

**PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE IMPULSOS
ATMOSFÉRICOS DE TENSIÓN.**

DAVID ALBERTO RODRÍGUEZ RUEDA
WILSON EPIFANIO GONZÁLEZ LIZARAZO
JAVIER RICARDO REÁTIGA GONZÁLEZ



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA
Y DE TELECOMUNICACIONES**

**BUCARAMANGA
2016**



**PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE
IMPULSOS ATMOSFÉRICOS DE TENSIÓN.**

WILSON EPIFANIO GONZÁLEZ LIZARAZO
DAVID ALBERTO RODRÍGUEZ RUEDA
JAVIER RICARDO REÁTIGA GONZÁLEZ

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA

DIRECTOR:

JULIO CÉSAR CHACÓN VELASCO
MPE. EN POTENCIA ELÉCTRICA

CODIRECTOR:

HERMANN RAÚL VARGAS TORRES
DOCTOR EN INGENIERÍA ELÉCTRICA



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA
Y DE TELECOMUNICACIONES

BUCARAMANGA
2016



DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

Dedicamos y agradecemos a dios por todo, por estar siempre a nuestro lado y darnos esta oportunidad. A nuestras familias por el apoyo incondicional a lo largo de toda la vida.

Agradecemos al profesor Julio César Chacón Velasco por el apoyo y la guía para desarrollar este proyecto, a los profesores de la E3t, compañeros y amigos por todos los momentos compartidos en la universidad.

Wilson, David y Javier

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	15
CAPÍTULO 1: IMPULSOS NORMALIZADOS.....	16
1.1 GENERACIÓN.....	16
1.2 NORMATIVA IEEE STANDARD 4 2013 FOR HIGH-VOLTAGE TESTING TECHNIQUES.....	16
1.3 PARÁMETROS.....	16
1.3.1 IMPULSOS DE TENSIÓN TIPO RAYO NORMALIZADOS	18
<i>1.3.1.1 Onda completa</i>	<i>18</i>
1.4 MEDICIÓN DE LOS IMPULSOS ATMOSFÉRICOS DE TENSIÓN	19
<i>1.4.1 Requisitos generales</i>	<i>19</i>
<i>1.4.2 Sistema de medida para impulsos atmosféricos de tensión</i>	<i>19</i>
<i>1.4.3 Indicadores o registros en los instrumentos</i>	<i>20</i>
<i>1.4.4 Incertidumbre en la medida</i>	<i>20</i>
1.5 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE PRUEBAS PARA IMPULSOS ATMOSFÉRICOS DE TENSIÓN	21
1.5.1 Historia del generador tipo Marx.....	21
1.5.2 Análisis del circuito del generador de una etapa	21
1.5.3 Análisis del circuito del generador multi-etapas.....	22

1.5.4	<i>Grupo de capacitores</i>	23
1.5.5	<i>Explosores</i>	24
1.5.6	<i>Resistencias</i>	24
1.6	EQUIPO DE LABORATORIO PARA LA PRUEBA DE IMPULSO ATMOSFÉRICO	25
	CAPÍTULO 2 ESTUDIO DE LAS OSCILACIONES DE LA ONDA DE IMPULSO ATMOSFÉRICO	33
2.1	OSCILACIONES	33
2.2	PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS PROPUESTO POR IEEE ESTÁNDAR 4 2013	33
2.2.1	<i>Bases de los procedimientos</i>	33
2.2.2	<i>Procedimiento para el cálculo de las formas de onda digitales</i>	35
2.2.2.1	<i>Descripción</i>	35
2.2.3	<i>Pasos recomendados para calcular los parámetros de formas de onda tipo rayo</i>	38
2.3	AJUSTE DE CURVAS	40
2.3.1	<i>Ajuste según IEEE Std. 4-2013 en Matlab</i>	41
	CAPÍTULO 3 ANÁLISIS DE RESULTADOS	42
3.1	PROCEDIMIENTO	44
3.1.1	<i>Primer ejemplo del procedimiento</i>	44
3.1.2	<i>Segundo Ejemplo del procedimiento</i>	50

CAPÍTULO 4 OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES	58
4.1 OBSERVACIONES.....	58
4.2 CONCLUSIONES	59
REFERENCIAS	60
BIBLIOGRAFÍA	61
ANEXOS	62

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características del generador de impulsos de la UIS.....	25
Tabla 2. Características de la unidad de carga de la UIS.	27
Tabla 3. Características del divisor capacitivo de la UIS.....	28
Tabla 4. Características y posición de las esferas del espinterómetro.	30

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Gráfica del impulso de tensión sin oscilaciones o sobrepicos.....	18
Figura 2. Impulso atmosférico onda recortada y completa.....	22
Figura 3. Generador de impulsos del laboratorio de alta tensión UIS.....	26
Figura 4. Unidad de carga del generador laboratorio UIS.....	27
Figura 5. Consola de mando del generador laboratorio UIS.....	28
Figura 6. Divisor capacitivo amortiguado.....	29
Figura 7. Espinterómetro laboratorio UIS.....	30
Figura 8. Consola de mando del espinterómetro.....	31
Figura 9. Osciloscopio digital.....	31
Figura 10. Filtro $k(f)$	35
Figura 11. Curva registrada, curva base mostrando sobrepico y curva residual.....	36
Figura 12. Curva de tensión de prueba.....	37
Figura 13. Curva registrada y curva de tensión de prueba.....	37
Figura 14. Diagrama de flujo de la herramienta computacional.....	43
Figura 15. Curva registrada (tipo frente).....	44
Figura 16. Curva registrada después de las dos divisiones (tipo frente).....	45
Figura 17. Curva registrada comparada con la curva ajustada (tipo frente).....	46
Figura 18. Curva residual (tipo frente).....	47
Figura 19. Curva ajustada, registrada y residual (tipo frente).....	47
Figura 20. Curva registrada y curva de ajuste desplazada (tipo frente).....	48
Figura 21. Filtro virtual (tipo frente).....	49

Figura 22. Curva residual filtrada (tipo frente).	49
Figura 23. Curva de tensión de prueba (tipo frente).	50
Figura 24. Curva registrada comparada con la curva de tensión de prueba (tipo frente). ..	50
Figura 25. Curva registrada (tipo cola).	51
Figura 26. Curva registrada después de las dos divisiones (tipo cola).	51
Figura 27. Curva registrada comparada con la curva ajustada (tipo cola).	52
Figura 28. Curva residual (tipo cola).	52
Figura 29. Curva registrada, ajustada y residual (tipo cola).	53
Figura 30. Filtro virtual (tipo cola).	53
Figura 31. Curva residual filtrada (tipo cola).	54
Figura 32. Curva de tensión de prueba (tipo cola).	54
Figura 33. Curva registrada comparada con la curva de tensión de prueba (tipo cola).	55
Figura 34. Portada interfaz gráfica.	56
Figura 35. Curva registrada mostrada en la interfaz gráfica.	57
Figura 36. Curva de tensión de prueba con parámetros.	57
Figura 37. Archivo CSV (Excel).	62
Figura 38. Archivo hoja de pegado (Excel).	63
Figura 39. Entorno Matlab.	63
Figura 40. Entorno INI.	64
Figura 41. Entorno IAT.	65

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A.....	62
A RECOMENDACIONES PARA EL USUARIO DE LA INTERFAZ GRÁFICA	62
B VENTANA INI.....	64
C VENTANA IAT	65

RESUMEN

TÍTULO: Procedimiento para el cálculo de los parámetros de impulsos atmosféricos de tensión*.

AUTORES:

Wilson Epifanio González Lizarazo

David Alberto Rodríguez Rueda

Javier Ricardo Reátiga González**

PALABRAS CLAVE:

Generador de Impulsos (GI), Impulso Atmosférico (IA), Objetos de Ensayo, Curva Registrada, Tensión de Prueba.

DESCRIPCIÓN:

Los laboratorios de alta tensión permiten realizar pruebas a diferentes objetos de ensayo o en vacío. En el laboratorio de la UIS se realizan las pruebas del impulso atmosférico para lo cual se identifican las curvas de tensión normalizadas. Este libro presenta una descripción del generador de impulsos utilizado y de la forma como se genera la tensión de prueba.

La prueba de impulso atmosférico de tensión arroja una señal con oscilaciones con lo que se puede detallar el estudio de la curva de tensión de ensayo y sus parámetros de tiempos en el frente de onda y en la cola. Los datos son tratados de acuerdo a lo recomendado por el procedimiento propuesto por la IEEE estándar 4 de 2013 para el cálculo de estos parámetros.

Este estudio caracteriza señales tomadas de la prueba con el osciloscopio a diferentes escalas por división, por lo que la información de la curva registrada se ve influenciada dependiendo de la escala de captura. Para unas ondas se tienen más muestras que para otras, también es evidente que para los diferentes casos las oscilaciones cambian. Las ondas analizadas son truncadas, filtradas y ajustadas según el procedimiento a partir del que se determinan los valores de tiempo que describen si la onda está en el rango de las ondas estándar $1,2/50\mu\text{s}$.

Los resultados se obtienen a través de una herramienta computacional desarrollada en Matlab, teniendo en cuenta la metodología propuesta, se creó una interfaz de usuario para el fácil acceso a los resultados luego de realizada la prueba de laboratorio.

*Trabajo de grado.

**Facultad de ingenierías Físico-Mecánica, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, Director: M. Sc. Julio César Chacón Velasco

ABSTRACT

TITLE: Method for calculation of the parameters of voltage pulses atmospheric *.

AUTHORS:

Wilson Epifanio González Lizarazo

David Alberto Rodríguez Rueda

Javier Ricardo Reátiga González**

KEYWORDS: Pulser, lightning impulse, test objects, recorded curve, test voltage.

DESCRIPTION:

High voltage laboratories allow making different test objects or empty. In laboratory tests UIS lightning impulse for which standard voltage curves are identified are made. This book presents a description of the pulse generator used and how the test voltage is generated.

Atmospheric test voltage pulse yields a signal oscillations which can be detailed study of the test voltage curve and timing parameters in the wavefront and tail. The data are treated as recommended by the proposed standard IEEE 4 of 2013 for the calculation of these parameters procedure.

This study characterizes the test signals taken with the oscilloscope division at different scales, so the information recorded curve is influenced depending on the scale of capture. For some waves are more samples than for others is also clear that for different cases the oscillations change. Waves are analyzed truncated, filtered and adjusted according to the procedure from the time values describing whether the wave is in the range of standard waveforms $1.2 / 50\mu\text{s}$ are determined.

The results are obtained through a computational tool developed in Matlab, taking into account the proposed methodology, a user interface for easy access to the results after completion of the test laboratory was established.

*Degree Project.

**Faculty of Physical-Mechanics Engineering, School of Electrical Engineering, Electronics and Telecommunications. Director: M. Sc. Julio César Chacón Velasco.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo de grado trata sobre la onda normalizada 1,2/50 empleada en los laboratorios de alta tensión con el fin de probar aislamientos que se someten a descargas atmosféricas para tal fin se emplea la norma IEEE estándar 4 de 2013.

CAPÍTULO 1: IMPULSOS NORMALIZADOS

1.1 GENERACIÓN

La generación de impulsos de tensión se hace en el laboratorio de alta tensión de la Universidad Industrial de Santander con el generador tipo “Marx” de ocho etapas, con la finalidad de realizar pruebas experimentales para investigar el aislamiento eléctrico de los sistemas, equipos y maquinaria que se pueda ver afectado por estos impulsos de corta duración.

1.2 NORMATIVA IEEE STANDARD 4 2013 FOR HIGH-VOLTAGE TESTING

TECHNIQUES

El estándar 4 IEEE de 2013 establece métodos estándar y técnicas básicas para las pruebas de alta tensión. El estándar es aplicable para todo tipo de aparatos de corriente alterna, corriente continua, impulsos atmosféricos de tensión, impulsos de tensión tipo maniobra e impulsos de corriente. El estándar 4 IEEE define términos de aplicación general y describe métodos para la evaluación de los resultados de pruebas de alta tensión, pero para este proyecto de grado solo se va a definir términos concernientes a la realización de pruebas del impulso atmosférico de tensión, realizados en el laboratorio de alta tensión de la Universidad Industrial de Santander.

1.3 PARÁMETROS

Los siguientes términos son usados para caracterizar impulsos atmosféricos de tensión completos tal como se define en el IEEE estándar 4 de 2013.

- **Impulso**

Es un transitorio de tensión o corriente intencionalmente aplicado que crece rápidamente a un valor pico y luego cae lentamente a cero.

- **Impulso de corriente**

Es un transitorio de corta duración que no presenta periodicidad, crece sin oscilaciones alcanzando un valor pico y luego decrece a cero.

- **Impulso de maniobra**

Los impulsos de maniobra (IM) representan sobretensiones por efectos de maniobra (switching) en los sistemas de distribución, por la entrada o salida de circuitos o la energización de equipos.

- **Impulso de tensión atmosférico estándar**

Es un impulso atmosférico que tiene un tiempo de frente de 1,2 microsegundos y un tiempo T2 llamado tiempo de cola que es el tiempo que transcurre hasta alcanzar el 50% del máximo valor pico, su valor es 50 microsegundos y es descrito como impulso 1,2/50.

- **Impulso recortado de tipo atmosférico**

Tiene el mismo principio de impulso atmosférico completo pero durante el cual cualquier tipo de descarga ocasiona un rápido colapso de tensión.

- **Sobrepico**

Es el incremento en la amplitud de un impulso de tensión completo originado por una oscilación en el pico.

- **Valor máximo impulso de corriente**

El valor pico es el máximo valor entre varias oscilaciones que puede tener el impulso.

- **Curva registrada**

Es una gráfica o representación digital de los datos de la prueba de un impulso de tensión.

- **Nivel base**

El nivel de la gráfica obtenida por el osciloscopio de la medición del impulso cuando es cero.

- **Curva base**

Es el estimado de un impulso de tensión atmosférico completo sin oscilación superpuesta.

- **Curva residual**

Es la diferencia entre la curva grabada y la curva base.

- **Magnitud del sobrepico β**

Es la diferencia entre los valores pico entre la curva grabada y la curva base.

- **Magnitud relativa del sobrepico β'**

Es el radio de la magnitud del sobrepico al valor extremo, usualmente es expresado como porcentaje.

- **Valor extremo de un impulso v_e**

Es el máximo valor de la curva grabada.

1.3.1 IMPULSOS DE TENSIÓN TIPO RAYO NORMALIZADOS

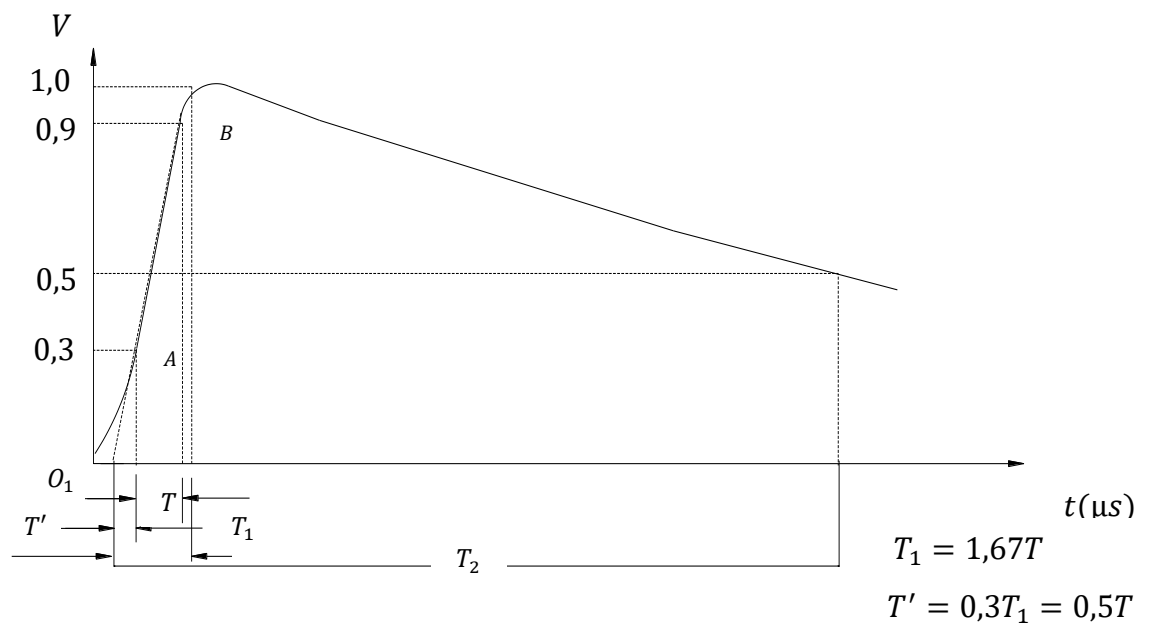
1.3.1.1 Onda completa

Impulso de tensión que alcanza un valor pico en un instante de tiempo que crece y decrece Exponencialmente alcanzando un valor cercano a cero.

Los impulsos atmosféricos estándar tienen tiempo de frente (T_1) de $1,2 \mu s$ y tiempo de cola (T_2) de $50 \mu s$.

Las oscilaciones pueden presentarse en exceso para ello se limitan al 5% de la tensión pico. Pero en todos los casos, el sobrepico u oscilación se limita al 10%.

Figura 1. Gráfica del impulso de tensión sin oscilaciones o sobrepicos.



Fuente: IEEE Standard 4-2013-Techniques for High-Voltage Testing. Redline, 2013.

La figura 1 muestra una onda de tensión de prueba normalizada con sus parámetros de tiempo. Los puntos A y B describen la parte lineal de la curva de tensión de prueba estándar.

1.3.1.2 Tolerancias normalizadas para impulsos atmosféricos

Para las pruebas de aislamiento se tienen en cuenta las siguientes tolerancias:

Valor pico: ± 3 = voltaje máximo $\pm 3\%$ kV.

Tiempo de frente: $1,2 \pm 30\%$ = $1,2 \pm 0,36 \mu\text{s}$.

Tiempo de cola: $50 \mu\text{s} \pm 20\%$ = $50 \pm 10 \mu\text{s}$.

