onda de prueba obedezca los parámetros característicos de una onda tipo rayo (tiempo de frente y tiempo de cola), donde el estudio de estas ondas puede presentar dificultades en la toma de datos en el laboratorio de alta tensión por perturbaciones (ruido), por lo que surge la necesidad de implementar un filtrado con base al procedimiento propuesto en el estándar 4 de 2013 de la IEEE.

Obteniendo como resultado una herramienta computacional desarrollada en MATLAB® que servirá como herramienta de estudio e investigación en laboratorios en alta tensión relacionados con impulsos atmosféricos ya que identifica la onda que está siendo analizada y a partir de esto, se realiza el respectivo tratamiento de filtrado.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela De Ingenierías Eléctrica, Electrónica Y De Telecomunicaciones. Director. Julio César Chacón Velasco Magíster En Potencia Eléctrica. Codirector. Hermann Raúl Vargas Torres. Doctor En Ingeniería Eléctrica

Abstract

TITLE: implementation of a filter for a 1,2/50 μ s wave (lightning type).*

AUTHORS: Elver David Carreño Guevara, Georgi Samuel García Cala.**

KEYWORDS: Lightning wave, Impulse generator (G.I), Test voltaje (V_t), Test voltaje curve ($V_t(t)$), Registered curve ($V(t)$), Base curve ($V_m(t)$), Residual curve ($R(t)$), Filtered residual curve ($R_f(t)$).

DESCRIPTION

An electrical equipment (power, transmission or distribution electrical system) during its service life must withstand surges due to atmospheric discharges or by maneuvers (Switched type), which exceed their nominal operating voltages and therefore it is necessary to generate test waves to investigate the capacity to withstand surges that such electrical equipment have. These tests are not intended to accurately reproduce operating conditions, but an experience-based criterion can be achieved to obtain results that are close to reality. This book presents a description of the virtual filter created by means of a computational tool and how it attenuates atmospheric impulses.

For this, the criterion is that the test wave obeys the characteristic parameters of a ray-type wave (front time and tail time), where the study of these waves can present difficulties in data collection in the laboratory of high voltage perturbations (noise), so the need arises to implement a filtering based on the procedure proposed in IEEE standard 4 of 2013.

Obtaining as a result a computational tool developed in MATLAB ® that will serve as a study and research tool in high voltage laboratories related to atmospheric impulses since it identifies the wave that is being analyzed and from this, the respective filtering treatment is performed.

* Degree Work

** Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Director. Julio César Chacón Velasco Master in Electric Power. Co-director. Hermann Raúl Vargas Torres. Doctor in Electrical Engineering

Introducción

Este trabajo de grado trata sobre la elaboración e implementación de un filtro para una onda 1,2/50 μs (TIPO RAYO), con el propósito de obtener una señal con el menor ruido posible, todo esto de acuerdo con los lineamientos de la norma IEEE std.4 de 2013.

En los capítulos 1 y 2 se describen los conceptos básicos a tener en cuenta para la ejecución de este y los lineamientos presentados por la norma IEEE std.4 para la elaboración del filtro a través de la herramienta computacional MATLAB®.

En el capítulo 3 se describe todo lo relacionado al diseño de la herramienta computacional (diagramas de flujos, procedimiento, entre otros). Y en el capítulo 4 los cálculos realizados cumpliendo lo establecido en los capítulos anteriores.

En los anexos se presentan los soportes procedimentales en los equipos de pruebas utilizados en alta tensión y el código realizado para la ejecución de la herramienta computacional.

1. Obtención de formas de ondas

El estándar 4 IEEE de 2013 define métodos y técnicas básicas para pruebas de alta tensión aplicables a todo tipo de aparatos que funcionan con corriente continua, corriente alterna, tensiones de impulso atmosférico, tensiones de impulso de maniobra y corrientes de impulso. Este trabajo de grado se desarrolla e implementa un filtro para aplicarle a las señales obtenidas de las pruebas y mediciones en tensiones de impulso atmosférico (tipo rayo) de las ondas generadas en LAT¹ de la UIS, siguiendo las recomendaciones establecidas en dicha norma.

1.1 Parámetros

Los siguientes términos son importantes para la comprensión de este trabajo, los cuales se definen en el estándar 4 IEEE de 2013.

Impulso. Transitorio de tensión o corriente generado que crece hasta un valor pico y luego decae hasta un valor cero.

Impulso atmosférico (IA o tipo rayo). Impulso con tiempo frontal de hasta 20 μ s, son originadas por descargas atmosféricas.

Impulso tipo rayo completo. Impulso tipo rayo no interrumpido por ningún tipo de descarga brusca.

Sobre impulso. Aumento de amplitud en la tensión de impulso tipo rayo completo causado por una oscilación en el pico.

¹ LAT: Laboratorio de alta tensión

Valor de la tensión de prueba, V_t . Valor máximo de la curva de tensión de prueba. El V_t para un impulso tipo rayo sin sobre impulso u oscilaciones es su valor máximo.

Curva registrada, $V(t)$. Representación gráfica o digital de los datos de prueba de una tensión de impulso.

Nivel base. Nivel de un registro de un sistema de medición de impulsos cuando no hay una entrada al instrumento de grabación.

Curva base, $V_m(t)$. Estimación de una tensión de impulso tipo rayo completo sin una oscilación superpuesta.

Curva residual, $R(t)$. La diferencia entre la curva registrada y la curva base.

Curva de tensión de prueba, $V_t(t)$. Suma de la curva base y la curva residual después de haber sido procesado por un filtro cuya respuesta de frecuencia está definida por la función de tensión de prueba.

Cuando no hay sobre impulso ($\beta' < 1\%$), la curva registrada es la curva de tensión de prueba.

Magnitud de sobre impulso, β . La diferencia en los valores máximos entre la curva registrada y la curva base.

Magnitud relativa de sobre impulso, β . Relación entre la magnitud del sobre impulso y el valor extremo de un impulso, generalmente expresado como un porcentaje.

Valor extremo de un impulso, V_e . Valor máximo de la curva registrada.

Función de tensión de prueba. Función de amplitud-frecuencia que define la respuesta del aislamiento a los impulsos con sobre impulso, está dado por:

$$k(f) = \frac{1}{1 + 2,2f^2}$$

1.2 Impulsos atmosféricos (IA) de tensión normalizados.

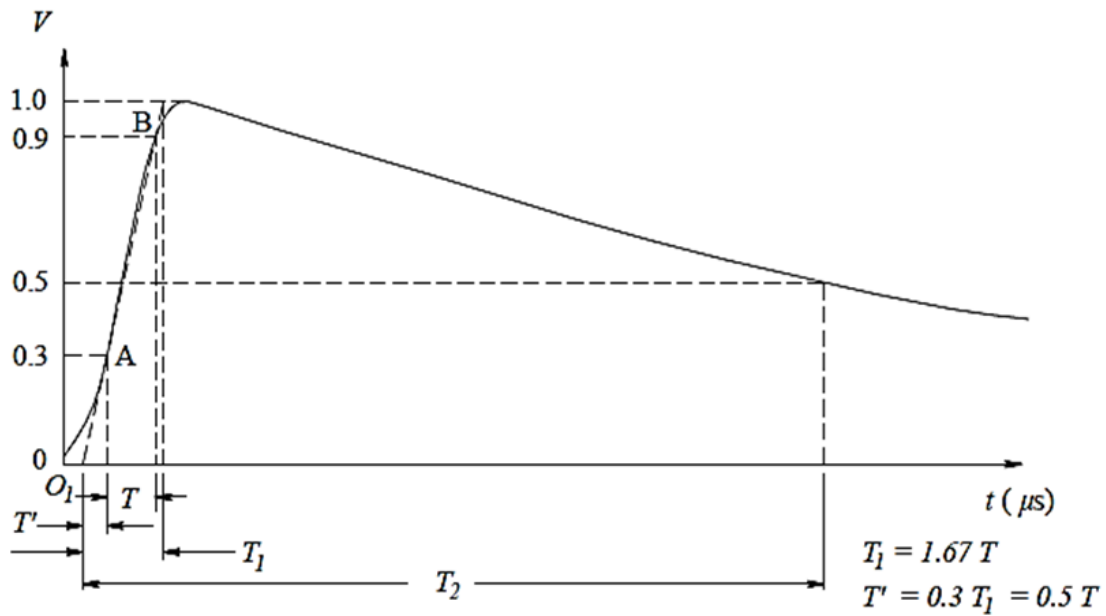
1.2.1 Onda completa

IA que alcanza su V_e en un instante de tiempo que crece y luego cae exponencialmente a un valor cercano a cero.

Los impulsos de onda completa tienen un tiempo de frente (T_1) de $1,2 \mu\text{s}$ y un tiempo de cola (T_2) de $50 \mu\text{s}$.

Figura 1.

Impulso tipo rayo completo sin oscilaciones ni sobre impulsos.



Fuente: (IEEEExplore, 2013)

Los parámetros A y B representan el segmento lineal de la onda de prueba de la cual es un rango del 30% al 90% respecto a V_e .

Tolerancias:

T_1 $1,2 \mu s \pm 30\%$ de error.

T_2 $50 \mu s \pm 20\%$ de error.

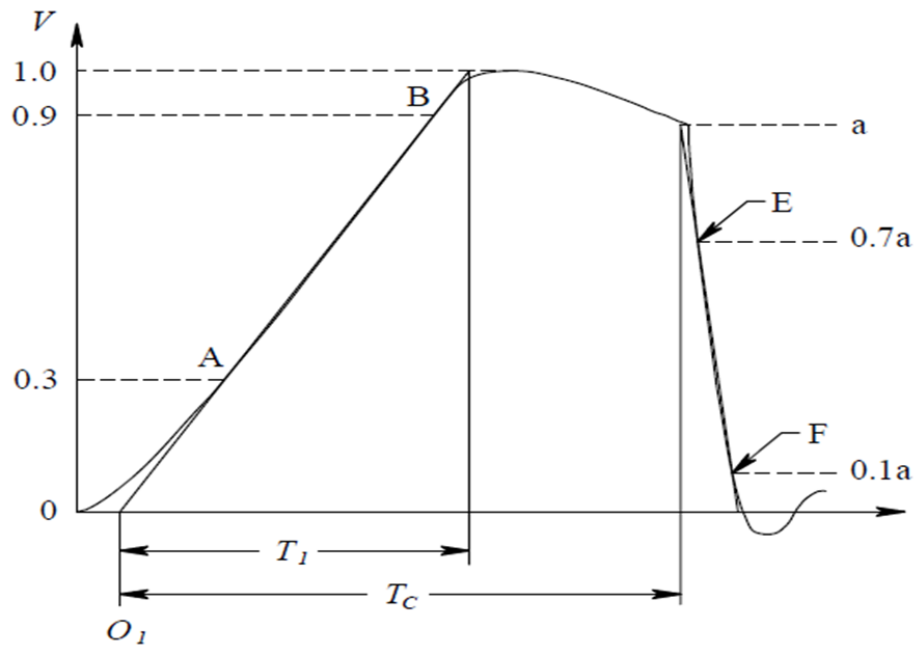
1.2.2 Onda tipo IA recortada en la cola

IA que alcanza su V_e en los instantes de tiempo de crecimiento y luego esta es recortada abruptamente en un instante de tiempo de su caída.

Los impulsos de onda recortada en la cola tienen un tiempo de frente (T_1) de $1,2 \mu s$ y un tiempo de corte que puede oscilar: $1,2 \mu s < (T_c) < 50 \mu s$.

Figura 2.

Impulso tipo rayo recortado en la cola.



Fuente: (IEEEExplore, 2013)

Un IA recortado y estandarizado por la cola es un impulso atmosférico recortado por un explosor externo, en un intervalo de tiempo que oscila entre $2 \mu\text{s}$ y $5 \mu\text{s}$ después del origen virtual. Otros tiempos para cortar pueden ser especificados por la norma del aparato correspondiente.

Tolerancias:

T_1 $1,2 \mu\text{s} \pm 30\%$ de error.

T_c $T_c > 2 \mu\text{s}$

1.3 Equipos de pruebas

Se tomó como base el trabajo “PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE IMPULSOS ATMOSFÉRICOS DE TENSIÓN” (Rodriguez , Gonzalez , & Reatiga , 2016), el cual consiste en la realización de pruebas de aislamiento a equipos de pruebas que se someten a descargas atmosféricas, describiendo los G.I utilizados y la manera como se genera las tensiones de prueba. Debido a los protocolos preventivos a causa de la pandemia “COVID-19”, no fue posible realizar en este trabajo dichas pruebas en el LAT de la UIS.

Para más información de los equipos de prueba, leer el anexo A.

1.4 Filtro

Es un circuito que se diseña con el objetivo de poder atenuar, corregir o rechazar un rango de frecuencias dentro de cualquier tipo de señal.

Entre sus aplicaciones más importantes se destaca el filtro de red el cual impide la entrada de ruido, además impide que el sistema contamine la red, de tal forma que se pueden utilizar fuentes analógicas y digitales que afecten el resto del equipo. También se destacan en la corrección de factores de potencia ya que el circuito reduce significativamente los picos de corriente generados en los sistemas al cargarse.

En este trabajo, el filtro tiene como objetivo eliminar las oscilaciones o el ruido de las señales tomadas en el LAT con el fin de facilitar la interpretación de las mediciones ya que por agentes externos al proceso de generación del impulso (precisión de equipos de pruebas, equipos de

medición, sistema de puesta a tierra, entre otros), estas se obtienen con unos niveles de ruido que no permiten que puedan ser analizadas de manera acorde como los estándares lo sugieren.

2. Procedimiento para calcular los parámetros en los IA con oscilación superpuesta en el pico

A continuación, se describe el procedimiento realizado para la elaboración y aplicación del filtro virtual, dicho procedimiento es propuesto por la IEEE estándar 4 del 2013 y es realizado a partir del programa computacional MATLAB®.

