



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Determinación del comportamiento de la impedancia de tejidos con hilos conductores ante la circulación de corrientes tipo rayo**

**Daniel Rodríguez Manrique**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería, Departamento de ingeniería Eléctrica y Electrónica

Bogotá, Colombia

2023



# **Determinación del comportamiento de la impedancia de tejidos con hilos conductores ante la circulación de corrientes tipo rayo**

**Daniel Rodríguez Manrique**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título

de:

**Magister en Ingeniería Eléctrica**

Director:

Prof. Francisco José Román Campos, Ph. D.

Línea de Investigación:

Descargas eléctricas atmosféricas – Protección contra rayos

Grupo de Investigación:

Grupo de Compatibilidad Electromagnética EMC - UN

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de ingeniería Eléctrica y Electrónica

Bogotá, Colombia

2023



## *Dedicatoria*

*A Dios, a mis padres, hermanos, amigos y todos mis seres queridos, los cuales siempre han estado ahí para mí y me han alentado.*

*A todas las personas que siempre han visto mis capacidades y han creído en mí.*



## Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



Daniel Rodríguez Marriqué

Fecha: 02/08/2023

## Agradecimientos

Agradezco a Dios por su bondad y amor hacia mí, porque a pesar de todo siempre ha estado y siempre ha guiado mis pasos. A mi familia, mis padres y hermanos por su amor, sus oraciones y apoyo durante este proceso, en especial a mi hermano Jorge Rodríguez por sus consejos, colaboración y por siempre ser un modelo a seguir para mí.

Al grupo de investigación en compatibilidad electromagnética de la Universidad Nacional de Colombia EMC-UN por su colaboración en la elaboración de las mediciones y uso de equipos y espacios. En especial a mi director, el profesor Francisco Román por su acompañamiento, orientación y guía en el proceso de la investigación y de este camino en el grupo de investigación y los proyectos trabajados en el marco mi maestría.

Un agradecimiento al laboratorio de ensayos eléctricos industriales – LABE, por su colaboración en el préstamo de espacios y equipos para la realización de las pruebas de laboratorio. Al personal del laboratorio particularmente al profesor Francisco Amórtegui por sus aportes técnicos y supervisión en los ensayos y mediciones.

A mis amigos y seres queridos que han estado pendientes de este proceso y que me han motivado siempre a continuar y no desfallecer a pesar de que las circunstancias no sean las más favorables.

A todos aquellos no mencionados, pero que en mi corazón están presentes y hay un agradecimiento por sus palabras por su apoyo y por su cariño.

## Resumen

Colombia se encuentra ubicada en una zona de alta incidencia de descargas eléctricas atmosférica nube-tierra (rayos), por lo cual la exposición de personas en zonas abiertas y remotas que no cuentan con sistemas de protecciones contra rayos aumenta el riesgo de accidentes y víctimas fatales. Un caso relevante es el ejército de Colombia para el cual según cifras actualizadas se tienen 10 soldados muertos y aproximadamente 40 heridos al año.

Dentro de las investigaciones preliminares del grupo de investigación en Compatibilidad Electromagnética de la Universidad Nacional de Colombia – Grupo EMC-UN –, se ha trabajado en el diseño de refugios de protección contra rayos portables y livianos, que permitan preservar la vida de las personas que se encuentren en espacios abiertos, reduciendo el riesgo de afectaciones a la salud.

El presente trabajo de investigación presenta el comportamiento de la impedancia de un tejido con hilos conductivos (tipo ripstop, con hilos conductores de Cobre y Níquel) ante la circulación de corrientes tipo rayo. Para este propósito se realizaron ensayos de laboratorio sobre muestras de dos tamaños, aplicando diferentes magnitudes de corriente y con diferentes formas de onda. A partir de lo anterior se evaluó el comportamiento de la impedancia de estos tejidos relacionando la misma con la densidad de corriente. Este trabajo resulta de suma importancia para evaluar el uso potencial de este tipo de tejidos en la fabricación de refugios portátiles contra rayos.

**Palabras clave:** Tejidos con hilos conductivos, ripstop, densidad de corriente superficial, protección contra rayos, impulso de corriente, constantán

## Abstract

**Title: Determination of the behavior of the impedance of fabrics with conductive threads under the circulation of lightning currents.**

Colombia is located in a region with a high incidence of cloud-to-ground atmospheric electrical discharges (lightning flash). For the above, exposure of people in outdoor and remote areas that do not have lightning protection systems, increases the risk of accidents and fatalities. A relevant case is the Colombian army for which, according to updated data, there are 10 dead soldiers and approximately 40 wounded per year.

The electromagnetic research group of the National University of Colombia - EMC-UN Group – has been working on topics such as lightning discharges and lightning protection. In order to protect the lives of people who are outdoors and to reduce the risk of health effects, the EMC group is working on the design of portable and lightweight lightning protection shelters.

The present research work investigates the behavior of the impedance of a fabric with conductive threads (ripstop type, with Copper and Nickel conductive threads) after the circulation of lightning currents. For this purpose, laboratory tests were carried out on samples of two different dimensions, applying different current magnitudes and waveforms. From these results, the behavior of the fabric impedance as a function of the current density is evaluated. This work is extremely important to evaluate the potential use of this type of fabric in the manufacture of portable lightning shelters.

**Keywords:** Fabrics with conductive threads, impedance, current density, lightning protection, current impulse, constantan.

# Contenido

	Pág.
<b>Resumen .....</b>	<b>IX</b>
<b>Lista de figuras.....</b>	<b>XII</b>
<b>Lista de tablas .....</b>	<b>XIV</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>1. Marco teórico.....</b>	<b>5</b>
1.1 Tejidos con hilos conductivos.....	5
1.2 Conducción de corrientes tipo rayo de los tejidos conductivos .....	8
1.3 Generadores de impulsos de corriente.....	10
<b>2. Modelado y simulación.....</b>	<b>13</b>
2.1 Modelo y simulación de un generador 8/20 $\mu$ s. ....	13
2.2 Modelado generador de mayor energía.....	16
2.3 Simulación del tejido como elemento no lineal. ....	18
<b>3. Implementación generadores, ejecución de ensayos y mediciones .....</b>	<b>25</b>
3.1 Implementación generador onda tipo 8/20 $\mu$ s.....	25
3.2 Implementación de un generador de mayor energía. ....	29
<b>4. Análisis de resultados .....</b>	<b>33</b>
4.1 Análisis de los registros.....	34
4.2 Análisis por energía.....	41
<b>5. Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>51</b>
5.1 Conclusiones.....	51
5.2 Recomendaciones.....	53
<b>A. Anexo: Detalle de implementación de generadores y protocolo de pruebas. ...</b>	<b>55</b>
<b>B. Anexo: Verificación del sistema de medición. ....</b>	<b>63</b>
<b>C. Anexo: Detalle del procesamiento de señales por medio de Matlab.....</b>	<b>67</b>
<b>D. Anexo: Producción académica .....</b>	<b>69</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>74</b>

## Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 1-1:</b>	Estructura de hilo conductivo (a) y micrografía tejido conductivo (b). ....5
<b>Figura 1-2:</b>	Micrografía óptica de tejidos con hilos conductivos. ....7
<b>Figura 1-3:</b>	Corrientes de impulso tipo rayo sobre tejidos con hilos conductores.....8
<b>Figura 1-4:</b>	Corrientes de impulso tipo rayo sobre tejidos con hilos conductores.....9
<b>Figura 1-5:</b>	Forma de onda de corriente (8/20 $\mu$ s) según IEC 6100-4-5 ..... 11
<b>Figura 2-1:</b>	Modelo de circuito generador de corriente onda 8/20 $\mu$ s. .... 14
<b>Figura 2-2:</b>	Forma de onda corriente vs tiempo del generador de corriente onda 8/20 $\mu$ s. 15
<b>Figura 2-3:</b>	Modelo de circuito generador de corriente de mayor energía. .... 16
<b>Figura 2-4:</b>	Forma de onda corriente vs tiempo generador de mayor energía. .... 17
<b>Figura 2-5:</b>	Resultados de ensayo sobre muestras de tejido con onda 8/20 $\mu$ s. .... 18
<b>Figura 2-6:</b>	Implementación de modelo no lineal en ATP. ....20
<b>Figura 2-7:</b>	Simulación del impulso 8/20 $\mu$ s al modelo, tensión de carga 2 kV.....21
<b>Figura 2-8:</b>	Simulación del impulso 8/20 $\mu$ s al modelo, tensión de carga 8 kV.....21
<b>Figura 2-9:</b>	Simulación de impulso mayor energía al modelo, tensión de carga 0,3 kV. 23
<b>Figura 2-10:</b>	Simulación de impulso mayor energía al modelo, tensión de carga 1 kV 24
<b>Figura 3-1:</b>	Esquema de circuito y de ubicación de los equipos de medida 8/20 $\mu$ s. 26
<b>Figura 3-2:</b>	Datos obtenidos para un impulso de corriente de polaridad positiva a muestra S11 de tejido conductivo. ....27
<b>Figura 3-3:</b>	Datos tomados para impulso de corriente de polaridad negativa a muestra S26 de tejido conductivo. ....28
<b>Figura 3-4:</b>	Esquema de circuito y ubicación de los equipos de medida.....29
<b>Figura 3-5:</b>	Datos tomados para un impulso de corriente de polaridad negativa a muestra S89 de tejido conductivo. ....30
<b>Figura 3-6:</b>	Datos tomados para un impulso de corriente de polaridad positiva a muestra S70 de tejido conductivo. ....30
<b>Figura 4-1:</b>	Datos de tensión y corriente para la muestra S11 (datos primarios). ...36

---

<b>Figura 4-2:</b>	Datos de tensión y corriente para la muestra S11 datos filtrados. ....	37
<b>Figura 4-3:</b>	Estimación de la impedancia para la muestra S11 en función de la densidad de corriente.....	37
<b>Figura 4-4:</b>	Datos de tensión y corriente para muestra S89 de tejido conductor... ..	39
<b>Figura 4-5:</b>	Estimación de la impedancia para la muestra S89 en función de la densidad de corriente.....	40
<b>Figura 4-6:</b>	Detalle del espesor de las muestras de tejido conductor a partir de microscopia. ....	42
<b>Figura 4-7:</b>	Estimación del espesor de las muestras de tejido conductor a partir de microscopias y datos de fabricante.....	43
<b>Figura 4-8:</b>	Representación de la muestra de tejido conductor como lámina de material conductor.....	45
<b>Figura 4-9:</b>	Fotografías de muestras luego de los ensayos de laboratorio. ....	48
<b>Figura A-1:</b>	Detalle del GAP encargado del disparo para la aplicación de los impulsos. ....	56
<b>Figura A-2:</b>	Conexión de la muestra a los electrodos de alta tensión y tierra. ....	59
<b>Figura B-3:</b>	Esquema de conexión para la verificación del sistema de medición....	64

## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 4-1:</b> Clasificación de muestras según dimensiones.....	34
<b>Tabla 4-2:</b> Datos para ensayos con onda 8/20 $\mu$ s sobre muestras tipo 1.....	35
<b>Tabla 4-3:</b> Datos para ensayos con onda 8/20 $\mu$ s sobre muestras tipo 2.....	35
<b>Tabla 4-4:</b> Datos para ensayos con onda de mayor energía con muestras tipo 1.....	38
<b>Tabla 4-5:</b> Datos para ensayos con onda de mayor energía con muestras tipo 2.....	38
<b>Tabla 4-6:</b> Datos para el cálculo de la energía y su relación con el punto de fusión....	45
<b>Tabla A-1:</b> Equipos utilizados para la implementación del set-up de prueba.....	55
<b>Tabla B-2:</b> Equipos utilizados para las mediciones de tensión y corriente.....	64
<b>Tabla B-3:</b> Verificación divisor de alta tensión EMC.....	65
<b>Tabla C-4:</b> Relación de las líneas de código para el tratamiento de señales.....	68

# Introducción

Alrededor del mundo se han realizado diferentes estudios sobre las descargas eléctricas atmosféricas (rayos), teniendo en cuenta ubicaciones geográficas y condiciones del clima. En las zonas intertropicales del planeta se presenta el mayor porcentaje de muertes y heridos por incidencia de rayos nube-tierra (Cooper et al., 2016). Dado que Colombia se ubica en la zona de convergencia intertropical, es una de las regiones del mundo con una alta actividad de rayos. Adicionalmente, su geografía y condiciones ambientales locales hacen que, en algunas regiones del país, especialmente en las zonas rurales, exista un alto número de personas afectadas por los rayos.

Algunos trabajos de investigación asociados al grupo de investigación EMC-UN han identificado que dentro del país los rayos tienen una variación en parámetros temporales y de magnitud que hace necesaria una caracterización de los rayos en Colombia por regiones (Rojas et al., 2017), (Younes, 2020). Estas investigaciones aportan información para poder determinar el nivel de riesgo por este fenómeno y de esta manera diseñar sistemas de prevención y protección más acordes a las necesidades de las regiones, como por ejemplo refugios portables para zonas rurales, esto con el fin de reducir los accidentes por descargas atmosféricas en personas. Este tipo de protecciones se hacen necesarias debido a que en Colombia los rayos tienen un valor promedio probabilístico de corriente pico por encima de los niveles promedios en otras partes del mundo (Rojas et al., 2017), (NTC 4552-1, 2008), por lo que aumenta la exposición al riesgo y posibilidad de afectación en la población expuesta.

Esta vulnerabilidad se identifica en zonas rurales donde no hay construcciones o estructuras que sirvan como refugios adecuados y que permitan disminuir la probabilidad de afectaciones a las personas por descargas atmosféricas a tierra. Por lo anterior, las actividades agropecuarias o incluso militares son de alto riesgo sobre todo en zonas del país donde la densidad de descargas eléctricas atmosféricas nube a tierra es alta.

A partir de la identificación de este riesgo, se hace necesario la implementación de medidas de protección contra accidentes ocasionados por rayos a tierra. Una de estas medidas de protección son los refugios portátiles contra rayos, los cuales se usarían para que la gente se pueda resguardar sin sufrir los efectos de las corrientes de rayo por tensiones de paso o de contacto. Para el diseño y construcción de estos refugios, es necesario identificar el tipo de material o tejido con los que deben ser fabricados, su composición, las características de fabricación como costuras o uniones y los materiales empleados para su proceso de armado, identificando sus características eléctricas.

Como primer paso para la evaluación, diseño y construcción de estos refugios portátiles de protección contra rayos, es necesario estudiar muestras de tejidos con hilos conductores, conocer el comportamiento de la impedancia cuando por este tipo de tejidos circulan corrientes tipo rayo de diferentes magnitudes y niveles de energía. Para determinar el comportamiento de los tejidos conductores, es necesario simular el tejido para aproximarse al comportamiento de este ante la circulación de corrientes tipo rayo. De igual manera, realizar ensayos de laboratorio para diferentes configuraciones de montaje de los tejidos y diferentes magnitudes y formas de onda de corriente.

A partir de ensayos de laboratorio sobre muestras de diferentes dimensiones de tejidos con hilos conductores tipo ripstop, se busca caracterizar el comportamiento eléctrico de estos tejidos conductores ante la circulación de corrientes tipo rayo. De esta manera se plantea la siguiente pregunta de investigación ¿Cómo es el comportamiento de la impedancia de los tejidos con hilos conductivos cuando son sometidos a diferentes densidades de corriente tipo rayo?

Con esta pregunta de investigación y con la revisión bibliográfica se determina la necesidad de plantear modelos de simulación que permitan identificar el fenómeno y la planeación y ejecución de ensayos de laboratorio para determinar este comportamiento. De esta manera se busca responder y establecer las densidades de corrientes críticas a las cuales el tejido con hilos conductivos pueda perder propiedades de conducción causadas por su deterioro físico originado en efectos térmicos.

Para la realización de las pruebas experimentales en condiciones controladas de laboratorio, se desarrollaron dos modelos de generadores de impulsos de corriente. Con estos generadores se obtuvieron las características tensión-corriente de muestras de tejidos tipo ripstop, con hilos de polímero recubiertos de materiales metálicos como níquel y cobre. Estas mediciones experimentales permiten identificar un posible comportamiento de la impedancia de este tipo de tejidos conductores ante la circulación de impulsos de corriente tipo rayo variantes en el tiempo sobre estos. Con el mencionado proceso experimental se establece que este tipo de tejidos con hilos conductivos permiten una buena conducción de las corrientes de rayo y permite tener en cuenta este tipo de material para la construcción de refugios portables para la protección contra rayos.



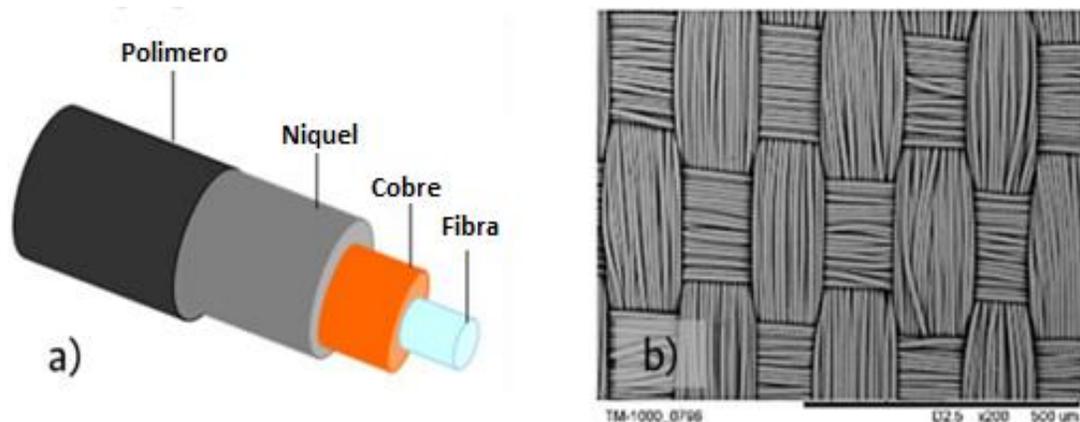
# 1.Marco teórico

## 1.1 Tejidos con hilos conductivos

Los tejidos conductores, conocidos en inglés como “electroconductive fabrics” o ECF, son tejidos construidos con fibras o hilos con material conductor, pueden ser tejidos, no tejidos o de punto. Este tipo de tejidos permiten la conducción de corriente eléctrica.

Los ECF se pueden encontrar compuestos de hilos con sustratos conductivos, o no conductivos, con recubrimientos o incrustaciones de metales o aleaciones entre ellos como níquel, plata, cobre, titanio, acero e incluso oro. Es común encontrar la combinación de diferentes materiales para la fabricación de estos hilos conductivos, en la figura 1-1 se muestra una estructura de hilo conductor y la micrografía de un tejido conductor.

**Figura 1-1:** Estructura de hilo conductor (a) y micrografía tejido conductor (b).



Fuente: Zhejiang, 2017 [28]

Se puede identificar en la figura 1 que el hilo tiene un alma de material no conductor que por lo general le da consistencia y elasticidad al tejido, luego unas capas de material conductor de cobre y níquel para finalmente tener una última película polimérica la cual tiene como propósito dar color según necesidad o dar alguna propiedad anticorrosiva.

En este trabajo se consideran los tejidos tipo *ripstop* o en español anti-desgarre, la cual es una técnica de tejido donde los hilos son delgados (para este caso aproximadamente 15  $\mu\text{m}$ ) y entrelazados lo cual genera una alta resistencia a la tracción y al desgarre. Esto se debe a que el diseño de su estructura en forma de cuadrícula impide la propagación de las afectaciones mecánicas que puedan ocurrir en una parte del tejido a otras celdas diferentes de donde se originó.

El entrelazamiento de los hilos o fibras conductoras se da en de forma perpendicular, en donde se denomina que los hilos en una dirección se llaman urdimbre y los hilos perpendiculares se denominan trama. Es importante resaltar que los hilos que conforman el tejido conductor tienen un diámetro aproximado de 15  $\mu\text{m}$ , de los cuales, su núcleo es de poliéster y solo su capa externa, la cual es aproximadamente de 1  $\mu\text{m}$ , es de material conductor, que para este caso es una aleación de níquel y cobre.