Sobreoscilaciones = menor del 5 % del valor pico

1.4 MEDICIÓN DE LOS IMPULSOS ATMOSFÉRICOS DE TENSIÓN

La medición de los impulsos atmosféricos de tensión se hace con un sistema de medida aprobado. Un sistema de medición es un conjunto completo de dispositivos adecuados para realizar mediciones de alta tensión o impulsos de corriente. Un sistema de medición aprobado cumple con uno o más requisitos establecidos en la norma IEC 60060-2 mediante una prueba de rendimiento inicial y un ensayo que verifique si es apto o no.

1.4.1 Requisitos generales

Los requisitos generales para un sistema de medida aprobado están dados a continuación, más detalles sobre estos requisitos y métodos de pruebas se pueden encontrar en la IEC 60060-2:

- Para medir el valor pico de un impulso completo se debe tener en cuenta una incertidumbre de $\pm 3\%$.
- Para medir el valor pico de un impulso recortado depende del tiempo en el que se corta:
 - Para impulsos recortados en el frente ($0.5 \mu\text{s} \leq T_c \leq 2 \mu\text{s}$) $\pm 5\%$
 - Para impulsos recortados en la cola ($T_c \geq 2 \mu\text{s}$) $\pm 3\%$
- Para medir los parámetros de tiempo que definen la forma de onda con una incertidumbre de 10%
- Para medir los niveles permitidos de oscilaciones en un impulso en IEC 60060-1.
- El factor de escala permanece constante durante un largo periodo de tiempo. El factor de escala no deberá variar en más de un 1% para rangos de temperatura ambiente.
- Los instrumentos de medida tanto para osciloscopios y voltímetros deben cumplir con IEC 60790 y para las lecturas digitales con IEC 61083-1.

1.4.2 Sistema de medida para impulsos atmosféricos de tensión

Un sistema de medida para la medición de impulsos atmosféricos de tensión se compone de:

- Un dispositivo de conversión con los conductores necesarios para conectar el dispositivo al objeto de prueba y las conexiones a tierra.
- Sistema de transmisión conectado a los terminales de salida del dispositivo para los indicadores (indican cuando se está por fuera de la escala de medida) o lecturas del instrumento con este tipo de atenuaciones.
- Indicadores o lecturas del instrumento junto con algunas conexiones a la fuente de alimentación.
- Software o procedimiento para la evaluación de los parámetros.

1.4.3 Indicadores o registros en los instrumentos

En los laboratorios de alta tensión de todo el mundo se están utilizando diferentes instrumentos con indicadores o registros para la medición de impulsos atmosféricos de tensión, se pueden diferenciar los tres tipos de instrumentos:

- Voltímetros de pico
- Osciloscopios análogos
- Osciloscopios digitales o grabadoras digitales

La evaluación de los parámetros se realiza ya sea de forma manual o automática, dependiendo del tipo de indicador o registro del instrumento y de la habilidad del software.

1.4.4 Incertidumbre en la medida

La medición de los parámetros que caracterizan un impulso atmosférico de tensión usando sistemas de medición aprobados, tiene que realizarse dentro de los límites de incertidumbre mencionados en la norma IEC 60060-1 (3% o 5% del valor pico y 10% para los parámetros de tiempo).

En este capítulo se describe brevemente los elementos a tener en cuenta al evaluar la incertidumbre de medida de una medición.

La finalidad de una medición es determinar el valor de una magnitud, llamada el mensurando. Definir bien el mensurando es muy importante para obtener buenos resultados de la medición, aunque nunca se puede conocer con certeza absoluta el verdadero valor de una magnitud; todas las mediciones llevan implícita una incertidumbre que caracteriza la dispersión de los valores más razonables al mensurando. Luego de la determinación del mensurando se identifican los diversos factores involucrados en la medición o fuentes de incertidumbre que pueden ser por ejemplo:

- Los resultados de la calibración del instrumento.
- La incertidumbre del patrón o del material de referencia.
- La repetitividad de las lecturas.
- La reproducibilidad de las mediciones por cambio de observadores, instrumentos u otros elementos.
- Características del propio instrumento, como resolución, histéresis, etc.
- Variaciones de las condiciones ambientales.
- La definición del propio mensurando.
- El modelo particular de la medición.
- Variaciones en las magnitudes de influencia.

No es aconsejable excluir alguna de las fuentes de incertidumbre porque puede resultar poco significativa sin antes cuantificarla [3].

1.5 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE PRUEBAS PARA IMPULSOS

ATMOSFÉRICOS DE TENSIÓN

1.5.1 Historia del generador tipo Marx

Erwin Otto Marx (1893- 1980) fue un ingeniero electricista quien primero describió un sistema para generar tensiones de impulso. El modelo matemático se mostró en 1923, el cual en comparación con otros modelos presentados décadas atrás compartía el concepto de multiplicador de tensión en cascada, pero difería, la tensión aplicada de la fuente cargaba a los capacitores conectados en paralelo y la descarga se hacía en serie.

Los generadores de varias etapas pueden realizar pruebas en sistemas de aislamiento eléctrico [4], [5]. Hoy en día, el generador tipo Marx es utilizado para simular las sobretensiones, sean de impulso atmosférico o de maniobra.

1.5.2 Análisis del circuito del generador de una etapa

El circuito de una sola etapa del ingeniero Marx es usado para generar impulsos de tensión, tiene un condensador de impulso C_1 el cual es cargado hasta su capacidad de tensión V_0 por una fuente de tensión continua, a través de una resistencia de carga R_L . El generador de una sola etapa es válido para tensiones que no superen los kilovoltios de diseño de la etapa, para

obtener un rango más amplio en las tensiones de prueba se necesita de un generador de impulsos de más de una etapa, que mediante la conexión en serie de las etapas produzca la tensión de prueba.

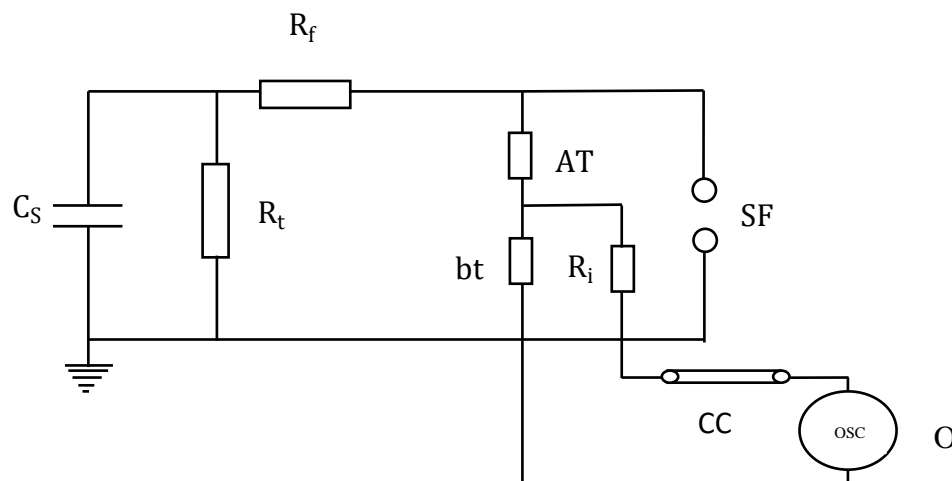
1.5.3 Análisis del circuito del generador multi-etapas

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 equivalente deben ser igual a los valores de multietapa. Los generadores con varias etapas constan de condensadores en cada una de las etapas conectados en paralelo a la tensión de prueba que se desee. Las resistencias del circuito son: resistencia de frente, de cola y de carga. El generador de impulsos del laboratorio de la Universidad Industrial de Santander UIS es de 8 etapas.

En el laboratorio de la UIS se realizan pruebas como la del impulso atmosférico (circuito figura 2):

- Montaje de la prueba de impulso de tensión.

Figura 2. Impulso atmosférico onda recortada y completa.



Fuente: Julio Rugeles J., M.Sc, Julio César Chacón V., MPE. Laboratorio de alta tensión “Manual de prácticas”. Bucaramanga: UIS 2013.

Donde:

C_s - grupo de capacitores del generador de impulsos de tensión

R_t - resistencia en paralelo de la cola

R_f - resistencia serie del frente

AT- capacitancia de alta tensión

bt- capacitancia de baja tensión

R_i- resistencia del terminal de acople
CC- cable coaxial
O- osciloscopio
SF- espinterómetro

En el generador de varias etapas se consideran parámetros como:

- **Tensión nominal**

Es la tensión máxima de carga V_0 multiplicada por el número de etapas. La tensión real que se puede aplicar en una prueba es menor que nV_0 (donde n es el número de etapas) haciendo que el rendimiento en la generación de la tensión de impulso sea menor al 100%, por lo general la tensión de carga V_0 está en un rango de 50 kV a 400 kV, rango diferente al de construcción de los generadores que puede alcanzar valores de voltaje de hasta 5 MV.

- **Capacitancia nominal**

Es la capacitancia por etapa del generador $\frac{C_s}{n}$, por lo general es mínimo cinco veces la capacitancia de prueba, ya que esto implica que la eficiencia respecto a tensión no sea baja. La capacitancia por etapa está en el rango de 200 nF a 2000 nF.

- **Energía nominal**

La energía nominal es la máxima energía que se puede almacenar y se describe mediante la expresión:

$$w = \frac{1}{2} n C_s V_0^2 \quad (1)$$

- **Número de etapas**

En formas de onda con oscilaciones se debe reducir el valor de la inductancia L del circuito, esto se logra limitando etapas. De forma similar el número de resistencias de frente y cola debe mantenerse en la cantidad posible. Por otra parte la tensión V_0 indica la capacidad de los capacitores de carga y el número de etapas, los generadores de impulsos por lo general tienen un gran número de etapas dependiendo de la señal que se quiere modelar.

1.5.4 Grupo de capacitores

Es el grupo de capacitores que se encuentran en el generador de impulsos de tensión, dependiendo de las etapas del GI será el número de capacitores, su valor de capacitancia por etapa es de 500 nF más una tolerancia del 5%.

Estos elementos son cargados en paralelo por medio de rectificadores de alta tensión a través de resistencia de carga para luego realizar una descarga en serie.

1.5.5 Explosores

Es un dispositivo que principalmente está conformado por dos electrodos enfrentados en los cuales se inicia la descarga eléctrica bajo unas condiciones específicas y hacen parte del circuito de descarga del G.I. Al cerrarse el interruptor del gap cierra el circuito uniendo el Cs con la impedancia de carga, R_t y R_f . El más utilizado es el de dos semiesferas metálicas y se produce un arco eléctrico entre el espacio entre las dos esferas.

1.5.6 Resistencias

- **Resistencia de amortiguamiento**

Es una resistencia con baja inductancia y puede ser insertada en el conductor de alta tensión para amortiguar las reflexiones y oscilaciones de alta frecuencia. Si la resistencia está cercana al divisor de tensión, esta es considerada como parte del divisor y debe tomarse en cuenta para el cálculo de la relación del sistema de medición del divisor.

- **Resistencia de frente y de cola**

La resistencia de frente y de cola se representa por una impedancia, donde la resistencia e inductancia son los valores nominales de resistencia e inductancia. La correcta selección de estas resistencias permite obtener los tiempos de la señal de impulso de tensión [7].

- **Resistencia del terminal de acople**

La resistencia del terminal de acople R_i es la que permite la conexión entre la capacitancia de baja tensión C_t del divisor capacitivo y el cable coaxial que va al osciloscopio.

- **Resistencia de esterilla**

Es la resistencia que permite la conexión entre el generador de impulsos y el divisor capacitivo, está conformada por un largo filamento que recorre la mayor superficie de una esterilla a la cual va sujeto, su valor varía también dependiendo de la prueba a realizar.

1.6 EQUIPO DE LABORATORIO PARA LA PRUEBA DE IMPULSO

ATMOSFÉRICO

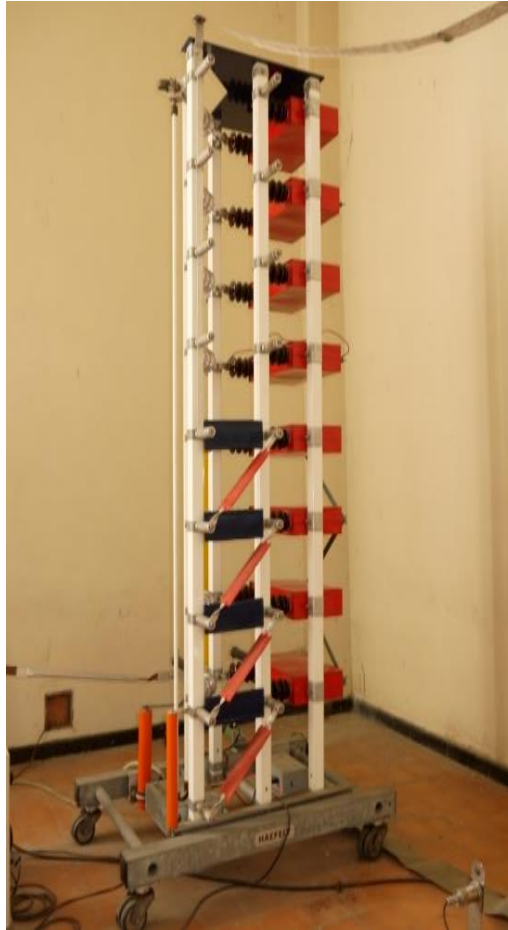
- **GENERADOR DE IMPULSOS DE TENSIÓN.**

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 3 se muestra una gráfica del mismo.

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 3. Generador de impulsos del laboratorio de alta tensión UIS.



- **UNIDAD DE CARGA TIPO LGR 100/15.**

La unidad de carga del generador de impulsos figura 4 está constituida por medio de rectificadores de alta tensión junto con resistencias de carga que permiten que el conjunto de capacitores del G.I. se carguen en paralelo hasta un nivel de tensión determinado. Luego los explosores inician la descarga de los capacitores. Este equipo está diseñado para trabajar conjuntamente con la unidad de control y con el generador de impulsos. Entre sus componentes esta un transformador elevador de 3 kVA relación (220 V / 50 kV), un condensador de acople, un circuito de DC conformado por un rectificador y un doblador de carga; resistencias de amortiguamiento, las características se muestran en la tabla 2.

La resistencia de carga tiende a infinito si se compara su valor con las resistencias de frente y de cola, esta resistencia solamente se tiene en cuenta para cargar los capacitores en las pruebas.

Figura 4. Unidad de carga del generador laboratorio UIS.



Tabla 2. Características de la unidad de carga de la UIS.

Tensión Nominal	100 kV
Corriente Nominal	15 mA
Tensión primaria	220 V
Potencia de Entrada	3000 VA

- **CONSOLA DE MANDO DEL GENERADOR.**

Es una unidad capaz de controlar de forma automática o manual todo el proceso de carga, descarga y disparo de la onda de impulso de tensión. Opera directamente el sistema de seguridad, una fotografía de ella se muestra en la figura 5.

Figura 5. Consola de mando del generador laboratorio UIS.



- **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. Su fotografía se aprecia en la figura 6 y sus características en la tabla 3.

Tabla 3. 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 6. Divisor capacitivo amortiguado.



- **ESPINTERÓMETRO.**

Sus dos electrodos metálicos esféricos son iguales, lisos sin irregularidades y de igual tamaño. Donde la distancia entre los electrodos se puede modificar, la figura 7 es una fotografía del espinterómetro de la UIS y la tabla 4 presenta sus características y la posición de las esferas.

Tabla 4. Características y posición de las esferas del espinterómetro.

MARCA	HAEFELY
DIÁMETRO DE LAS ESFERAS	25 cm
POSICIÓN	TIEMPO MICROSEGUNDOS
1	1
2	2
3	2,5
4	3
5	3,5
6	4
7	4,5
8	5

Figura 7. Espinterómetro laboratorio UIS.



- **CONSOLA DE MANDO DEL ESPINTERÓMETRO.**

Figura 8. Consola de mando del espinterómetro.



- **OSCILOSCOPIO**

Es un equipo que permite capturar las imágenes de las señales de algunas pruebas de laboratorio, el equipo con el que se cuenta es marca Fluke 105 serie II 100 MHz. Mediante este instrumento es posible medir y observar ondas como la del impulso atmosférico de tensión, además de almacenar las imágenes para luego por conexión, mediante interface óptica visualizarlas por PC.

Figura 9. Osciloscopio digital.



Características del instrumento de medida

- Osciloscopio digital.
- Menú de medición.
- Multímetro digital (DMM) de 5 MHz.
- Amplia capacidad de memoria.
- Puerto interfaz óptica RS-232, aislamiento 600 V
- Auto *SETTM* para medir señales con sonda.
- Función *TrendPlotTM* Min Max con lectura de tiempo para registro de larga duración.

- **Amplitud:** se dispone de 16 rangos de amplitud. La sonda 1:1 ajusta desde 1 mV a un máximo de 100 V por división. La de 10:1 ajusta desde 10 mV a un valor máximo de 1 kV por división.
La amplitud tiene variaciones en incrementos de 1,2 y 5 (100 mV, 200 mV y 500mV)

- **Base de tiempos**

Recurrente: 5 ns (10ns)/DIV-1s/DIV
Única: 100 ns/DIV-1s/DIV
Desplazamiento: 2s/DIV-60s/DIV
Fluke 105: 5ns/DIV

CAPÍTULO 2 ESTUDIO DE LAS OSCILACIONES DE LA ONDA DE IMPULSO ATMOSFÉRICO

2.1 OSCILACIONES

Las pruebas realizadas en el laboratorio de alta tensión UIS pueden arrojar formas de onda con oscilaciones alrededor del valor pico, así como oscilaciones en el frente de la onda. Esto debido a las inductancias y capacitancias del generador de impulsos de tensión. También los circuitos de medición, incluidos los cables de alta tensión así como el fenómeno de reflexión durante la energización de las brechas de las esferas del generador [8].