La curva registrada $V(t)$ se obtiene utilizando el GI de LAT de la UIS, donde, por medio del osciloscopio se importan los datos a procesar para la creación del filtro para ondas tipo IA. Este proceso de importación de datos se explica detalladamente en el capítulo 3 de este informe.

2.1 Pasos para calcular los parámetros de una onda tipo IA completa

Luego de obtener la $V(t)$, se realiza los siguientes pasos para calcular los parámetros característicos de una onda tipo IA completa:

- A. Encontrar el valor extremo de V_e de la curva registrada $V(t)$.
- B. Encontrar la última muestra en el intervalo de T_1 que tenga un valor de tensión menor a 0,2 veces el valor extremo de V_e , y descartar los datos hasta esta muestra, incluyendo dicha muestra. Esto es para eliminar la influencia de cualquier perturbación y aumento lento de tensión al comienzo de $V(t)$ en la curva base ajustada $V_m(t)$.
- C. Encontrar la última muestra en el intervalo de T_2 que tenga un valor de tensión superior a 0,4 veces el valor extremo de V_e , y descartar los datos siguientes a esa muestra. Esto es para proporcionar un punto final consistente para la curva base ajustada.

D. Modificar el vector de tiempo con el fin de redimensionar los datos junto al vector de tensión y así aplicar el proceso adecuado de filtrado.

A continuación, se realiza un ejemplo para una mayor compresión de los pasos realizados.

Ejemplo:

Vectores de dimensiones 1×11 de tensión y tiempo.

$$V = [10 \ 40 \ 90 \ 100 \ 90 \ 80 \ 70 \ 60 \ 50 \ 40 \ 30] \quad Vt = [1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \ 9 \ 10 \ 11] \ \mu s$$

Aplicando los pasos anteriores se obtiene:

$$V_e = 100 \ V$$

$(0,20 \times V_e) = 20 \ V$ se descartan los valores de tensión menores o iguales a 20 V en el intervalo de T_1 .

$(0,40 \times V_e) = 40 \ V$ se descartan los valores de tensión menores o iguales a 40 V en el intervalo de T_2 .

Las nuevas dimensiones de los vectores de tensión y tiempo son de 1×8 :

$$V = [40 \ 90 \ 100 \ 90 \ 80 \ 70 \ 60 \ 50] \text{ V}$$

$$t = [1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8] \mu\text{s}$$

Encontrar la curva base $V_m(t)$ utilizando la herramienta computacional MATLAB®, con la cual se crea un algoritmo que encuentra los parámetros para cualquier tipo de IA mediante una función de doble exponencial.

$$U_d(t) = A \left(e^{\frac{(t-D)}{B}} - e^{\frac{(t-D)}{C}} \right) \quad (\text{ecuación 1})$$

Donde:

t: es el vector de tiempo de la curva registrada.

$U_d(t)$: es la función de tensión exponencial doble.

Siendo A, B, C y D los parámetros a encontrar para el ajuste.

a. Construir la curva base $V_m(t)$ mediante la función doble exponencial utilizando los parámetros encontrados en el paso anterior.

b. Restar la curva base $V_m(t)$ de la curva registrada $V(t)$, obteniendo como resultado la curva residual $R(t)$.

$$R(t) = V(t) - V_m(t) \quad (\text{ecuación 2})$$

Calcular la amplitud de sobre impulso relativo, que se define como:

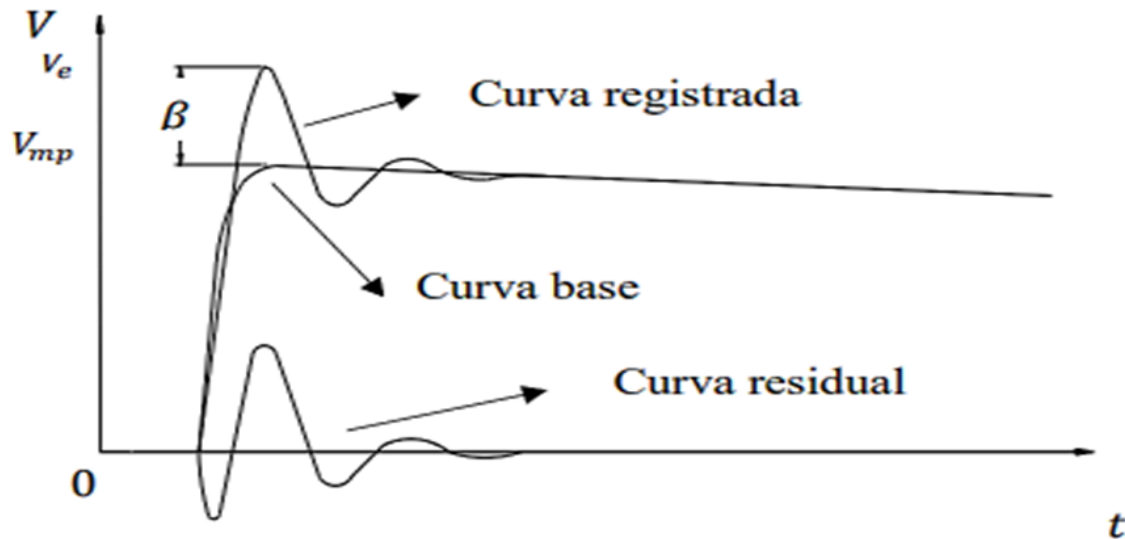
$$\beta' (\%) = \left(\frac{V_e - V_{mp}}{V_e} \right) \times 100 \quad (\text{ecuación 3})$$

V_e : Valor máximo de la curva registrada.

V_{mp} : valor máximo de la curva base.

A continuación, mediante una gráfica se puede observar la diferencia entre la curva registrada $V(t)$ y la curva base $V_m(t)$, de las cuales se obtiene el residuo $R(t)$ y se puede apreciar la magnitud de sobre impulso β .

Figura 3. Curva registrada $V(t)$, Curva base $V_m(t)$ y curva residual $R(t)$.



Fuente: (Rodriguez, Gonzalez, & Reatiga, 2016)

Construir el filtro digital con su función de transferencia $H(f)$ a partir de la siguiente ecuación.

$$k(f) = \frac{1}{1+af^2} \quad (\text{ecuación 4})$$

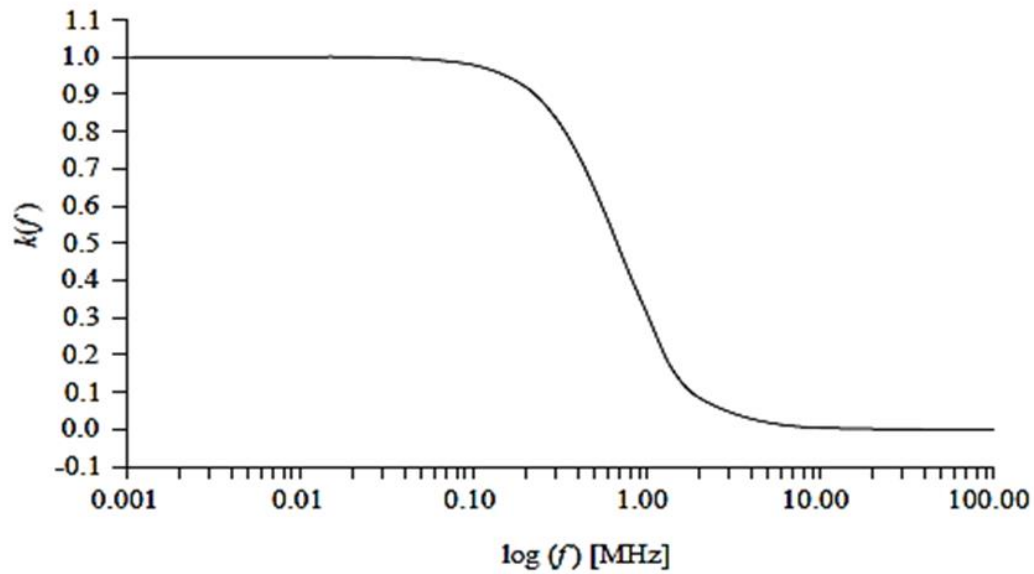
f es la frecuencia en MHz

a es un coeficiente con un valor de 2,2

La expresión gráfica de la función $k(f)$ se muestra en la siguiente figura:

Figura 4.

Función dependiente de la frecuencia del factor de tensión de prueba $K(f)$.



Fuente: (IEEEExplore, 2013)

a. Para la aplicación del filtro, convertir el residuo $R(t)$ al dominio de la frecuencia mediante la transformada de Fourier(fft²) obteniendo $R_i(f)$.

b. Aplicar el filtro digital de la siguiente manera:

$$R_0(f) = R_i(f) \times H(f) \quad (\text{ecuación 5})$$

Donde:

$R_0(f)$ es el vector de tensión de salida del filtro.

² fft: comando utilizado en MATLAB® para hallar la transformada de Fourier.

$R_i(f)$ es el vector de tensión de entrada del filtro.

$H(f)$ es la función de transferencia del filtro.

Finalmente, convertir $R_0(f)$ nuevamente al dominio del tiempo aplicando la transformada inversa de Fourier (ifft³) para obtener la forma de onda residual filtrada $R_f(t)$.

a. La curva residual filtrada $R_f(t)$ se vuelve a agregar a la curva base $V_m(t)$ para formar la curva de tensión de prueba $V_t(t)$ para el cálculo de parámetros.

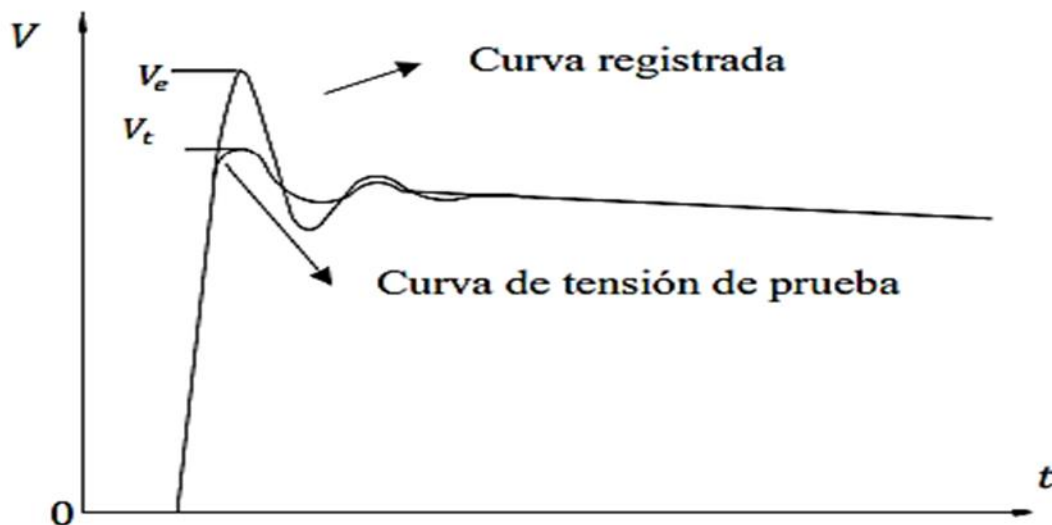
$$V_t(t) = V_m(t) + R_f(t) \quad (\text{ecuación 6})$$

b. Visualizar la curva registrada $V(t)$ y la curva de tensión de prueba $V_t(t)$.

³ ifft: comando utilizado en MATLAB® para hallar la transformada inversa de Fourier.

Figura 5.

Curva registrada $V(t)$, curva de tensión de prueba $V_i(t)$.



Fuente: (Rodriguez, Gonzalez, & Reatiga, 2016)

a. Informar el valor de la tensión de prueba V_t , el tiempo frontal T_1 , el tiempo hasta el valor medio T_2 y la amplitud de sobre impulso relativo β' (%).

2.2 Impulso tipo IA recortada en la cola

El IA recortado en la cola puede producirse intencionalmente como parte de un procedimiento de prueba estándar, como una prueba de impulso de transformador. También se pueden producir impulsos recortados en la cola cuando falla el aislamiento bajo prueba. En estos casos, los impulsos tipo rayo completos del mismo circuito de prueba están normalmente disponibles antes de la primera aparición de un impulso de corte de cola. Por ejemplo, durante la prueba de impulso de los transformadores, normalmente se aplica un impulso tipo rayo de nivel reducido antes de las ondas de impulso cortadas. En otras pruebas de aislamiento, se aplican

impulsos completos de magnitudes crecientes hasta que se produce una descarga disruptiva. Es habitual que el circuito de prueba permanezca sin cambios durante las aplicaciones preliminares de tensión y las aplicaciones de tensión de onda cortada, y, por lo tanto, la forma de onda completa prospectiva del registro de impulso recortado sería la misma que la de las aplicaciones preliminares.

2.3 Pasos para calcular los parámetros de una onda tipo IA recortada en la cola.

A continuación, se verifica si la onda tipo IA es completa o recortada en la cola, esto se realiza por medio de un algoritmo creado en MATLAB® que analiza el vector de tensión de la curva registrada $V(t)$, donde:

- Si ocurre una gran caída de tensión en la cola, el algoritmo lo identifica como un IA recortado en la cola.