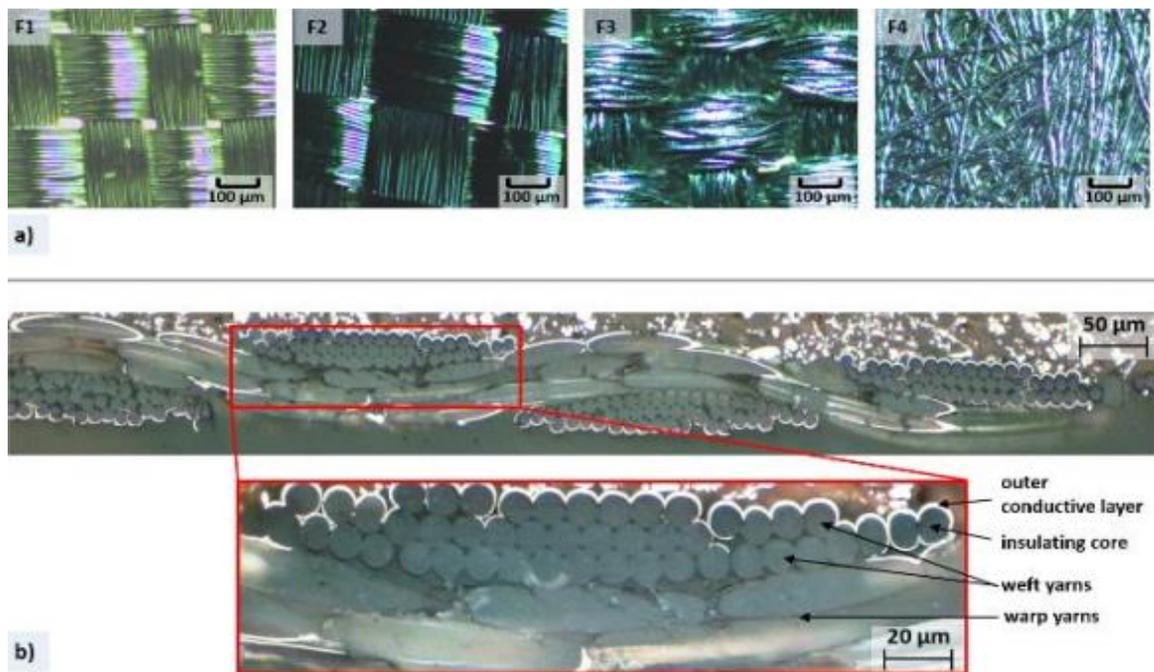
Por su estructura y composición, el comportamiento eléctrico de los tejidos con hilos conductivos se debe modelar como la combinación de resistencias en serie y paralelo, considerando los filamentos entrelazados entre trama y urdimbre (Cristancho J. et al., 2023). De esta manera el comportamiento eléctrico de un ECF puede modelarse como una lámina conductora uniforme al tomarse como una red simétrica dependiendo del material de los hilos y el patrón de construcción.

En la figura 1-2 a) se puede observar el detalle del tejido conductivo tipo Ripstop, a partir de una microscopía óptica. Igualmente, en la figura 1-2 b) se observa el detalle de la sección transversal de la urdimbre de un tejido tipo Ripstop. En esta imagen se muestra cómo se realiza el entrelazamiento entre los hilos de la urdimbre con los hilos de la trama. Adicional, se pueden identificar aproximadamente 48 hilos de trama entrelazados con los de la urdimbre para cada paso.

**Figura 1-2:** Micrografía óptica de tejidos con hilos conductivos.

a) Superficie cuatro tipos de tejidos conductivos

b) Sección transversal de la urdimbre de un tejido conductivo tipo Ripstop.



Fuente: Cristancho J, 2023 [29]

A partir de los modelos e investigaciones, incluso fichas técnicas de fabricantes de este tipo de tejidos, se encuentra que la resistencia del tejido conductivo es independiente al tamaño de la muestra, siempre y cuando las dimensiones de sus lados sean iguales, es decir que la resistencia no varía si las muestras son un cuadrado. (Banaszczyk et al., 2010). Para la industria de tejidos conductivos las unidades que reportan los fabricantes son de ohmios por cuadrado ( $\Omega/\square$ ) esto significa que la resistencia depende de la simetría de la muestra es decir su ancho y su largo deben ser iguales (ASTM D4496-13, 2013; ASTM

F390-11, 2011; Smith, 2010). Es decir que una muestra de tejido conductivo de 5 cm x 5 cm tendría la misma resistencia que una muestra de 20 cm x 20 cm.

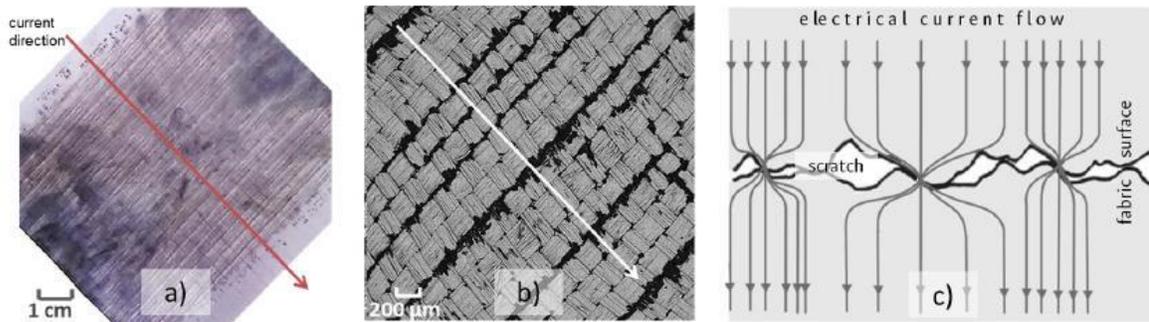
## 1.2 Conducción de corrientes tipo rayo de los tejidos conductivos

Dentro de estos trabajos investigativos sobre la conducción de corrientes tipo rayo con tejidos conductivos, se encuentra el artículo, "Lightning Impulse Current Tests on Conductive Fabrics" (J. Cristancho et al., 2019), en el cual se realiza una investigación de diferentes tipos de tejidos con hilos conductores para la elaboración de estos refugios, la idea de los hilos conductores es dar un camino seguro a la corriente de la descarga y de esta manera las personas dentro del refugio no sufran las consecuencias de un accidente por la caída de un rayo a tierra. A partir de simulaciones y pruebas de laboratorio con diferentes probetas o muestras se han determinado los niveles de corriente a los cuales las fibras tienen una ruptura o un cambio en las propiedades de conducción.

A continuación, en la figura 4-2, se observan algunas de las imágenes del trabajo de Cristancho (J. Cristancho et al., 2019) donde se identifica el sentido de la corriente tipo rayo y los efectos sobre el tejido, (desgaste y sublimación del material).

**Figura 1-3:** Corrientes de impulso tipo rayo sobre tejidos con hilos conductores.

- a) y b) Sentido de circulación de la corriente
- c) Rupturas de los tejidos después del flujo de corriente.

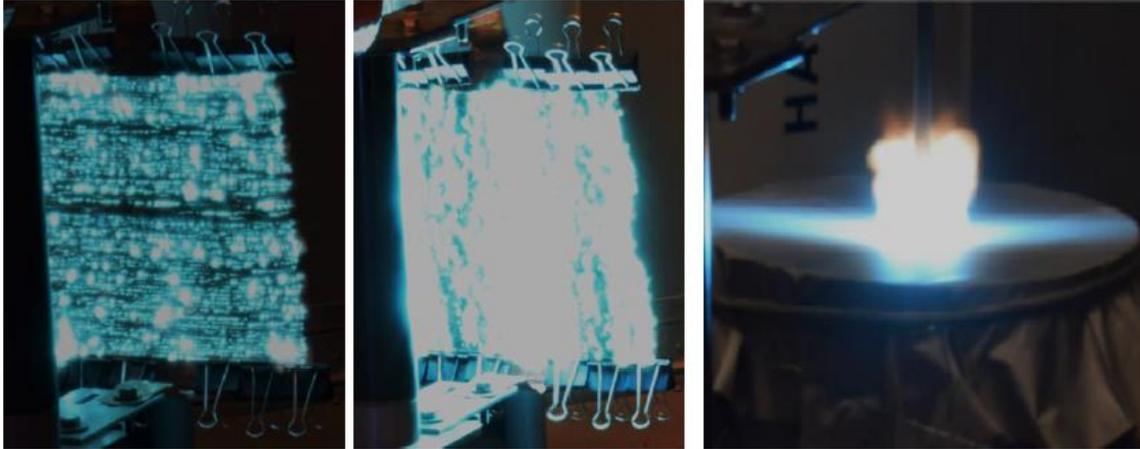


Fuente: Cristancho J, 2019 [24]

Se identifica que los tejidos permiten realizar una circulación de las corrientes tipo rayo, sin embargo, aparecen afectaciones sobre su composición y estructura, como se identifica en la figura 4-2 c) en donde en las zonas de contacto de los hilos entrelazados entre urdimbre y trama se intensifican los fenómenos y ocurren rupturas y pérdidas de material.

Otras investigaciones han permitido observar el comportamiento de los tejidos conductivos con formas de onda diferentes, es el caso de los experimentos realizados en el laboratorio de la universidad de UPPSALA (Suecia), los cuales se llevaron a cabo sobre los tejidos conductivos tipo Ripstop (Román et al., 2021). En estas pruebas se utilizó un generador de onda 10/350  $\mu\text{s}$  con una rama crowbar la cual permitía abrir el circuito para quitar las oscilaciones de la onda cuando la corriente llegaba al pico de su magnitud. Durante los ensayos se usaron diferentes configuraciones de montaje entre las que se tenían, una sola capa de tejido, 5 capas en paralelo y una última configuración cilíndrica con la cual se buscaba obtener la densidad de corriente superficial en los tejidos.

- Figura 1-4:** Corrientes de impulso tipo rayo sobre tejidos con hilos conductores.
- a) Conducción de corrientes de rayo y evidencia de deterioro.
  - b) Conducción de altas corrientes con descargas superficiales.
  - c) Conducción radial para identificar densidades de corriente.



Fuente: Roman F, 2021 [27]

A partir de esto, se identifica que el tejido presenta una variación de su impedancia a partir de la circulación de diferentes magnitudes de corriente a través de estos. Lo que hace necesario identificar estas variaciones y relacionarlas con niveles de corriente o energía máxima para que el tejido aun con pérdida de material o deterioro pueda realizar la conducción de corriente tipo rayo. Se evidencia la presencia de efectos térmicos y sublimación del material conductivo en este fenómeno de conducción.

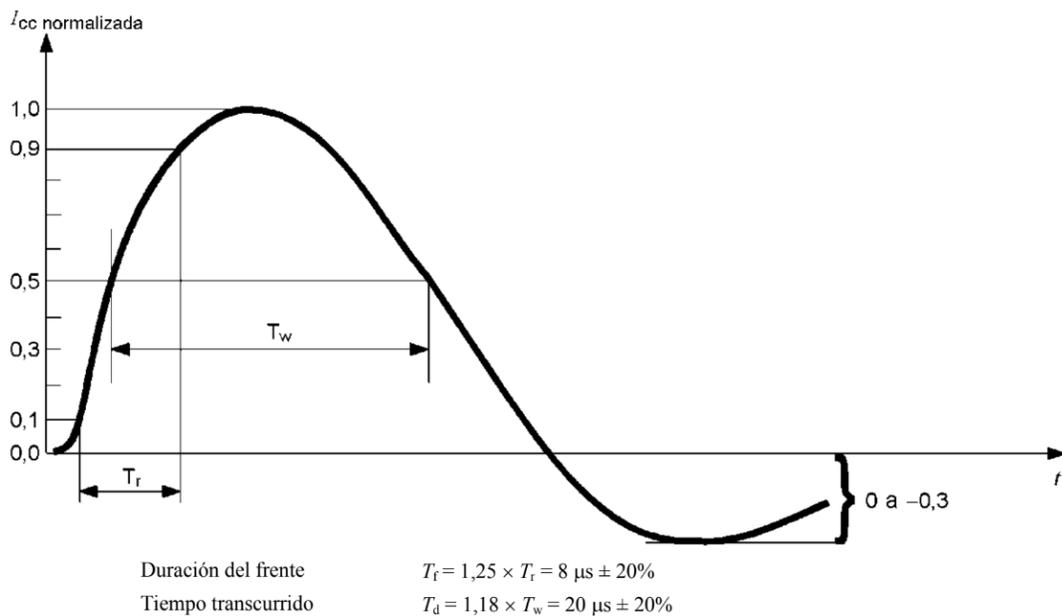
### 1.3 Generadores de impulsos de corriente

Para el desarrollo y fabricación de productos de alta tensión o corriente, se establecen ensayos de laboratorio en los cuales se realiza la aplicación de ondas normalizadas de impulso. Estas formas de onda son producto de investigaciones y consideraciones de los comités técnicos internacionales y permiten caracterizar un rayo en tensión y corriente. Para el caso de equipos que deben soportar altas corrientes en su funcionamiento normal, como en el caso de los descargadores de sobretensión o DPS, se establecen los impulsos de corriente ya sea en onda de impulso  $8/20 \mu\text{s}$  o  $10/350 \mu\text{s}$  donde se evalúa el comportamiento del DPS ante la circulación de diferentes magnitudes y densidades de

corriente e incluso poder determinar cuál es la tensión (residual) que mantiene entre sus terminales cuando por el circulan corrientes tipo rayo.

Para los ensayos realizados en el laboratorio sobre muestras de tejidos con hilos conductivos, se toma como base la forma de onda al impulso de corriente 8/20  $\mu$ s la cual es el comportamiento de un circuito RLC subamortiguado que simula el fenómeno transitorio de un rayo. Según la “*International Electrotechnical Commission*” o por su sigla IEC, los parámetros temporales de la onda mostrada en la figura 1-3, dependerán de los valores de la capacitancia (elemento que almacena la carga del circuito) y el conjunto de inductancia y resistencia en el momento de la descarga. En el capítulo 2 se mostrarán los detalles de la construcción del generador.

**Figura 1-5:** Forma de onda de corriente (8/20  $\mu$ s) según IEC 6100-4-5



Fuente: UNE-EN-61000-4-5,2015 [30]

La combinación de un circuito RLC permite por medio de procesos de simulación establecer los tiempos de la onda de corriente. Por un lado, se tiene el tiempo de frente el cual debe ser de 8  $\mu$ s con una tolerancia del 20 %, el cual se determina entre el tiempo

transcurrido entre el 10 % y el 90 % del valor máximo de corriente multiplicado por un factor de 1.25. Por otro lado, el tiempo de cola se determina como el tiempo que transcurre entre que la onda alcanza el 50 % del valor pico (cuando va creciendo) y cuando vuelve a tener este valor del 50 % (cuando va decreciendo) en el primer ciclo, este tiempo es de 20  $\mu$ s con una tolerancia del 20 %. Este tipo de onda se utiliza para los ensayos “tipo” a los elementos utilizados para la protección contra sobretensiones y corrientes generadas principalmente por descargas atmosféricas a tierra como varistores y descargadores de sobretensión. De esta manera es que se considera pertinente la aplicación de este tipo de ensayos para la caracterización de los tejidos con hilos conductivos ante corrientes de rayo. En el capítulo 2, se mostrará como se realizó el proceso de diseño e implementación de los generadores con los cuales se realizaron experimentos de laboratorio.

## **2. Modelado y simulación**

A partir de la revisión de documentos normativos internacionales como lo son las normas IEC 60060-1:2010 e IEC 61000-4-5:2014, se identifican algunos parámetros importantes para la implementación de generadores los cuales permiten realizar ensayos de impulsos de corriente en laboratorio. Para el proceso de simulación se utilizó el software ATP Draw.

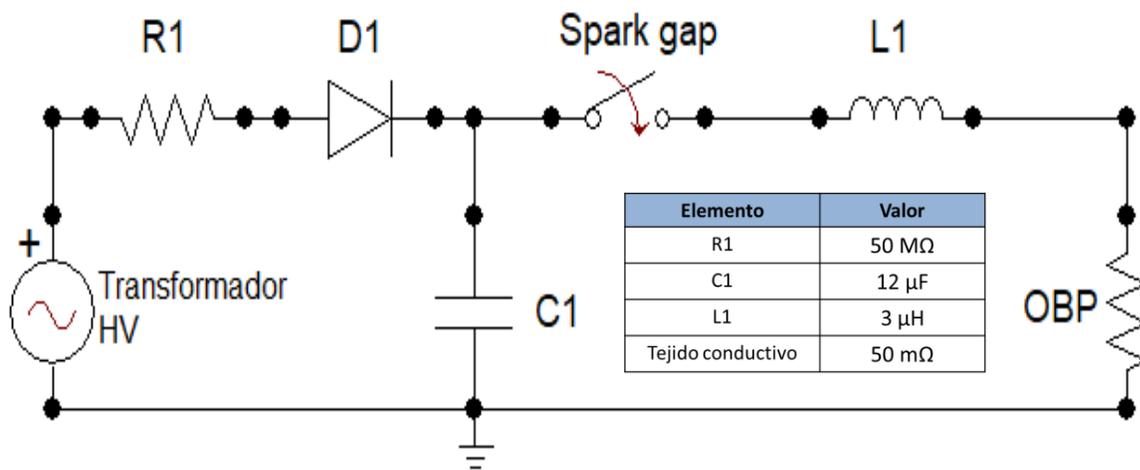
### **2.1 Modelo y simulación de un generador 8/20 $\mu$ s.**

El modelado del generador 8/20  $\mu$ s y su simulación en ATP Draw, se realizó a partir de los parámetros, tolerancias de los tiempos y recomendaciones del capítulo 6.2.2 de la norma IEC 61000-4-5:2014 y tomando como referencia los valores de los equipos disponibles en los laboratorios de alta tensión de la Universidad Nacional de Colombia.

En la figura 2-1 se muestra el modelo final implementado en el laboratorio para los ensayos a las muestras de tejidos conductivos. El parámetro fijado en este caso es la capacitancia, la cual se conformó a partir de 8 condensadores de 6  $\mu$ F, conectados a manera de 2 arreglos en serie conformados por la conexión de 4 condensadores en paralelo cada uno, de esta manera se tiene una capacitancia equivalente de 12  $\mu$ F la cual permite alcanzar tensiones de carga de hasta 8 kV.

Por otro lado, en la figura 2-1 se muestra el “spark gap”, que es un interruptor el cual se cierra mediante el arreglo de dos esferas separadas las cuales se juntan con el contacto de una tercera. Este sistema de disparo se controla de manera neumática por medio de un compresor de aire cuyo detalle se especifica en el Anexo A.

**Figura 2-1:** Modelo de circuito generador de corriente onda 8/20  $\mu$ s.



El circuito consta de un transformador de alta tensión controlado con un variac el cual permite realizar una variación y control de la tensión de carga según la necesidad. En la figura 2-1 se observa un diodo D1 de alta tensión que permite realizar la rectificación de la onda para cargar la capacitancia C1 la cual es el equivalente de los 8 condensadores mencionados anteriormente. Para limitar la corriente de carga de la capacitancia y no sobrepasar la corriente del diodo se coloca una resistencia de limitadora de aproximadamente 50 MΩ. Esta parte descrita de la figura 2-1 corresponde a la etapa de carga de la capacitancia del sistema.

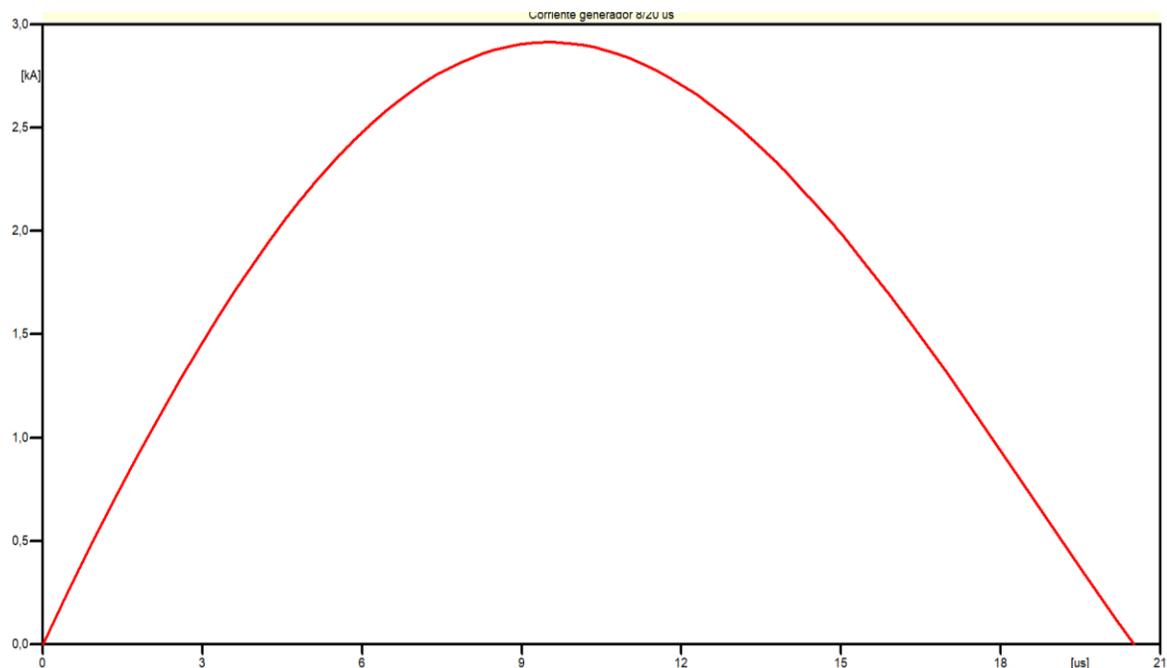
Luego de realizar la carga de la capacitancia a la tensión establecida, el circuito se desacopla por medio del apagado de la fuente y el condensador se convierte en el único elemento que entrega la energía para aplicar el impulso de corriente pasando por la inductancia L1 la cual es de 3  $\mu$ H, para llegar finalmente al Objeto bajo prueba (OBP) que

representa las muestras de tejido conductivo inicialmente considerando una impedancia de 50 m $\Omega$ , dato tomado de la ficha técnica entregada por el fabricante de este tipo de tejidos.