Para capturar estas oscilaciones el sistema de medición debe poseer un ancho de banda suficiente con el fin de capturar una onda con oscilaciones; el ancho de banda lo define el filtro del sistema de medida que filtra la onda reduciendo varias oscilaciones que pueden desaparecer utilizando la herramienta computacional desarrollada (ancho de banda alrededor de 10 MHz para las oscilaciones en el frente y 5MHz para oscilaciones en el pico). Las oscilaciones en los circuitos de prueba deben diferenciarse de las que podrían ocurrir a causa de la resonancia intrínseca en el divisor capacitivo debido a su construcción; estas oscilaciones a la salida del divisor pueden tener una amplitud mayor, lo que sería inadecuado para la medición de oscilaciones de la tensión de prueba [8].

Las oscilaciones en el pico de los impulsos atmosféricos de tensión necesitan de un proceso de evaluación para determinar el valor de la tensión de prueba. De acuerdo a la normativa para este tipo de pruebas el máximo valor de un impulso atmosférico de tensión con oscilaciones superpuestas de frecuencia $f < 500$ kHz se define como la tensión de prueba. Para $f \geq 500$ kHz, el valor de la tensión de prueba es determinado como el valor pico de la curva ajustada a través de la curva con oscilaciones. La frecuencia de oscilación en el pico no se puede determinar exactamente en 500 kHz [8].

2.2 PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS

PROPUESTO POR IEEE ESTÁNDAR 4 2013

En este capítulo se describe el procedimiento para el cálculo de los parámetros de impulsos atmosféricos de tensión con oscilación superpuestas en el pico. Los procedimientos se basan en una función derivada empíricamente que proporciona un medio de cálculo de la tensión efectiva impuesta sobre el aislamiento por diversos grados de sobrepico u oscilaciones de pico. Esta función es continua. Los parámetros se determinarán usando el procedimiento propuesto por IEEE estándar 4 2013 para impulsos tipo rayo normalizado.

2.2.1 Bases de los procedimientos

Una curva base $V_m(t)$ se construye siguiendo los siguientes pasos: primero a través de la tensión aplicada o curva registrada $V(t)$ y luego resta de la curva de la tensión aplicada así

como para producir sus componentes oscilatorias (estas curvas teóricas tomadas del IEEE estándar 4 de 2013 se muestran en la figura 15). Los componentes oscilatorias (es decir, la curva residual $R(t)$), se filtran a continuación por una función de filtro dependiente de la frecuencia para convertirse en $R_f(t)$, antes de ser añadido de nuevo a la curva de base para producir la curva de tensión de prueba $V(t)$, la curva o registro del que se derivan los parámetros de impulso.

El procedimiento se basa en la siguiente ecuación (2) y la ecuación que define $k(f)$ (3):

$$V(t) = V_{mp} + k(f)(V_e - V_{mp}) \quad (2)$$

Donde;

$V(t)$ es la tensión de prueba, que es el valor pico de la curva de tensión de prueba procesada.

V_{mp} es el valor pico de la curva base libre de sobreimpulso.

V_e es el valor extremo o máximo del valor del impulso de tensión aplicado (es decir la curva registrada).

$k(f)$ es el factor de tensión de prueba que depende de la frecuencia.

La ecuación describe un valor de tensión de prueba efectivo $V(t)$ que podría ser sometido el aislamiento y con el cual se derivan los parámetros del impulso.

La función dependiente de la frecuencia del factor de tensión de prueba está dada por:

$$k(f) = \frac{1}{1 + a * f^2} \quad (3)$$

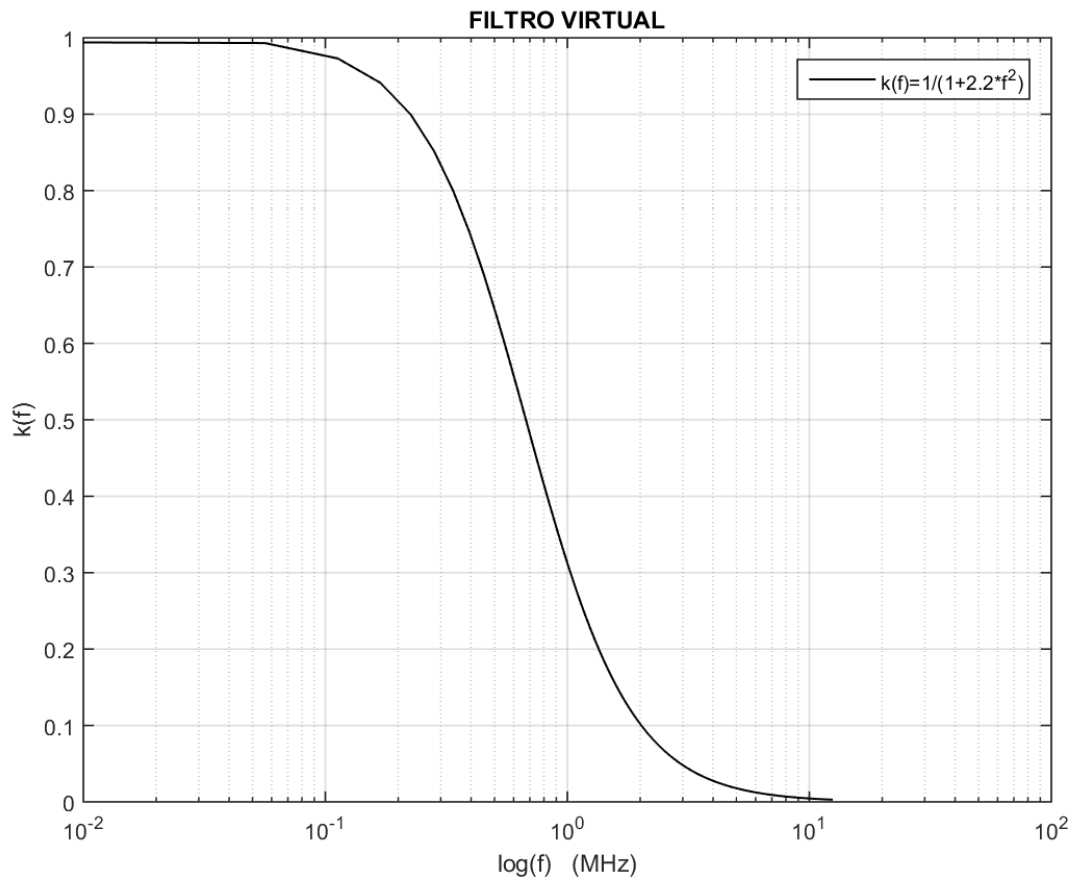
Donde;

f es la frecuencia en MHz

a es un coeficiente de valor igual a 2,2

La expresión gráfica de la función de $k(f)$ se muestra a continuación en la figura 14 que es el filtro virtual con un ancho de banda definido para las oscilaciones como lo recomienda el IEEE estándar 4 de 2013.

Figura 10. Filtro $k(f)$.



Fuente: IEEE Standard 4-2013-Techniques for High-Voltage Testing. Redline,2013.

La ecuación de tensión de prueba y la ecuación de $k(f)$ es aplicable a impulsos con y sin sobrepico. Para impulsos sin sobrepico, la tensión aplicada es una curva suave y tiene la forma de una curva base sin ninguna oscilación residual para procesar. Tales curvas no se ven afectadas por los parámetros de la función de filtro y la producción de los parámetros no son afectados por esta función.

2.2.2 Procedimiento para el cálculo de las formas de onda digitales

2.2.2.1 Descripción

Este procedimiento es una implementación de la ecuación de $k(f)$, y se sugiere usar para el cálculo asistido por ordenador de los impulsos en forma digital.

$$V(t) = \text{Max}\{V_m(t) + R_f(t)\} \quad (4)$$

Donde;

$V(t)$ es como se define anteriormente.

$V_m(t)$ es el registro de la curva base obtenida por un procedimiento de ajuste de la curva exponencial.

$R_f(t)$ es el registro de la curva residual filtrada.

La curva residual se obtiene restando $V_m(t)$ a partir de la curva registrada [es decir, la tensión aplicada $V(t)$]. La función de transferencia del filtro aplicado a la curva residual es igual a la definida por la ecuación de $k(f)$.

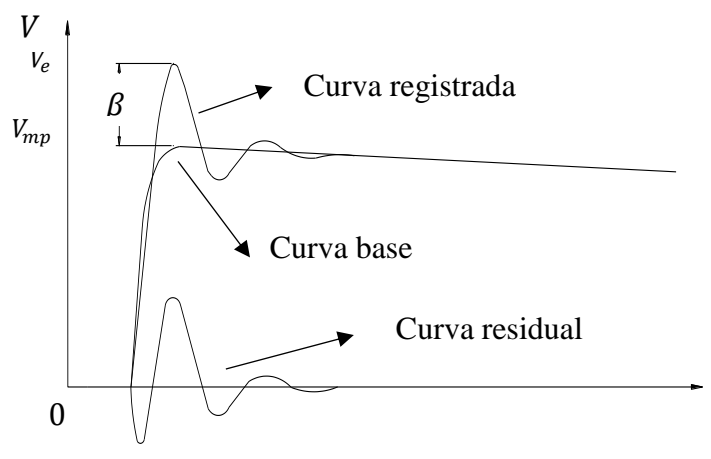
Entonces, el valor de la tensión de prueba V_t , y los valores de la duración del frente y el tiempo a la mitad de valor, se determinan a partir de la forma de onda procesada $V_t(t)$, denominado la curva de tensión de prueba, dado Por:

$$V_t(t) = V_m(t) + R_f(t) \quad (5)$$

La amplitud de sobrepico relativa, expresada como un porcentaje, β (%), se determina a partir de la diferencia relativa entre el valor pico de la curva registrada V_e y el valor pico de la curva de base V_{mp} [es decir, $100 (V_e - V_{mp}) / V_e$].

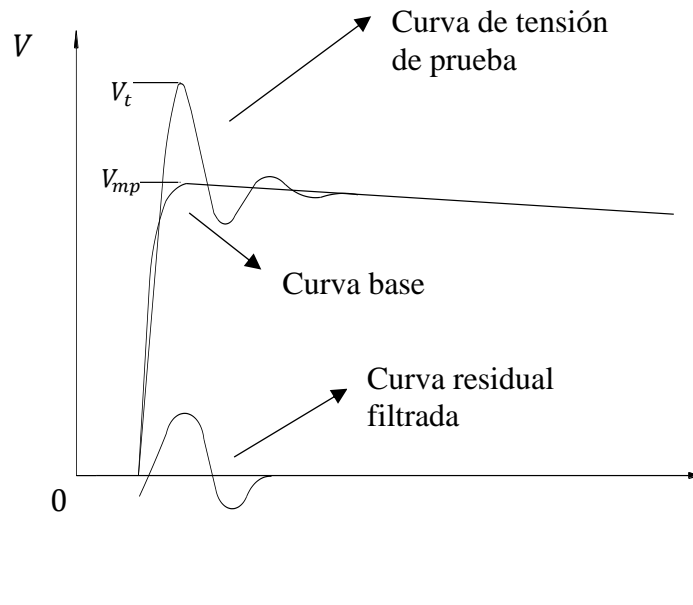
Ilustraciones gráficas de las diversas formas de onda se muestran en la figura 15, figura 16, y la figura 17 (tomadas del IEEE estándar muestran la curva base comparada con la curva registrada, la curva residual y también la de tensión de prueba).

Figura 11. Curva registrada, curva base mostrando sobrepico y curva residual.



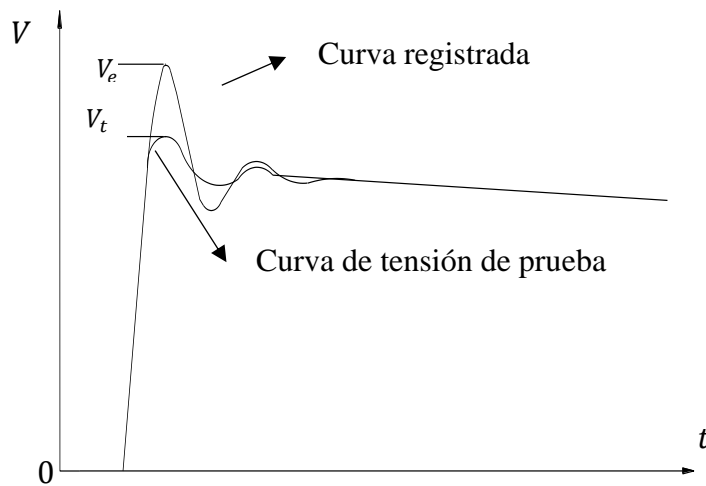
Fuente: IEEE Standard 4-2013-Techniques for High-Voltage Testing. Redline, 2013.

Figura 12. Curva de tensión de prueba.



Fuente: IEEE Standard 4-2013-Techniques for High-Voltage Testing. Redline, 2013.

Figura 13. Curva registrada y curva de tensión de prueba.



Fuente: IEEE Standard 4-2013-Techniques for High-Voltage Testing. Redline, 2013.

2.2.3 Pasos recomendados para calcular los parámetros de formas de onda tipo rayo

En el procedimiento de la IEEE estándar 4 de 2013 se recomiendan los siguientes pasos para el cálculo de los parámetros de los impulsos registrados digitalmente:

1. Encontrar el valor extremo V_e de la curva registrada $V(t)$
2. Encontrar el nivel de base de la curva registrada mediante el cálculo de la media de los valores de tensión de la parte plana o pie de la forma de onda en el comienzo del registro.
3. Encontrar la última muestra en el frente que tenga un valor de tensión inferior a 0,2 veces el valor extremo V_e , y descartar estos datos incluyendo esa muestra. Esto es para eliminar la influencia de cualquier perturbación y aumento de tensión lento al comienzo de la curva grabada en la curva base ajustada.
4. Encontrar la última muestra en la cola que tenga un valor de tensión superior a 0,4 veces el valor extremo V_e , y descartar los datos después de esa muestra. Esto es para proporcionar un punto final consistente para la curva de base ajustada.
5. Encontrar la curva de base $V_m(t)$ mediante el ajuste de las muestras restantes a la función doble exponencial siguiente:

$$u_d(t) = A \left(e^{\frac{(t-D)}{B}} - e^{\frac{(t-D)}{C}} \right) \quad (6)$$

Donde;

t es el tiempo

$u_d(t)$ es la función de tensión de doble exponencial

A , B , C , y D son los parámetros que pueden ser encontrados por el ajuste

NOTA Los valores de tensión y los valores de tiempo pueden diferir por más de 10 órdenes de magnitud, lo cual puede resultar en la divergencia del cálculo apropiado.

Escalando los valores de tensión y valores de tiempo a un rango aproximadamente igual ayuda a resolver el problema de la divergencia. Los parámetros ajustados A , B , C , y D deben ser reducidos a sus escalas originales una vez el ajuste se encuentra.

6. Construir la curva base $V_m(t)$ utilizando el nivel base de la curva registrada para la muestra de puntos hasta el tiempo D y los valores de $u_d(t)$ para muestras de puntos desde el tiempo D hasta el instante de la última muestra definida en el paso 4. Encontrar el pico de tensión V_{mp} de la curva de base $V_m(t)$.
7. Restar la curva de base, $V_m(t)$, de la curva registrada, $V(t)$, y obtener la curva residual:

$$R(t) = V(t) - V_m(t) \quad (7)$$

8. Construir el filtro digital con su función de transferencia $H(f)$ igual a la definida por la ecuación $k(f)$ mencionada anteriormente.
9. Aplicar el filtro digital a la curva residual $R(t)$ y obtener la curva residual filtrada $R_f(t)$.

Hay dos algoritmos (dominio de la frecuencia y los algoritmos de dominio del tiempo) que pueden utilizarse para este paso.

En el dominio de la frecuencia, realizar una transformada de Fourier de $R(t)$ obtenida a partir de la ecuación mencionada en el paso 7 para obtener $R_i(f)$ y, a continuación, aplicar el filtro digital como sigue:

$$R_o(f) = R_i(f) \times H(f) \quad (8)$$

Donde;

$R_o(f)$ es el vector de voltaje de salida del filtro

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

$H(f)$ Es la función de transferencia del filtro

Por último, convertir $R_o(f)$ de nuevo al dominio de tiempo para obtener la forma de onda residual filtrada $R_f(t)$.

En el dominio del tiempo

$$Rf(t) = \int_0^{\infty} R(t) \times H(t - f)df \quad (9)$$

Donde;

$Rf(t)$ es la curva residual filtrada (tensión de salida del filtro)

$R(t)$ es la curva residual (tensión de entrada del filtro) de la ecuación (A.4)

$H(t)$ es en el dominio del tiempo contraparte de $H(f)$

10. La curva residual filtrada $Rf(t)$ se añade entonces de nuevo a la curva de base $Vm(t)$ para formar la curva de tensión de prueba $Vt(t)$ para el cálculo de parámetros.

$$Vt(t) = Vm(t) + Rf(t) \quad (10)$$

Calcular la tensión de impulso de prueba, Vt , y parámetros de tiempo utilizando la curva de tensión de prueba.

11. Calcular la amplitud relativa de sobrepico, que se define como:

$$\beta'(\%) = 100 \frac{Ve - Vmp}{Ve} \quad (11)$$

12. Visualizar la curva grabada $V(t)$ y la curva de tensión de prueba $Vt(t)$.

13. Reportar el valor de la tensión de prueba Vt , el tiempo de frente T1, el tiempo de valor medio T2, y la amplitud relativa de sobrepico $B'(\%)$.

2.3 AJUSTE DE CURVAS

El ajuste de la mejor curva se encuentra a partir de las muestras capturadas, para ello existen diferentes métodos con la finalidad de obtener la señal continua sin oscilaciones. Este método se describe a continuación:

2.3.1 Ajuste según IEEE Std. 4-2013 en Matlab

Este ajuste se hace con la señal muestreada pero teniendo en cuenta las muestras comprendidas entre el 20% en el frente de onda hasta el 40% en la cola. En el presente caso el más apropiado es el modelo de la doble exponencial descrito como:

$$v(t) = A(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (12)$$

Donde;

t es el tiempo.

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

A , α y β son los parámetros determinados por el ajuste.

La convergencia de estos parámetros se determina tratando las muestras en el frente, descartando los datos de valor menor o igual a 0,2 veces el valor cresta. Esto permite definir una forma de onda con una amplitud A y parámetros α , β que representan la curva base con este modelo matemático de doble exponencial.