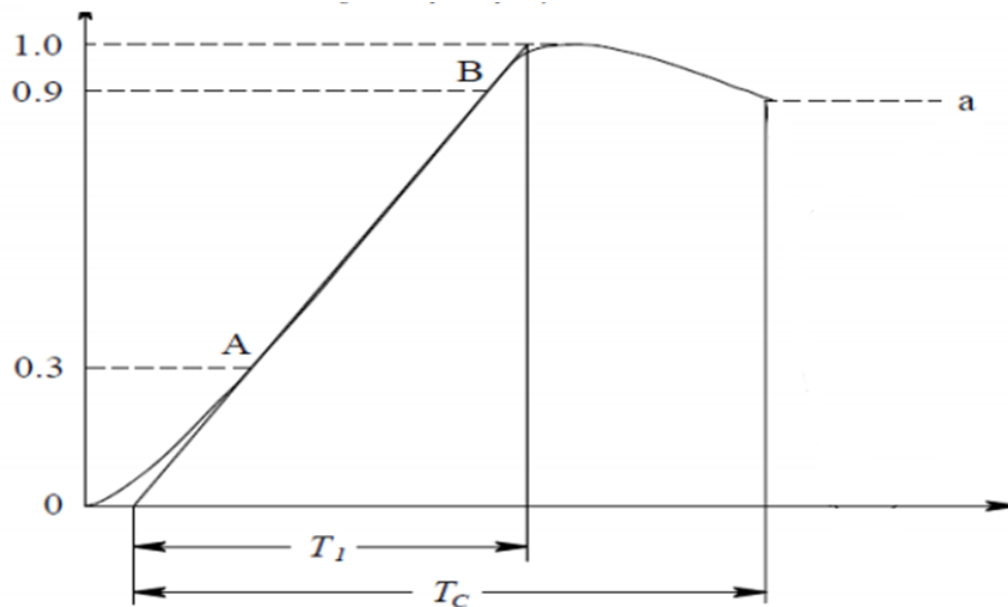
- Si no ocurre un cambio abrupto en la tensión en la cola, el algoritmo lo identifica como un IA de onda completa y se aplicará el procedimiento explicado en el ítem 2.1 de este informe.

En el caso de que se identifique la onda tipo IA recortada en la cola, se realiza el siguiente procedimiento:

- a. Eliminar los datos que producen el corte en la onda tipo IA, obteniendo lo siguiente:

Figura 6.

Onda recortada en la cola.



Fuente: (IEEEExplore, 2013)

Siendo **a** el último valor en el instante antes del corte.

a. Para recuperar la parte faltante de la cola de la onda tipo IA se realiza el siguiente procedimiento:

A partir de MATLAB® se desarrolla un algoritmo que usa como base la tensión de la posición **a** representada en la figura anterior, con la cual crea un parche con valores aleatorios descendentes para completar los datos restantes.

Con el parche aplicado, se obtiene una onda tipo IA con las características de una onda completa.

A continuación, se realiza un ejemplo para una mayor compresión de los pasos realizados.

Ejemplo:

Vector de 1×15 representando la curva registrada $V(t)$.

$$V = [10 \ 40 \ 90 \ 100 \ 95 \ 90 \ 85 \ 80 \ 75 \ 15 \ 13 \ 12 \ 10 \ 8 \ 7] V$$

Siendo $a = 75 V$ el último valor en el instante antes del corte, obteniendo el siguiente vector:

$$V = [10 \ 40 \ 90 \ 100 \ 95 \ 90 \ 85 \ 80 \ 75] V$$

Se observa un vector nuevo de dimensiones 1×9 , al cual se le aplica el proceso de parche mencionado anteriormente, obteniendo:

$$V = [10 \ 40 \ 90 \ 100 \ 95 \ 90 \ 85 \ 80 \ 75 \ 73 \ 70 \ 68 \ 65 \ 63 \ 60] V$$

Al aplicar el parche se obtiene un nuevo vector de dimensiones 1×15 , el cual ya presenta las mismas dimensiones que el vector original, sin embargo, este nuevo vector representa una onda tipo IA completa.

a. Al presentar características similares a una onda tipo IA completa, se aplica el procedimiento explicado en el ítem 2.1 de este informe.

b. Encontrar el origen virtual O1 de la onda tipo IA recortada en la cola usando la curva de tensión de prueba $V_t(t)$ determinada en el paso luego encontrar el valor de tiempo para hacer el T_c de la curva de impulso registrada.

c. Visualizar la curva registrada y la curva de tensión de prueba.

d. Informar el valor de la tensión de prueba V_t , el tiempo frontal T_1 , el tiempo de corte T_c y la amplitud relativa de sobre impulso β' (%).

3. Diseño de la interfaz

En el siguiente capítulo se describe todo lo relacionado a la creación, ejecución y diseño de la herramienta computacional realizada en MATLAB® para el análisis adecuado de las ondas tipo IA, creada a partir del filtro digital.

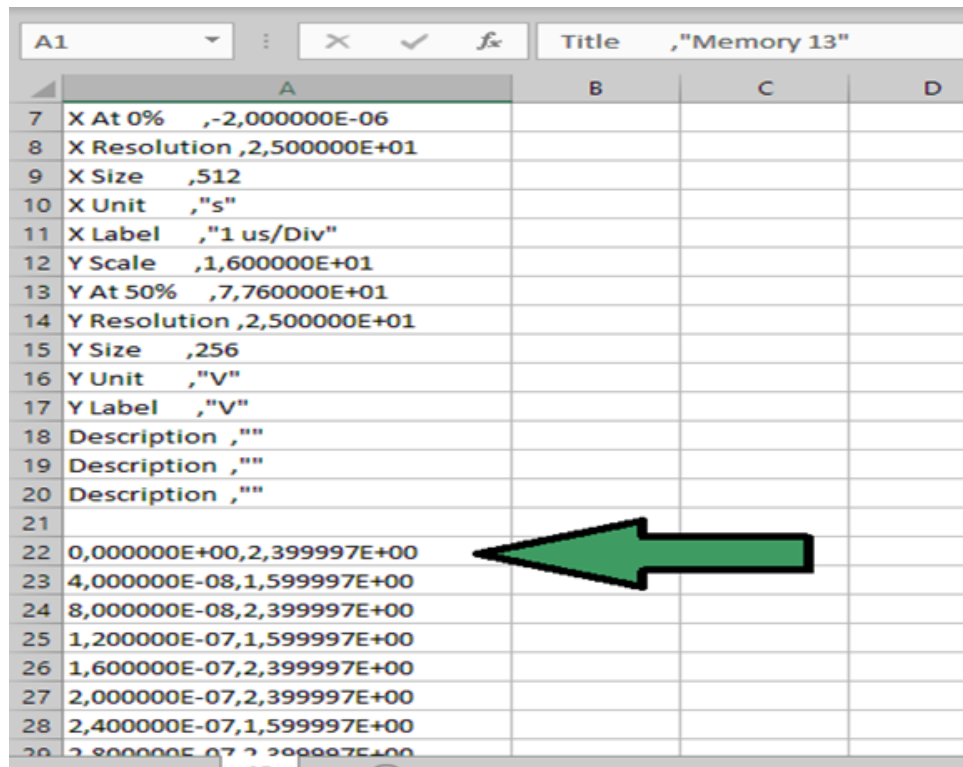
3.1 Importación de datos

Para el uso adecuado de los datos y una lectura exitosa por parte de la interfaz gráfica, se debe realizar lo siguiente:

De los archivos Excel con formato .csv generados al realizar las pruebas en el LAT de la UIS, se requiere copiar los datos a partir de la celda A22 hasta la celda A533, tal como se muestra en la siguiente imagen:

Figura 7.

Archivo Excel .CSV



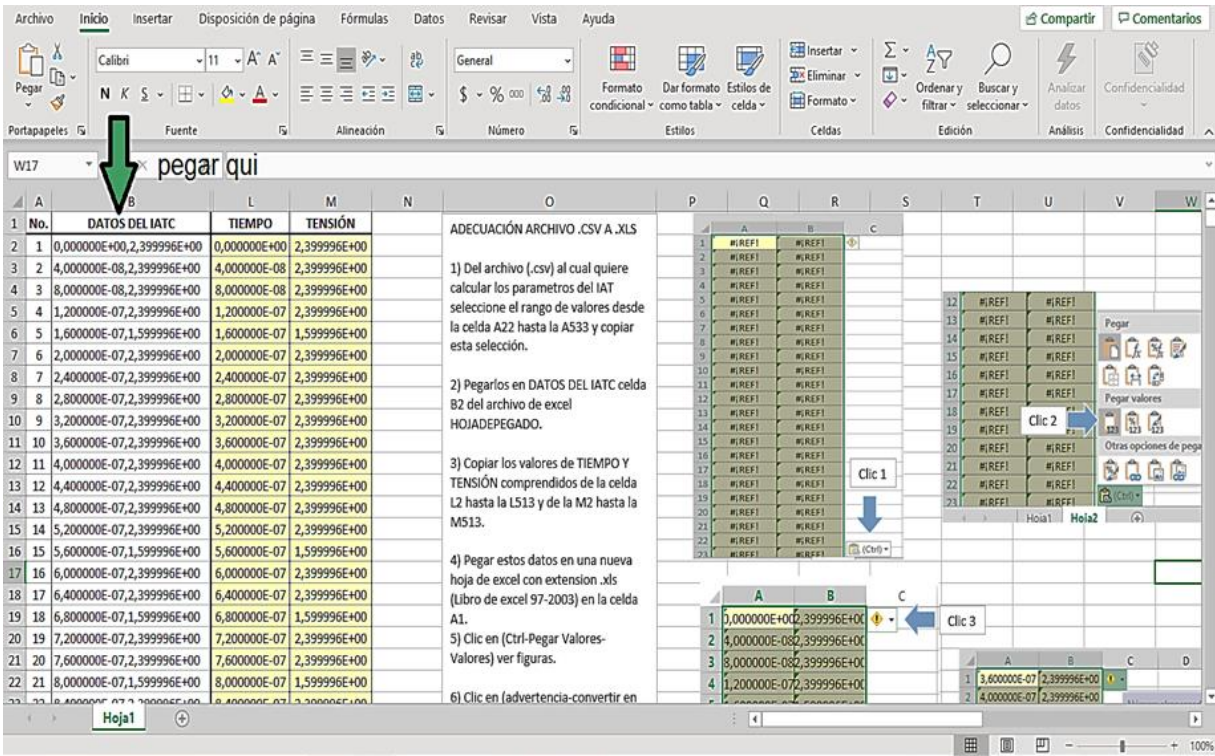
	A	B	C	D
7	X At 0% , -2,000000E-06			
8	X Resolution , 2,500000E+01			
9	X Size , 512			
10	X Unit , "s"			
11	X Label , "1 us/Div"			
12	Y Scale , 1,600000E+01			
13	Y At 50% , 7,760000E+01			
14	Y Resolution , 2,500000E+01			
15	Y Size , 256			
16	Y Unit , "V"			
17	Y Label , "V"			
18	Description , ""			
19	Description , ""			
20	Description , ""			
21				
22	0,000000E+00, 2,399997E+00			
23	4,000000E-08, 1,599997E+00			
24	8,000000E-08, 2,399997E+00			
25	1,200000E-07, 1,599997E+00			
26	1,600000E-07, 2,399997E+00			
27	2,000000E-07, 2,399997E+00			
28	2,400000E-07, 1,599997E+00			
29	2,800000E-07, 2,399997E+00			

A continuación, se recomienda seguir los pasos del archivo Excel "HOJADEPEGADO" para la correcta importación de los datos para la ejecución de la interfaz gráfica.

Nota: El archivo Excel "HOJADEPEGADO" será compartido en la carpeta del apéndice B.

Figura 8.

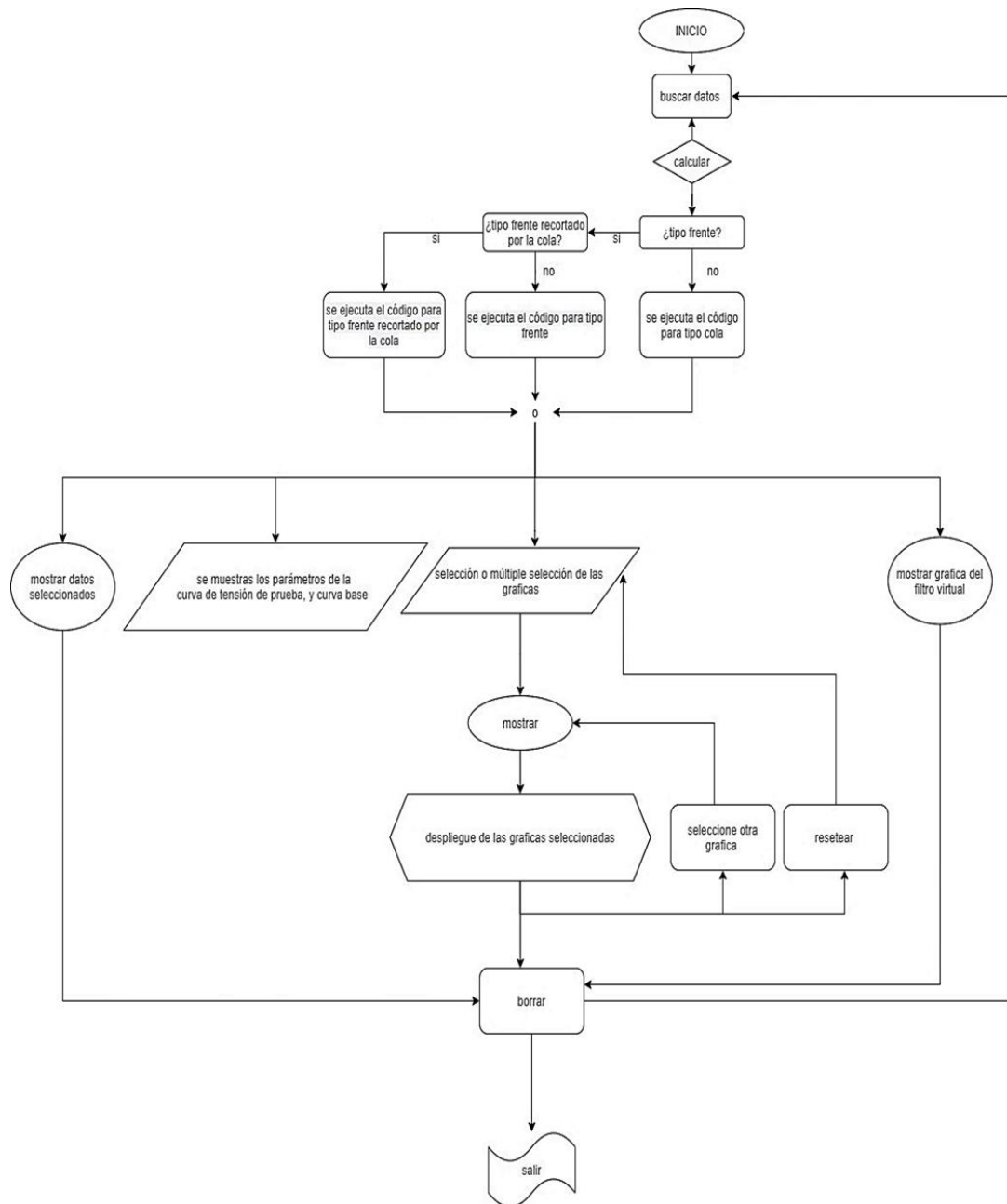
Archivo Excel “HOJADEPEGADO”



3.2 Diagrama de flujo de la interfaz

A continuación, se muestra el diagrama de flujo para representar la secuencia de los pasos a realizar que sigue el algoritmo para la implementación del filtro digital.