La aplicación de los impulsos sobre los tejidos conductivos se da cuando el spark GAP es accionado de manera remota por medio del mecanismo neumático y queda en posición de cerrado, permitiendo que el condensador se descargue en el lazo cerrado de la derecha de la figura 2-1.

En la figura 2-2 se puede ver el detalle de la onda de corriente 8/20  $\mu$ s implementada en ATP Draw, se muestra solo el primer ciclo, el cual es sobre el cual se determinan los parámetros temporales para garantizar que la onda es normalizada, para esta figura el eje horizontal es el eje de tiempo en  $\mu$ s y el eje vertical es la magnitud de corriente en kA. La corriente máxima depende de la tensión de carga de los condensadores.

**Figura 2-2:** Forma de onda corriente vs tiempo del generador de corriente onda 8/20  $\mu$ s.

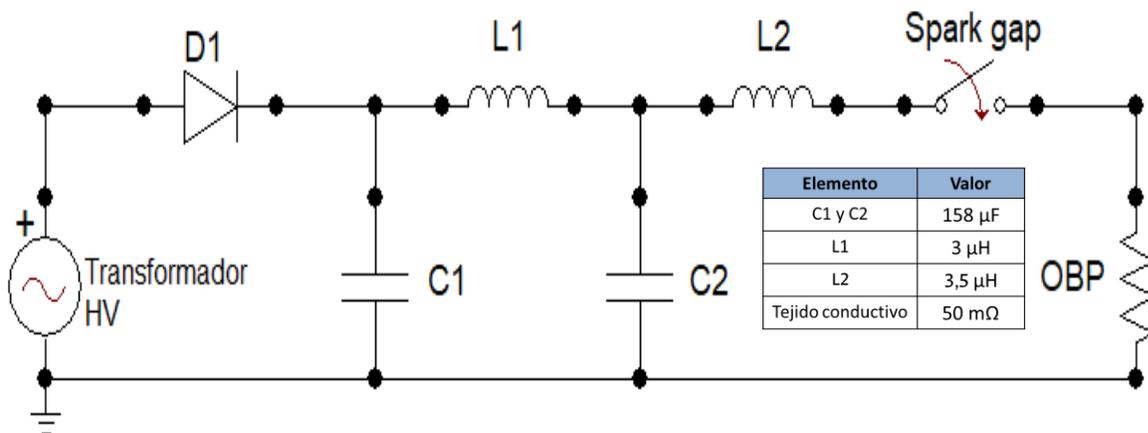


En el capítulo 2.3 se realizan simulaciones para obtener las gráficas de tensión y corriente sobre las muestras de tejidos conductivos, cuando se les aplica un impulso de corriente tipo rayo. Esta simulación se hace con nuevo modelo del tejido a partir de datos y experimentos anteriores donde se debe considerar al tejido como un elemento no lineal.

## 2.2 Modelado generador de mayor energía.

Para poder observar el comportamiento de los tejidos conductivos ante una corriente diferente a la de  $8/20 \mu\text{s}$ , se implementó un generador con una forma de onda más larga. La base para la construcción de este generador fueron los equipos disponibles en el laboratorio de alta tensión – LABE, adicional a la consulta de modelos y recomendaciones de Haefely (fabricante del equipo de pruebas del laboratorio) sobre ondas “largas” de corriente. Esta base se tomó del modelo de “Impulso de corriente rectangular” en donde la energía total sobre la muestra bajo ensayo es la suma de la carga de cada condensador del circuito como se observa en la figura 2-3. Para este generador todo lo que está a la izquierda de la inductancia L2 se considera el sistema de carga y descarga de los condensadores.

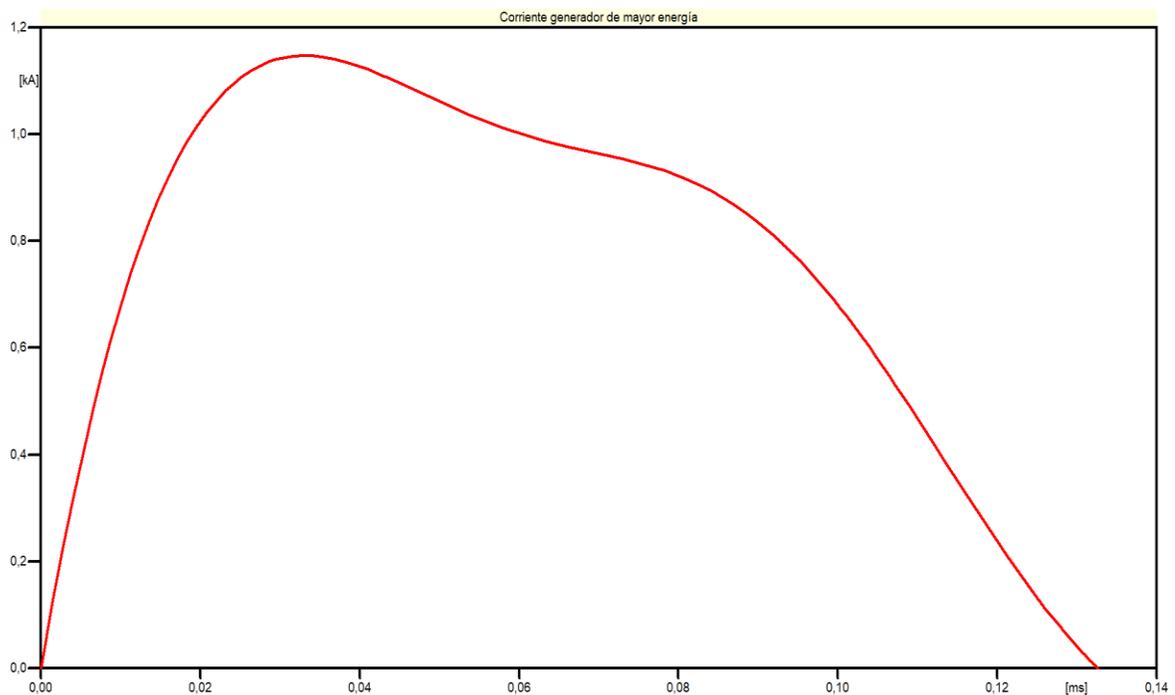
**Figura 2-3:** Modelo de circuito generador de corriente de mayor energía.



De manera análoga al generador de forma de onda 8/20  $\mu$ s explicado anteriormente, el circuito consta de un transformador de alta tensión controlado con un variac, un diodo D1 de alta tensión que permite realizar la rectificación de la onda y cargar los condensadores C1 y C2 los cuales están conectados a través de la inductancia L1. Cuando la tensión de carga es la misma para los dos condensadores, se cierra el spark GAP de manera remota y la carga almacenada por los condensadores pasa por las inductancias hasta finalmente llegar a la muestra de tejido conductivo (OBP). En la figura 2-4 se observa la forma de onda obtenida para la implementación del generador en ATP Draw, el eje horizontal corresponde al tiempo en  $\mu$ s y el eje vertical es la magnitud de corriente en kA.

El valor de resistencia asignado en el simulador para la muestra de tejido conductivo es de 50 m $\Omega$ , el cual es el dato dado por el fabricante. Cabe resaltar que este valor es tomado únicamente para la simulación de la respuesta del generador y poder implementar su construcción en el laboratorio.

**Figura 2-4:** Forma de onda corriente vs tiempo generador de mayor energía.

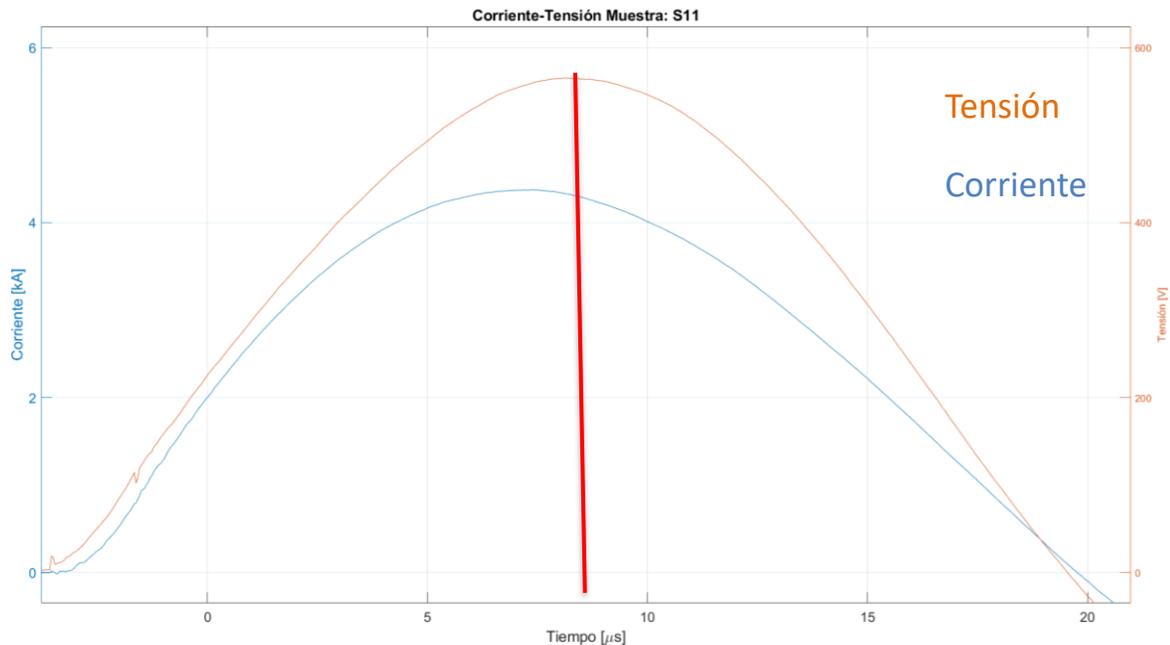


## 2.3 Simulación del tejido como elemento no lineal.

A partir del proceso de simulación en el software ATP y teniendo en cuenta los resultados obtenidos en pruebas de laboratorio y otros trabajos de investigación realizados por miembros del grupo EMC-UN previamente, se determinó para la simulación un modelo no lineal que representa el comportamiento de las muestras de tejido conductor ante la circulación de corrientes tipo rayo.

Esto se debe a que como se ha podido identificar en investigaciones como la de (Cristancho, 2018), el comportamiento de los tejidos conductivos tiene una variación en su relación V-I. Inicialmente esta variación se considera que es debida a las densidades de corriente que circulan por los hilos conductivos, lo que genera un cambio en la impedancia de las muestras de tejido según los niveles de corriente aplicados.

**Figura 2-5:** Resultados de ensayo sobre muestras de tejido con onda 8/20  $\mu\text{s}$ .



Para crear el modelo no lineal e implementarlo en la simulación de ATP, se tomaron datos de tensión y corriente registrados en ensayos de laboratorio realizados con forma de onda 8/20  $\mu$ s, como los que se muestran en la figura 2-5. Con estos datos se procedió a determinar el comportamiento de la tensión medida sobre la muestra de tejido conductor en función de la corriente aplicada y de esta manera poder estimar una ecuación que permitiera representar este comportamiento. El análisis de este comportamiento se realizó desde el instante que se cierra el spark GAP para aplicar el impulso de corriente hasta el punto donde la corriente alcanza su máximo valor en el primer ciclo.

En la ecuación 2.1 podemos ver el polinomio que representa el comportamiento de la tensión en función de la corriente, basado en experimentos anteriores. Se puede observar que un polinomio grado cuatro permite realizar una buena representación del fenómeno, ya que el coeficiente de determinación o de relación fue de  $R^2 = 0,9969$ .

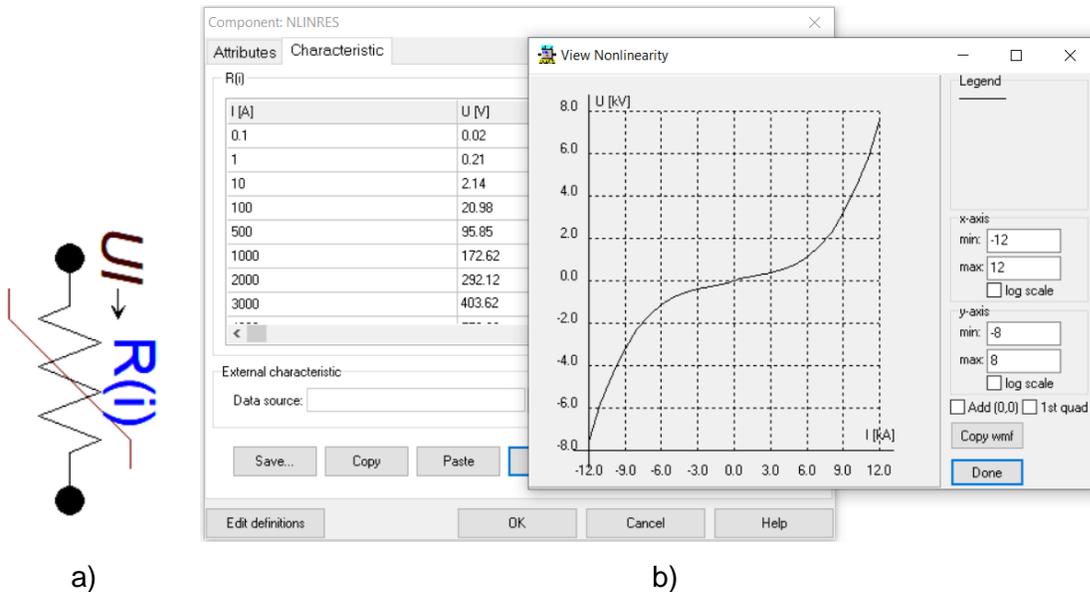
$$y = (-8x10^{-14})x^4 + (8x10^{-9})x^3 - (5x10^{-5})x^2 + 0,2147x \quad (2.1)$$

Con este polinomio y utilizando el componente no lineal R(i) "Type 99" en ATP el cual es un componente que depende de la corriente, se procedió a construir el modelo No lineal de las muestras de tejido conductor. Como primer paso se determina que es un componente de 2 terminales, luego de esto y asignando valores de corriente en el polinomio grado cuatro (variable independiente, eje X) para obtener los valores de la tensión (variable dependiente, eje Y) se construye una tabla que se ingresa a la pestaña de características del componente.

En la figura 2-6 podemos observar el símbolo del elemento implementado, el ingreso de datos y la gráfica de tensión en función de la corriente que construye ATP a partir de los datos ingresados.

**Figura 2-6:** Implementación de modelo no lineal en ATP.

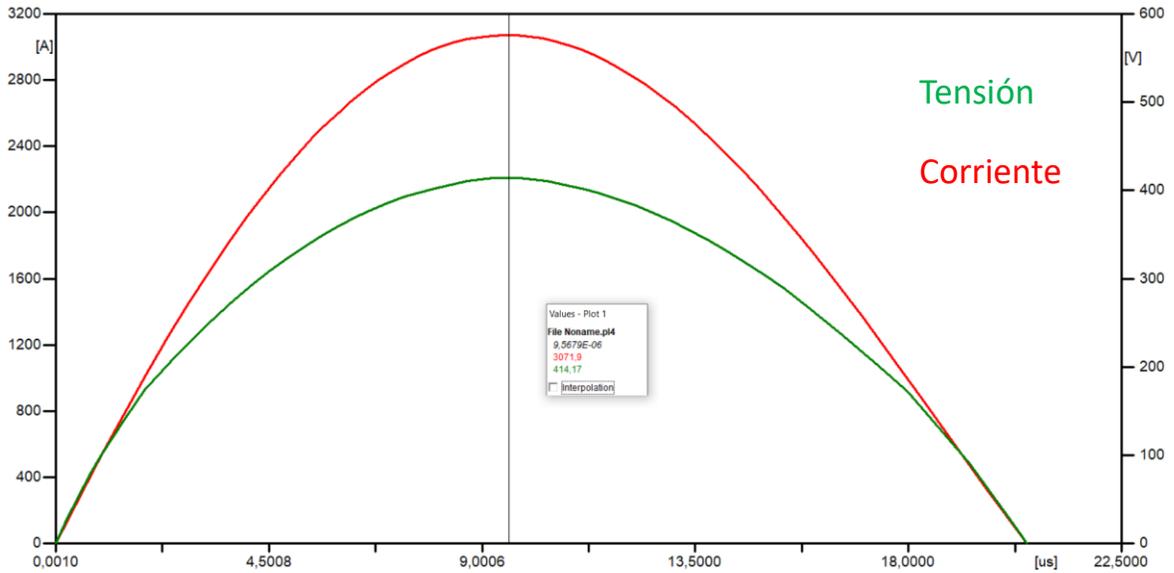
- a) Símbolo del componente no lineal.
- b) Ventana de parametrización del componente no lineal.



Con este modelo de componente no lineal implementado en ATP, se procede a reemplazar la resistencia que se denominaba OBP del esquema de circuito presentado en la figura 2-1 con el nuevo componente que representa el comportamiento de la muestra de tejido conductivo. Con este cambio en el modelo de la muestra de tejido conductivo, se realizan simulaciones con diferentes valores de tensión de carga sobre los condensadores, las cuales se pueden observar en las figuras 2-7 y 2-8 y determinar que el comportamiento del tejido cambia en función de la corriente inyectada.

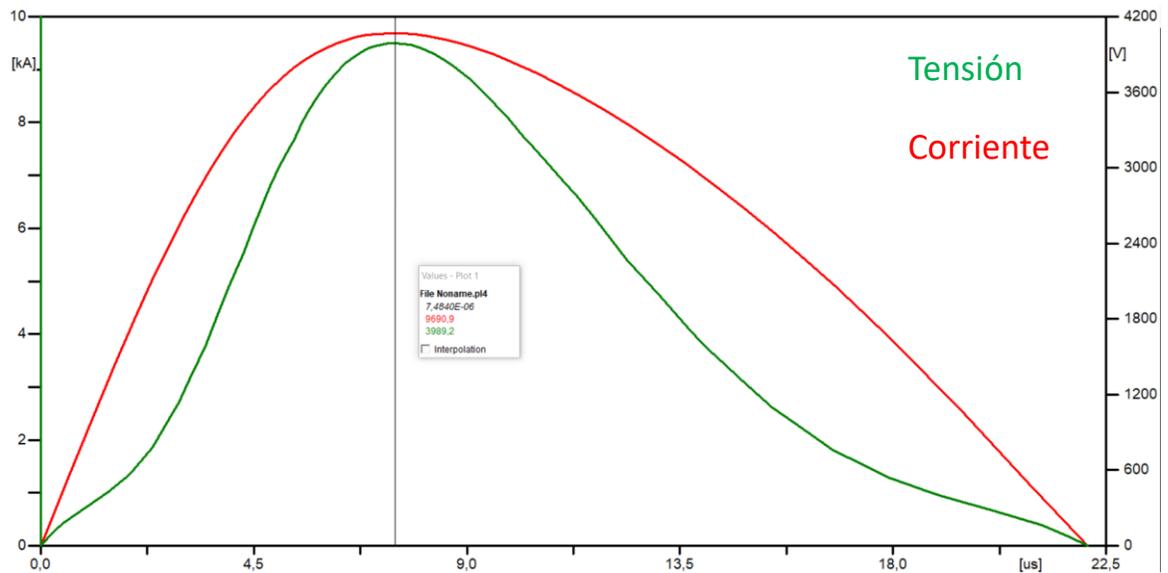
Cuando el capacitor se carga a una tensión de 2 kV se tiene una corriente pico del impulso de 3 kA, como se puede observar en la figura 2-7. Para este valor de corriente pico inyectada, se tiene un valor pico de tensión de 414 V sobre la muestra de tejido conductivo y adicional se observa que el comportamiento de las dos graficas es aproximadamente mismo (despreciando la diferencia por escala), lo que muestra un comportamiento netamente resistivo para valores de corriente pequeños.