Otra forma de describir la curva base con modelo de doble exponencial es el mencionado en la ecuación 6 el cual se puede obtener a partir del modelo planteado anteriormente para el ajuste.

CAPÍTULO 3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el laboratorio de alta tensión se pueden realizar pruebas con objetos de prueba, para este caso el ensayo se hace en vacío y la señal de salida es capturada por el osciloscopio digital (formato .csv). Para el estudio de las muestras teniéndolas en Excel (formato .xls) se importan en Matlab separándolas en el vector de tiempo y el de tensión. Los dos vectores en los que se separa la curva registrada se tienen en cuenta a partir de las dos divisiones del osciloscopio.

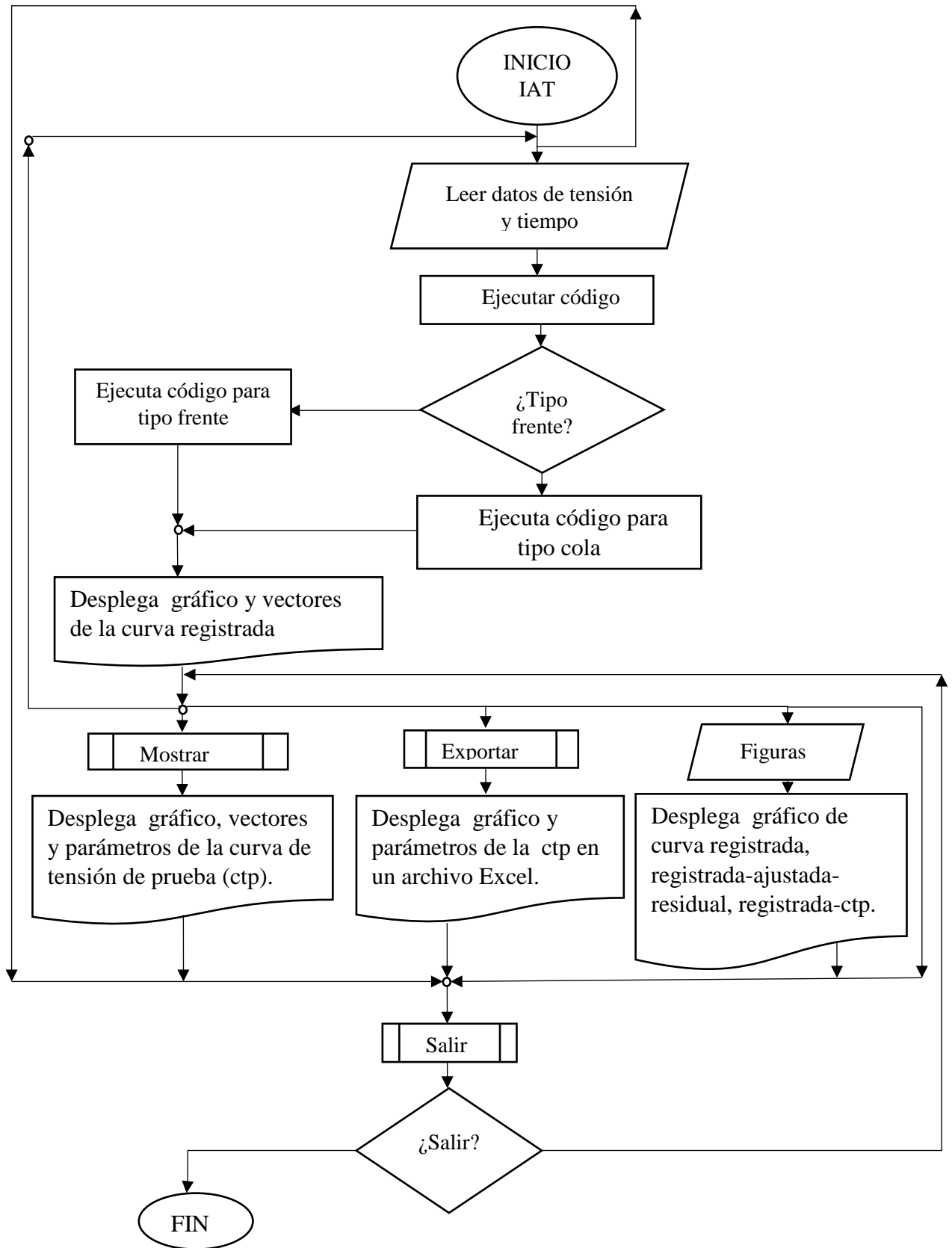
Los valores de tensión son normalizados a partir de su valor máximo. El tiempo de muestreo se calcula como un delta de tiempo entre muestras con el que se define el vector de tiempo para graficar la curva registrada a la cual se le realiza el estudio. El delta de tiempo permite identificar el tipo de curva registrada que se tiene, si es tipo frente o tipo cola, la herramienta computacional desarrollada hace el procedimiento para el cálculo de los parámetros de las ondas para los dos tipos. Se realizan los truncamientos solo en el 40% en la cola para la tipo cola que no son truncadas en el 20% al inicio de la curva registrada ya que el origen es el mismo que en el instante de la captura del osciloscopio después de las dos divisiones consideradas. En la tipo frente se trunca en el 20% en el inicio y el 40 % en la cola, para los datos en el inicio hasta el 20% se determina el nivel base. El vector después de los truncamientos es ajustado al modelo matemático de doble exponencial de la ecuación 5 y con el modelo ajustado se calculan los parámetros de tiempo.

La curva residual se obtiene de la diferencia entre la curva registrada y la ajustada. Esta señal es pasada al dominio de la frecuencia mediante la transformada rápida de Fourier (fft), se identificó si es par o impar, luego se filtra con la ganancia $K(f)$ de la ecuación 2, ya con la señal residual filtrada en frecuencia y con la transformada inversa de Fourier (ifft) arroja la señal residual en el tiempo para sumarla a la curva ajustada determinando así la curva de tensión de prueba.

La herramienta computacional se desarrolló en Matlab y se presenta en el anexo A.

A continuación se presenta el algoritmo en la figura 14:

Figura 14. Diagrama de flujo de la herramienta computacional.



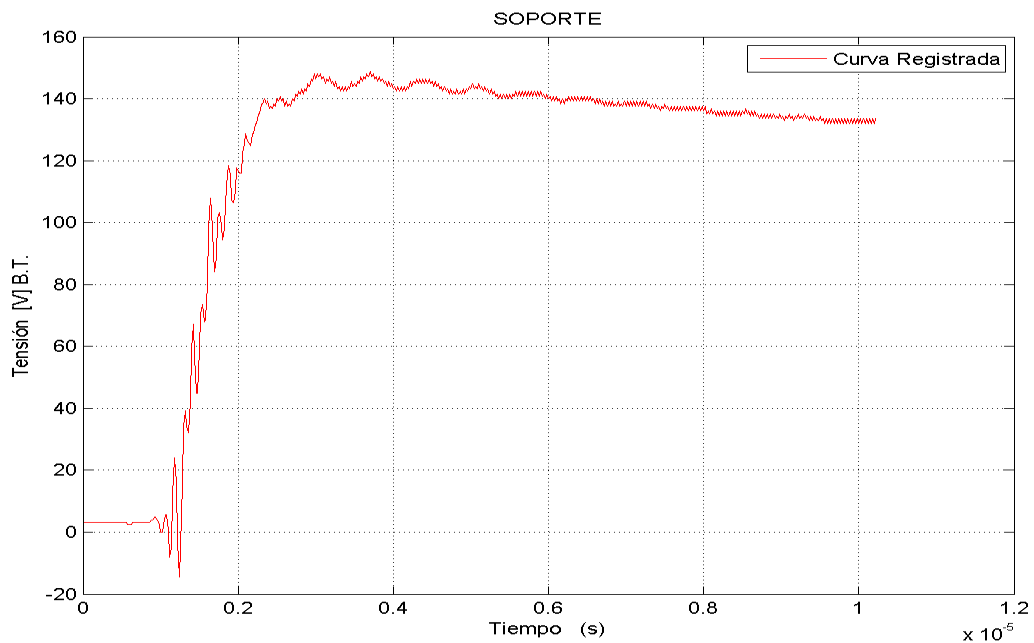
3.1 PROCEDIMIENTO

La metodología propuesta en la sección 2.2.3 (pasos recomendados para calcular los parámetros de formas de onda tipo rayo) fue desarrollada en Matlab, donde se calcula el valor pico de la curva registrada y el valor medio de tensión para los datos en el inicio de la curva registrada en la parte plana de la señal, se ajusta al modelo de doble exponencial se obtiene la curva residual, la cual es filtrada con el filtro de la ecuación 3, por último se suma la curva ajustada con la residual ya filtrada para obtener la curva de tensión de ensayo. A continuación se muestran dos ejemplos empleando la metodología desarrollada.

3.1.1 Primer ejemplo del procedimiento

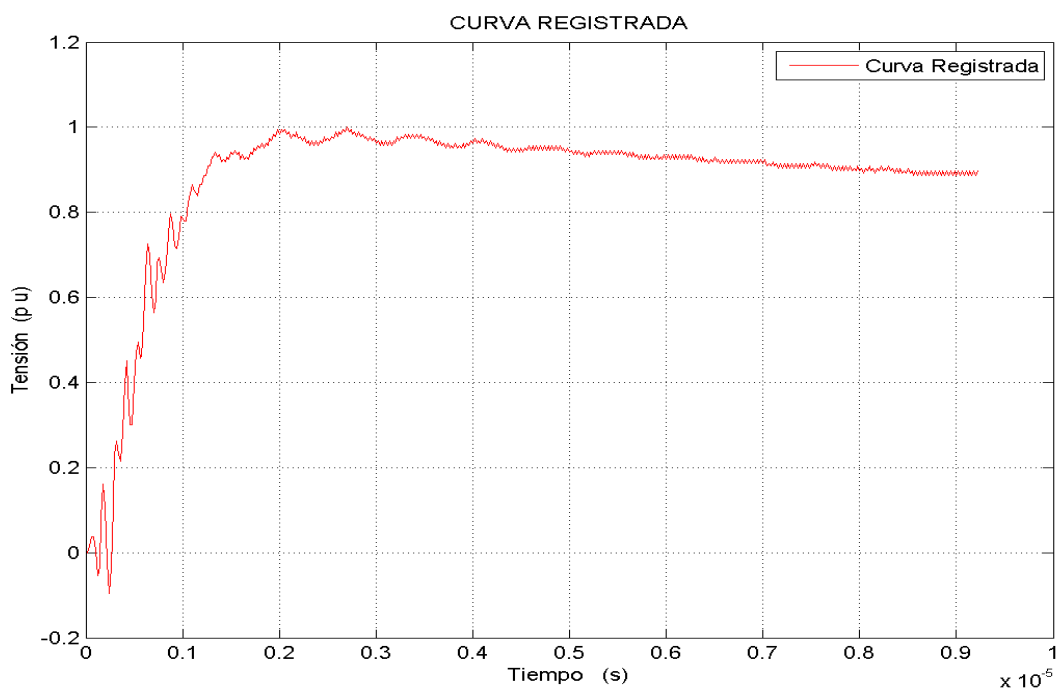
Este ejemplo muestra el procedimiento para curva con varias oscilaciones en el frente de onda. Las señales tomadas de la práctica de laboratorio pueden clasificarse en dos tipos (ondas tipo frente y tipo cola) de acuerdo a la escala por división la figura 15 muestra una onda tipo frente (señal capturada del osciloscopio digital).

Figura 15. Curva registrada (tipo frente).



La figura 16 es la señal registrada con el origen a partir de las dos divisiones de la escala por división del osciloscopio, para definir el tiempo del que se empieza a capturar la onda del osciloscopio.

Figura 16. Curva registrada después de las dos divisiones (tipo frente).



- **Señal truncada**

Se trunca la curva registrada en el 20% de su valor pico en el frente de onda, con el objetivo de impedir que las oscilaciones sean influyentes en los valores de tensión al inicio de la curva.

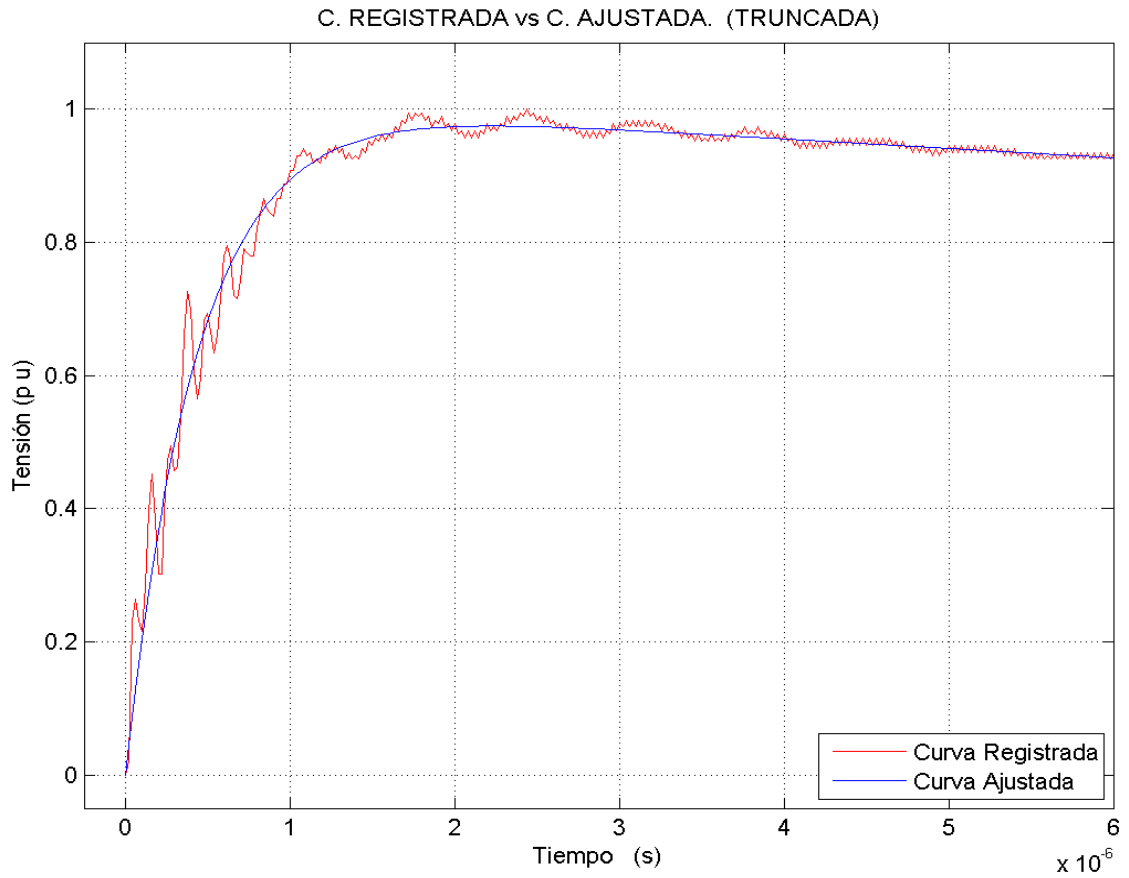
La señal se trunca en el 40 % del valor pico en la cola para valores de tensión menores a este en la cola de la onda.

La figura 17 muestra la señal truncada ajustada para valor del 20% en el frente y 40% en la cola.

- **Curva registrada y ajustada**

Se ajusta la curva al modelo propuesto en la ecuación 5, para definir los parámetros A, B, C, D de la curva base, calcular el valor pico de la curva, construida con el nivel base calculado de la curva registrada Figura 17.

Figura 17. Curva registrada comparada con la curva ajustada (tipo frente).



- **Curva residual**

La curva residual se obtiene empleando la ecuación 6. A la curva registrada se resta la curva base determinada anteriormente (figura 18). La figura 19 muestra la curva residual obtenida a partir de la curva registrada y la curva base comparadas.

Figura 18. Curva residual (tipo frente).