Figura 9.







Diagrama de flujo

3.3 Procedimiento de ejecución.

Se dispone de un archivo comprimido que contiene lo siguiente:

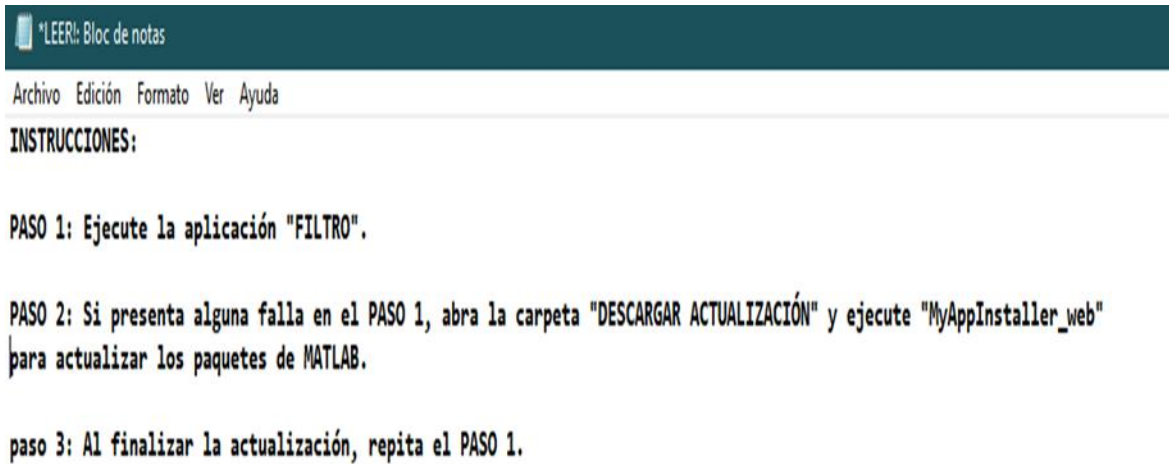
Figura 10.

Archivos de la herramienta computacional

Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
 ANEXO B. CÓDIGO	22/01/2021 12:54 a. m.	Carpeta de archivos	
 DATOS	22/01/2021 12:53 a. m.	Carpeta de archivos	
 DESCARGAR ACTUALIZACIÓN	22/01/2021 12:50 a. m.	Carpeta de archivos	
 LIBRO	27/01/2021 8:23 p. m.	Carpeta de archivos	
 FILTRO	22/01/2021 12:50 a. m.	Aplicación	2.693 KB
 LEER!	22/01/2021 1:17 a. m.	Documento de te...	1 KB

Se procede a ejecutar la aplicación “FILTRO”, se recomienda tener instalado la última versión de MATLAB® para no presentar inconvenientes en la ejecución, si presenta alguna falla abrir el documento “**LEER**” y seguir los pasos correspondientes.

Figura 11.

Instrucciones de actualización

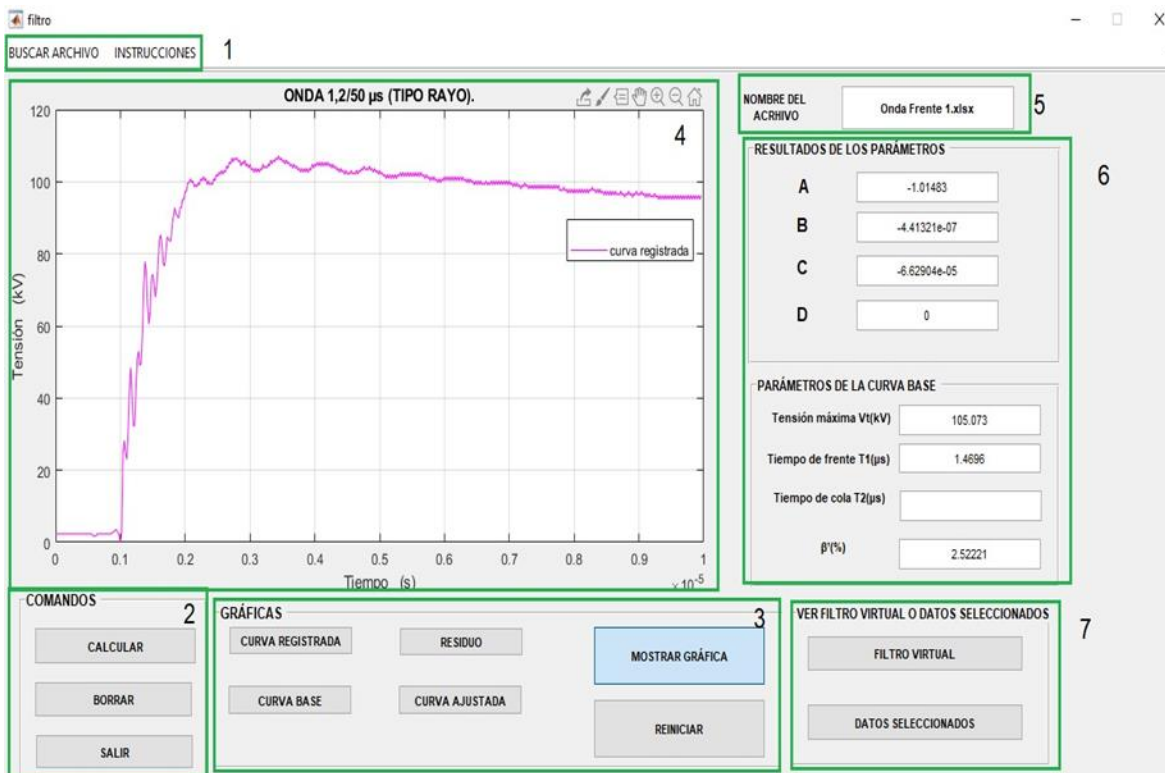
3.4 Manual de usuario

Figura 12.

Portada de la interfaz grafica

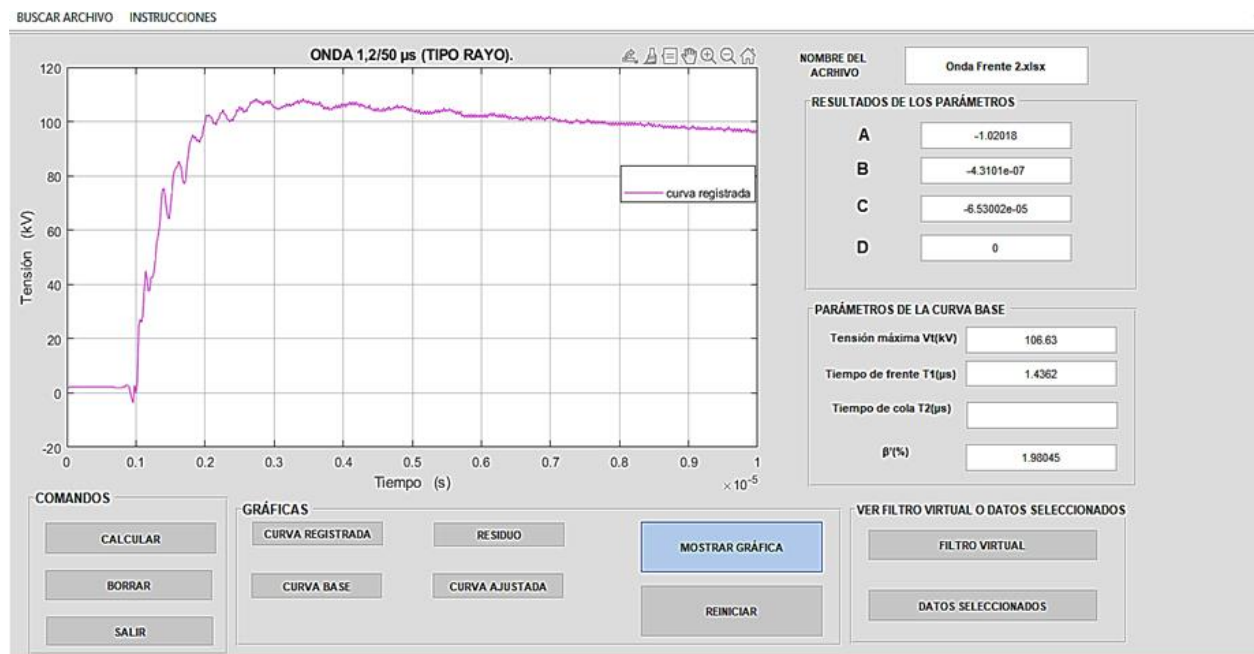


Figura 13.

Partes de la interfaz gráfica

1. Menú del interfaz (BUSCAR ARCHIVO e INSTRUCCIONES)
2. Comandos (CALCULAR, BORRAR y SALIR).
3. Menú de curvas a graficar.
4. Área de gráficas.
5. Nombre del archivo
6. Resultados de los parámetros
7. Filtro virtual y datos seleccionados.

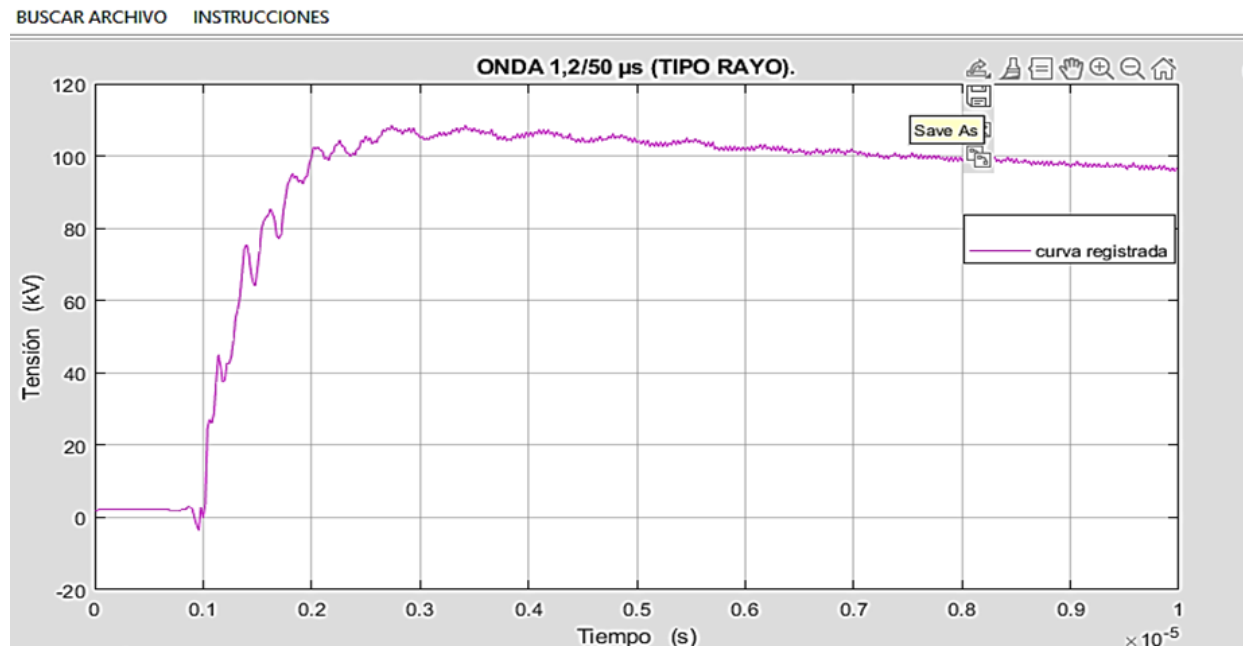
Figura 14.

Aplicación de la interfaz gráfica

3.5 Guardar gráficas

Si desea almacenar los resultados obtenidos en la interfaz gráfica, se debe realizar lo siguiente:

Figura 15.

Guardar graficas

Para una mejor comprensión, se recomienda leer las instrucciones adjuntas en la interfaz.

4. Cálculos realizados

Una vez obtenidos los datos en pruebas realizadas en LAT de la UIS, se procedió a la implementación del filtro, utilizando los elementos descritos en el capítulo 2 de este informe.