**Figura 2-7:** Simulación del impulso 8/20  $\mu$ s al modelo, tensión de carga 2 kV.



Cuando se carga el condensador a 8 kV observamos que se tiene una corriente pico de 9,7 kA aproximadamente y la tensión sobre la muestra de tejido conductivo llega a los casi 4 kV, como se observa en la figura 2-8.

**Figura 2-8:** Simulación del impulso 8/20  $\mu$ s al modelo, tensión de carga 8 kV.



Sin embargo, a comparación del caso anterior, se observa que el comportamiento de la corriente y de la tensión ya no es puramente resistivo, sino que se tiene una variación en la impedancia, lo que concuerda con investigaciones anteriores (Cristancho. 2018) en donde a mayores niveles de corriente el material se ve afectado y el tejido conductivo empieza a tener deterioro y las tensiones llegan a ser de miles de voltios.

De igual manera que para la onda 8/20  $\mu$ s, a partir de mediciones previas, se tomaron datos de tensión y corriente para construir un modelo no lineal que representara el comportamiento de las muestras de tejido conductivo ante una onda de corriente de una energía mayor. De igual manera se graficó y se determinó el polinomio que representa el comportamiento de la tensión en función de la corriente, en la ecuación 2.2 se puede observar el polinomio grado cuatro con coeficiente de relación de  $R^2 = 0,9855$ .

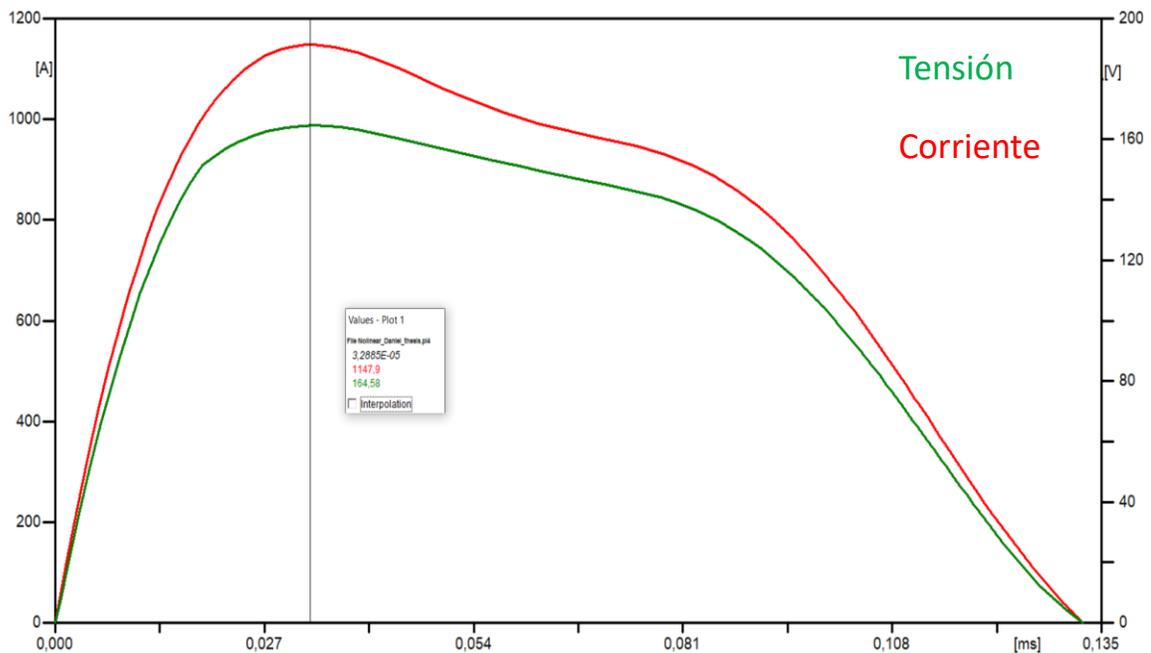
$$y = (2x10^{-11})x^4 - (7x10^{-8})x^3 + (7x10^{-5})x^2 + 0,1624x \quad (2.2)$$

Con este polinomio se asignaron datos de corriente (variable independiente) para calcular el valor de tensión asociado (variable dependiente) y de esta manera construir una tabla para ingresar en el modelo de elemento no lineal "type 99" en ATP, de la misma manera que en el caso del modelo implementado para el generador 8/20  $\mu$ s. Al ingresar los datos el programa construye la curva característica del elemento no lineal.

Con la implementación del modelo, se reemplaza la resistencia relacionada como OBP del circuito mostrado en la figura 2-3 y de esta manera se realizan simulaciones a diferentes niveles de corriente.

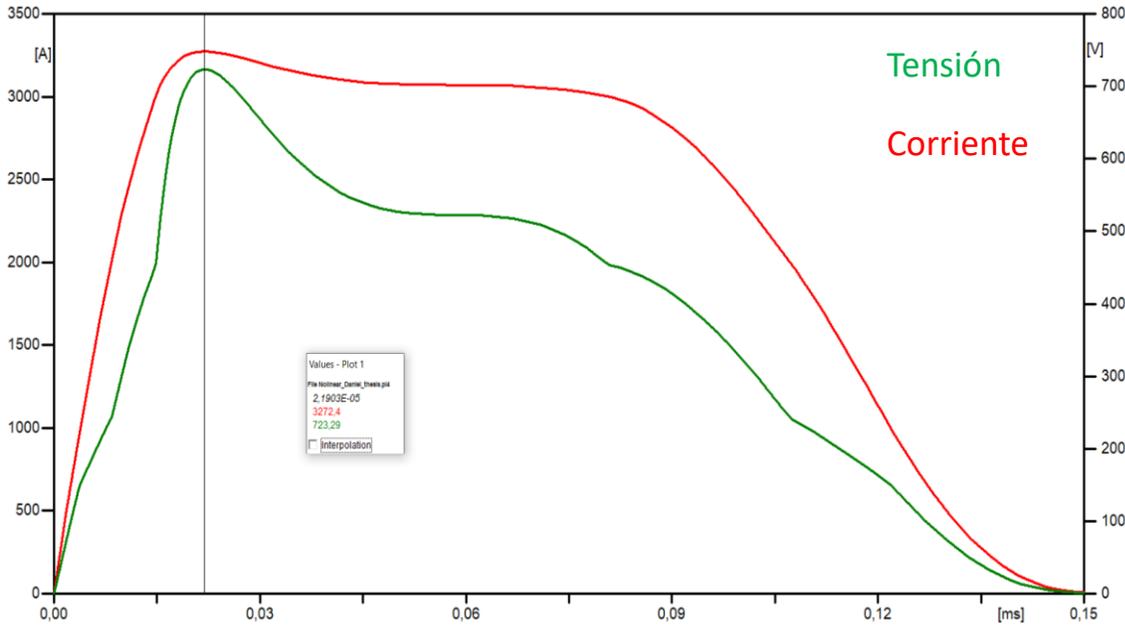
Cuando la tensión de carga de cada condensador es de 0,3 kV se tiene una corriente máxima de impulso de 1,2 kA aproximadamente. Se observa que la tensión no tiene una variación considerable respecto a la forma de onda de la corriente y su valor máximo es de 170 V lo que permite entender que el nivel de corriente aplicado a la muestra aún no es suficientemente grande para generar afectaciones en el tejido. Esto se puede observar en la figura 2-9, presentada a continuación.

**Figura 2-9:** Simulación de impulso mayor energía al modelo, tensión de carga 0,3 kV.



Por otro lado, cuando la tensión de carga es de 1 kV la corriente pico alcanza un valor de 2.7 kA aproximadamente y a diferencia del caso anterior si se observa una variación en la gráfica de tensión y su valor pico es de casi 800 V, lo que se refleja en una variación de la impedancia, es decir que la muestra de tejido conductivo puede empezar a tener afectaciones permanentes, la gráfica de este comportamiento se observa en la figura 2-9.

**Figura 2-10:** Simulación de impulso mayor energía al modelo, tensión de carga 1 kV



Estos modelos implementados en ATP permiten tener un primer acercamiento a la variación de la relación de tensión vs corriente que se da sobre las muestras de tejidos con hilos conductivos cuando por ellos circulan corrientes tipo rayo. Esto debido a que como se identifica de investigaciones anteriores el valor resistivo dado por el fabricante queda limitado para explicar el fenómeno de conducción por la pérdida de material y sublimación por los niveles de energía asociados a las densidades de corriente que pueden conducir.

En el capítulo 4 se realiza la relación de estas variaciones a partir de la energía estimada de los resultados experimentales y la energía calculada a partir de las características del material y un modelo simplificado geométrico de la configuración del tejido.

### **3. Implementación generadores, ejecución de ensayos y mediciones**

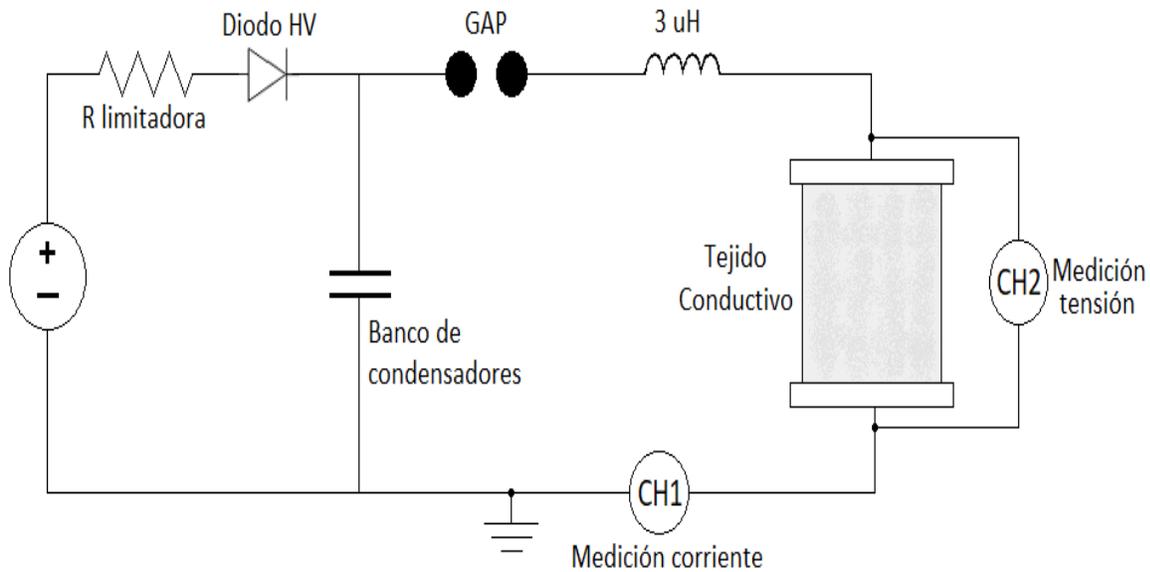
A partir de los datos obtenidos en el proceso de simulación, se utilizaron los espacios del Laboratorio de ensayos eléctricos – LABE y del laboratorio docente de alta tensión de la Universidad Nacional para la construcción e implementación de los generadores de impulsos de corriente. A continuación, se hará una descripción de los montajes, la ubicación de las medidas y las señales obtenidas en el laboratorio.

#### **3.1 Implementación generador onda tipo 8/20 $\mu$ s.**

En la figura 3-1 se puede observar el esquema completo del generador implementado y la conexión de las muestras de tejido conductor bajo ensayo. Los valores de los elementos de circuito son los descritos en el capítulo 2-1. Las mediciones se realizan y registran a través de un osciloscopio digital, se asigna el canal 1 para la medición de la corriente inyectada a la muestra por medio de una bobina Rogowsky y el canal 2 para la medida de la tensión en los terminales de las muestras a través del divisor de alta tensión EMC.

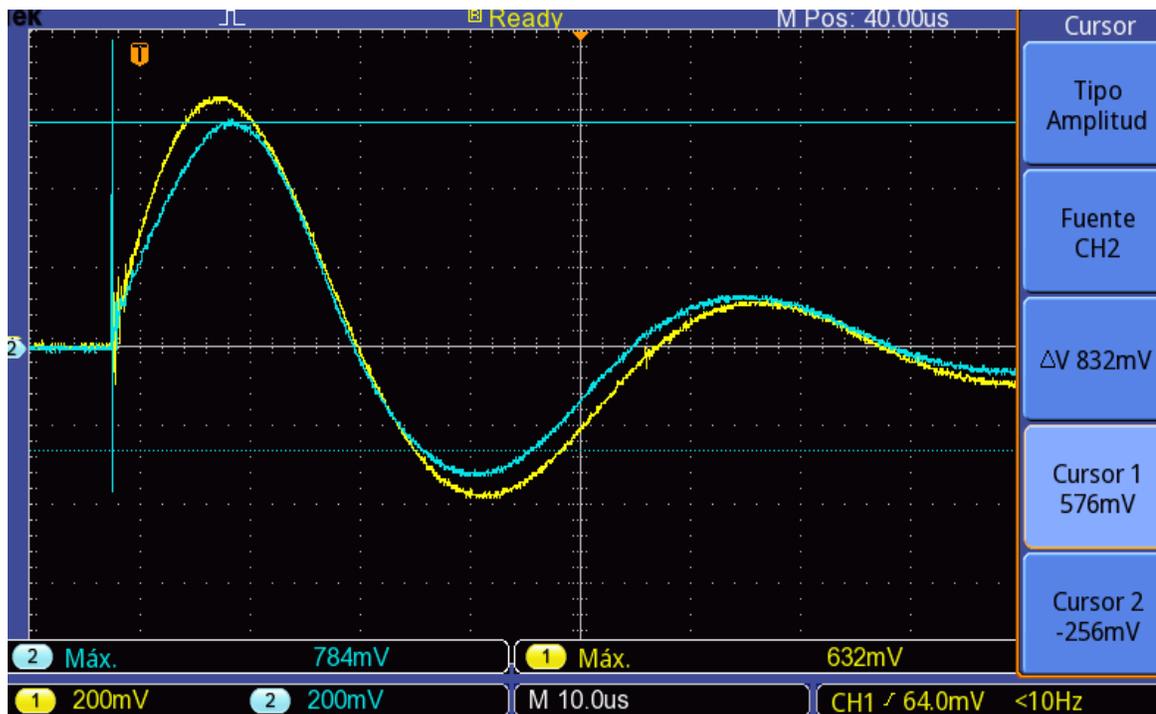
Para la implementación de los equipos de medición, se realiza la reducción del efecto del lazo inductivo de los cables haciendo la medición lo más cercana a la muestra y llevando la medición al osciloscopio por medio de cables coaxiales entorchados de manera que el la distancia y el área fueran las menores posibles. De esta manera se busca evitar que la onda electromagnética que se produce al momento de aplicar el impulso pudiese generar tensiones inducidas. Adicional, se mejoraron los contactos para las mediciones y en el mecanismo de cierre del GAP y de esta manera poder reducir el ruido eléctrico en el registro de los datos de corriente y tensión.

**Figura 3-1:** Esquema de circuito y de ubicación de los equipos de medida 8/20  $\mu$ s.



En la figura 3-2 se observa uno de los registros de las señales obtenidas durante la ejecución de la parte experimental de este trabajo. Se pueden identificar en la imagen las señales de tensión (señal azul) y la de corriente (señal amarilla) para el ensayo de aplicación de impulso de corriente positivo sobre la muestra de tejido conductivo con codificación "S11" (Sample 11), la cual tenía las siguientes dimensiones, ancho de 5 cm y un largo de 20 cm.

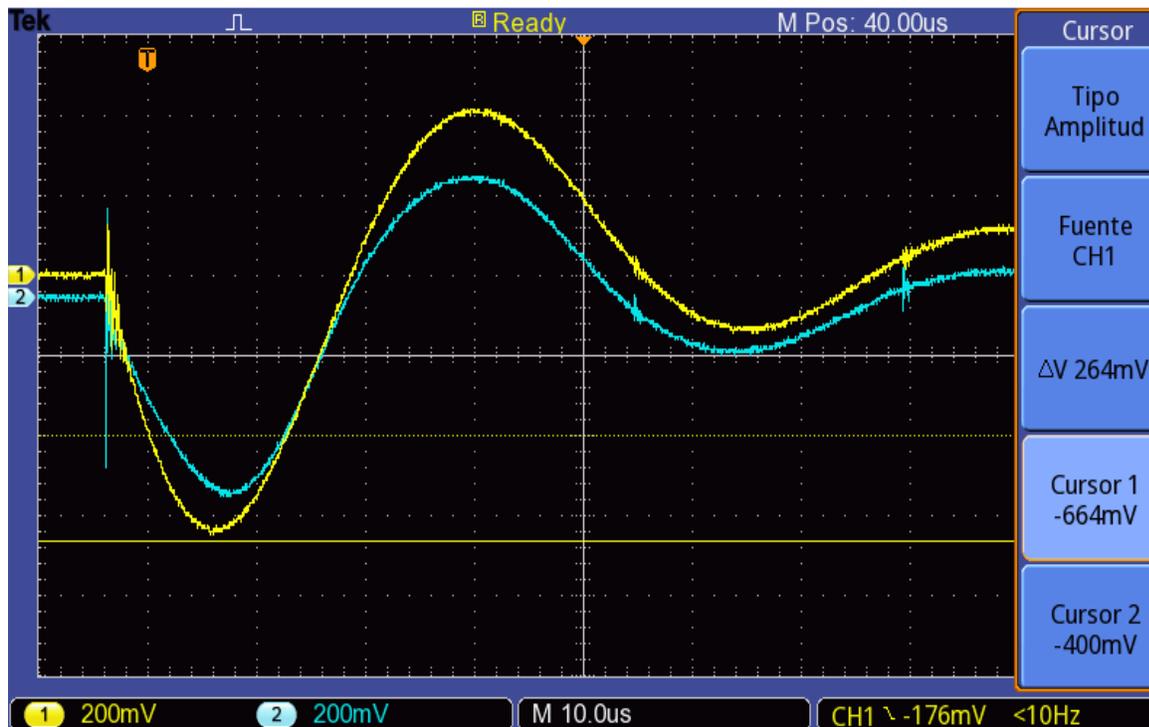
**Figura 3-2:** Datos obtenidos para un impulso de corriente de polaridad positiva a muestra S11 de tejido conductivo.



En la figura 3-3 se observa el registro de las señales de tensión (señal azul) y corriente (señal amarilla) para el ensayo de impulso de corriente de polaridad negativa sobre la muestra con codificación “S26”, la cual tenía un ancho de 5 cm y un largo de 20 cm. De igual manera que en el caso anterior, para la implementación se redujo el efecto inductivo de los cables haciendo la medición lo más cercana a la muestra, de manera que la adquisición de las señales a través del osciloscopio tuviera la menor influencia por fenómenos externos.

Estos registros se realizaron por medio de un osciloscopio digital y almacenadas en un computador en el cual se realiza el almacenamiento y análisis de los resultados descritos en el capítulo 4. En el anexo A se puede observar el detalle del “setup2 de medición y registro para el proceso experimental.

**Figura 3-3:** Datos tomados para impulso de corriente de polaridad negativa a muestra S26 de tejido conductivo.

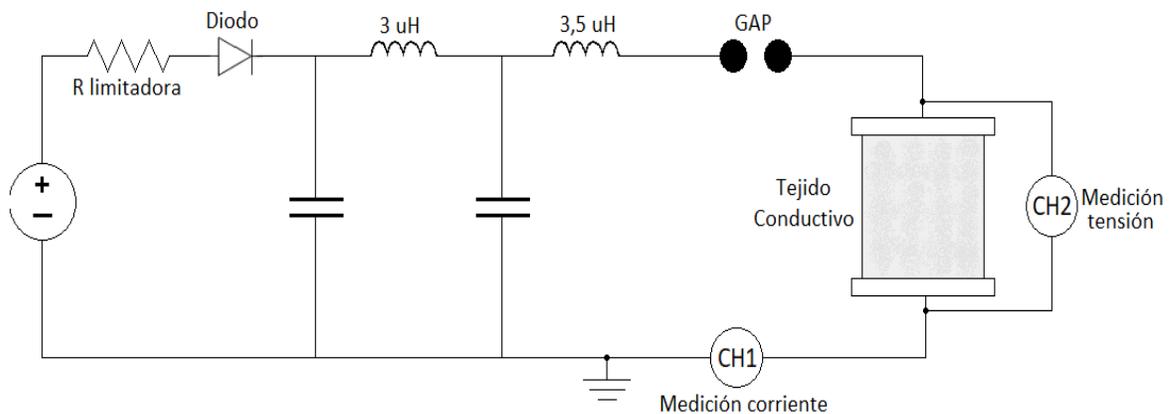


Las señales de corriente y tensión registradas en el osciloscopio durante la ejecución de la parte experimental de aplicación de impulsos de corriente positivos y negativos a muestras de tejido conductivo se descargaron y guardaron por conexión USB en un computador destinado para este fin por medio del software “OpenChoiceDesktop” del fabricante del equipo (Tektronix). Por medio de este programa, se pudo guardar para cada experimento sobre las muestras dos archivos, uno de imagen y otro archivo con el registro datos según el muestreo del equipo (archivos .png y .csv respectivamente) colocando como nombre la codificación de la muestra.