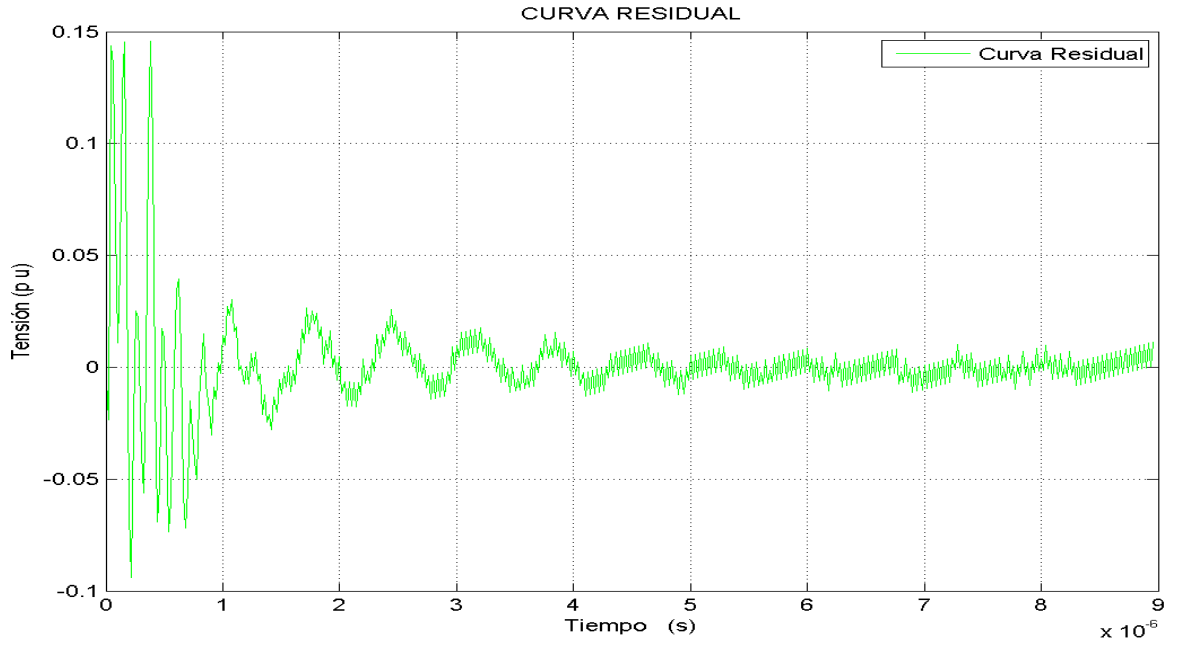
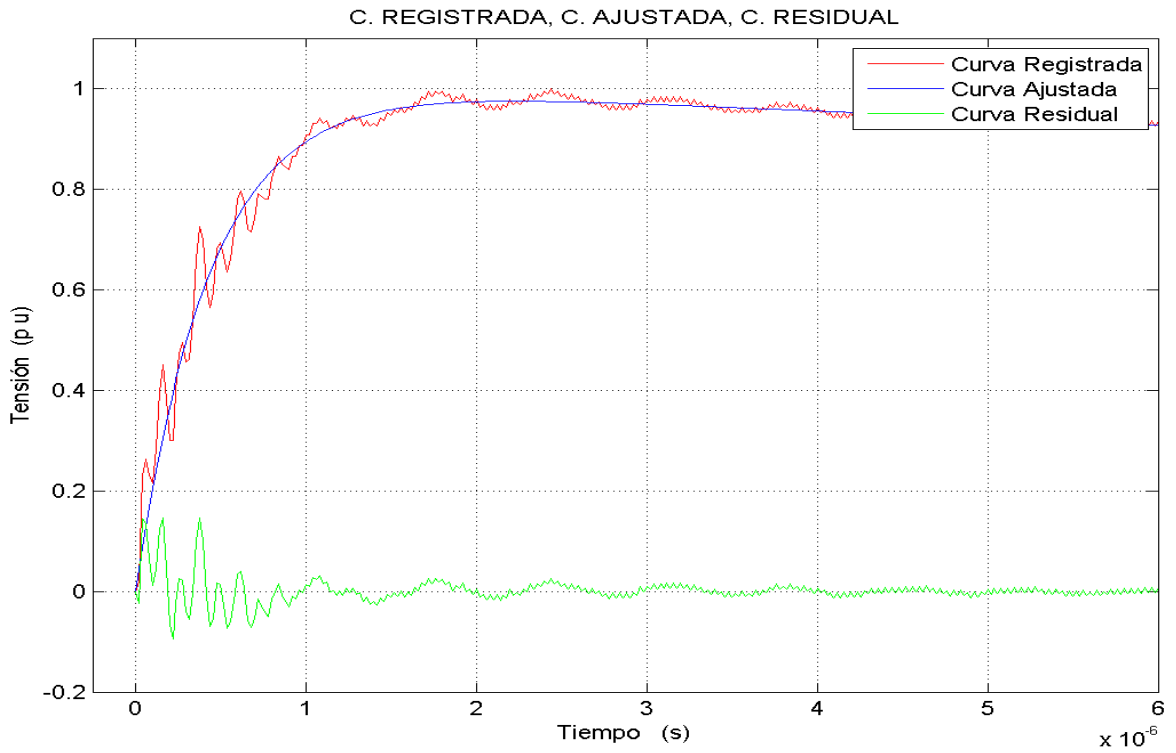
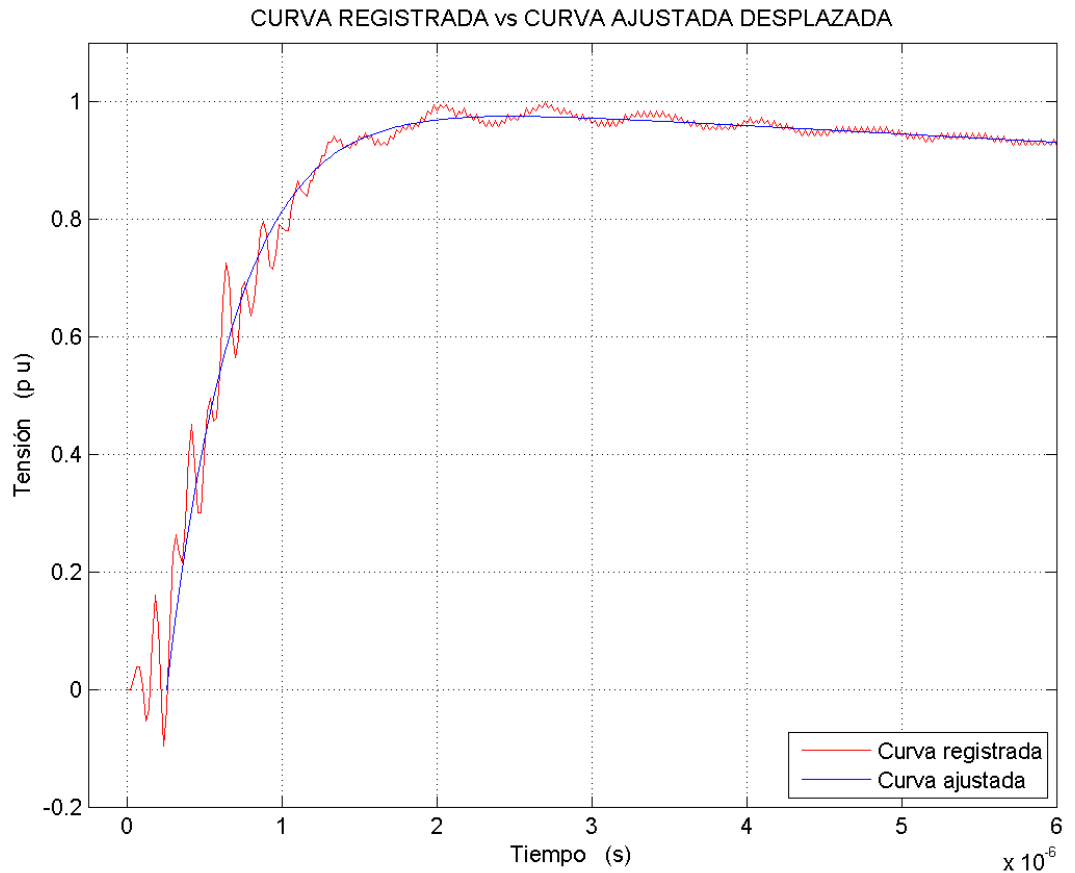


Figura 19. Curva ajustada, registrada y residual (tipo frente).



La figura 20 es una gráfica de la curva registrada comparada con la curva ajustada desplazada un tiempo D.

Figura 20. Curva registrada y curva de ajuste desplazada (tipo frente).



La curva residual con oscilaciones es tratada con el filtro digital (filtro de fase cero figura 21) para obtener la residual filtrada. Esto se puede hacer de dos formas, una es aplicando la transformada de Fourier a la función de transferencia y a la curva residual, operando luego una multiplicación en frecuencia que finalmente se transforma al dominio del tiempo como la curva residual filtrada (figura 22). La otra forma es trabajar en el dominio del tiempo sin necesidad de hacer transformada de Fourier, es decir con la convolución de la residual y la función de transferencia, filtrando así la curva residual.

Figura 21. Filtro virtual (tipo frente).

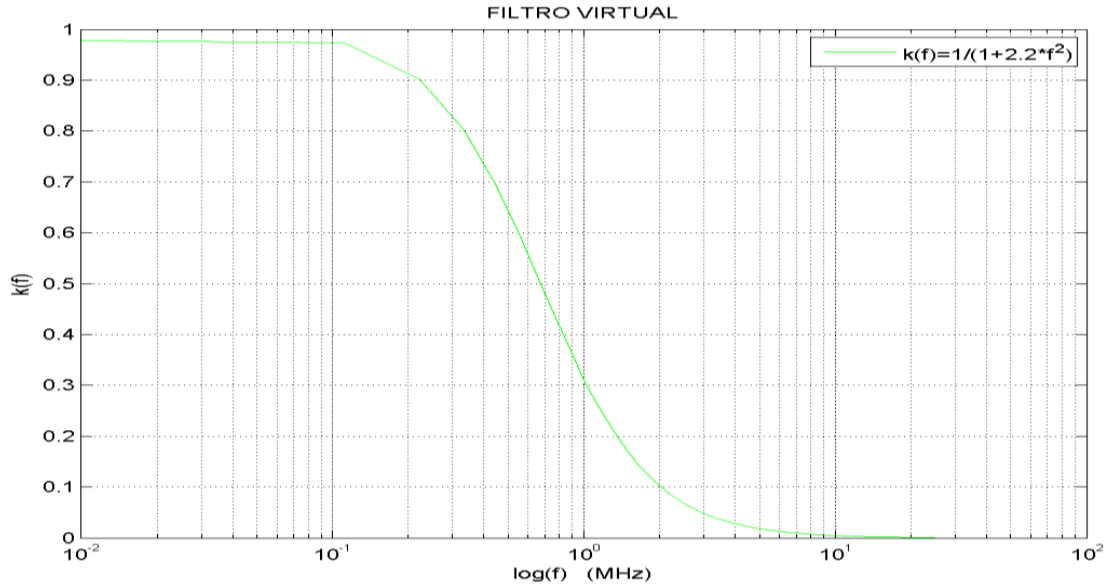
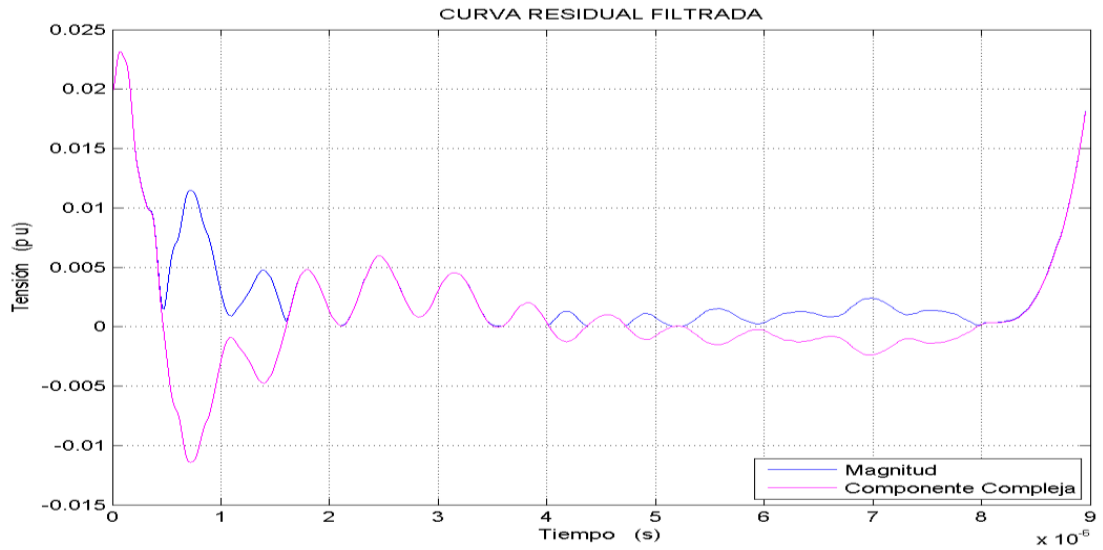


Figura 22. Curva residual filtrada (tipo frente).



- **Curva de tensión de ensayo**

Para obtener la curva de tensión de ensayo (figura 23 y figura 24 comparada con la registrada) se superpone la curva residual filtrada a la curva base. Los parámetros de impulsos atmosféricos de tensión los define la curva de tensión de ensayo.

Figura 23. Curva de tensión de prueba (tipo frente).

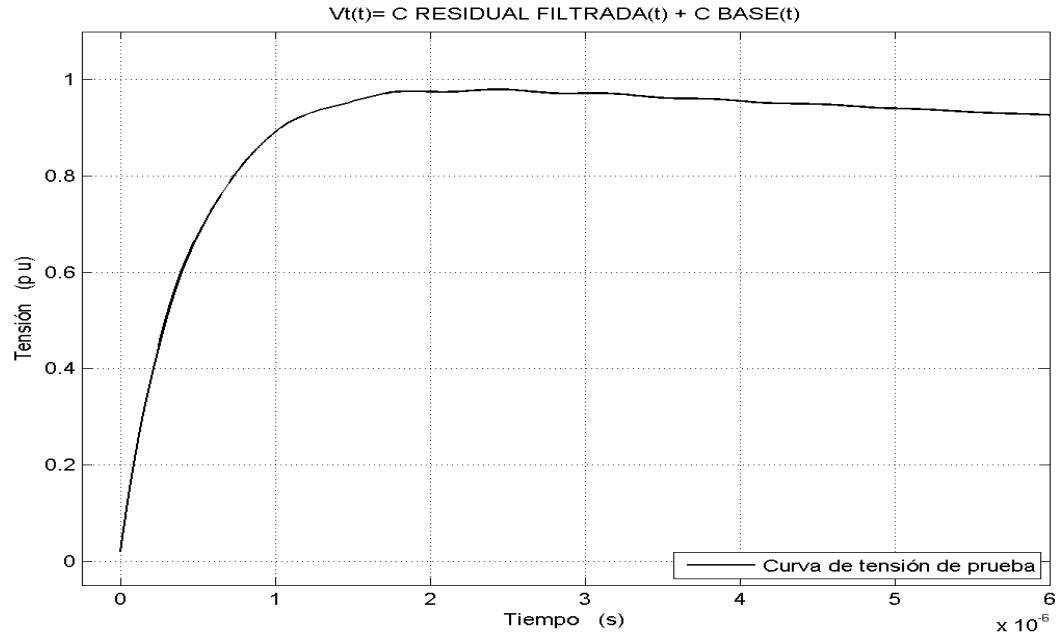
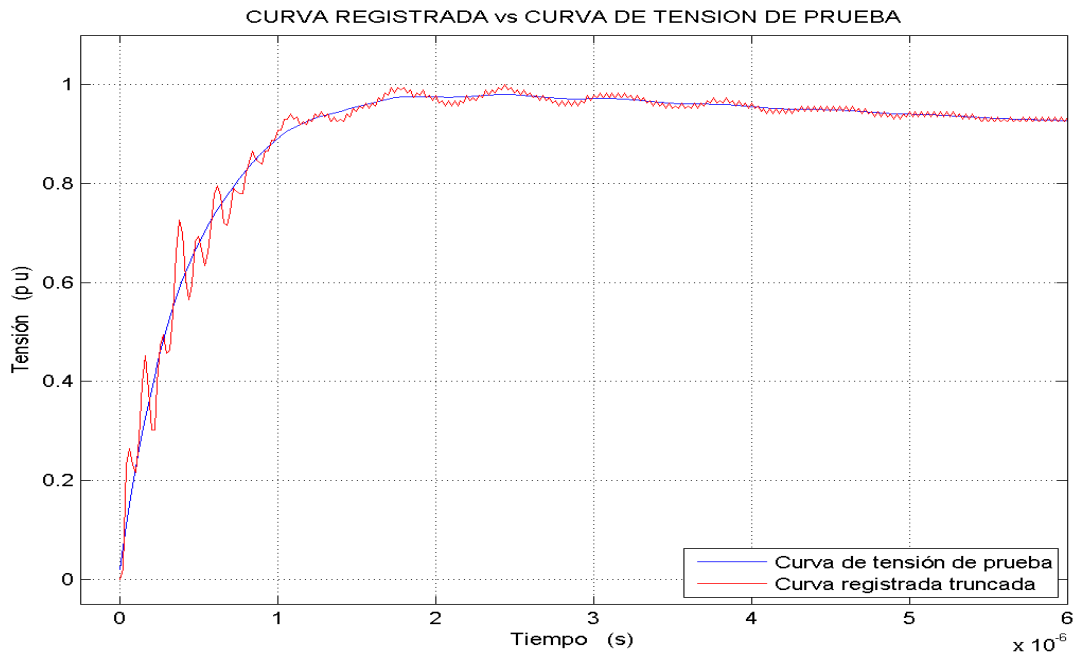


Figura 24. Curva registrada comparada con la curva de tensión de prueba (tipo frente).



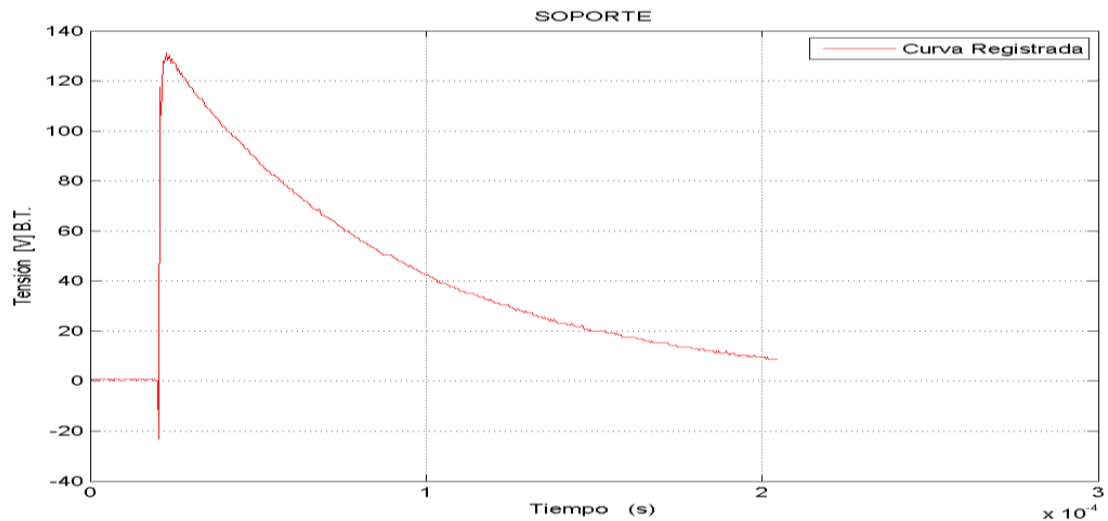
3.1.2 Segundo Ejemplo del procedimiento

En el ejemplo anterior la onda tenía varias oscilaciones en el frente debido a la escala por división en la que fue capturada, para este ejemplo esas oscilaciones no son tan considerables

en el inicio de la curva y se puede determinar el tiempo de cola para lo que sería una onda tipo cola.