Obteniendo los siguientes filtros:

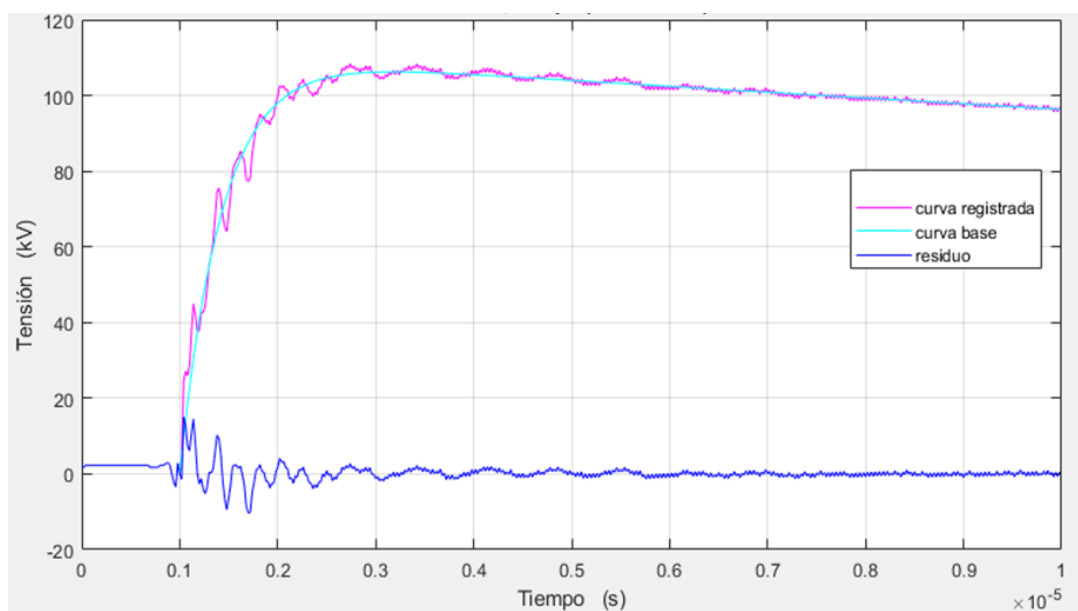
4.1 Tipos de filtros

4.1.1 Filtro tipo frente

Se analizaron los datos tomados, de los cuales se realiza la curva registrada $V_i(t)$, una curva base $V_m(t)$ y una curva residual $R(t)$.

Figura 16.

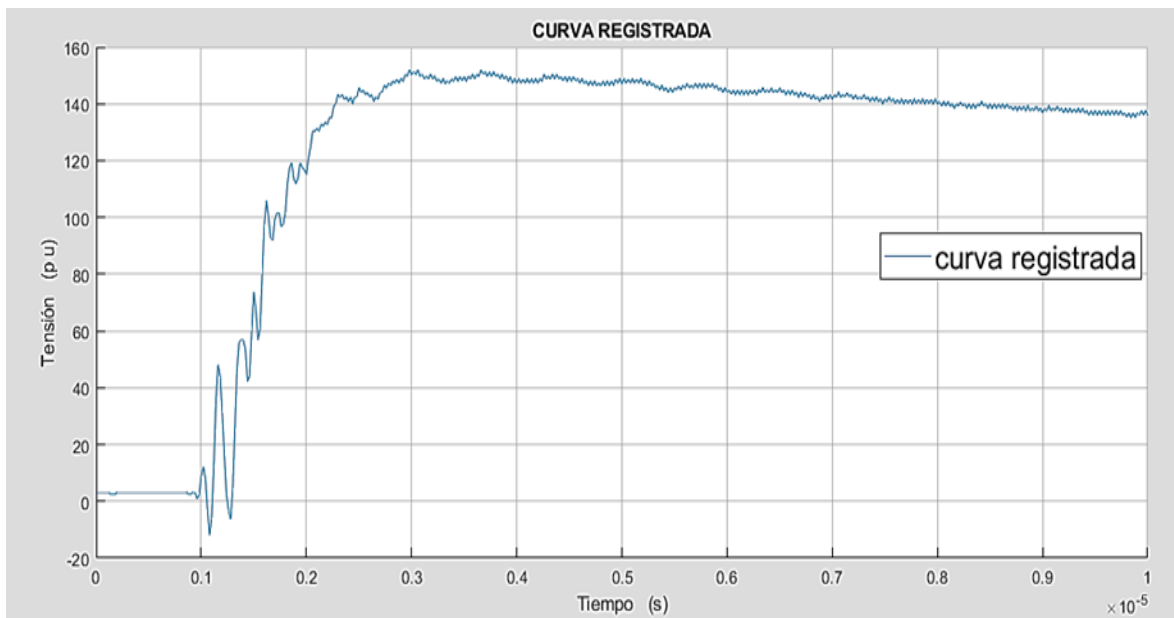
Curva registrada $V(t)$, curva base $V_m(t)$ y curva residual $R(t)$.



A partir de la curva registrada se realiza lo siguiente:

Figura 17.

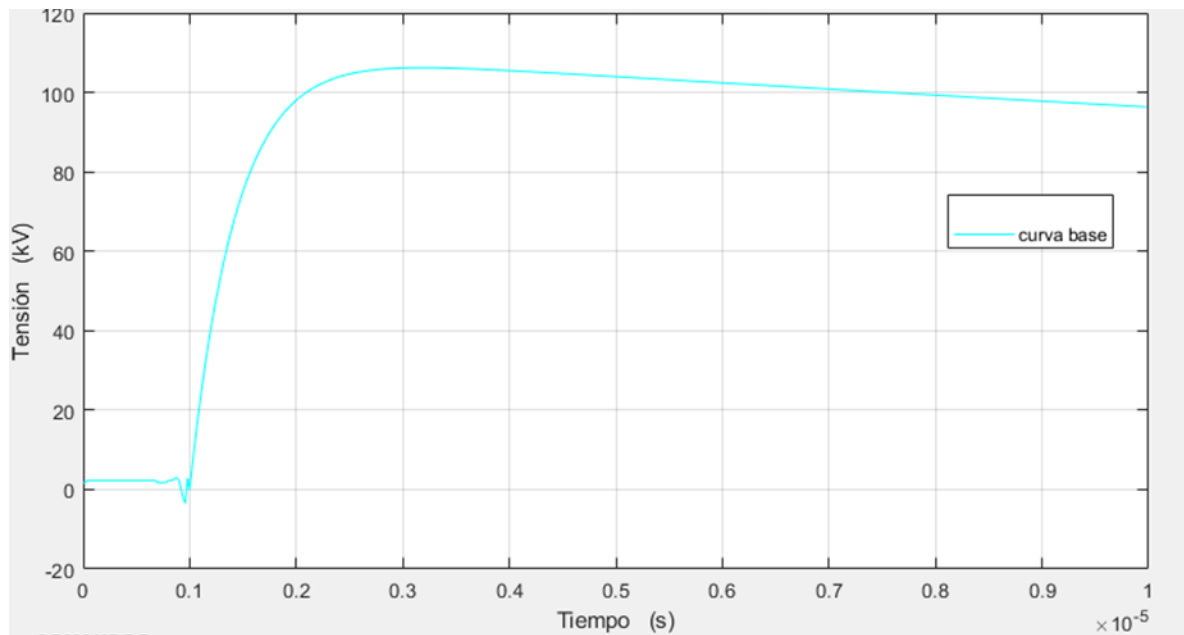
Curva registrada $V(t)$.



- Se halló V_e , Valor máximo de la curva registrada $V(t)$.
- Se realizó una reducción de datos, a partir de V_e , donde en la última muestra en el frente que tenga un valor menor a 0,2 veces de V_e fueron descartados por debajo de este dato, incluyendo a este.
- Se realizó una reducción de datos, a partir de V_e , donde en la última muestra en la cola que tenga un valor mayor a 0,4 veces de V_e fueron descartados por arriba de este dato, incluyendo a este.
- Se realizó la $V_m(t)$ ajustando los parámetros encontrados por el algoritmo a la función doble exponencial (ecuación 1).

Figura 18.

Curva base $V_m(t)$.



- Se realiza la resta entre la curva registrada $V(t)$ y la curva base $V_m(t)$, obteniendo la curva residual $R(t)$.

- Se construye el filtro digital con su función de transferencia (ecuación 4).

Figura 19.

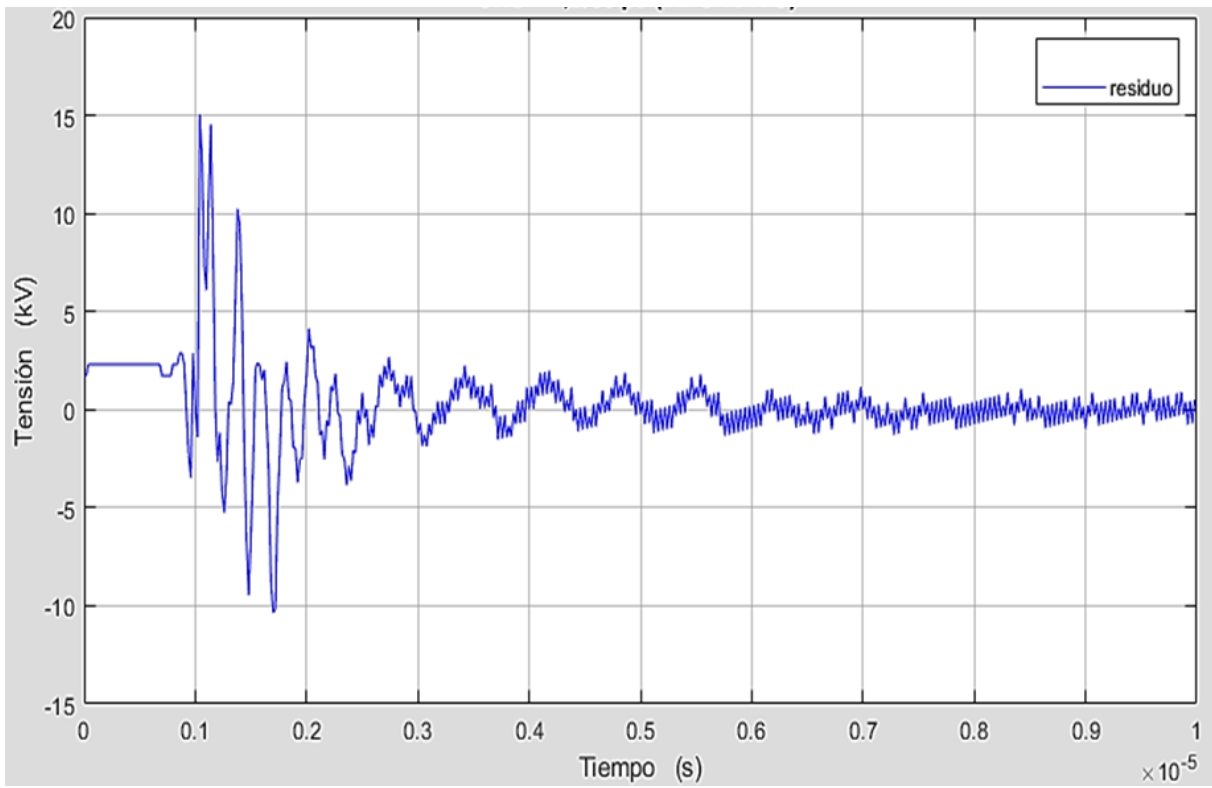
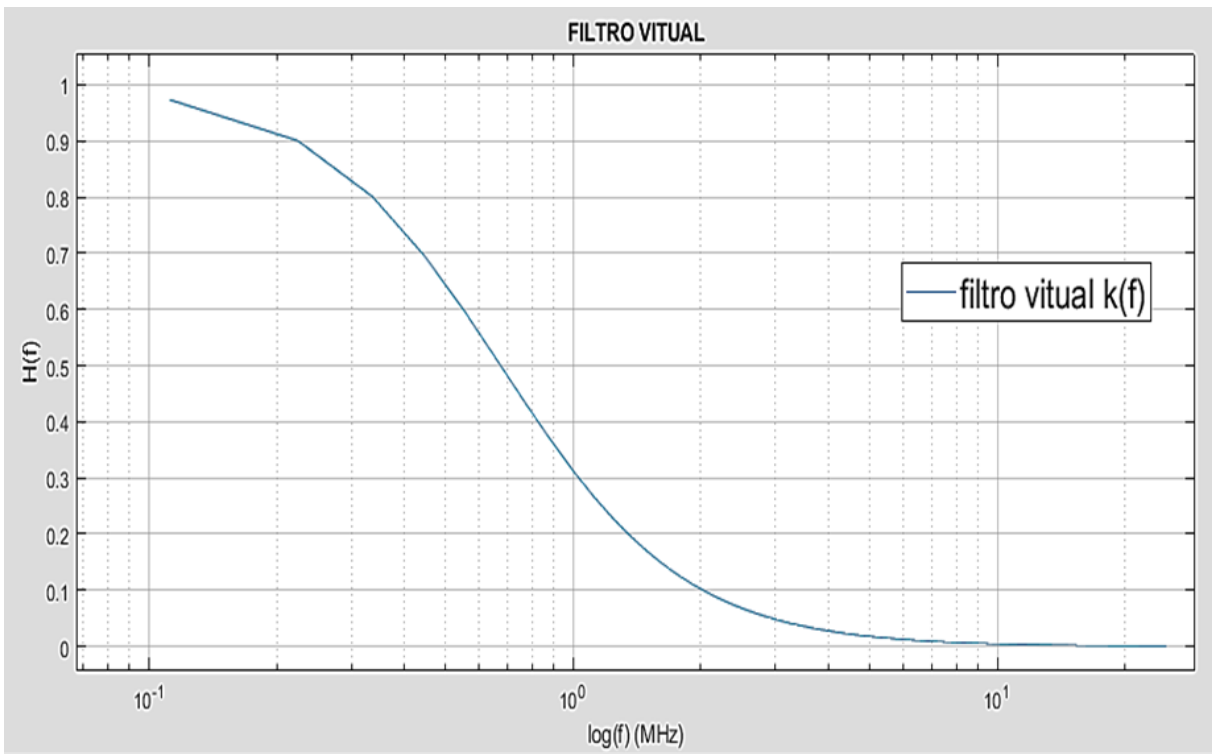
Curva residual $R(t)$.