### 3.2 Implementación de un generador de mayor energía.

En la figura 3-4 se puede observar el esquema completo del segundo generador implementado en el laboratorio y la conexión de las muestras de tejido conductivo bajo ensayo. Se puede observar que los canales de medida del osciloscopio se asignaron, canal 1 para la medición de corriente la corriente de impulso por medio de la bobina Rogowsky y el canal 2 para la medida de la tensión a través del divisor de alta tensión EMC. Los valores de los elementos mostrados en la figura son los definidos en el capítulo 2-2.

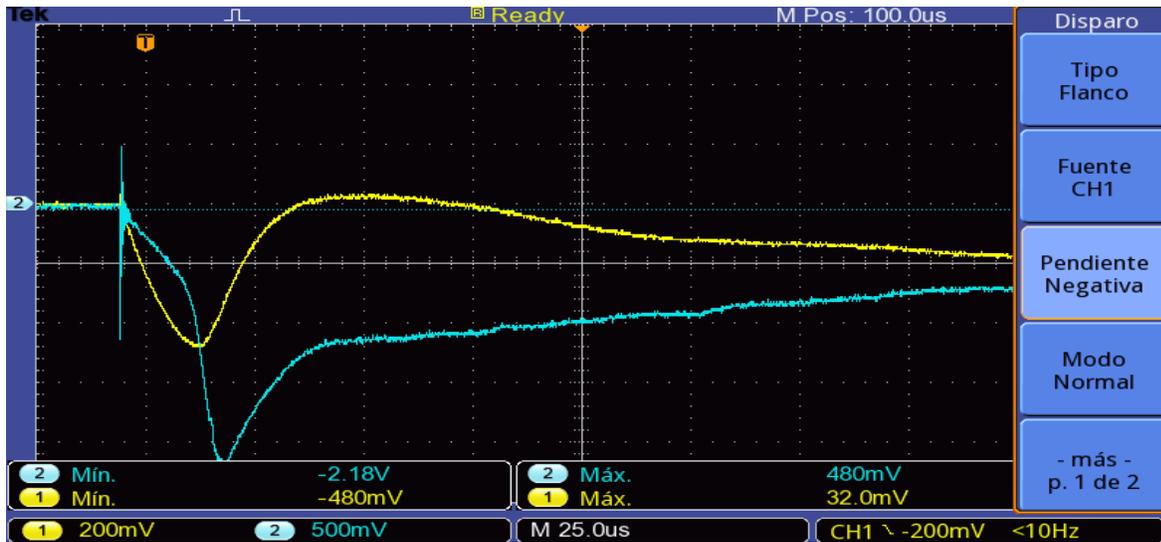
**Figura 3-4:** Esquema de circuito y ubicación de los equipos de medida.



En la figura 3-5 se observa una de las señales registradas durante la etapa de experimentación para la aplicación de impulso de corriente negativo sobre la muestra con codificación "S90". En color amarillo se registra la señal de corriente inyectada a la muestra y en color azul la señal de tensión medida sobre la muestra de tejido conductivo. Esta muestra tenía como dimensiones, ancho de 5 cm y un largo de 20 cm.

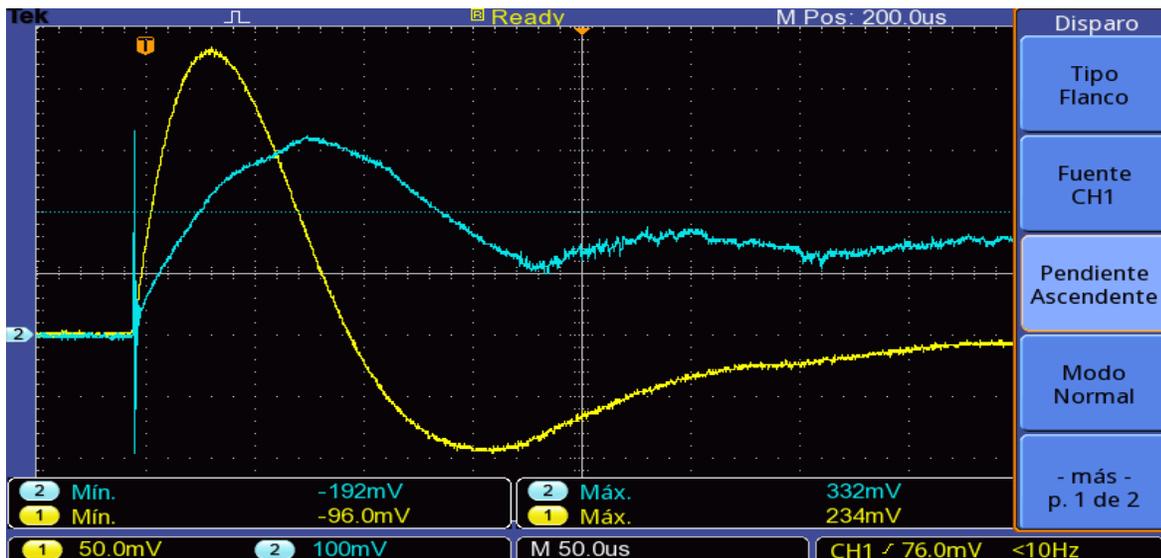
Para la implementación al igual que en el caso de impulsos con onda tipo 8/20  $\mu\text{s}$ , se redujo el efecto inductivo de los cables haciendo la medición lo más cercana a la muestra y con cables apantallados, adicional se mejoraron los contactos para reducir la posible afectación por el ruido eléctrico en los datos de corriente con el cierre del GAP.

**Figura 3-5:** Datos tomados para un impulso de corriente de polaridad negativa a muestra S89 de tejido conductor.



En la figura 3-6 se muestran las señales de tensión (azul) y corriente (amarilla) registradas para un impulso de corriente positivo aplicado sobre la muestra "S70". Esta muestra tenía como dimensiones ancho de 5 cm y un largo de 20 cm.

**Figura 3-6:** Datos tomados para un impulso de corriente de polaridad positiva a muestra S70 de tejido conductor.



---

Se realizan aproximadamente 90 aplicaciones de impulsos de corriente y registro de mediciones a muestras diferentes, distribuidas en varias sesiones de uso de los espacios del laboratorio. Dentro de las muestras se consideraron dos tipos de geometrías. Un tipo de muestras tienen un ancho de 10 cm y largo de 20 cm y otro tipo de muestras 5 cm de ancho y 20 cm de largo, el detalle de esta clasificación de muestras y su análisis se muestra en el capítulo 4. De esta manera se pretende identificar las variaciones que se puede tener en la relación de corriente vs tensión a partir de mayores áreas de contacto y de conducción de la corriente tipo rayo. Es decir, realizar una comparación de diferentes densidades de corriente e incluso con la variación de los tipos de impulsos determinar la posible afectación del  $di/dt$  sobre las muestras de tejido conductivo.

En el anexo A, se explica el detalle de los componentes utilizados para la implementación de los generadores de impulsos de corriente. Adicionalmente en el anexo se describe el protocolo de pruebas diseñado y ejecutado en la elaboración de los ensayos de laboratorio para lograr una repetibilidad en las mediciones y condiciones. Por otro lado, en el anexo B se describe el proceso de verificación del sistema de medición realizando una comparación con patrones calibrados y de esta manera garantizar una trazabilidad de las mediciones al sistema internacional de unidades.



## 4. Análisis de resultados

En este capítulo a la relación de tensión y corriente que se da sobre los registros obtenidos a partir de los ensayos de laboratorio se llamará impedancia y su posible variación a partir de las corrientes inyectadas sobre las muestras de tejido como impedancia dinámica. Esto debido a la identificación de cambios en el comportamiento de los registros de tensión vs corriente obtenidos en el laboratorio y que permiten identificar que hay una pérdida de la relación lineal de estas dos variables para ciertos valores de corriente inyectada.

Por medio de cálculos y el tratamiento de las señales registradas a través del trabajo experimental, se identifican parámetros importantes como la impedancia a partir de datos de tensión y corriente, densidad de corriente a partir del ancho de las muestras, la variación de corriente respecto al tiempo para el primer ciclo de aplicación de la corriente inyectada a las muestras en el primer ciclo.

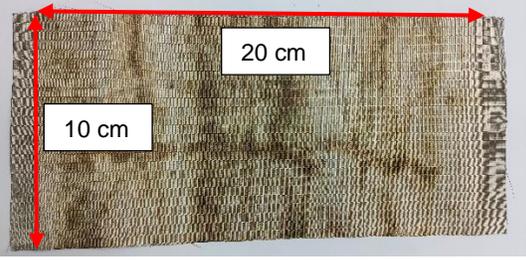
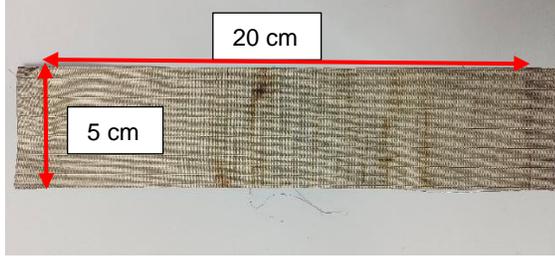
Por otro lado, se realiza una estimación de la energía inyectada sobre las muestras, por medio de la geometría y características técnicas de fabricación del material, de esta manera se busca hacer una correlación entre estos resultados calculados y los obtenidos en la parte experimental para describir las variaciones de la impedancia y los mecanismos de conducción en los tejidos conductivos.

## 4.1 Análisis de los registros.

A partir de los datos registrados en la parte experimental llevada a cabo en el laboratorio, se procedió a realizar el análisis correspondiente de las señales. Para realizar el tratamiento de los datos y reducir el ruido se implementa un código de Matlab el cual permite realizar un filtrado de los datos y hacer el tratamiento matemático adecuado de las señales. Para suavizar las curvas como las presentadas en el capítulo anterior, se implementó la media móvil a partir de un código y una corrección de corrimiento, el detalle de este tratamiento de las señales se describe en el anexo C.

La clasificación de las muestras de tejido bajo ensayo se realiza en dos grupos muestras tipo 1 y tipo 2, esto es según las dimensiones de la muestra, el detalle se muestra a continuación y como se menciona en el capítulo 3. Para las muestras se dejó un centímetro adicional a cada lado de su longitud (lado más largo) esto para garantizar la correcta conexión de los tejidos con los electrodos de prueba (la conducción de corriente tipo rayo se da a través de la longitud, es decir de manera horizontal de como se muestran en la tabla 4-1).

**Tabla 4-1:** Clasificación de muestras según dimensiones.

Muestras tipo 1	Muestras tipo 2
Ancho: 10 cm; Longitud: 20 cm	Ancho: 5 cm; Longitud: 20 cm
	

En las Tablas 4-2 y 4-3 se puede observar el resumen de los datos analizados por medio del software Matlab para algunas de las muestras bajo ensayo con forma de onda  $8/20 \mu\text{s}$ .

**Tabla 4-2:** Datos para ensayos con onda 8/20  $\mu$ s sobre muestras tipo 1.

Polaridad	Muestra	Corriente [kA]	Tensión [kV]	Impedancia Z [m $\Omega$ ]	Max J [kA/cm]	Energía [J]
Positiva	S1	4,6	0,40	123,27	0,64	480,4
	S2	15,77	5,64	94,04	1,58	2134
	S3	16,17	4,59	72,44	1,62	2396
	S5	18,30	8,69	126,92	1,83	2577
Negativa	S6	19,12	8,93	138,01	1,91	2886
	S7	17,03	6,28	75,76	1,70	2532
	S8	16,75	6,03	68,77	1,67	2551
	S10	7,9	1,82	102,36	0,82	785,2

En la tabla se identifican parámetros importantes para las muestras como la corriente pico (se trabaja con el valor absoluto, sabiendo que hay impulsos negativos y positivos), la tensión máxima que alcanza la muestra bajo ensayo entre sus terminales de conexión, la impedancia estimada al pico de corriente de manera matemática, la densidad de corriente máxima asociada al ancho de las muestras y la energía estimada a partir de los registros al máximo de la corriente. Esta energía se determinó por medio de Matlab por medio de la integración de la corriente por el método del trapecio.

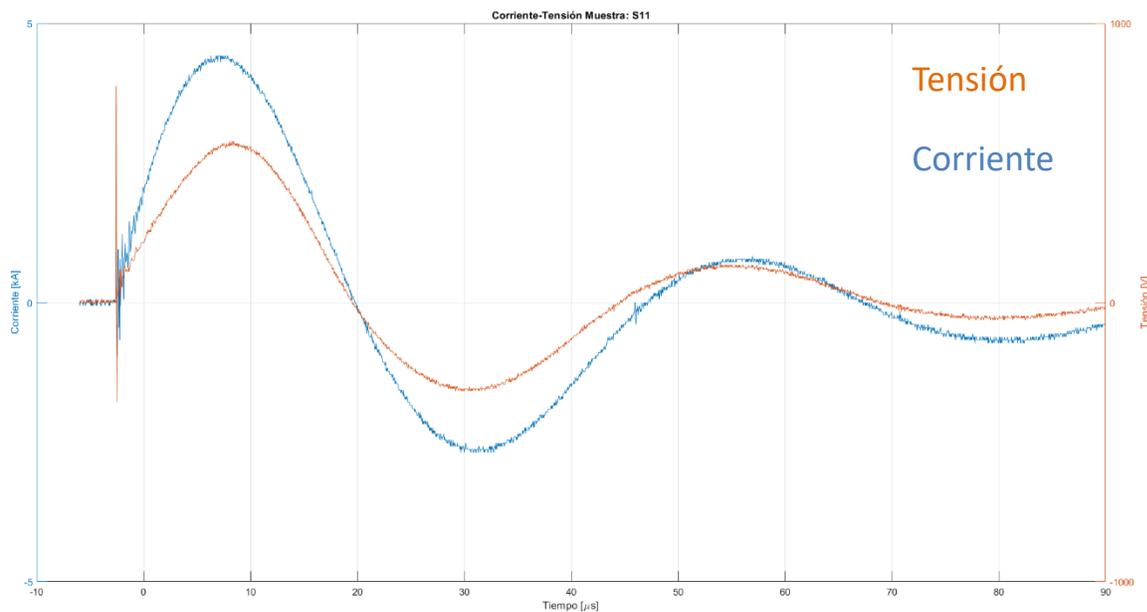
**Tabla 4-3:** Datos para ensayos con onda 8/20  $\mu$ s sobre muestras tipo 2.

Polaridad	Muestra	Corriente [kA]	Tensión [kV]	Impedancia Z [m $\Omega$ ]	Max J [kA/cm]	Energía [J]
Positiva	S11	4,40	0,57	126,41	0,88	212,7
	S14	6,25	2,97	162,48	1,25	353,5
	S18	6,88	0,66	91,90	1,38	518,7
	S20	5,55	0,60	102,28	1,11	339,4
Negativa	S22	5,53	0,67	116,33	1,11	332,8
	S27	4,71	0,51	105,58	0,94	247,0
	S29	6,77	1,71	128,27	1,35	461,4
	S33	10,20	8,99	249,06	2,04	634,8

Estos datos fueron obtenidos del análisis de las señales realizado en Matlab, se leyeron los archivos guardados desde el osciloscopio en formato .csv y se procedió al tratamiento de las señales de tensión y corriente registradas para cada uno de los ensayos. En la Figura 4-1 se puede observar la corriente y la tensión para la muestra S11.

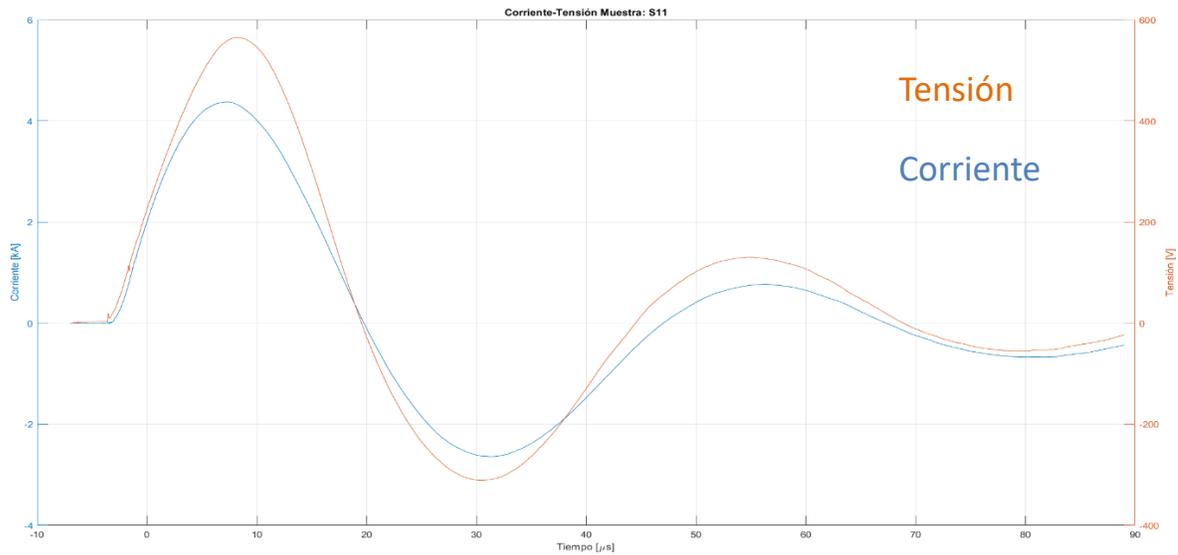
La figura 4-2 es la misma señal luego del procesamiento que se realizó para cada uno de los registros como se puede ver en detalle en el Anexo C. Podemos observar un comportamiento puramente resistivo de la muestra ya que no se observa al menos para el primer ciclo de la corriente un desfase entre la tensión y corriente. Lo que concuerda con experimentos anteriores en donde no se ven muestras o evidencias de deterioro en la superficie del tejido conductor.

**Figura 4-1:** Datos de tensión y corriente para la muestra S11 (datos primarios).



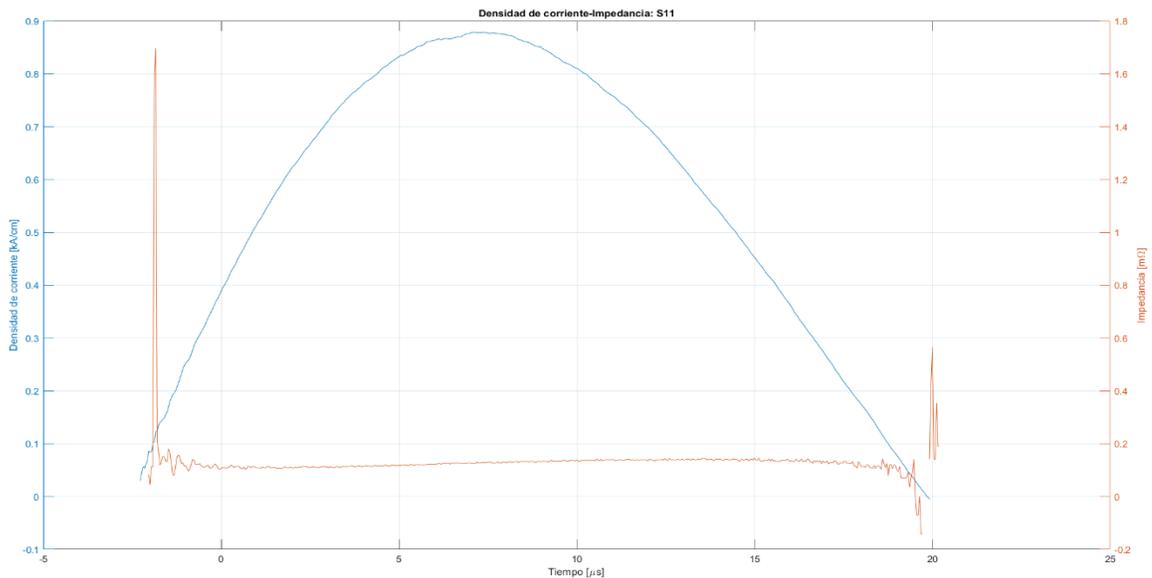
Con las señales de tensión y corriente para cada una de las muestras ensayadas se procedió a hacer una estimación de la impedancia sobre el primer ciclo de las señales, esto haciendo punto a punto la división de la tensión y la corriente por medio de MATLAB

**Figura 4-2:** Datos de tensión y corriente para la muestra S11 datos filtrados.



En la Figura 4-3, podemos observar la estimación de la impedancia para la muestra S11, donde se puede observar que para ese primer ciclo se tiene un valor promedio aproximado de 130 mΩ. Esta impedancia obtenida punto a punto, se grafica en función de la densidad de corriente, la cual se obtiene de los registros de la corriente sobre la muestra, dividida por el ancho de la muestra que para este caso es de 5 cm.