Las señales registradas se capturan en una escala por división que puede identificar el tiempo de cola figura 25, la curva registrada.

Figura 25. Curva registrada (tipo cola).



Curva registrada mostrada a partir de las dos divisiones del osciloscopio digital figura 26. La figura 27 compara la registrada con la curva ajustada y la figura 28 es la diferencia entre las dos.

Figura 26. Curva registrada después de las dos divisiones (tipo cola).

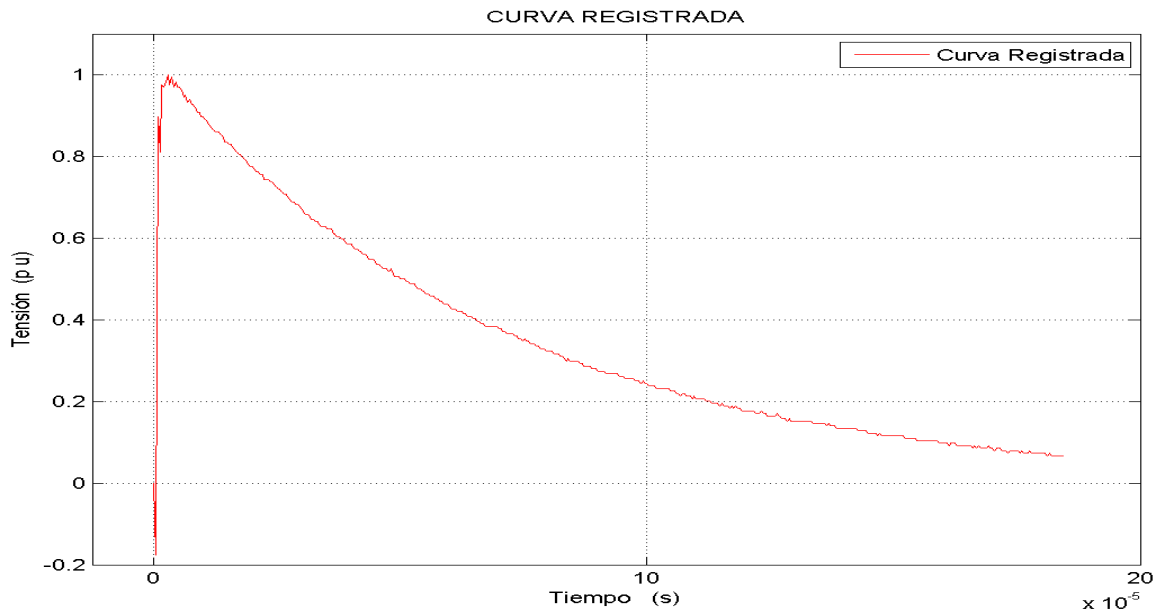


Figura 27. Curva registrada comparada con la curva ajustada (tipo cola).

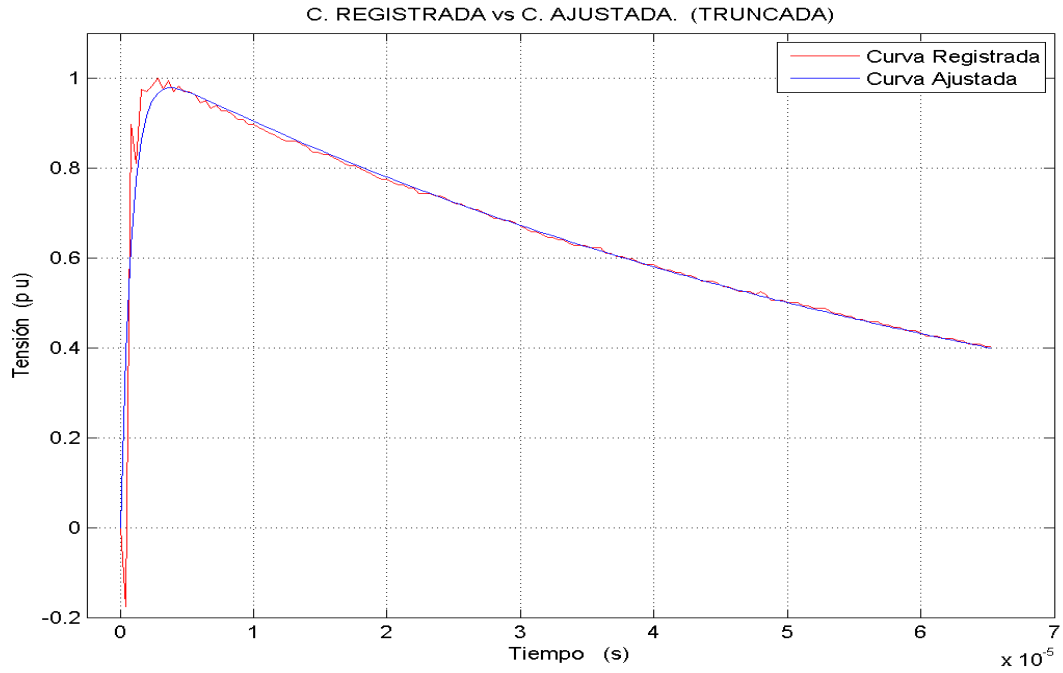
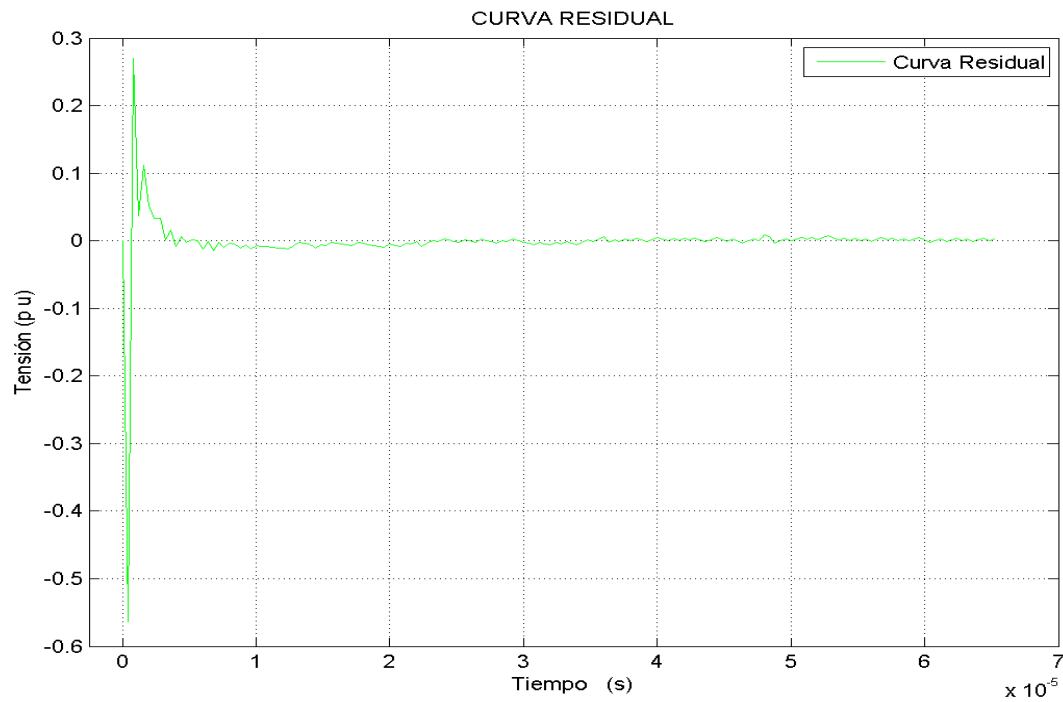


Figura 28. Curva residual (tipo cola).



La figura 29 es la gráfica de la curva registrada comparada con la ajustada y la residual empleando el procedimiento para una onda tipo cola de acuerdo a la escala en que se capturo

la registrada. La figura 30 es el filtro virtual utilizado para filtrar la residual para obtener la residual filtrada figura 31.

Figura 29. Curva registrada, ajustada y residual (tipo cola).

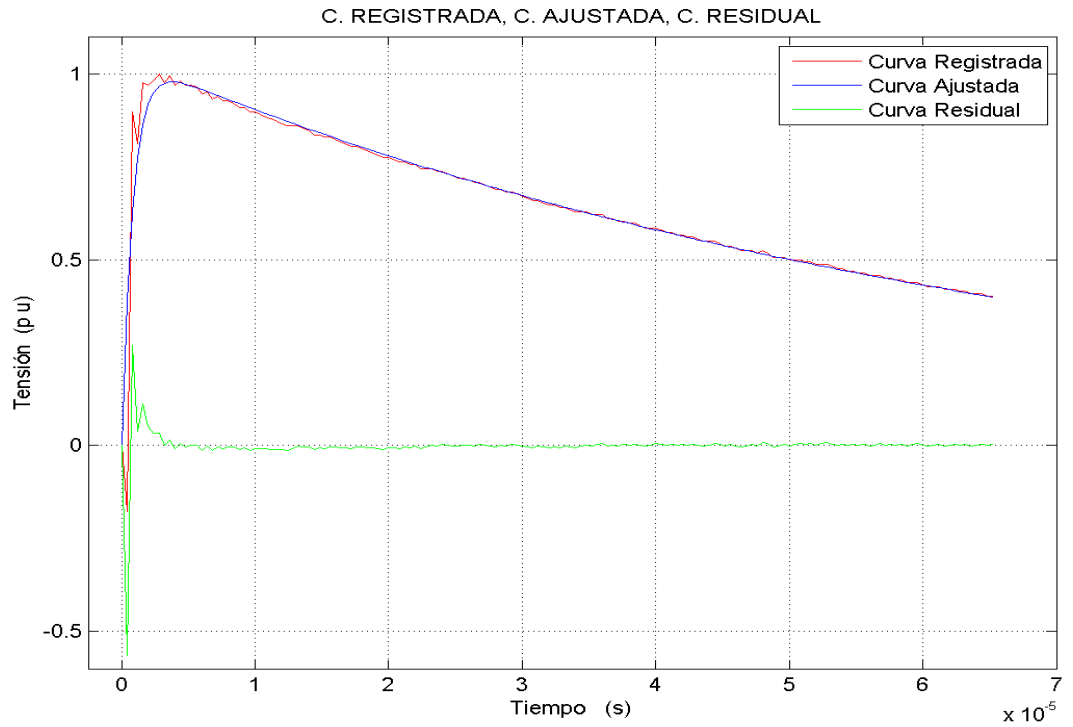
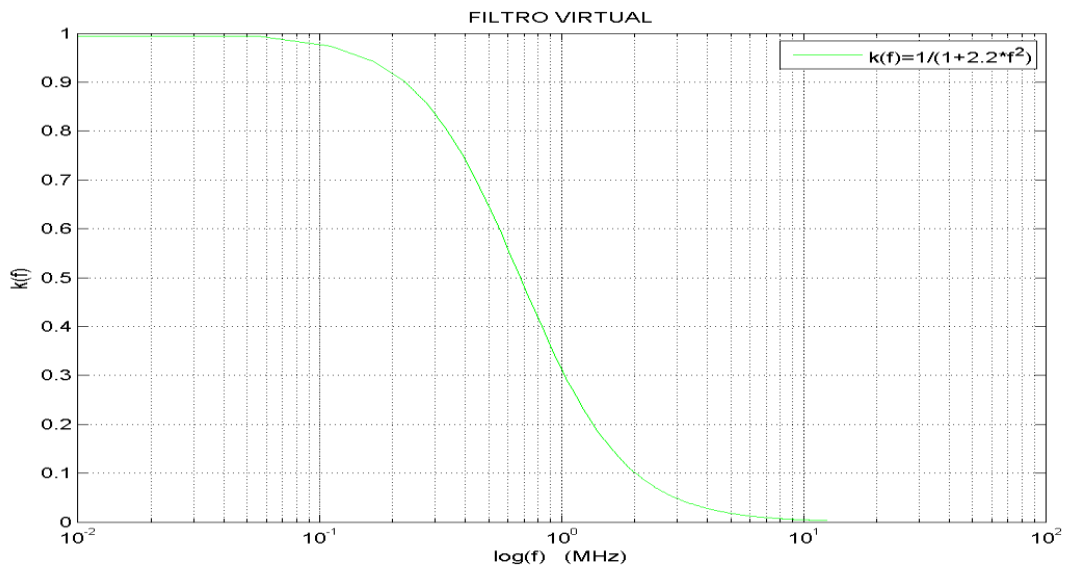


Figura 30. Filtro virtual (tipo cola).



La figura 32 muestra la figura de la curva de tensión de prueba obtenida luego del procedimiento y la figura 33 muestra la curva de tensión de prueba comparada con la curva registrada.

Figura 31. Curva residual filtrada (tipo cola).

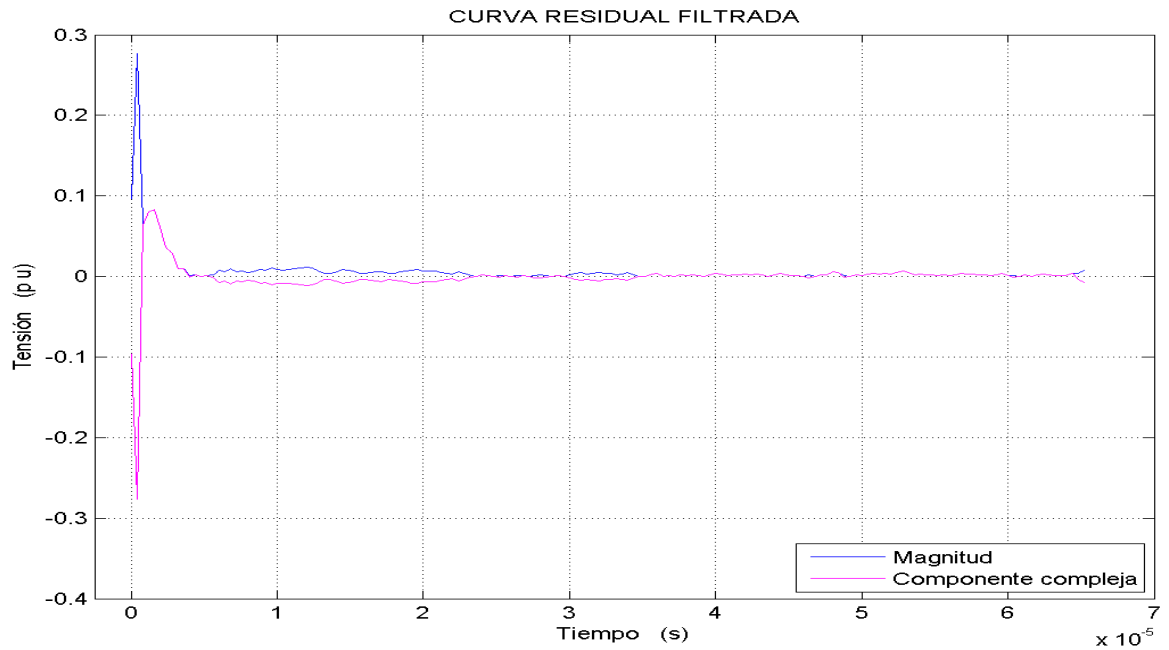


Figura 32. Curva de tensión de prueba (tipo cola).