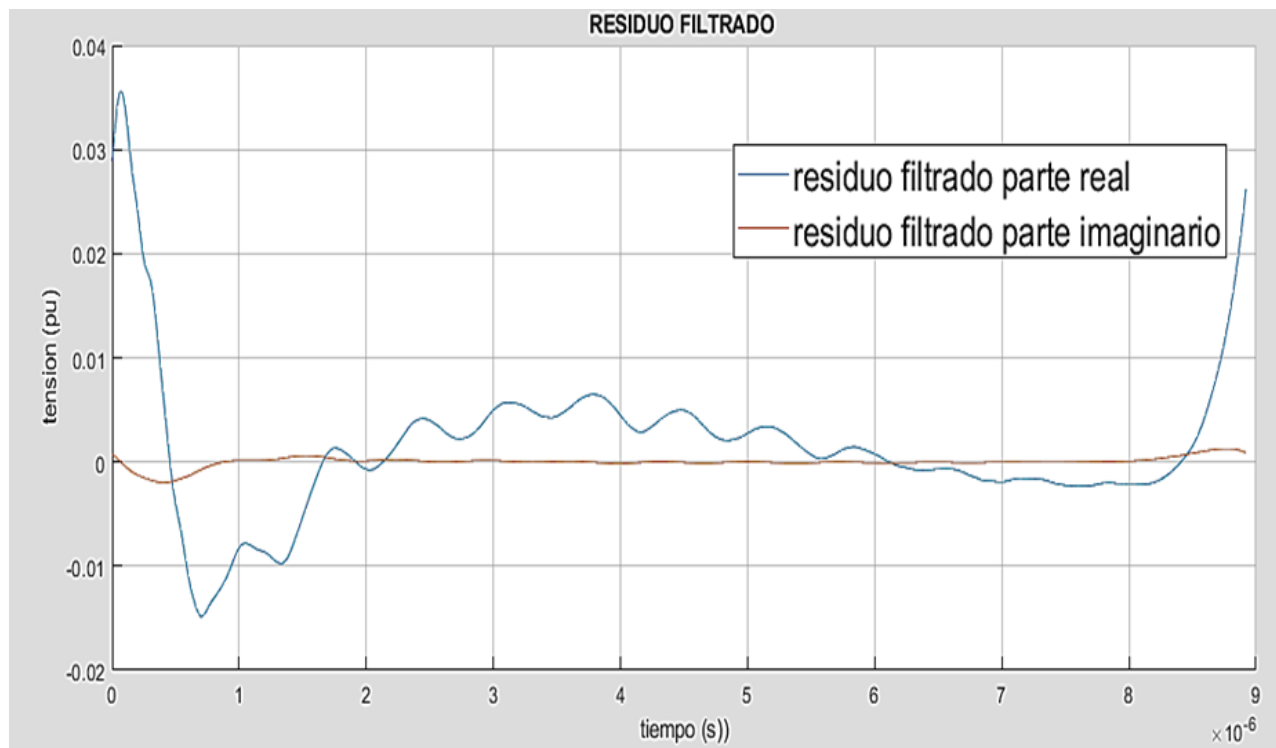
Figura 20.

Filtro virtual $k(f)$.

Se aplica el filtro digital a la curva residual $R(t)$, obteniendo la curva residual filtrada $R_f(t)$.

Figura 21.

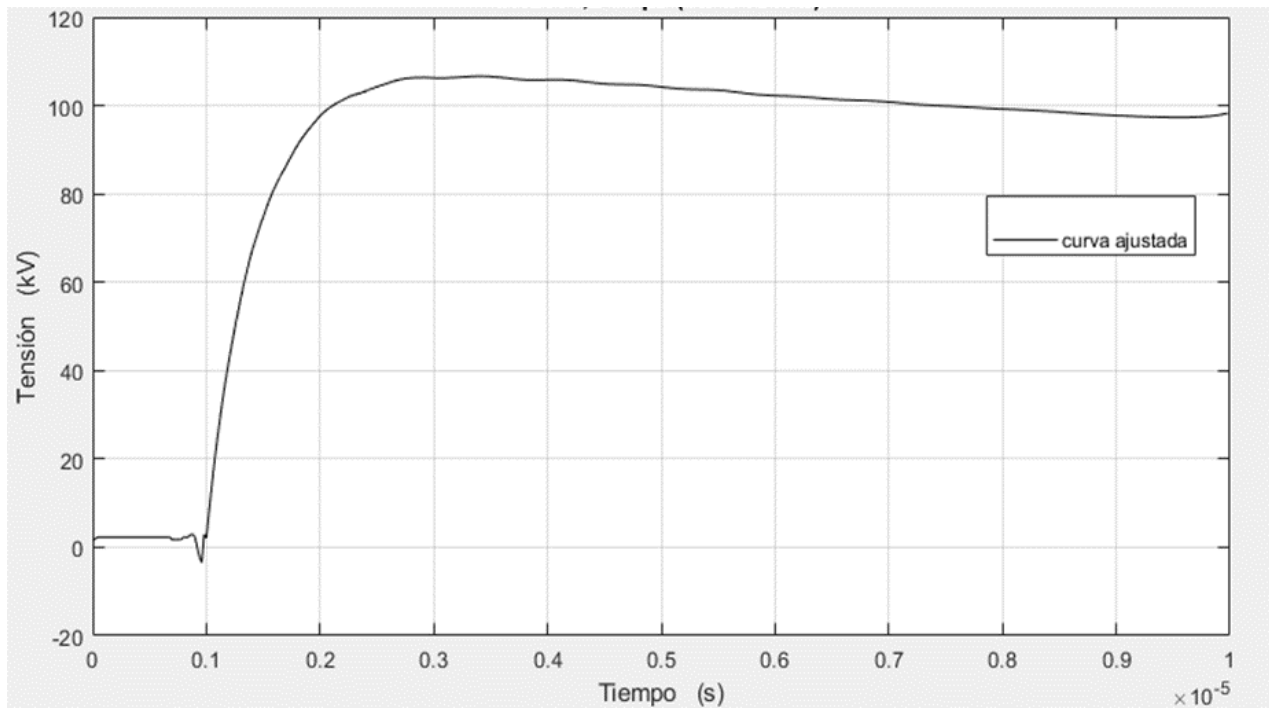
Curva residuo filtrada $R_f(t)$.



La curva residual filtrada $R_f(t)$ se vuelve a agregar a la curva base $V_m(t)$ para formar la curva de tensión de prueba $V_t(t)$ para el cálculo de parámetros, (Ecuación 6).

Figura 22.

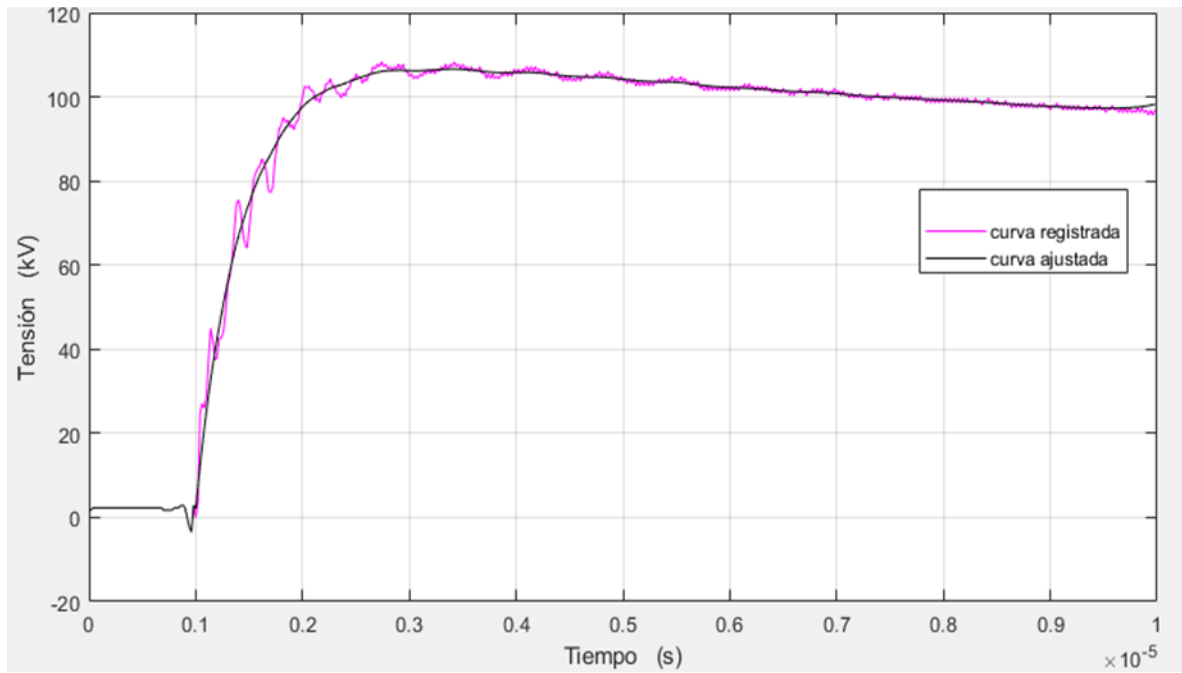
Curva de tensión de prueba $V_t(t)$.



Se visualiza la curva $V(t)$ y la curva $V_t(t)$.

Figura 23.

Curva de tensión (antes y después del tratamiento de filtrado)



Se obtiene valores de V_t , T_1 y β' (%) y se analiza si dichos resultados cumplen los rangos de tolerancia establecidos por la norma IEEE std.4 de 2013.

Parámetros de la curva base $V_m(t)$.

A: -1,02018

B: $-4,3101 \times 10^{-7}$

C: $-6,53002 \times 10^{-5}$

D: 0

Parámetros característicos de la onda tipo frente.

Tensión máxima $V_i(t)$: 106,63 kV

Tiempo de frente T_1 : 1,4382 μs

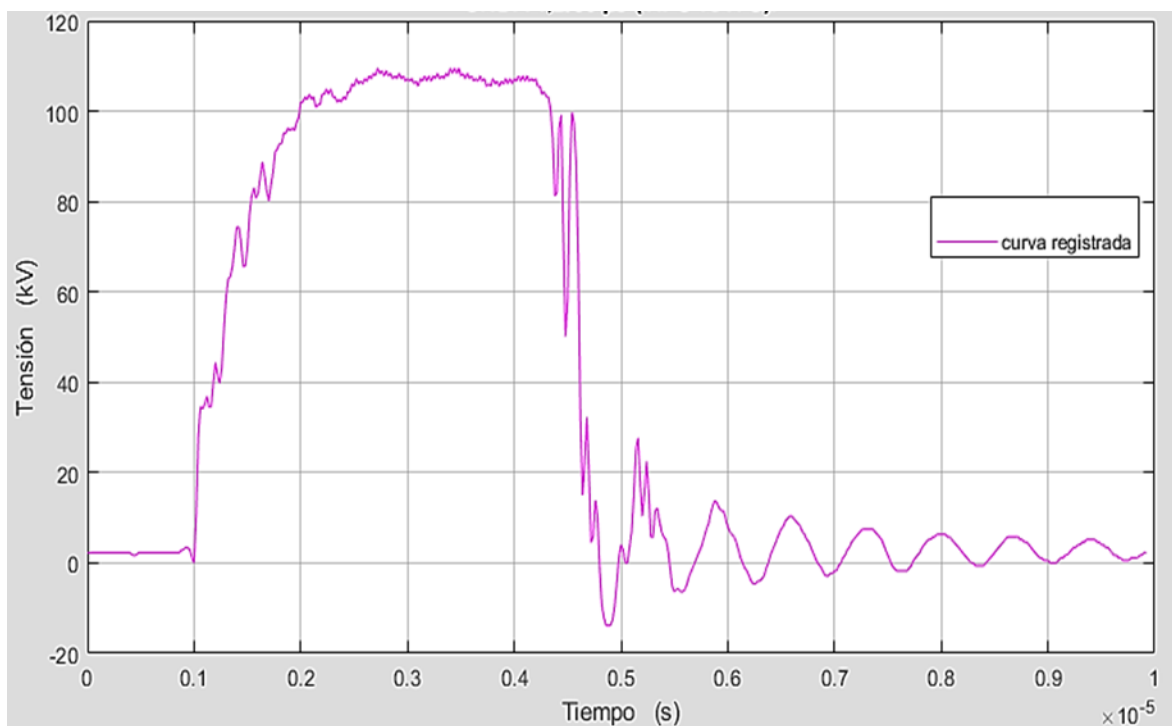
β' : 1,98045 %

4.1.2 Filtro tipo frente recortado en la cola

Teniendo en cuenta el procedimiento descrito en el ítem 2.3 de este informe, se identifica a partir del algoritmo que es un IA recortado en la cola.

Figura 24.

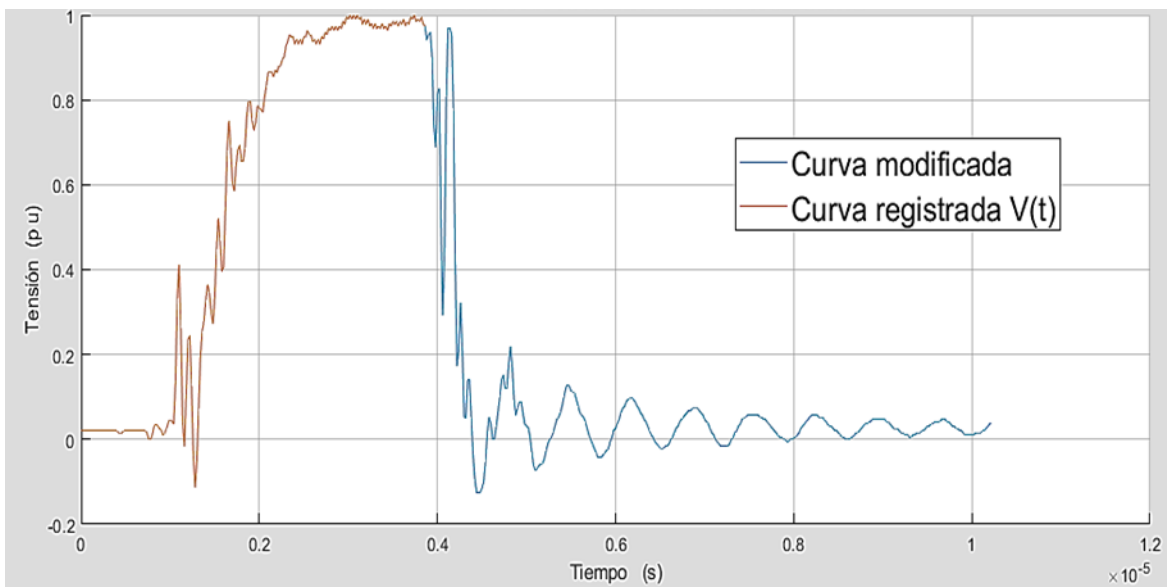
Curva registrada recortada en la cola.