**Figura 4-3:** Estimación de la impedancia para la muestra S11 en función de la densidad de corriente.



De la misma manera que se hizo para los ensayos con onda 8/20  $\mu\text{s}$ , se realizaron las mediciones y análisis de resultados para las muestras ensayadas con la onda de corriente de mayor energía. En la Tabla 4-4 se registran los datos medidos (tensión y corriente) y los calculados o determinados a partir de las señales y su procesamiento para las muestras tipo 1, mientras que en la Tabla 4-5 se muestran los resultados de los ensayos realizados a las muestras tipo 2.

**Tabla 4-4:** Datos para ensayos con onda de mayor energía con muestras tipo 1.

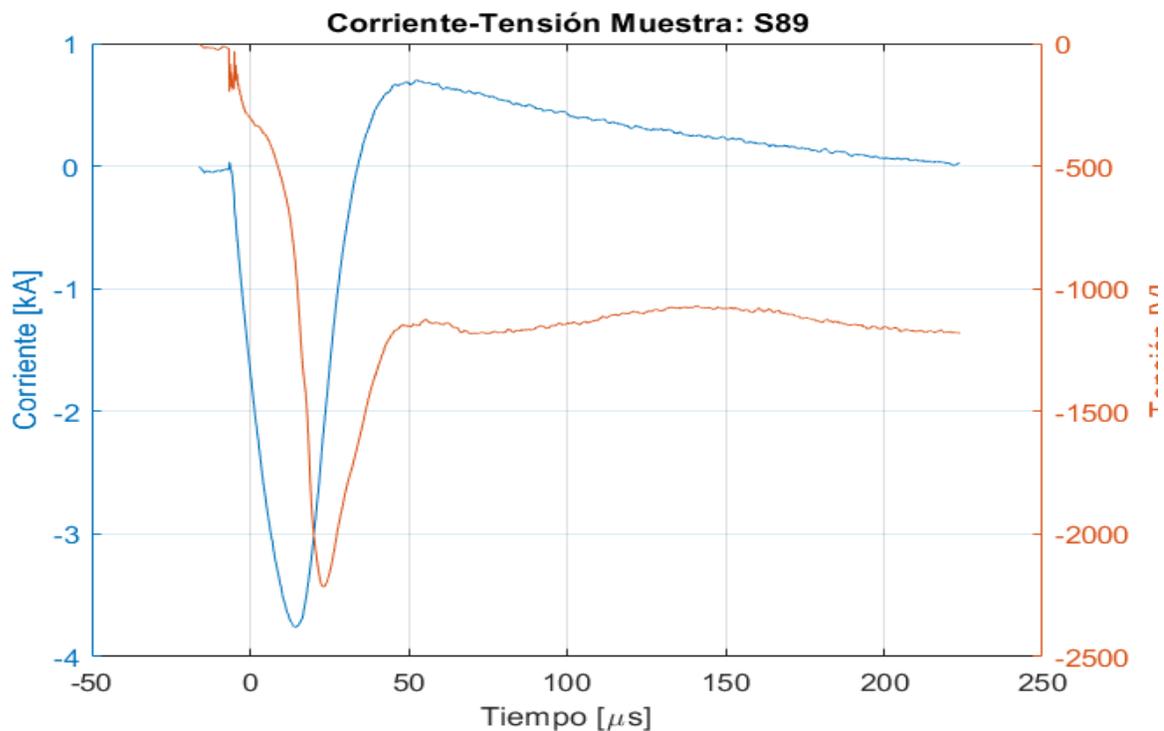
Polaridad	Muestra	Corriente [kA]	Tensión [V]	Impedancia Z [m $\Omega$ ]	Max J [kA/cm]	di/dt [kA/ $\mu\text{s}$ ]
Positiva	S54	1,81	183,26	90,65	0,18	0,04
	S38	3,89	978,22	96,53	0,39	0,10
	S39	5,62	1658,40	103,43	0,56	0,17
Negativa	S44	2,09	170,29	73,40	0,21	0,05
	S46	3,97	900,61	94,70	0,40	0,10
	S50	5,71	1849,90	105,98	0,57	0,17

**Tabla 4-5:** Datos para ensayos con onda de mayor energía con muestras tipo 2.

Polaridad	Muestra	Corriente [kA]	Tensión [V]	Impedancia Z [m $\Omega$ ]	Max J [kA/cm]	di/dt [kA/ $\mu\text{s}$ ]
Positiva	S77	4,05	1694,20	229,41	0,81	0,174
	S73	2,99	1364,80	182,26	0,60	0,107
	S69	1,64	315,12	138,42	0,33	0,045
	S81	0,88	145,57	111,85	0,18	0,023
Negativa	S60	4,22	1866,00	207,48	0,84	0,194
	S64	2,99	1174,50	192,45	0,60	0,117
	S67	1,61	355,40	143,21	0,32	0,046
	S87	0,84	120,11	142,11	0,17	0,020

En la figura 4-4 se puede observar los registros de las señales de tensión vs corriente ya procesadas para la muestra S89 ensayada con una onda de más energía. Se puede identificar que no presentan un comportamiento similar a las muestras ensayadas con forma de onda de 8/20  $\mu\text{s}$ . Sin embargo, estos ensayos permiten observar las afectaciones que las muestras de tejidos conductivos tienen cuando una energía mayor pasa a través de ellos.

**Figura 4-4:** Datos de tensión y corriente para muestra S89 de tejido conductivo.

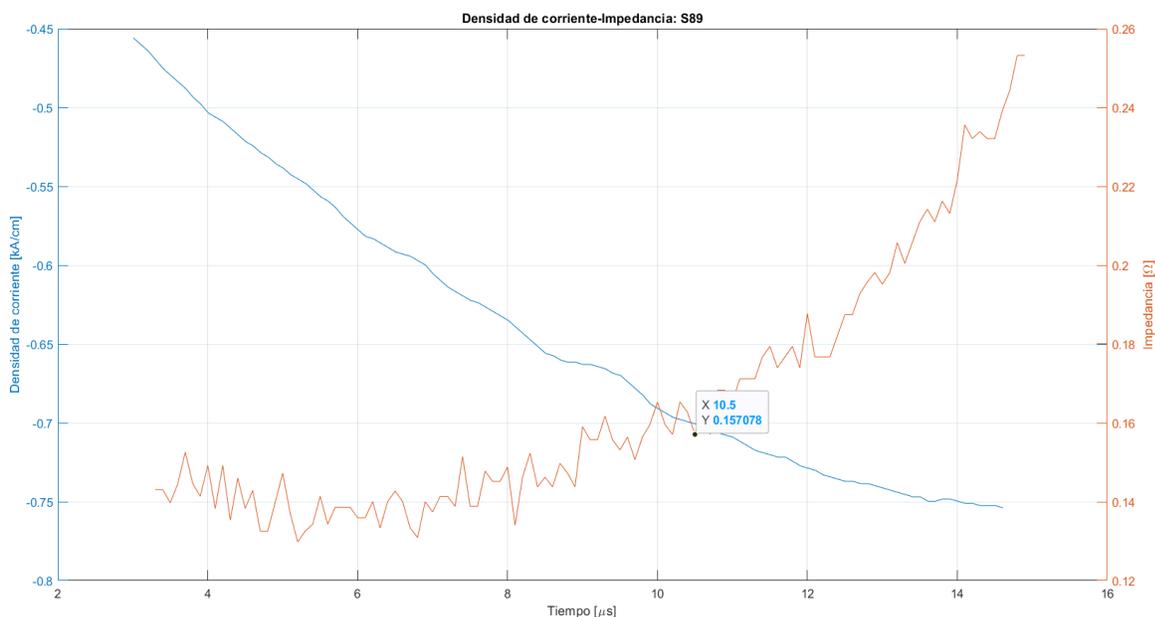


Como se puede observar en la figura 4-4 para la muestra S89 se observa una variación en el comportamiento de la gráfica tensión vs corriente, esto es debido a que el nivel de corriente y por ende de energía es mayor, esto hace que el comportamiento del tejido cambie e incluso se vean marcas en la superficie del tejido, estas afectaciones se pueden ver con mayor detalle en la evaluación por energía.

En la figura 4-5 se puede observar la gráfica de impedancia para la muestra S89 calculada a partir de los puntos de tensión y corriente y graficada en función de la densidad de corriente que, igual que en el caso de  $8/20 \mu\text{s}$  es relacionar la corriente con el ancho de la muestra, que para este caso fue de 10 cm. Como el comportamiento de la relación tensión vs corriente para este tipo de muestras era diferente, el criterio para graficar la impedancia es cuando se observaba una variación considerable es decir de más de 20%.

Cabe resaltar que las gráficas mostradas corresponden al análisis sobre una sola muestra bajo ensayo, se escoge la gráfica más representativa de las cerca de 90 que se obtuvieron en el proceso de experimentación.

**Figura 4-5:** Estimación de la impedancia para la muestra S89 en función de la densidad de corriente.



Durante los ensayos se observaron descargas superficiales, y pequeños arcos que entran en una etapa de conducción diferente dada por el efecto térmico y la sublimación de parte del material conductivo del tejido, lo cual se explicará con más detalle a continuación.

## 4.2 Análisis por energía.

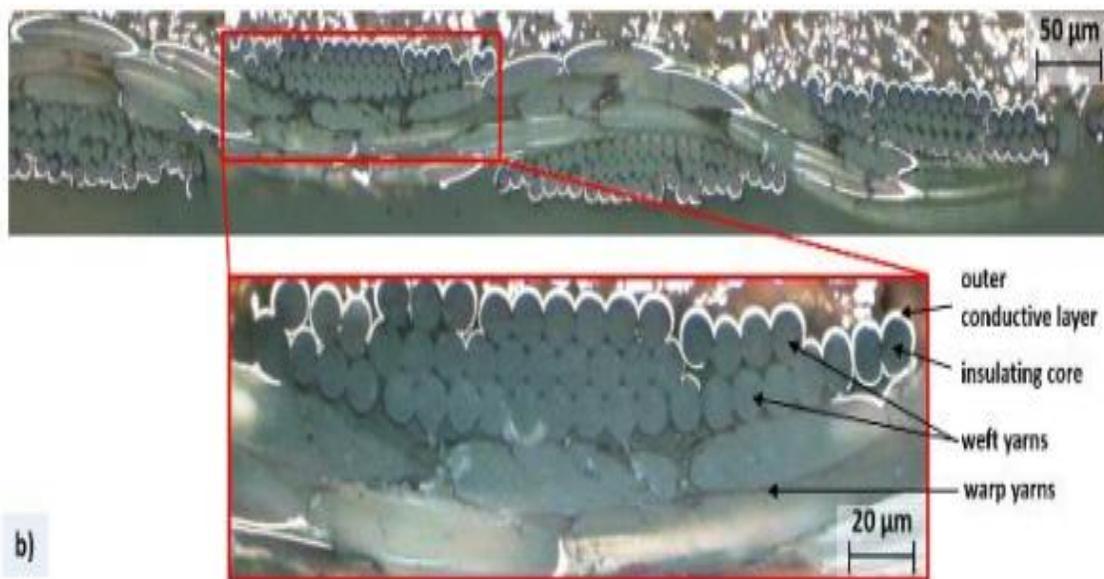
Dentro del tratamiento matemático realizado en Matlab para las señales registradas para cada una de las muestras, se realizó un análisis de la energía para cada una de las muestras. Esto se realizó por medio de la relación  $i^2t$ , al ser una señal discreta (tener puntos tomados por el muestreo del osciloscopio, se procedió a generar un código el cual realiza la sumatoria de los trapezoides formados para cada delta con un ancho determinado el cual era la separación de los datos. El detalle del código para el calculo de energía se puede ver en el Anexo C.

La estimación de la energía por medio de MATLAB se realizó tomando como base las muestras que fueron sometidas a impulsos de corrientes con amplitudes relativamente bajas, es decir, muestras cuyas graficas de tensión y corriente respecto al tiempo muestran un comportamiento puramente resistivo y adicional visualmente no tengan evidencias de deterioro. Para este tipo de muestras se calculó la energía bajo el área de la curva de la corriente sobre el primer ciclo. De aquí se obtienen valores entre los 200 J y 250 J, es decir que para estos niveles de energía no se observa una variación en la impedancia de las muestras de tejidos conductivos ni afectaciones sobre su superficie.

A partir de estos valores de energía obtenidos del procesamiento de las señales tomadas durante la parte experimental, se procedió a realizar la estimación de energía sobre las muestras de tela que fueron sometidas a ensayos, considerando la geometría y características propias del material. De esta manera relacionar los resultados obtenidos en el laboratorio y asociarlos a la variación de la impedancia de los tejidos conductivos.

Como primer paso para este cálculo de la energía, se determina la geometría de las muestras de tejido conductor. Esto se realizó inicialmente con las dimensiones de ancho y de largo mencionadas anteriormente. Para el primer tipo de muestras fue 5 cm de ancho y 20 cm de largo. Como se observa en la Figura 4-6 de la microscopía realizada sobre los tejidos conductivos bajo ensayo, para el espesor de la tela se pueden observar hasta 6 hilos entrelazados, 3 en sentido de la urdimbre y 3 en sentido de la trama.

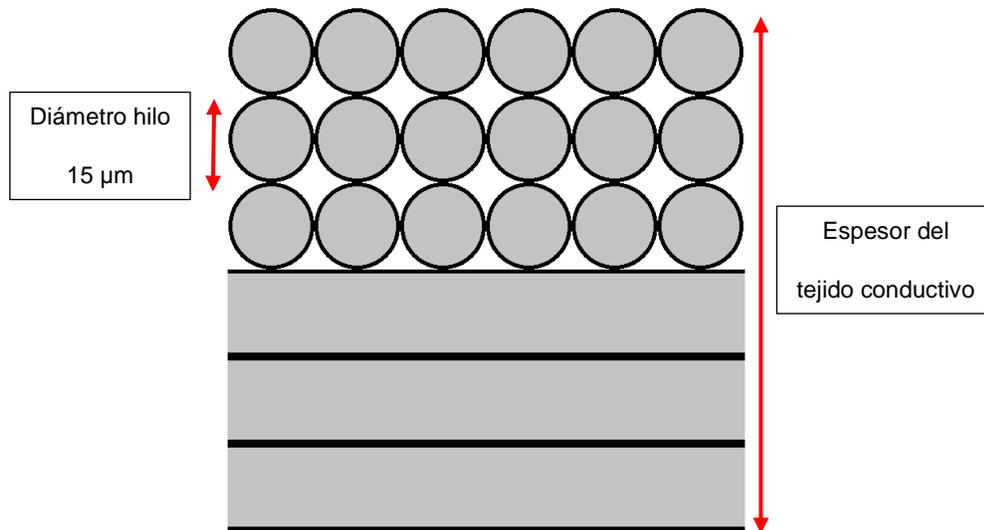
**Figura 4-6:** Detalle del espesor de las muestras de tejido conductor a partir de microscopía.



Fuente: Cristancho J, 2023 [29]

En la Figura 4-7 se observa un gráfico de un modelo que representa el máximo espesor que podría tener el tejido conductor según su forma de construcción, teniendo en cuenta los 6 hilos y el diámetro de cada uno de estos.

**Figura 4-7:** Estimación del espesor de las muestras de tejido conductivo a partir de microscopias y datos de fabricante.



Sin embargo, como se especifica en el Capítulo 1, el hilo internamente tendrá un alma o núcleo de poliéster y solo una capa de recubrimiento de constantán (denominación comercial dada a la aleación de níquel y cobre). De los 15  $\mu\text{m}$  del diámetro del hilo, se tiene por datos del fabricante que 13,8  $\mu\text{m}$  es el diámetro del hilo de poliéster. Pasando el diámetro a términos del radio para tener la relación de áreas de sección transversal por material, tenemos que el área de sección transversal del constantán sería la diferencia entre el área del hilo completo y el área del poliéster.

$$A_{\text{constantan}} = \text{Área}_{\text{hilo}} - \text{Área}_{\text{poliéster}}$$

$$A_{\text{constantan}} = (\pi r_{\text{hilo}}^2 - \pi r_{\text{poliéster}}^2) = \pi((15 \mu\text{m})^2 - (13,8 \mu\text{m})^2) \quad (4.1)$$

$$A_{\text{constantan}} = 27,14 \mu\text{m}^2$$

Con este valor de área trasversal de Constantán por hilo se procede a representar la muestra de tejido conductivo como una placa uniforme de material conductivo. Para esto,

como el ancho y largo de las muestras de tejido conductor lo da la suma de los diámetros de la cantidad de hilos que se encuentran en estas dimensiones, se realiza una relación entre la forma de circunferencia de los hilos a un rectángulo con lado el diámetro completo del hilo. Esto se realiza igualando el área del rectángulo al área del constantán calculada y fijando el ancho del rectángulo al mismo ancho del hilo completo, es decir 15  $\mu\text{m}$ .

$$A_{\text{rectangulo}} = \text{Ancho} * \text{Altura}$$

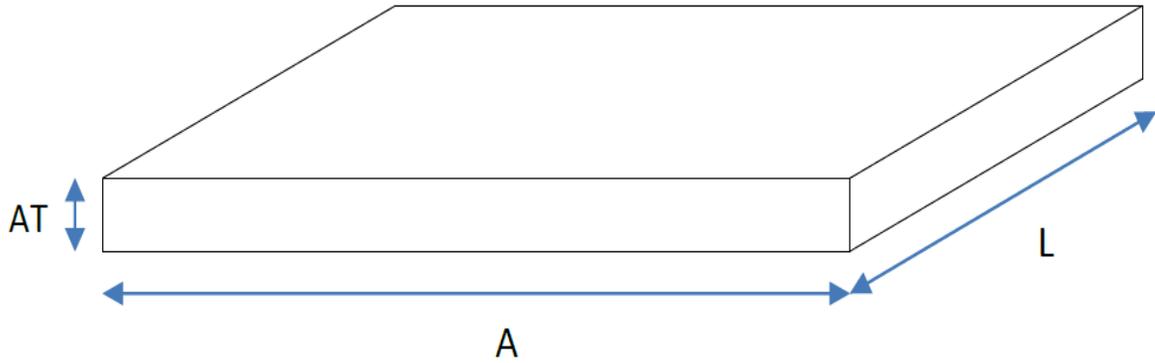
$$27,14 \mu\text{m}^2 = (15 \mu\text{m}) * \text{Altura} \rightarrow \text{Altura} = \frac{27,14 \mu\text{m}^2}{15 \mu\text{m}} = 1,81 \mu\text{m} \quad (4.2)$$

Esta altura se relaciona con el espesor del rectángulo de Constantán equivalente a un hilo de tejido conductor. Como vemos en la Figura 4-7 el espesor de la tela estará dado por 6 hilos en su punto máximo, sin embargo, en la Figura 4-6 se alcanza a observar que hay zonas que, por el entretejido entre la urdimbre y trama, este grosor varía y se reduce en algunas de las zonas.

Es por este motivo que se asume un ancho promedio en todas las dimensiones de la tela de aproximadamente 9  $\mu\text{m}$ . Con este espesor promedio y con los datos de ancho y de largo de las muestras de tejido conductor se busca representar la tela como una lámina completa de constantán como se representa en la figura 4-8.

Cabe resaltar que este modelo desprecia la reducción en el contacto de los hilos en el proceso de fabricación y entretejido de los mismos, lo que puede generar mayores afectaciones sobre el tejido cuando por ellos circulan corrientes tipo rayo. Sin embargo, es un modelo adecuado para identificar las regiones de variación de la impedancia dinámica de los tejidos.

**Figura 4-8:** Representación de la muestra de tejido conductor como lámina de material conductor.



A partir de fichas técnicas de fabricantes de constantán, material del cual están hechos los hilos de los tejidos conductivos, se identifican los parámetros necesarios para realizar el cálculo de la energía necesaria para realizar el cambio de estado, relacionado al punto de fusión del material. En la Tabla 4-7 se resumen los parámetros tenidos en cuenta para el cálculo de la energía que relacionada al punto de fusión del material.