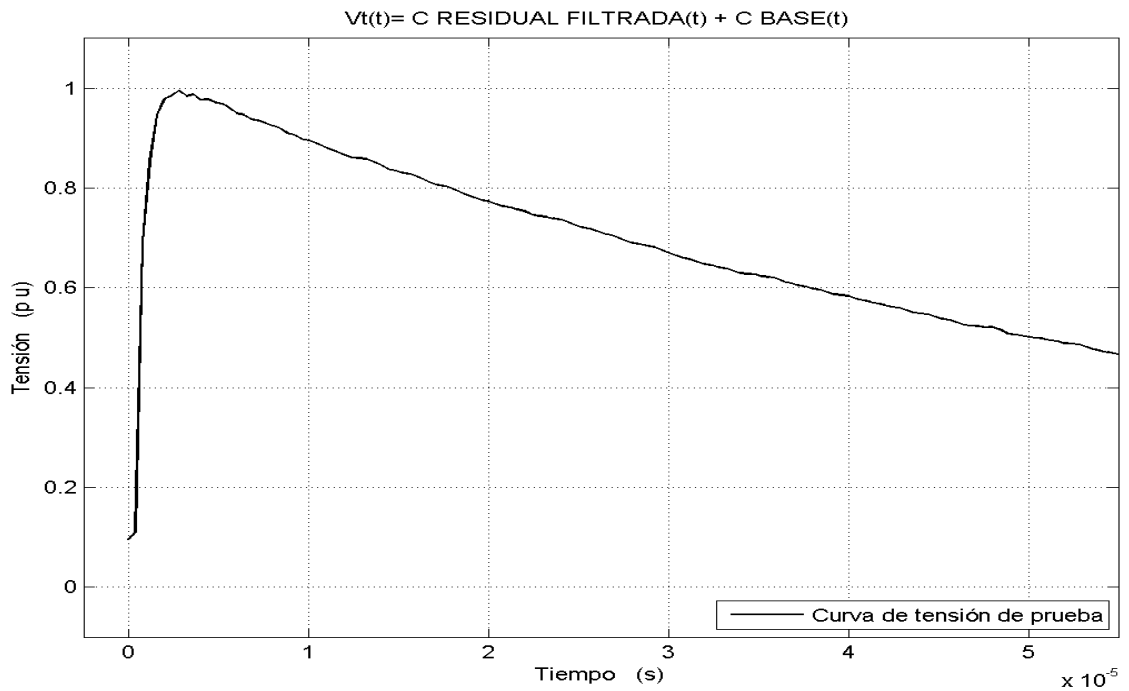
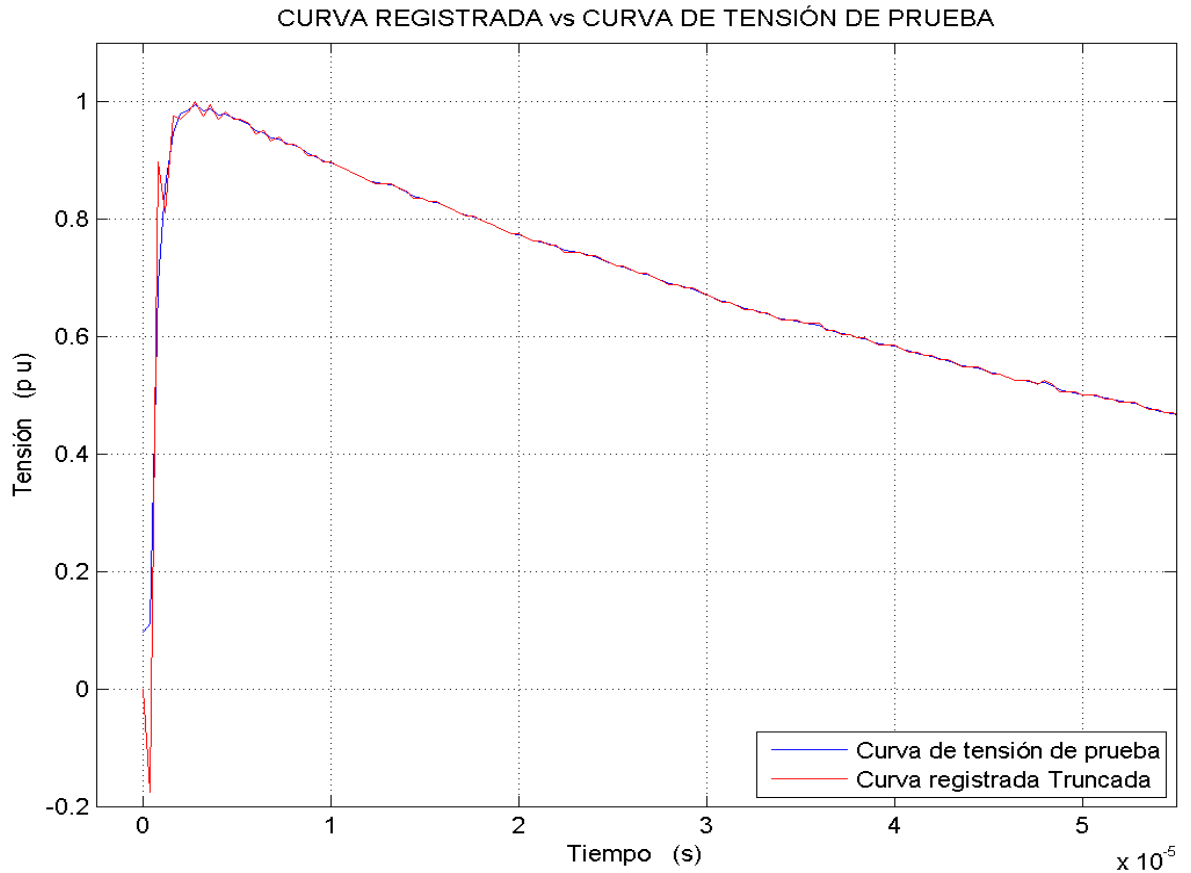


Figura 33. Curva registrada comparada con la curva de tensión de prueba (tipo cola).



3.2 Interfaz gráfica de usuario

La interfaz gráfica de usuario (figura 34) carga la curva registrada, para realizar el procedimiento de determinación de los parámetros se hace click en el botón mostrar (figura 35 y figura 36) para ver la curva de tensión de la prueba con sus parámetros de tiempo. También se observan los parámetros del modelo matemático ajustado. En la interfaz gráfica se pueden observar las curvas comparadas, la registrada, ajusta, residual y la de tensión de prueba. El procedimiento se realizó a varias ondas capturadas con diferente escala por división del osciloscopio digital (1, 10, 50 $\mu\text{s}/\text{Div}$) y sus resultados son mostrados en la interfaz; para beneficios del observador las señales capturadas fueron escaladas.

Figura 34. Portada interfaz gráfica.

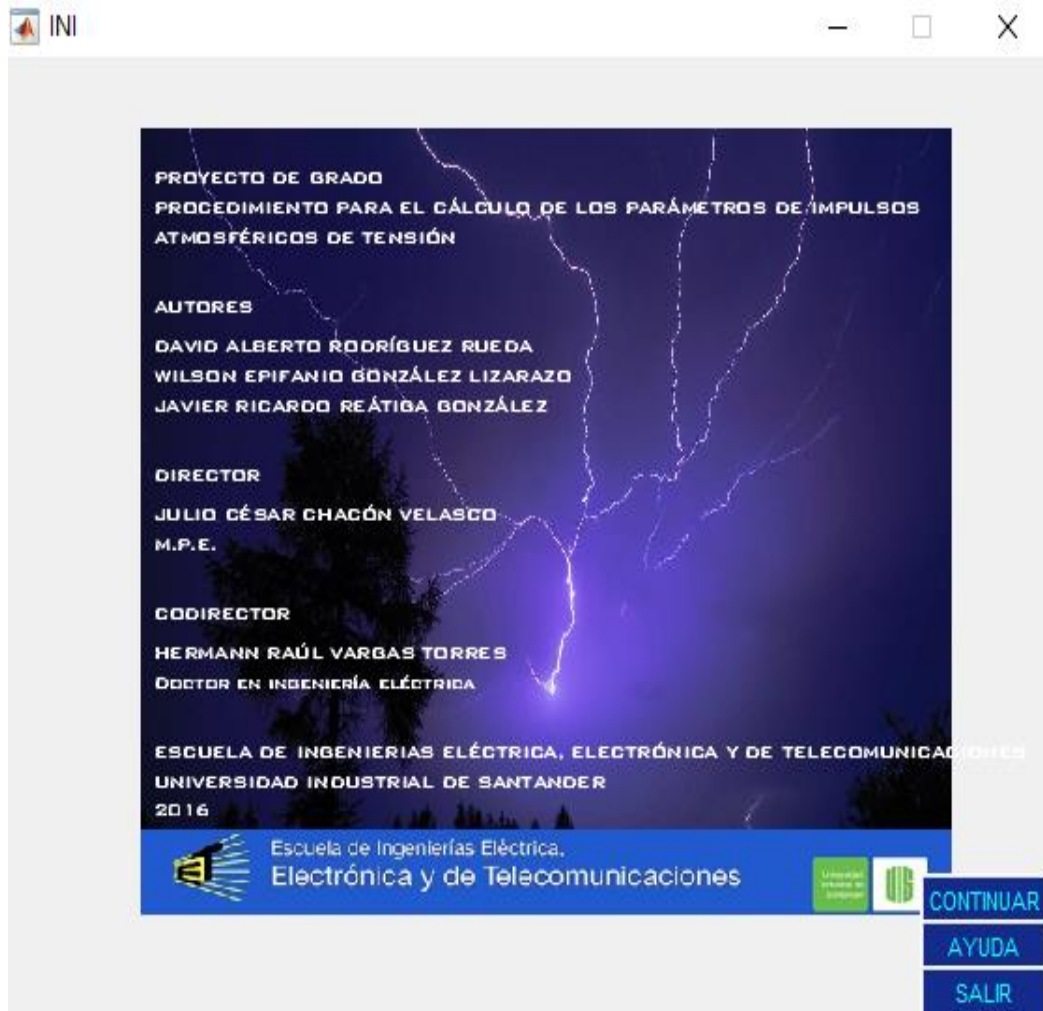


Figura 35. Curva registrada mostrada en la interfaz gráfica.

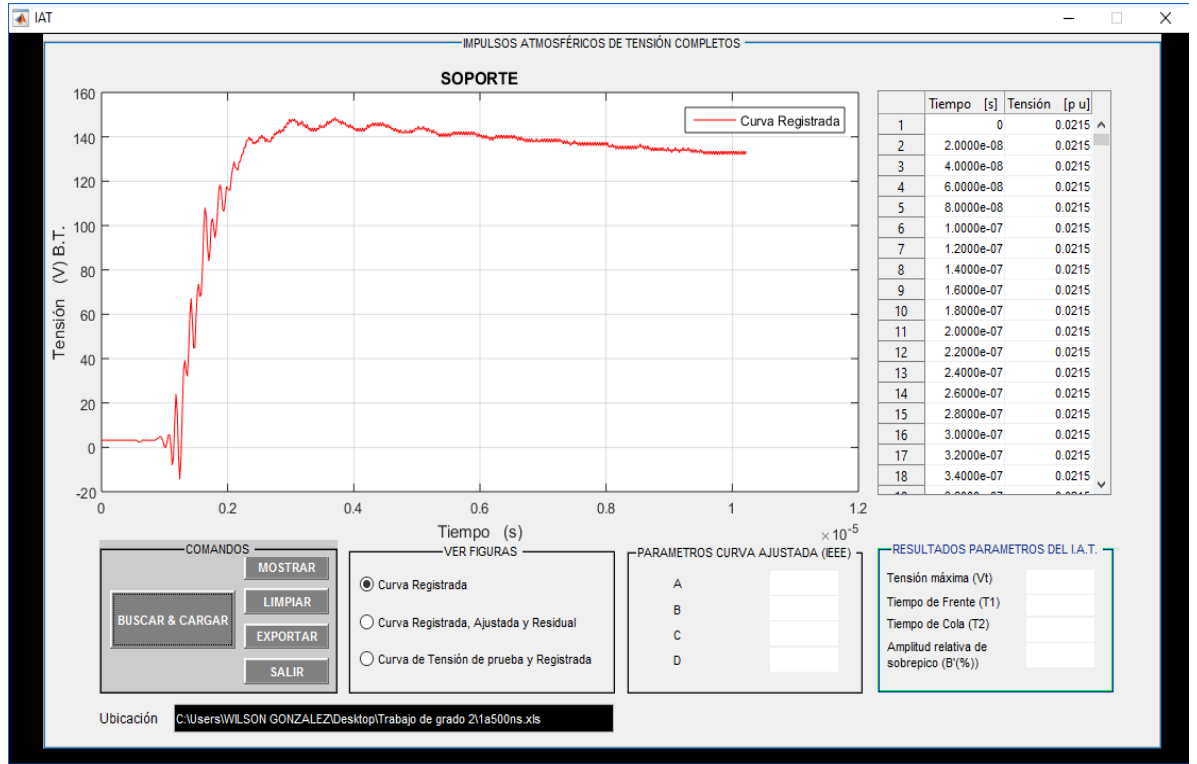
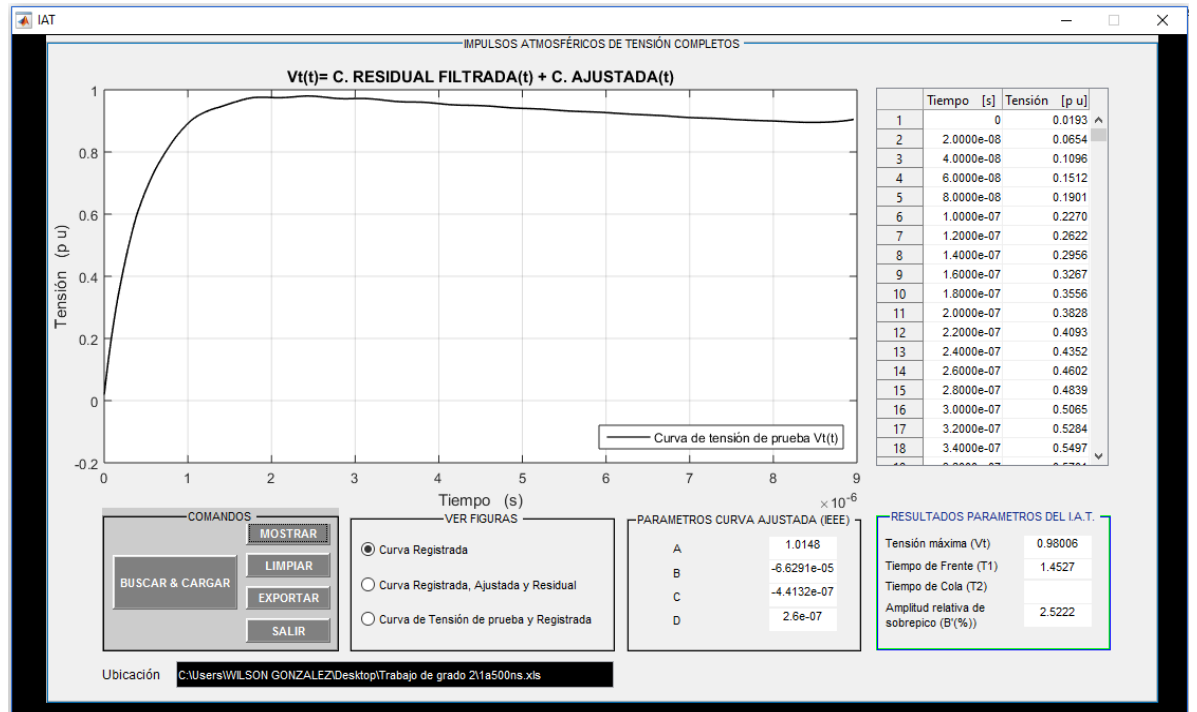


Figura 36. Curva de tensión de prueba con parámetros.



CAPÍTULO 4 OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES

4.1 OBSERVACIONES

- El estudio de las señales capturadas en la prueba puede verse influenciado por las oscilaciones registradas en el inicio de la curva para la determinación del origen virtual, definido por la linealidad en el frente de onda entre el 30% y el 90%. En el procedimiento utilizado no se plantea una metodología para el cálculo del origen virtual. Trabajar en la zona de linealidad con los datos capturados por el osciloscopio puede generar inconvenientes en la obtención de los parámetros de tiempo, debido a las oscilaciones en ese intervalo no resulta tan fácil encontrar una curva promedio, resulta más sencillo encontrar la convergencia con el modelo ajustado para las muestras entre el 20% en el frente y hasta el 40% en la cola. El modelo ajustado permite definir los parámetros de tiempo en la zona de linealidad. En las ondas en las que se definen los tiempos de cola el origen virtual es el mismo origen de la curva registrada.
- El diseño del filtro se realizó siguiendo el procedimiento IEEE estándar 4 2013. Se asignó una banda de paso para el filtro virtual. La ganancia es el $k(f)$ de la ecuación 2. Es un filtro pasa bajas de segundo orden. La frecuencia del filtro es la máxima de la banda de paso, se puede filtrar la residual a frecuencias mucho más grandes pero se perderían niveles de tensión de la curva de tensión de ensayo disminuyendo la potencia.
- Con los datos comprendidos entre el origen virtual y el 20% en el frente no es posible ajustar al modelo por la oscilación de los datos y el corto intervalo que se toma de la curva registrada. la curva base es construida con el ajuste a partir del 20% en el frente hasta el 40% en la cola, con este modelo ajustado se pueden determinar los parámetros de tiempo en el frente y en la cola de la onda.
- El osciloscopio esta calibrado para capturar la onda después de dos divisiones de la escala de microsegundos por división ($\mu\text{s}/\text{Div}$), por lo que todas las señales capturadas muestran ese tiempo muerto en las dos primeras divisiones de la escala. La señal se empieza a capturar después de esas dos divisiones.

4.2 CONCLUSIONES

- Se obtuvo la curva de tensión de ensayo con los parámetros de tiempo definidos con el modelo ajustado, para ondas normalizadas de impulso atmosférico de tensión de acuerdo a los pasos recomendados, se truncaron los datos y se ajustaron al modelo matemático de la doble exponencial encontrando así las constantes de tiempo y la amplitud.
- Se evidenció que las tolerancias normalizadas descritas en la sección 2.3.1.4 con las ondas analizadas estuviera en el rango en el que se consideran ondas normalizadas 1,2/50 por lo que las ondas de la prueba del laboratorio de alta tensión U.I.S. están dentro de las tolerancias.
- El $\beta\%$ evalúa las oscilaciones con sobrepicos en las señales capturadas comparándolas con la curva base, estos valores tienen en cuenta las tolerancias normalizadas de las oscilaciones alrededor del valor pico de la onda.
- Se describen los parámetros de un impulso atmosférico de tensión completo normalizado, su estudio sobre las oscilaciones y la forma como es generado el impulso por medio del generador de impulsos. La prueba y sus resultados pueden estar influenciados por el montaje y la medición, como es capturada la onda con el osciloscopio, las oscilaciones dependen de la escala por división en la que se capture la señal, para algunas curvas se capturan más oscilaciones que para otras, las oscilaciones aparecen como producto de los puntos de conexión del montaje y las condiciones ambientales del laboratorio en el momento de la prueba, también la medición en el momento de la captura de la onda pueden aparecer oscilaciones que pueden ser producto de las condiciones en las que se encuentre el osciloscopio, lo mejor es verificar que este en óptimas condiciones de calibración y funcionamiento.
- La herramienta se desarrolló en Matlab con un procedimiento para el cálculo de los parámetros de impulsos atmosféricos de tensión completos, los resultados del procedimiento son mostrados en Matlab. Se diseñó una interfaz gráfica de usuario que muestre la curva de tensión de ensayo, sus parámetros y los parámetros de curva base ajustada al modelo de doble exponencial.
- Se pretende incentivar el estudio de las ondas normalizadas del I.A.T. para lograr el desarrollo de líneas de investigación en estos campos, adicionalmente se deja una herramienta computacional muy práctica y de fácil uso para poder simular las ondas del I.A.T. generadas en el L.A.T. de la UIS.

REFERENCIAS

- [1] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, IEEE Standard 4-2013-Techniques for High-Voltage Testing. Redline, 2013.
- [2] IEC Standard 60060-2: High – Voltage tests techniques. Part 2: Measuring Systems, October. 2012.
- [3] Guía para estimar la incertidumbre de la medición / CENAM / WSchmid y RLazos / Mayo 2000, Pag 7, 8, 16.
- [4] IEC Electromagnetic compatibility (EMC) Part 4-5: Testing and measurement techniques – Surge immunity test, IEC Standard 61000-4-5, Nov. 2005.
- [5] Santiago Gómez Arango “diseño y construcción de un generador de impulsos de alta tensión, portátil y didáctico”, trabajo de grado, Manizales, 2013. available:<http://www.bdigital.unal.edu.co/50618/1/1053776042.2013.pdf>
- [6] Julio Rugeles J., Msc, Julio Cesar Chacón V., MPE. Laboratorio de alta tensión “Manual de Prácticas”. Bucaramanga: UIS 2013, Pag136, 153.
- [7] M.Khalifa.high-Voltage Engineering theory and practice.Marcel Dekker,University of Cairo Inc., New York, 1990.
- [8] Klaus Shon, High Impulse Voltage and Current Measurement Techniques. Chapter 2. Available: <http://www.springer.com/978-3-319-00377-1>

BIBLIOGRAFÍA

CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA, CENAM. Guía para estimar la incertidumbre de la medición / WSchmid y RLazos / Mayo 2000, Pag 7, 8, 16.