Donde se puede observar en la siguiente figura la curva modificada (línea azul), la cual va ser reemplazada por el parche creado con el algoritmo.

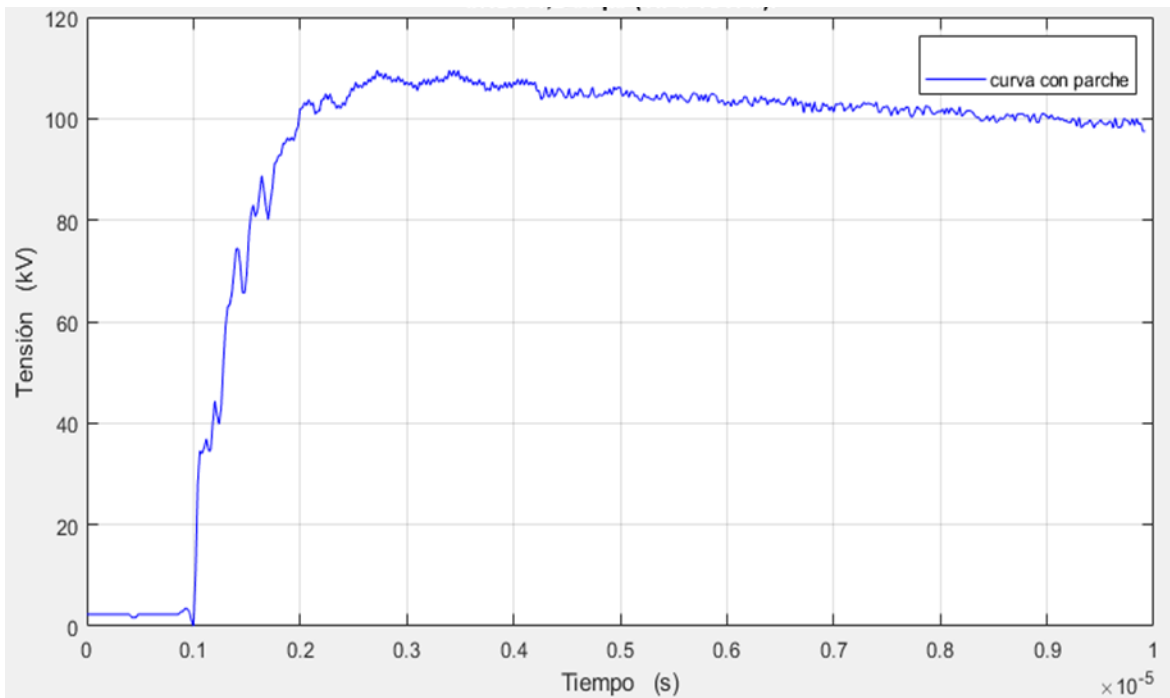
Figura 25.

Curva registrada $V(t)$ seccionada para la creación del parche de cola



Con el parche aplicado, se obtiene una forma de onda semejante a un IA completo, en el cual se puede aplicar el procedimiento descrito en el ítem 2.1 de este informe y calcular sus parámetros.

Figura 26.

Curva registrada $V(t)$ *Parámetros de la curva base $V_m(t)$.*

A: -1,01053

B: $-4,16258 \times 10^{-7}$ C: $-7,8072 \times 10^{-5}$

D: 0

*Parámetros característicos de la onda tipo frente recortada en la cola.*Tensión máxima $V_i(t)$: 107,722 kVTiempo de frente T_1 : 1,4028 μ s

Tiempo de corte T_c : 3,31579 μs

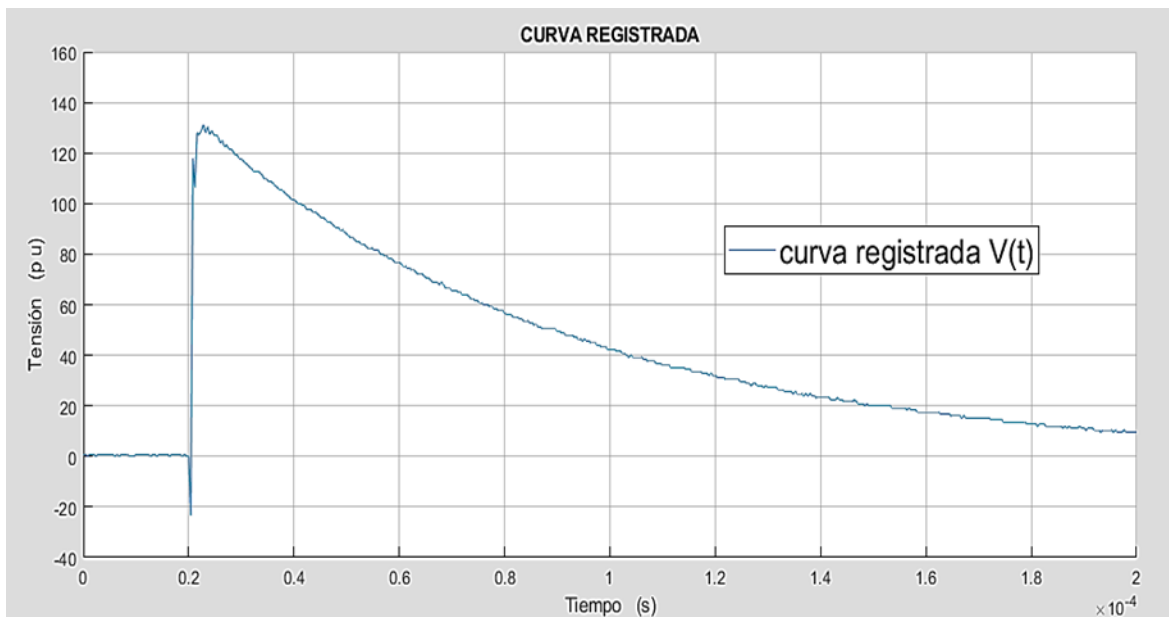
β' : 2,2671 %

4.1.3 Filtro tipo cola

El proceso utilizado es similar al mencionado en el ítem 2.1 de este informe, sin embargo, en este filtro no se halla T_1 por las características que tiene la onda. Donde se halló lo siguiente:

Figura 27.

Curva tipo cola registrada $V(t)$.

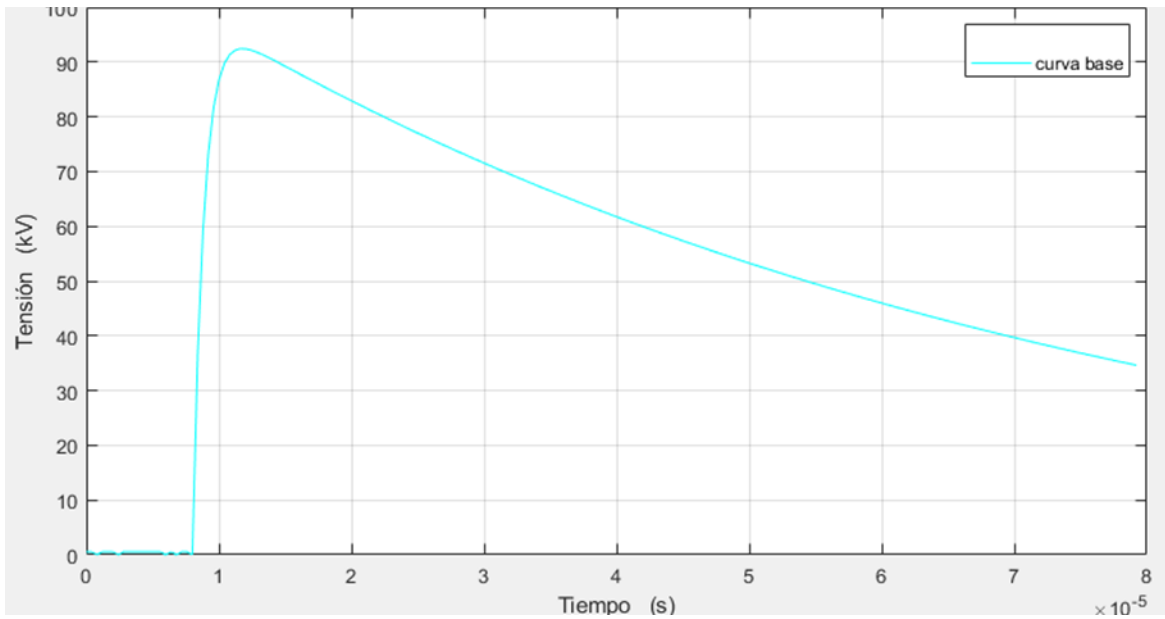


- Se halló V_e , Valor máximo de la curva registrada $V(t)$
- Se realizó una reducción de datos, a partir de V_e , donde en la última muestra en la cola que tenga un valor mayor a 0,4 veces de V_e fueron descartados por arriba de este dato, incluyendo a este.

- Se realizó la $V_m(t)$ ajustando los parámetros encontrados por el algoritmo a la función doble exponencial (ecuación 1)

Figura 28.

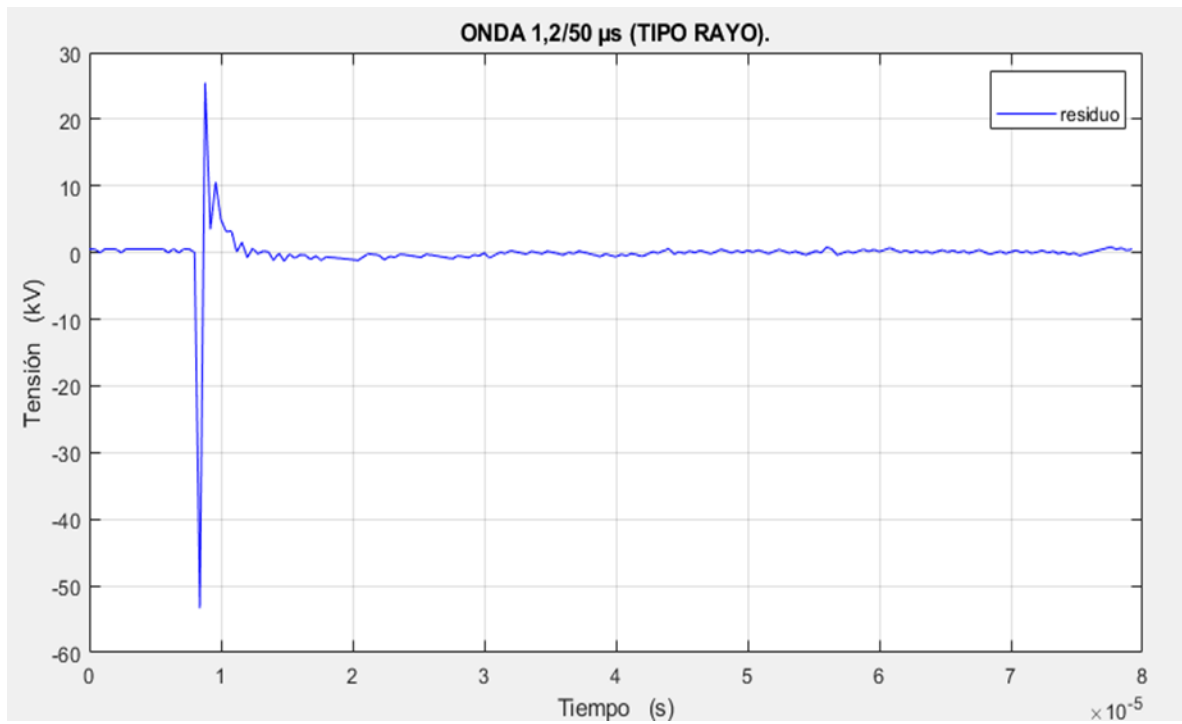
Curva tipo cola base $V_m(t)$.



Se realiza la resta entre la curva registrada $V(t)$ y la curva base $V_m(t)$, obteniendo la curva residual $R(t)$.

Figura 29.

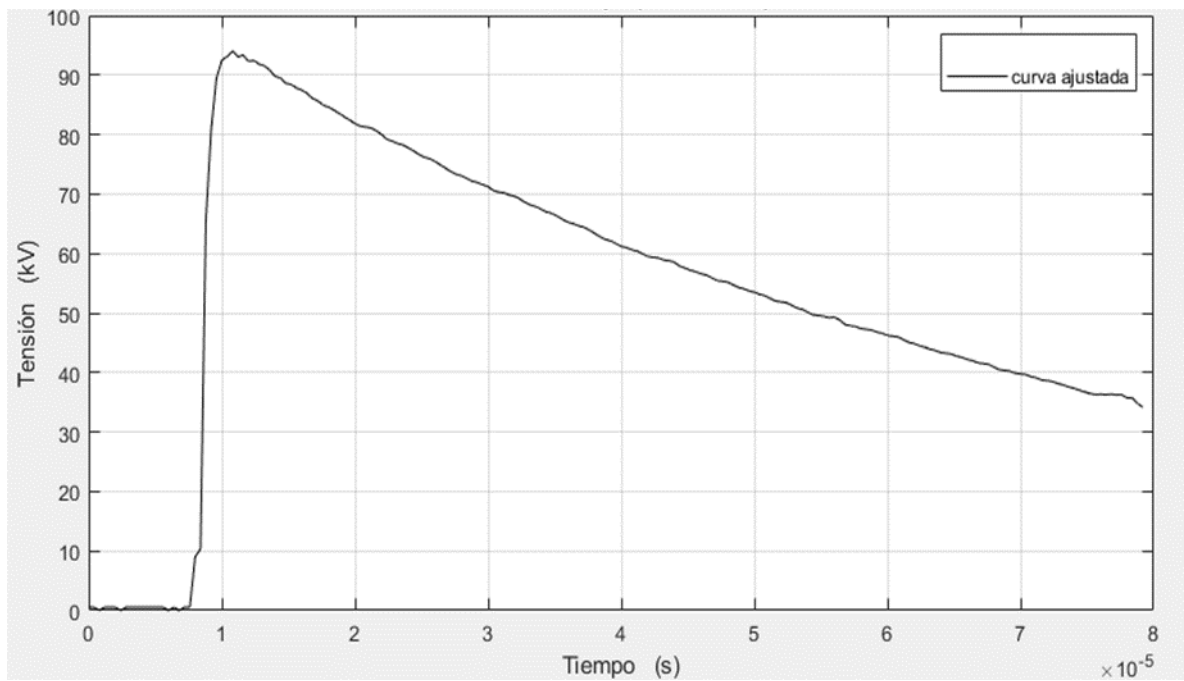
Curva tipo cola residual $R(t)$.