**Tabla 4-6:** Datos para el cálculo de la energía y su relación con el punto de fusión.

Parámetro	Valor	Unidades
Densidad	8,9	$g/cm^2$
Punto de fusión	1280	$^{\circ}C$
Calor específico	410	$\frac{J}{kg * ^{\circ}K}$
Volumen	$9 \times 10^{-8}$	$m^3$
T. ambiente promedio	20	$^{\circ}C$

Con los datos de la tabla 4-6 se busca calcular la energía necesaria para la cual empieza el tejido conductor empieza a tener afectaciones en sus propiedades por hilos que llegan a su punto de fusión. Lo primero es calcular la masa a partir del volumen hallado anteriormente y la densidad del material y luego de esto calcular la energía como se muestra a continuación.

$$m = d * v = 8,9 \frac{g}{cm^3} * 9 \times 10^{-8} m^3 = 8,1 \times 10^{-4} kg$$

$$Energía = masa * calor específico * (T_{fusión} - T_{ambiente}) \quad (4.3)$$

$$Energía = 8,1 \times 10^{-4} kg * 410 \frac{J}{kg * ^\circ K} * (1280 ^\circ C - 20 ^\circ C)$$

$$Energía = 416 J$$

Se observa que a partir de 416 J aplicados sobre una muestra de tejido conductor de dimensiones 5 cm por 20 cm se comienza a tener afectación del material, esto debido a que como el cálculo se relaciona con la temperatura de fusión, se establece que el material a partir de este punto empieza a perder sus propiedades y a generar una posible sublimación del contenido conductor de los hilos.

Se realizó el mismo procedimiento para muestras de dimensiones 10 cm por 20 cm y el valor de energía que se encuentra es de 832 J. Esto debido a que se asume el mismo espesor de la tela, pero las dimensiones del ancho varían. Se puede observar entonces que corresponde al doble de la energía que es requerida para afectar una muestra de material con la mitad de área. Lo que permite identificar que el nivel crítico de energía inyectada a los tejidos con hilos conductivos depende de la cantidad de material que pueda distribuir la conducción de la corriente.

A partir de estos resultados de la estimación del nivel crítico de energía para la fusión del material y los obtenidos a partir de las señales registradas en el proceso experimental, se identifican 3 regiones en donde se presentan variaciones de la impedancia del tejido con hilos conductivos. Estas regiones descritas a continuación están relacionadas a las muestras tipo 2, es decir muestras con dimensiones de 5 cm de ancho y 20 de largo, sin embargo, como se observó anteriormente es posible realizar la identificación de las regiones de variación de impedancia en función del área del material. Estas regiones se mencionan a continuación:

- Región 1.

Comportamiento puramente resistivo, sin evidencia de deterioro de los hilos del tejido conductivo, este comportamiento se presenta para niveles de energía inyectados a las muestras de tejido conductivo hasta los 240 J aproximadamente. Para esta región la impedancia relacionada por el fabricante de hasta 50 m $\Omega$  es válida para el análisis.

- Región 2.

Para niveles de energía inyectada sobre las muestras entre los 240 J y los 416 J aproximadamente, se empieza a evidenciar deterioro de partes del tejido conductivo. Se observan quemaduras y su comportamiento deja de ser resistivo. Sin embargo, en esta región aún se observa conducción de la corriente tipo rayo por el tejido. El valor de 240 J es un valor obtenido a partir del análisis de las señales registradas durante los ensayos y evaluadas sobre el primer ciclo de corriente.

- Región 3.

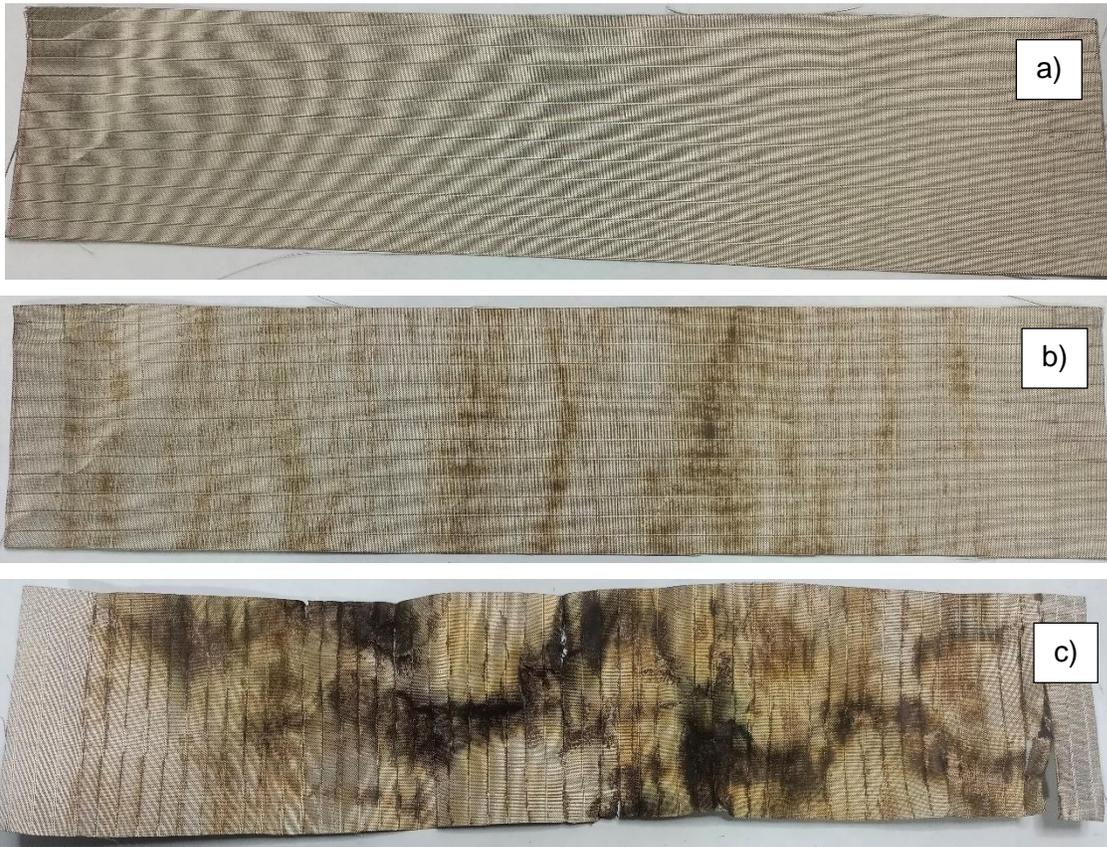
Para niveles de energía mayores a los 416 J aproximadamente, se intensifica el deterioro, incluso hay discontinuidades en la tela por pérdida de material. No se evidencia un comportamiento resistivo en la relación tensión corriente del tejido y por el nivel de energía

se produce sublimación del constantán (cambio de fase) lo que genera vapores y pérdida del material. Estos vapores generan un nuevo mecanismo de conducción por “plasma” es decir se ioniza la superficie cercana al tejido, lo que permite que el fenómeno ayude a la conducción segura de la corriente tipo rayo.

A continuación, en la figura 4-8 se puede observar el detalle de tres muestras tipo 2, a las cuales se les aplico impulsos de corriente tipo 8/20  $\mu$ s.

**Figura 4-9:** Fotografías de muestras luego de los ensayos de laboratorio.

- a) Energía aplicada aproximada de 240 J
- b) Energía aplicada aproximada de 370 J
- c) Energía aplicada aproximada de 540 J



---

Es evidente la progresión en el deterioro de los tejidos conductivos a partir de la conducción de mayores niveles de energía, al punto que para el caso c) de la figura 4-8 el material queda “rígido” y propenso a cuartearse o desgarrarse, sin embargo, logra dar un camino a la corriente tipo rayo.

Finalmente se observa que la determinación del comportamiento de la impedancia en tejidos conductivos depende de la energía que circula por el material, es decir que la variación en la impedancia estará dada por el cuadrado de la corriente inyectada, en el tiempo de exposición de los tejidos conductivos a la corriente tipo rayo. Cuando se consideren muestras mas grandes los efectos de la energía sobre estos será directamente proporcional puesto que a mayor cantidad de material conductor se pueden aplicar mayores niveles de corrientes tipo rayo. Esto permite pensar en la aplicación de este tipo de tejidos para el diseño y construcción de refugios portables contra rayos.



## 5. Conclusiones y recomendaciones

### 5.1 Conclusiones

El modelo del tejido conductor como elemento no lineal en ATP permite caracterizar el comportamiento ante la circulación de diferentes magnitudes de corriente tipo rayo, sin embargo, esta limitado a la evaluación hasta el máximo de la corriente. Por otro lado, el procedimiento implementado permitió garantizar las mismas condiciones de ensayos para la totalidad de las muestras ensayadas.

El comportamiento del tejido depende de la variación de la corriente en el tiempo, es decir que si la corriente que pasa a través del tejido conductor es rápida ( $8/20 \mu\text{s}$ ) permite llegar a niveles más altos de corriente pico, mientras que para ondas más “lentas” o con un  $di/dt$  más bajo en su primer pico, la corriente máxima es menor. Es decir que independiente de la onda hay unos valores de energía que condicionan el comportamiento del material.

Aunque en los modelos el comportamiento del tejido se asume como una lámina conductora, el contacto entre los hilos entrelazados afecta el comportamiento, esto debido a las pequeñas fallas que se pueden producir en los puntos de contacto y que se hacen evidentes en la inspección visual, como marcas perpendiculares a la dirección de conducción de la corriente. Es decir, la construcción del tejido juega un papel importante en los puntos de contacto, lo que permite determinar que hilos de mayor tamaño podrían reducir estas pequeñas fallas en la superficie de los tejidos.

El tejido con hilos conductivos presenta un comportamiento de muy baja resistencia, esto siempre y cuando no se superen los niveles críticos de energía determinados a partir de las mediciones y experimentos. Esto permite que el comportamiento de este tipo de tejidos conductivos pueda ser adecuado para la construcción de refugios portables para la protección antes descargas eléctricas atmosféricas (rayos) y poder dar un camino seguro a las corrientes para la protección de las personas.

La evaluación por energía de los tejidos con hilos conductivos permite identificar aproximadamente 3 zonas de comportamiento asociadas a la variación de la impedancia, lo que se conocería como impedancia dinámica. Dentro de estas zonas podemos hablar para el caso de muestra de ancho de 5 cm, que existe una primera zona de comportamiento puramente resistivo y sin afectaciones sobre las muestras hasta los 240 J, luego hay una zona en la que empiezan a haber afectaciones sobre las muestras de tejidos ya que se aproxima al nivel de energía para producir la fusión del material, sin embargo sigue habiendo una conducción solamente por los hilos y esta región se considera que sería hasta los 416 J. Finalmente aparece una última región para energías mayores a los 416 J en la que se supera la temperatura de fusión, los hilos empiezan a perder propiedades e incluso a sublimarse lo que genera una conducción por “plasma” es decir por el vapor generado por la sublimación del material en la superficie del tejido.

La sublimación del material, como se confirmó en la parte experimental y teórica, si bien deteriora el material completamente, permite aun así realizar una conducción de toda la corriente tipo rayo, lo que permite ver que este tipo de tejidos podría cumplir su función de conducción segura de las corrientes tipo rayo al ser implementadas en refugios portables de protección contra rayos.

## 5.2 Recomendaciones

Identificar otras posibilidades de modelo no lineal del tejido conductivo que no este restringido al primer ciclo de la corriente de esta manera poder identificar la afectación de los siguientes ciclos en el comportamiento de los tejidos. Poder mejorar el modelo del tejido con simulaciones de elementos finitos en donde se puedan identificar los efectos térmicos que afectan en el comportamiento de la impedancia.

Se deben realizar más ensayos de laboratorio sobre muestras de este tipo de tejido con hilos conductores de diferentes tamaños y con niveles de energía mayores, de esta manera realizar una caracterización más amplia de su comportamiento para garantizar su correcto funcionamiento en el uso final previsto que es en la construcción de refugios elaborados con tejidos conductivos.

Mejorar y estandarizar la conexión de las muestras a los electrodos del montaje a los generadores, garantizando así que la resistencia de contacto entre los electrodos y la superficie de la tela no sea considerable respecto a la impedancia a medir o determinar sobre el tejido conductivo. Una superficie de contacto mayor puede asegurar una mejor distribución de la corriente de impulso y, por ende, una reducción en la afectación en la superficie de contacto del tejido.

Se hace necesario realizar pruebas de laboratorio y la evaluación de otro tipo de tejidos conductivos, es decir tejidos que puedan tener hilos con mayor área transversal de material conductor, esto para determinar el área de capa conductora necesaria para la conducción de la corriente tipo rayo de manera segura. Incluso se recomienda revisar otro tipo de tejidos con hilos de cobre u otros materiales conductores.

Es posible que para el uso final de los tejidos en refugios portátiles se pueda implementar un sistema de refuerzo en las uniones de las caras o bajantes del refugio lo cual ayuda al proceso de conducción de las corrientes tipo rayo.

## A. Anexo: Detalle de implementación de generadores y protocolo de pruebas.

Dentro de los equipos utilizados para el montaje de los generadores de impulsos de corriente implementados y construidos para la realización de la parte experimental, en los espacios del laboratorio de alta tensión - LABE y laboratorio de alta tensión - Docente, se encuentran:

**Tabla A-1:** Equipos utilizados para la implementación del set-up de prueba.

Equipo	Especificaciones	Cantidad
Condensador (Onda 8/20 $\mu$ s)	Tensión máxima 6 kV Capacitancia 8 $\mu$ s	8
Condensador (Onda de mayor energía)	Marca: Nokia; Capacitancia: 158 $\mu$ s Tensión máxima: 8 kV	2
Inductancia	Construcción propia Inductancia: 3 $\mu$ H y 3,5 $\mu$ H	2
Diodo de alta tensión	Tensión máxima: 100 kV Corriente máxima: 100 mA	1
Transformador de alta tensión	Marca: Haefely Tensión máxima: 100 kV	1
Resistencia limitadora (Onda 8/20 $\mu$ s)	Construida en agua 50 M $\Omega$	1

Para la conexión y montaje de los componentes, se utilizaron recursos de los laboratorios de alta tensión como EMC-UN, como aisladores, cables de alta tensión, flejes de conducción de corrientes de retorno a tierra y pértigas de seguridad. De esta manera se garantizó que las condiciones del montaje fueran las más óptimas y seguras posibles.

- **Sistema de disparo controlado GAP:**

Un aspecto importante para la ejecución de los ensayos de laboratorio sobre los tejidos conductivos es el mecanismo de disparo el cual se encarga de cerrar el circuito y permitir que la energía almacenada en los condensadores de los generadores pueda transferirse a las muestras bajo ensayo.

Este mecanismo de disparo es un interruptor tipo Spark-Gap el cual consta de dos terminales metálicos los cuales están conectados al circuito de descarga del generador y una esfera metálica la cual se desplaza y realiza la unión entre los dos terminales para darle un camino a la corriente tipo rayo.

**Figura A-1:** Detalle del GAP encargado del disparo para la aplicación de los impulsos.



En la Figura A-1 se puede observar el Spark-Gap implementado para realizar los ensayos, se observan los terminales de conexión (tornillos con punta circular) y al fondo la esfera que se desplaza para realizar el contacto entre los dos puntos de diferente potencial. El control de este sistema de disparo se realiza a distancia, esto es posible por medio de un sistema de accionamiento neumático que permite por medio de un interruptor seleccionar la posición del Gap (abierto o cerrado). Esto debido a la válvula bidireccional que suministraba aire para el movimiento de la esfera entre dos posiciones.

- **Protocolo de pruebas de laboratorio:**

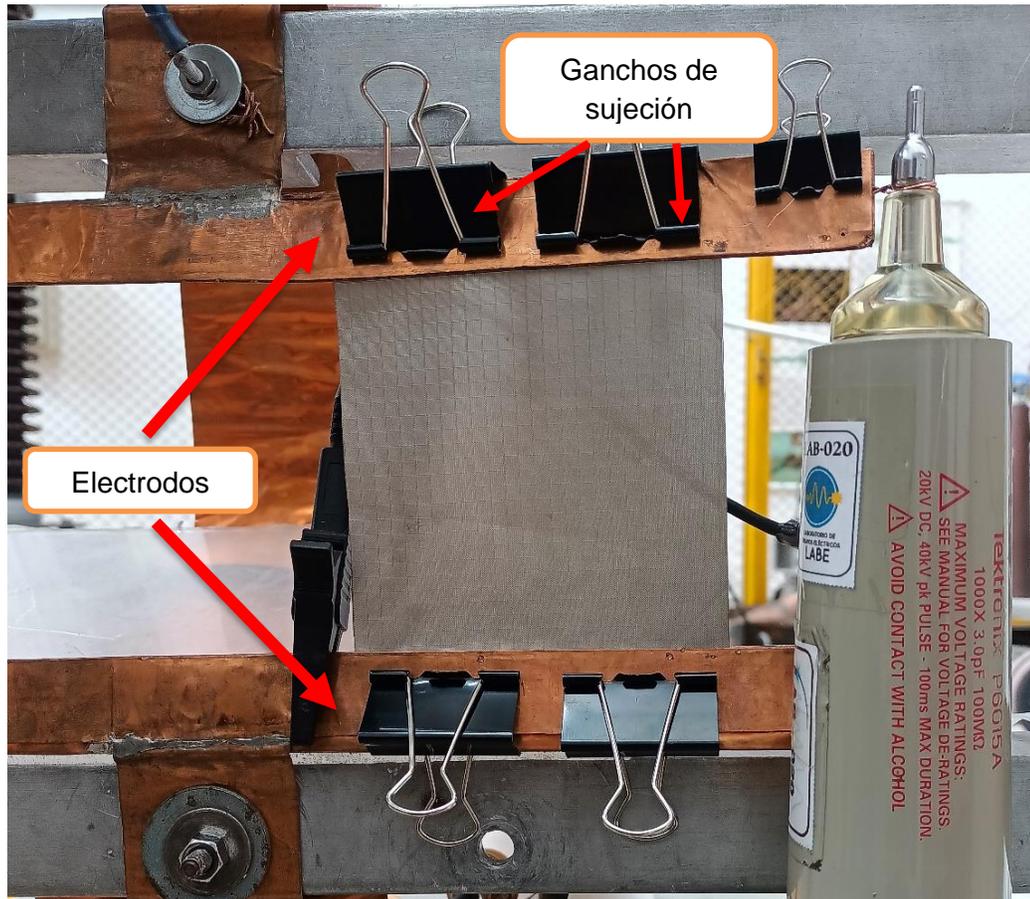
El protocolo descrito a continuación permite garantizar las mismas condiciones en la medición y en el montaje de cada una de las muestras de tejidos conductivos a ensayar en el laboratorio.

Antes de seguir el protocolo se deben cumplir aspectos básicos de seguridad en el laboratorio, como el control de acceso, la capacitación del personal respecto a la labor y los riesgos presentes. El personal que realiza las mediciones tiene capacitación y experiencia en ejecución de ensayos eléctricos de alta tensión y de alta corriente en laboratorio. Adicional el uso de equipo de protección personal mínimo como lo son, las botas dieléctricas, guantes de nitrilo y tapa oídos.

Antes de iniciar las labores, también se recomienda el realizar la programación de número de muestras a probar por sesión.

1. Asegurar la ausencia de tensión por medio de los medidores y el apagado de las fuentes de alimentación.
2. Revisar en el osciloscopio el registro de las señales de tensión y corriente del ensayo inmediatamente anterior. Por conexión USB descargar los datos del osciloscopio en un computador destinado para este fin con el software "OpenChoiceDesktop" del fabricante guardando los archivos de imagen y datos (.png y .csv respectivamente) colocando como nombre la codificación de la muestra.
3. Garantizar que el GAP se encuentra en la posición "abierto" esto por medio del sistema de control hidráulico instalado.
4. Ingresar a la zona de ensayos colocando la pértiga de seguridad generando un aterrizaje a tierra del punto de alta tensión más cercano desde la zona de ingreso.
5. Retirar la muestra ya ensayada (si aplica) retirando la sujeción mecánica (ganchos de seguridad) y desmontándola cuidadosamente del contacto con los electrodos para no generar afectaciones a la muestra de tejido conductivo.
6. Realizar el registro fotográfico o de video respectivo de la muestra ya ensayada y realizar su almacenamiento seguro.
7. Ubicar la muestra bajo ensayo nueva (codificación SXX) en los electrodos de conexión como se muestra en la Figura A-2. Ajuste la altura de los electrodos para asegurar que la superficie de contacto de cada electrodo con la muestra sea aproximadamente 1cm a cada uno de los extremos. Asegure el contacto entre la muestra y los electrodos con los ganchos dispuestos para este fin.

**Figura A-2:** Conexión de la muestra a los electrodos de alta tensión y tierra.



8. Revisar que la muestra quede completamente estirada, pero sin llegar a ser tensionada por los electrodos, para esto ajuste la altura del electrodo inferior. De esta manera no se generan esfuerzos mecánicos indebidos.
9. Dirigirse de la zona de pruebas a la zona de control y medición, retirando la pértiga de seguridad que aterriza el punto de alta.
10. Cerrar y bloquear el acceso a la zona de pruebas para evitar ingresos durante el tiempo del ensayo.