GÓMEZ, Santiago. “diseño y construcción de un generador de impulsos de alta tensión, portátil y didáctico”, trabajo de grado, Manizales, 2013.
Available: <http://www.bdigital.unal.edu.co/50618/1/1053776042.2013.pdf>

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, IEEE Standard 4-2013-Techniques for High-Voltage Testing. Redline, 2013.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, IEC Standard 60060-2: High – Voltage tests techniques. Part 2: Measuring Systems, October. 2012.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, IEC Electromagnetic compatibility (EMC) Part 4-5: Testing and measurement techniques – Surge immunity test, IEC Standard 61000-4-5, Nov. 2005.

KHALIFA, M. High-Voltage Engineering theory and practice. Marcel Dekker, University of Cairo Inc., New York, 1990.

RUGELES, J. y CHACÓN, J. Laboratorio de alta tensión “Manual de Prácticas”. Bucaramanga: UIS 2013, Pag 136, 153.

SCHON, Klaus. High Impulse Voltage and Current Measurement Techniques. Chapter 2. Available: <http://www.springer.com/978-3-319-00377-1>

ANEXOS

ANEXO A

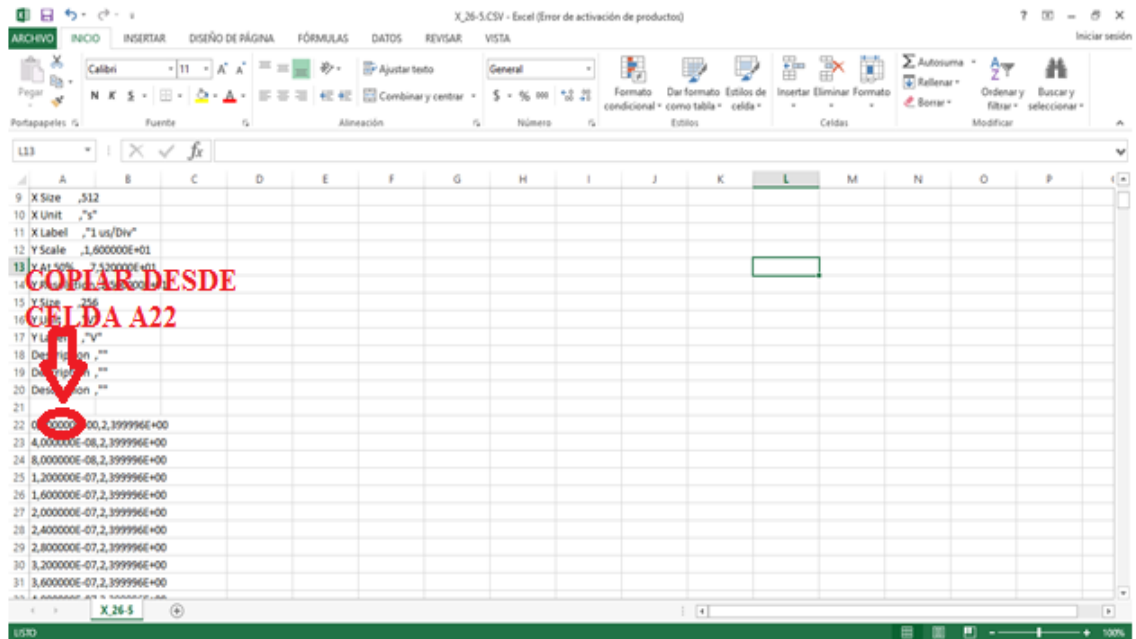
A RECOMENDACIONES PARA EL USUARIO DE LA INTERFAZ GRÁFICA

Este anexo es una guía sobre el funcionamiento y el uso adecuado de la interfaz de usuario desarrollada para analizar los parámetros de impulsos atmosféricos de tensión (IAT), utilizando la herramienta de laboratorio matemático, MATLAB R2014a. Con los ejemplos mostrados en el capítulo 4 la interfaz arroja los resultados para IAT tipo frente y tipo cola.

Para su uso adecuado se recomiendan lo siguiente:

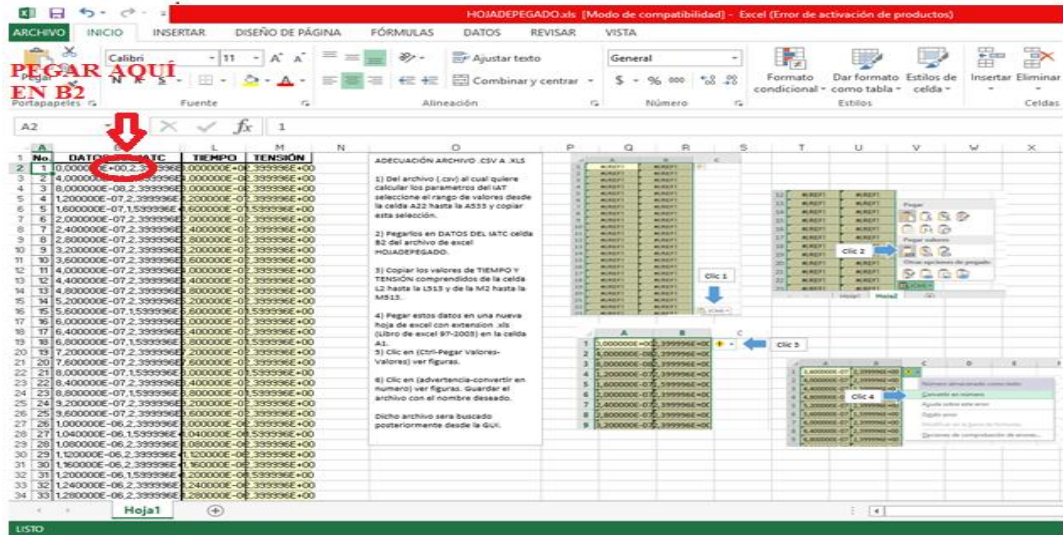
Del archivo .CSV generado después de la prueba de laboratorio (figura 37) se copian los datos desde la celda A22 hasta la A533 tal como se indica en los pasos del archivo hoja de pegado.

Figura 37. Archivo CSV (Excel)



Se siguen los pasos de la hoja de pegado (figura 38) para la adecuacion del archivo Excel(.xls) que se cargara en la interfaz grafica.

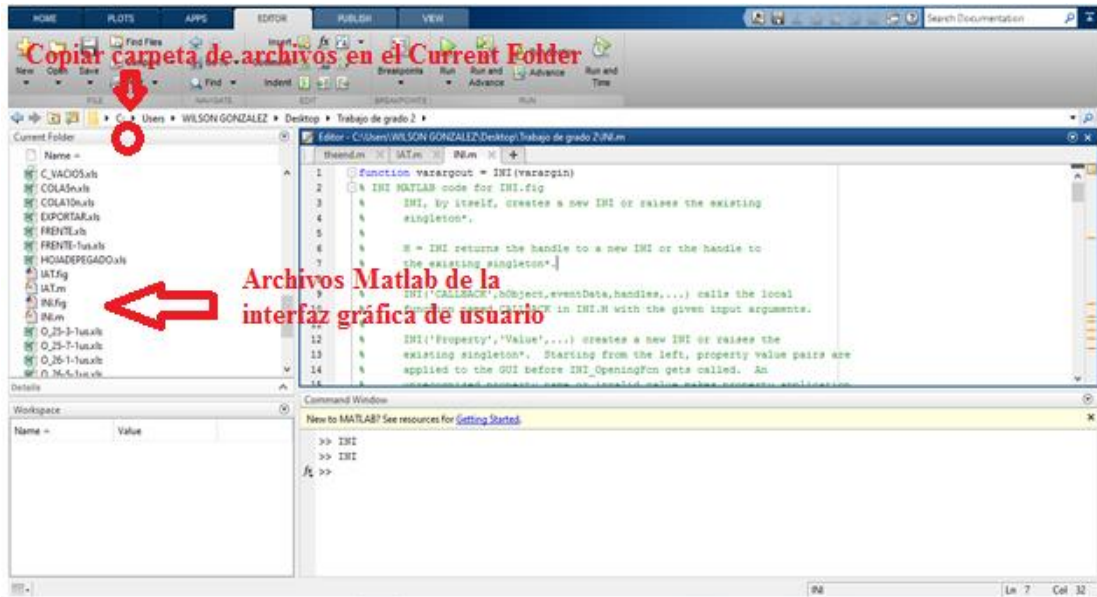
Figura 38. Archivo hoja de pegado (Excel).



Después de tener guardadas las ondas de la prueba de IAT en archivos Excel (.xls) se utiliza la interfaz gráfica para mostrar sus parámetros, la curva registrada, ajustada, residual y la de tensión de prueba.

Nota. Para ingresar al entorno de la interfaz gráfica se deben tener guardados los archivos en el Current Folder de Matlab como lo muestra la figura 39.

Figura 39. Entorno Matlab.



B VENTANA INI

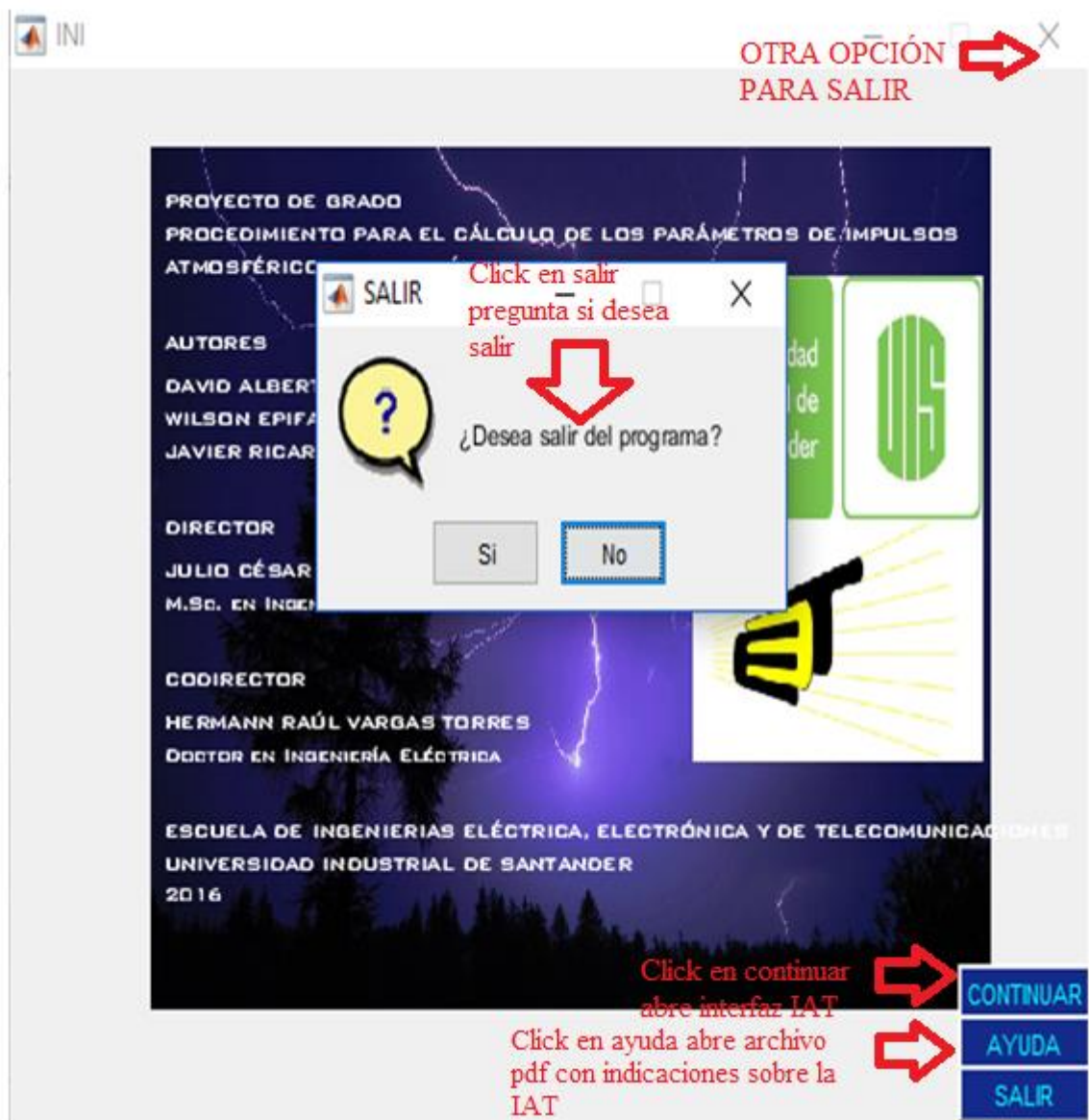
Se ejecuta el archivo INI.m para ingresar a la interfaz de usuario figura 40 donde tiene tres opciones:

Continuar: permite acceder a la interfaz IAT.

Ayuda: abre un archivo pdf con indicaciones sobre los comandos de la IAT.

Salir: permite salir de la interfaz INI.

Figura 40. Entorno INI.



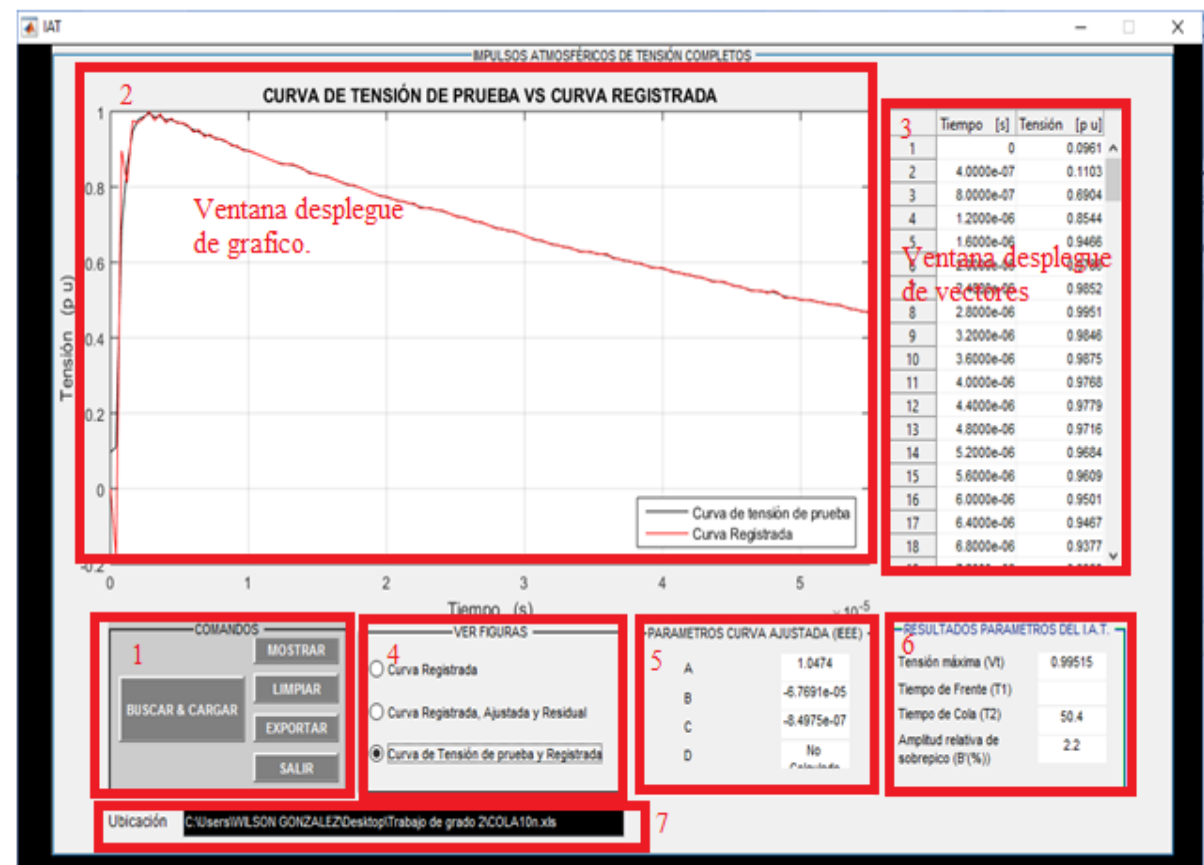
C VENTANA IAT

Para el uso de la interfaz IAT se recomienda utilizar el botón de ayuda (ventana INI) antes de relacionarse con su entorno con el fin de entender mejor su funcionamiento.

Al ingresar a la ventana IAT (figura 41) en el botón buscar y cargar en la ventana de comandos (1), se elige el tipo de onda que se quiere estudiar (ondas de impulso atmosférico de tensión tipo frente o tipo cola). Luego de elegir la onda se despliega gráfico, datos de tensión y tiempo (ventanas 2 y 3)

La figura 41 muestra la curva de tensión de prueba comparada con la curva registrada según lo indicado por el botón circular ventana 4 (también se pueden mostrar otras graficas dependiendo de los que se desee en VER FIGURAS hay tres botones), sus parámetros (ventanas 5 y 6) que son parte del entorno de la herramienta computacional desarrollada. En la ventana 7 aparece la ubicación del archivo.

Figura 41. Entorno IAT.



Nota. Se anexa una carpeta en el CD con los archivos en Matlab (.m, .fig), HOJADEPEGADO.xls, EXPORTAR.xls, AYUDA GUI-IAT.pdf y algunos eventos capturados del laboratorio de la UIS.