La curva residual filtrada $R_f(t)$ se vuelve a agregar a la curva base $V_m(t)$ para formar la curva de tensión de prueba $V_t(t)$ para el cálculo de parámetros, (Ecuación 6).

Figura 30.

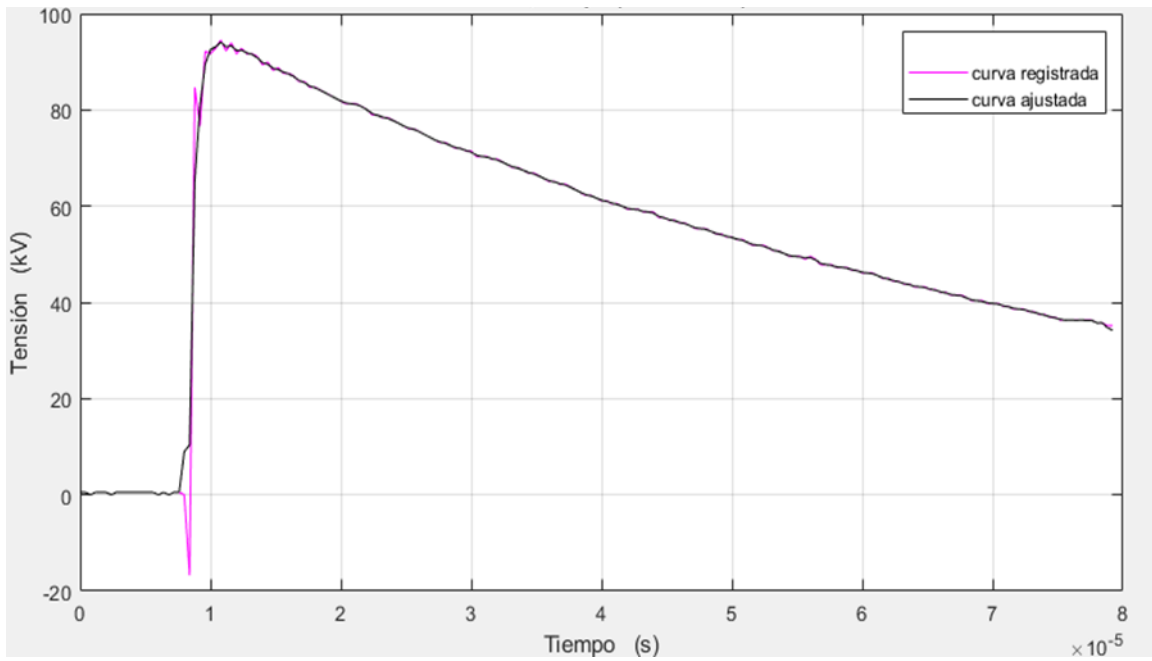
Curva tipo cola ajustada $V_t(t)$.



Se visualiza la curva $V(t)$ y la curva $V_t(t)$.

Figura 31.

Curva registrada y Curva de tensión de prueba



Se obtiene valores de V_t , T_2 y β' (%) y se analiza si dichos resultados cumplen los rangos de tolerancia establecidos por la norma IEEE std.4 de 2013.

Parámetros de la curva base $V_m(t)$.

A: -1,12945

B: $-8,48406 \cdot 10^{-7}$

C: $-6,78225 \cdot 10^{-5}$

D: 0

Parámetros característicos de la onda tipo frente recortada en la cola.

Tensión máxima $V_i(t)$: 94,0717 kV

Tiempo de cola T_2 : 55,6 μs

β' : 2,23425 %

5. Conclusiones

- El diseño del filtro virtual se realizó siguiendo el procedimiento del estándar IEEE 2013. Al realizar el filtro digital con su función de transferencia se utiliza la ecuación 4, ya con el filtro construido se puede adaptar a diferentes muestras y así mejorar la calidad de la onda.

- Se elaboró una herramienta computacional práctica, con el fin de facilitar el estudio a detalle del impulso atmosférico (tipo rayo), el cual se implementará en aplicaciones como: pruebas de aislamiento, en subestaciones, máquinas eléctricas, zonas de alta probabilidad de descargas atmosféricas, entre otros.

- Se evidenció que no hay un soporte matemático para la construcción de la curva base que se adapte mejor a los datos registrados en el laboratorio, dando como resultado múltiples soluciones, en este caso por medio de una función de doble exponencial.

- Al momento de identificar los tipos de ondas, ya sea de frente o de cola se percató que sus tiempos de muestreo son diferentes; Con esta información se logró establecer un método de identificación de cada onda al momento de realizar sus respectivos cálculos por medio del algoritmo creado en MATLAB®.

- Se evidenció que las ondas tipo frente recortadas por la cola al ser tratadas por el método del parche de cola, quedan con características similares a una onda tipo frente por lo cual se le puede aplicar el mismo tratamiento de filtrado de la onda tipo frente.

- Los datos adquiridos por el osciloscopio entre el origen y el 20% del frente son omitidos en los cálculos por su influencia de cualquier perturbación. La curva base es construida desde el 20% en el frente hasta el 40% en la cola, rango en el cual se presenta los valores más relevantes a tratar en la onda de prueba.

- Se evidenció que β es el encargado de evaluar la diferencia entre el valor máximo de la curva registrada y la curva base en el cual se representa como un valor porcentual.

6. Recomendaciones

- Al finalizar los respectivos cálculos de filtrado se agrega la parte plana o pie de la forma de onda al comienzo del registro, esto se hace con el fin de mejorar la visualización y de esta manera comprender mejor el análisis de las gráficas.

Referencias

- Asociación Española de Normalización y Certificación. (2012). Técnicas de ensayos de alta tensión Parte 2: Sistemas de medida [IEC 60060-2:2010]. 78. España: AENOR. Recuperado el Septiembre de 2020, de file:///F:/Nueva%20carpeta/EXT_N4TZow6S0h6h9X8T057V.pdf
- Asociación Española de Normalización y Certificación. (2013). Técnicas de ensayos de alta tensión Parte 1: Definiciones generales y requisitos de ensayo (IEC 60060-1:2010). 1-73. España: AENOR. Recuperado el Septiembre de 2020, de file:///F:/Nueva%20carpeta/EXT_21dSL0cbFaL4XN3A5Llf.pdf
- Hinow , M., Hauschild , W., & Gockenbach , E. (7 de Septiembre de 2010). Impulse Voltage and Overshot Evaluation Proposed in Drafts of IEC 60060-1 and Future UHV Testing. 1628 - 1634. IEEE. Recuperado el 2020, de <https://ieeexplore.ieee.org/document/5595567>
- IEEEExplore. (10 de Mayo de 2013). *IEEEExplore*. Recuperado el Septiembre de 2020, de <https://ieeexplore.ieee.org/document/6719473>
- Kuffel, E., Zaengl , W. S., & Kuffel , J. (2000). Fundamentos de la ingeniería de alto voltaje. *Segunda* . Recuperado el Septiembre de 2020, de <https://www.sciencedirect.com/book/9780750636346/high-voltage-engineering-fundamentals>
- Rodríguez , D., Gonzalez , W., & Reatiga , J. (2016). *Procedimiento para el cálculo de los parámetros de impulsos atmosféricos de tensión*. Bucaramanga. Recuperado el Septiembre de 2020

Rugeles , J., & Chacon V , J. C. (17 de Mayo de 2017). Laboratorio de alta tensión. Manual de prácticas. Bucaramanga: Ediciones UIS . Recuperado el Diciembre de 2020, de <https://ediciones.uis.edu.co/index.php/publicacionesuis/catalog/book/338>

Simon , P., Garnacho , F., Berlijn, S. M., & Gockenbach , E. (Abril de 2006). Determining the Test Voltage Factor Function for the Evaluation of Lightning Impulse With Oscillations and/or n Overshoot. *21, 1*, 560-566. IEEE. Recuperado el Septiembre de 2020, de <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1610663>

Apéndices

Apéndice A. Equipos de laboratorio para la prueba de impulso atmosférico

GENERADOR DE IMPULSOS DE TENSIÓN

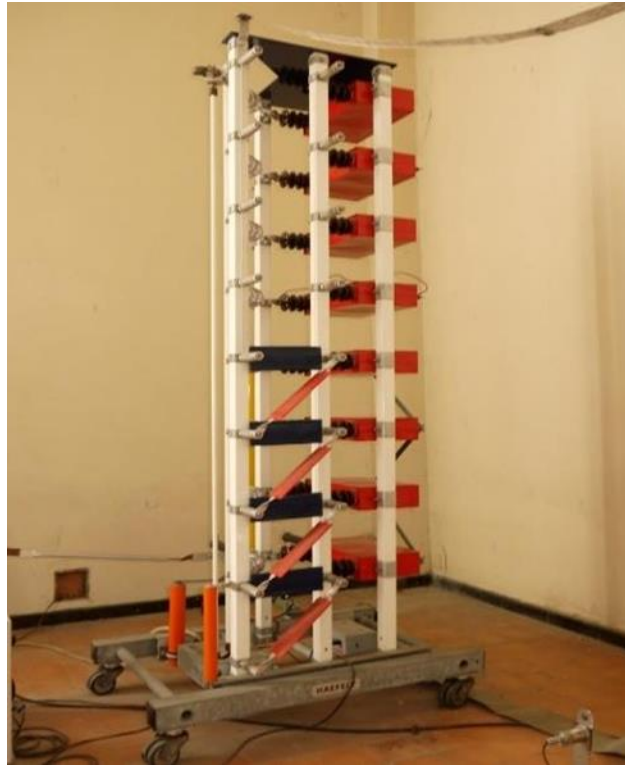
El laboratorio de alta tensión de la Universidad Industrial de Santander cuenta con un generador tipo Marx de 8 etapas con el cual se pueden realizar este tipo de ensayos, a continuación, se describen cada una de las partes constructivas de este equipo. En la tabla 1 se presentan las características más importantes del G.I. y en la figura 31 se muestra una gráfica del mismo. Lo normal es que un generador tenga varias etapas. La conexión de etapas en serie permite conseguir niveles elevados de tensión, de tal forma que los capacitores se descargan en serie. La tensión y la corriente de salida del generador del circuito deben ser igual a los valores de multietapa.

Tabla 1.

Características del generador de impulsos de la UIS

MARCA	HAEFELY TIPO S-SERIE
Máxima energía por etapa	2,5 kJ
Capacitancia por etapa	500 nF
Tensión máxima por etapa	100 kV
Eficiencia para IA	86-97 %
Eficiencia para IM	83-90 %
Numero de etapas	8

Figura 32. *G.I del laboratorio de alta tensión UIS.*



FUENTE: RODRÍGUEZ, D; GONZÁLEZ, W. y REÁTIGA, J. PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE IMPULSOS ATMÓSFERICOS DE TENSIÓN. Bucaramanga: UIS 2016

DIVISOR CAPACITIVO AMORTIGUADO

Es una parte del sistema y es utilizado para realizar una medición indirecta de la magnitud de la onda de tensión de impulso, para que pueda ser medida y observada por medio del osciloscopio además de protegerlo de las sobretensiones. Para tensiones de impulso y prevenir oscilaciones, se conectan en serie con los condensadores unidades resistivas. El divisor de tensión con el que se cuenta en el laboratorio de alta tensión de la UIS es de marca Haefely, tipo CS 1000 y permite enviar una onda de impulso de tensión reducida 720,5 veces al osciloscopio mediante un cable coaxial.

Tabla 2.

Características del divisor capacitivo de la UIS.

Marca	HAEFELY
Valor capacitancia de alta, AT	652,3 pF
Valor capacitivo de baja, bt	468 nF
Tensión máxima	1000 kV
Relación de divisor	720,5/1

Figura 33. *Divisor capacitivo amortiguado*



FUENTE: RODRÍGUEZ, D; GONZÁLEZ, W. y REÁTIGA, J. PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE IMPULSOS ATMÓSFERICOS DE TENSIÓN. Bucaramanga: UIS 2016.

Apéndice B. Código Matlab

En este proyecto se anexa como complemento digital los elementos utilizados y la herramienta digital creada en la elaboración del filtro a través de un CD, vía online (archivo comprimido), entre otros, el cual es entregado con el trabajo

Este anexo consta de un archivo comprimido con extensión RAR, creado con la herramienta WinRAR®, el cual contiene los siguientes elementos:

Apéndice B. CÓDIGO: en esta carpeta se ubica todos los archivos programados a través de la herramienta computacional MATLAB®.

DATOS: en esta carpeta se ubica los datos obtenidos en las pruebas realizadas en el laboratorio de alta tensión de la Universidad Industrial de Santander, los cuales tienen el formato de Hojas de cálculo de Microsoft Excel (.xlsx).

DESCARGAR ACTUALIZACIÓN: en esta carpeta se ubica el archivo ejecutable (.exe) con el cual se actualiza la herramienta computacional MATLAB® si esta presenta fallas al momento de ejecutar el aplicativo creado para el tratamiento de filtrado.

FILTRO: archivo ejecutable (.exe), con el cual a partir de su ejecución se realiza el tratamiento de filtrado realizado en el trabajo de grado.

¡LEER!: documento de texto (.txt) en el cual se presenta una serie de instrucciones por si se presenta algún inconveniente con los elementos mencionados anteriormente.