11. Verificar la escala de los canales de medición del osciloscopio (corriente canal 1 y tensión canal 2) garantizando que sean los adecuados para la adquisición de las nuevas señales y evitando posibles recortes en las señales. Garantizar que el osciloscopio tenga activada la función "Single" para la toma de las nuevas señales.
12. Verificar que el GAP se encuentre en la posición abierto para comenzar el proceso del nuevo ensayo sobre la nueva muestra.
13. Encender la consola y comenzar el periodo de carga de los condensadores con el control de la tensión de alimentación desde el variac de la zona de control.
14. Cuando se llegue a la tensión de carga deseada, apagar consola y encender el compresor de aire que controla el sistema neumático de disparo.
15. Realizar el cierre del GAP con la electroválvula de control para aplicar el impulso de corriente a la muestra. Recordar registrar la tensión de los condensadores a la cual se realizó el cierre.
16. Verificar que las señales de corriente y tensión del impulso aplicado hayan sido tomadas por el osciloscopio.
17. Repetir el procedimiento desde el paso 1 según el número de ensayos programados a realizar por jornada.

Cuando se finaliza el proceso de pruebas por jornada de trabajo, todos los elementos de control deben quedar desenergizados o desconectados, la pértiga debe estar siempre en el punto de alta tensión para evitar energizaciones accidentales y se debe cerrar el acceso a la zona de ensayos. De esta manera se realiza el control de la zona para solo ser intervenida por personal capacitado.

El área destinada para los ensayos tiene el control permanente de acceso para el personal responsable y calificado para esta labor. La parte experimental fue realizada por el estudiante de maestría y experto en ensayos de laboratorio según ISO/IEC 17025:2017 Daniel Rodríguez y con colaboración de miembros del grupo de investigación en compatibilidad electromagnética EMC-UN. La supervisión fue por parte del director del trabajo el profesor Francisco Román y del jefe técnico del laboratorio de alta tensión – LABE, profesor Francisco Amortegui.



## **B. Anexo: Verificación del sistema de medición.**

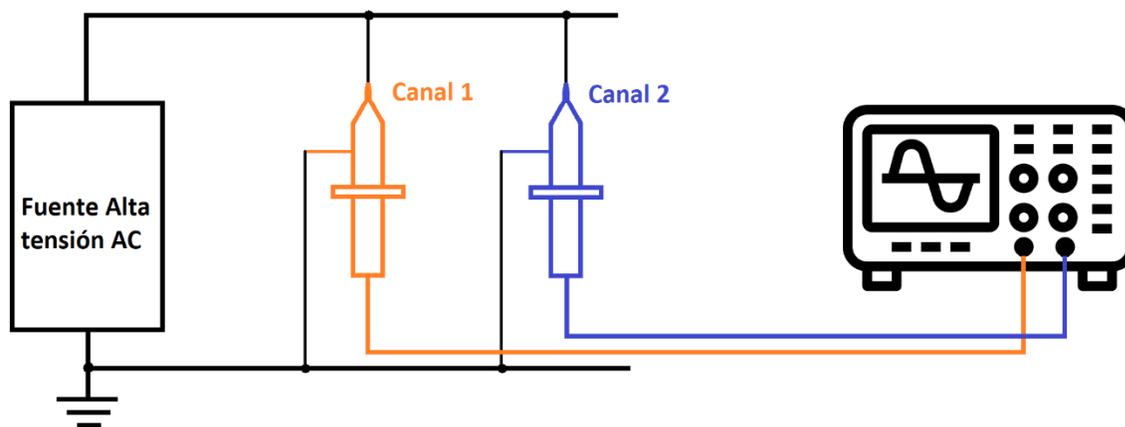
Para realizar las mediciones de las pruebas de laboratorio, se emplearon equipos del Laboratorio de ensayos eléctricos industriales – LABE y del grupo de investigación en compatibilidad electromagnética – Grupo - EMC-UN -. Estos equipos se relacionan en la tabla B1, con una breve descripción de sus características y su respectiva trazabilidad metrológica por medio de calibración o verificación.

Para que los datos de tensión y corriente de las mediciones realizadas durante las pruebas de laboratorio pudieran tener trazabilidad al SI, los equipos usados fueron calibrados con patrones de medición o verificados entre estos como se observa en la Tabla B-1, donde los equipos tienen un certificado de calibración o una verificación asociada.

Al garantizar la trazabilidad en la medición se puede corregir el error asociado y estimar la incertidumbre en la medición. A continuación, se observa el montaje para la verificación realizada entre los divisores resistivos de alta tensión, de esta manera obtener la relación de transformación con la cual se realiza el análisis de las señales de tensión, El canal 1 corresponde al Divisor de alta tensión – LABE, el cual es el valor de referencia al tener una calibración asociada y el canal 2 corresponde al Divisor de alta tensión - EMC el cual fue el equipo usado finalmente para las mediciones de todas las pruebas sobre las muestras.

**Tabla B-2:** Equipos utilizados para las mediciones de tensión y corriente.

Equipo	Especificaciones	Trazabilidad metrológica
Osciloscopio Digital Marca: Tektronix	Modelo: TBS 1102B-EDU Serial: C022961 Ancho de banda: 100 MHz Velocidad de muestreo: 2 GS/s Precisión: 3%, 2 mV	Calibración: LABE05CC9407 CMK-TFO-21039
Divisor resistivo de alta tensión – LABE Marca: Tektronix	Modelo: P6015A Tensión máxima: 20 kV CC 40 kV impulso (pulso de 100 ms) Alto ancho de banda - 75 MHz.	Calibrado LABE05CC9407
Divisor resistivo de alta tensión – LABE Marca: Tektronix	Modelo: P6015A Tensión máxima: 20 kV CC 40 kV impulso (pulso de 100 ms) Alto ancho de banda - 75 MHz.	Verificada con: LABE05CC9407
Bobina Rogowski	Con dispositivo integrador. Relación de 0,143 V/kA	Verificada con LABE05CC6319
Transformador de alta tensión y divisor	Marca: Haefely Modelo: 200 kV	Calibración: LABE05CC5586

**Figura B-3:** Esquema de conexión para la verificación del sistema de medición.

Luego de tener la conexión de la figura B-1, se procede a realizar la energización de la fuente de alta tensión y tomar las mediciones de los canales 1 y 2 del osciloscopio para con estos datos calcular la relación de transformación. Los datos tomados en la verificación se realizaron a diferentes niveles de tensión y en polaridad positiva y negativa. Esta información se consolida en la Tabla B-2.

**Tabla B-3:** Verificación divisor de alta tensión EMC.

<b>Canal 1 Divisor Labe (<math>V_{ref}</math>)</b>	<b>Canal 2 Divisor EMC</b>	<b>Relación de transformación Rx</b>
<b>Tensión [V]</b>	<b>Tensión [V]</b>	
1,92	2,16	976,57
4,16	4,56	1002,27
1,02	1,12	1000,55
12,00	13,40	983,85
-1,92	-2,16	976,57
-4,16	-4,56	1002,27
-1,02	-1,14	982,99
-12,00	-13,40	983,85
<b>Promedio de Rx</b>		<b>988.61</b>

Con análisis de los datos tomados en la verificación de los divisores y consolidados en la Tabla B-2, se calculó la relación de transformación del divisor de alta tensión EMC. Esto se realizó tomando el valor medido del canal 1 y multiplicarlo por la relación de transformación por certificado de calibración la cual es de 1098,64. El resultado de esta operación se divide por el valor medido para ese punto en el canal 2 y el resultado obtenido es la relación de transformación del Divisor EMC.

Se obtiene un valor de relación de transformación por punto de verificación. Sin embargo, se calcula el promedio de las relaciones de transformación y su desviación estándar, con lo que se observa que la dispersión de los datos no es considerable y por este motivo se determina trabajar en todas las mediciones con el promedio de la relación de transformación, el cual fue de 988,1.

Por otro lado, para las mediciones de las corrientes de impulso tipo rayo, se utilizó la relación de transformación de la bobina Rogowsky la cual es de 0,143 V/kA. Este dato es de una verificación realizada previamente para otras etapas experimentales sobre los tejidos con hilos conductivos.

## C. Anexo: Detalle del procesamiento de señales por medio de Matlab.

Para realizar el análisis de las señales de tensión y corriente obtenidas en el proceso de experimentación en el laboratorio, se utilizó el software MATLAB licenciado con la cuenta institucional de la Universidad Nacional de Colombia.

El uso de este software permitió realizar la lectura de los archivos entregados por el osciloscopio al momento de registrar las señales, los cuales son archivos tipo CSV (Comma Separated Values) en donde se consolidan los datos de tiempo, tensión y corriente separados por comas, asociados a los 2500 puntos de muestreo que tiene el equipo de medición el osciloscopio Digital Tektronix.

A continuación, en la Tabla C-1 se muestran las líneas de código implementadas en MATLAB y una breve descripción de su función. Estas líneas permitieron realizar todo el proceso de lectura y procesamiento de los datos, como el suavizado de las señales para reducir el ruido de la medición, cálculo de la impedancia, densidad de corriente, identificación de los máximos y mínimos de las señales, comportamiento del  $di/dt$  en los primeros ciclos de las señales y el cálculo de la energía asociada a cada una las señales registradas para cada ensayo sobre las muestras de tejido conductivo.

**Tabla C-4:** Relación de las líneas de código para el tratamiento de señales.

Código MATLAB	Descripción de la función
<pre>Data=csvread('S11.csv'); t=(Data(:,4)*1000000); I=(Data(:,5)/0.143); V=(Data(:,11)*988.6);</pre>	<p>Realiza la lectura de los archivos .csv y almacena las columnas de datos en vectores, tiempo, corriente y tensión (multiplicando por el valor de relación según el caso.</p>
<pre>Number=8; Coefficient=ones(1, Number)/Number; Media_I=filter(Coefficient, 1, I); Media_V=filter(Coefficient, 1, V); Delay=(length(Coefficient)-1)/2; tDelay=t-(Delay/42);</pre>	<p>Definición del coeficiente para la aplicación de la media móvil a las señales de tensión y corriente. Así como la corrección del retardo por uso de la media móvil</p>
<pre>figure() %axis tight [hAx,hLinea1,hLinea2] = plotyy(tDelay,Media_I,tDelay,Media_V); title('Corriente-Tensión Muestra: S9'); xlabel('Tiempo [\mus]'); ylabel(hAx(1),'Corriente [kA]'); ylabel(hAx(2),'Tensión [V]'); grid on;</pre>	<p>Grafica las señales de tensión y corriente filtradas con su eje de tiempo corregido por retardo.</p>
<pre>[a,b]=max(Media_I) [c,d]=max(Media_V)  m=150 J=((Media_I(m:b,:)*1000)/5); tJ=tDelay2(m:b,:); td=tDelay(m:b,:);  Imp=Media_Z(m:b,:); %tDelay3=tDelay2(m:b,:); t2=t(m:b,:); Z2=Z(m:b,:);  [e,f]=max(J)  T1=tDelay(b,:); Di=a/(T1-(-2.5))</pre>	<p>Identificación de los puntos máximos o mínimos de las señales de tensión, corriente y densidad de corriente. Cálculo de la densidad de corriente a partir del ancho del tejido conductor. Determinación de la impedancia a partir de datos de tensión y corriente. Determinación del di/dt para cada una de las señales de corriente.</p>
<pre>figure() [hAx,hLinea1,hLinea2] = plotyy(td,J,tJ,Imp); title('Densidad de corriente vs Impedancia: S11'); xlabel('Tiempo [\mus]'); ylabel(hAx(1),'Densidad de corriente [A/cm]'); ylabel(hAx(2),'Impedancia [m\Omega]'); grid on;</pre>	<p>Grafica la impedancia calculada con la densidad de corriente respecto a un intervalo de tiempo definido.</p>
<pre>Time=1319; I2=(Media_I).*(Media_I); T2=tDelay(b,:); X=tDelay(1:Time,:); X3=0.04; Y=I2(1:Time,:); Energy=trapz(X,Y) Cuadros=(X3.*Y); Energy2=sum(Cuadros)</pre>	<p>Cálculo del <math>i^2t</math> por medio del método de los trapecios y por rectángulos con base fija para comparar los valores.</p>

## D. Anexo: Producción académica

Durante el desarrollo de esta investigación, la cual hace parte del proyecto de construir refugios portátiles livianos con tejidos conductivos para la protección de personas ante descargas eléctricas atmosféricas, se ha participado en la escritura y publicación de los siguientes artículos investigativos:

C.1.F. Román et al., "10/350  $\mu$ s Lightning Impulse Current Behavior of a Conductive Fabric", 2021 35th International Conference on Lightning Protection (ICLP) and XVI International Symposium on Lightning Protection (SIPDA), Colombo, Sri Lanka, 2021, pp. 01-06, doi: 10.1109/ICLPandSIPDA54065.2021.9627391.

C.2. D. Rodríguez et al., "Effects on conductive fabrics of different lightning current densities", 2022 36th International Conference on Lightning Protection (ICLP), Cape Town, South Africa, 2022. [Paper 218].

Se está en proceso de publicación y participación del siguiente artículo de investigación:

C.3. J. E. Rodríguez et al., "Design and construction of a dummy to evaluate the electrical potential rise caused by lightning impulse current on a shelter", 2023, International Colloquium on Lightning and Power Systems and International Symposium on Lightning Protection (CIGRE ICLPS - SIPDA), Suzhou, China, 2023.



## 10/350 $\mu$ s Lightning Impulse Current Behavior of a Conductive Fabric

Francisco Román  
Electromagnetic Compatibility  
Research Group EMC-UN  
Universidad Nacional de Colombia  
Bogotá D.C., Colombia  
fromanc@unal.edu.co

Andre Lobato  
Department of Electrical Engineering  
Division of Electricity  
Uppsala University  
Uppsala, Sweden  
andre.lobato@angstrom.uu.se

Cristian Acosta  
Electromagnetic Compatibility  
Research Group EMC-UN  
Universidad Nacional de Colombia  
Bogotá D.C., Colombia  
ccacostac@unal.edu.co

Daniel Rodríguez  
Electromagnetic Compatibility  
Research Group EMC-UN  
Universidad Nacional de Colombia  
Bogotá D.C., Colombia  
danrodriguezman@unal.edu.co

Jorge Rodríguez  
Electromagnetic Compatibility  
Research Group EMC-UN  
Universidad Nacional de Colombia  
Bogotá D.C., Colombia  
jrodriguezman@unal.edu.co

Mahbubur Rahman  
Department of Electrical Engineering  
Division of Electricity  
Uppsala University  
Uppsala, Sweden  
Mahbubur.Rahman@angstrom.uu.se

Jorge Cristancho  
Electromagnetic Compatibility  
Research Group EMC-UN  
Universidad Nacional de Colombia  
Bogotá D.C., Colombia  
jacristanchoc@unal.edu.co

**Abstract**— Lightweight Portable Lightning Protection Shelters require the use of new materials capable of supporting the high current densities associated with lightning currents. In this paper, 30 x 30 cm<sup>2</sup> conductive fabrics samples are subjected to 10/350  $\mu$ s lightning current impulses. This experimental work, performed at the HV lab of Uppsala University, is aimed at understanding the transversal pattern of scratches or striations observed in conductive fabrics in previous experiments performed at the HV lab of Universidad Nacional de Colombia with 8/20  $\mu$ s lightning impulse currents. Striations were recorded with both a still camera and a fast-recording camera, while the samples current was measured. Additionally, the withstand current density of the tested conductive fabrics was obtained.

**Keywords**— conductive fabrics, conductive textiles, Current density, Impulse current, Arc, Plasma.

### I. INTRODUCTION

Several soldiers in their service of duty of the Colombian army have been involved in lighting-related accidents. Lightning accidents leave, on average every month, 1 fatality and 4 injured soldiers in the whole country [1]. To solve this problem, the Electromagnetic Research Group – EMC-UNC – of Universidad Nacional de Colombia – UNC – is developing portable shelters to protect this population against lightning. At UNC, conductive fabrics that can withstand direct and indirect lightning currents have been investigated [2]. In this paper, tests performed at Uppsala University to explain the pattern of scratches or striations left on the test

samples due to 8/20  $\mu$ s lightning impulse currents – LICs – observed at UNC, are described. Additionally, the maximum lightning impulse current density – LICD – that conductive fabrics can withstand is established. To understand the striation on the conductive fabric after LICD, a fast camera was used to see the development of the luminous events on its surface. Also, a second still camera was used to observe the electric discharges on the conductive fabrics surface. Lastly, a LIC was applied on the center of a conductive fabrics circular test probe to establish the maximum LICD that this material can withstand. This parameter was obtained by measuring the radius of the conductive fabric affected area.

The experimental set-up is described in section III. Additionally, some camera records of the conductive fabrics are presented to understand the discharge mechanism associated with the conductive fabrics striations. Finally, the procedure followed to determine the maximum LICD that conductive fabrics can withstand is described.

### II. BACKGROUND

#### A. Conductive Fabrics

Conductive fabrics are composed of fibers or yarns that are made from metal conductive substrates or layers such as nickel, copper or silver. In the present experiments, 30 x 30 cm<sup>2</sup> nickel-copper rip-stop electro-conductive fabric samples were tested. Fig. 1 shows a detail of the conductive fabric surface.

# Effects on conductive fabrics of different lightning current densities

1<sup>st</sup> Daniel Rodríguez M.  
EMC-UN Research Group  
Universidad Nacional de Colombia  
Bogotá D.C., Colombia  
danrodriguezman@unal.edu.co

2<sup>nd</sup> Juan P. Correa P.  
EMC-UN Research Group  
Universidad Nacional de Colombia  
Bogotá D.C., Colombia  
jpcorreap@unal.edu.co

3<sup>rd</sup> Jorge E. Rodríguez M.  
EMC-UN Research Group  
Universidad Nacional de Colombia  
Bogotá D.C., Colombia  
jrodriguezman@unal.edu.co

4<sup>th</sup> Laura Y. Casas L.  
EMC-UN Research Group  
Universidad Nacional de Colombia  
Bogotá D.C., Colombia  
lycasasl@unal.edu.co

5<sup>th</sup> Francisco Román  
EMC-UN Research Group  
Universidad Nacional de Colombia  
Bogotá D.C., Colombia  
fjromanc@unal.edu.co

**Abstract**— Colombia, due to its location in a region of high keraunic level, has a large number of accidents, deaths, and injuries caused by lightning. For this reason, the electromagnetic compatibility research group at the Universidad Nacional de Colombia -EMC-UNC Group-, is studying lightning portable shelters made of lightweight conductive fabrics. The studied conductive fabrics are made of coaxial conductive polyester fibers covered by a Ni-Cu conductive layer. One of the open questions is the conductive fabrics current withstand capability before the sublimation fibers conductive layer. This paper describes a series of experiments performed at two universities to determine the current density withstand capability of the investigated conductive fabrics. To obtain this parameter the resistance variation of sample as a function of the current density is investigated [4][6].

**Keywords**—Arc, Conductive Fabrics, Current Density, Impulse current, Plasma, lightning protection

## I. INTRODUCTION

The EMC-UNC Group has investigated lightweight and portable lightning protection solutions to be used in rural areas. To fulfill these requirements, the use of conductive fabrics has been proposed in order to divert lightning currents. In this paper we describe different conductive fabrics test configurations under different lightning current densities performed at two universities: the Institute of Energy and Environment IEE-USP (Brazil) and KTH Royal Institute of Technology (Sweden).

At the High Current Laboratory of the Energy and Environment Institute of the University of São Paulo - IEE/US [1] impulse current tests were applied to  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  samples with a  $8/20 \mu\text{s}$  lightning impulse current generator (LICG), with current amplitudes between 5 and 20 kA. Similarly, at the Swedish Institute of Technology – KTH [2],  $30 \times 30 \text{ cm}^2$  test samples were subjected to  $10/350 \mu\text{s}$  impulse current tests with amplitudes between 3 and 15 kA. For the tests, pieces of the rip-stop type conductive fabric were used.

In this paper we analyze the observed changes in both the conductive fabrics resistance variation and the surface marks left on the conductive fabrics surface after the circulation of different current densities. The variation of the conductive fabrics resistance as a function of current and voltage drop across the test sample was obtained. Additionally,

both voltage and current signatures from each experiment were recorded.

## II. BACKGROUND

### A. Conductive Fabrics

Conductive fabrics are composed of conductive threads, whose coaxial structure is presented in Fig. 1 a). Threads have an internal insulating core made of polyester, coaxially covered by a metal conductive layers made of conducting materials such as nickel, copper or silver [7]. Experiments described in this paper were performed in nickel-copper rip-stop electro-conductive fabric test samples of two different dimensions:  $30 \times 30 \text{ cm}^2$  and  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ . Fig. 1 b) shows a conductive fabric rip-stop surface made of the mentioned conductive threads shown in Fig. 1 b). The characteristics of the conductive fabric used in this research work are presented in Table 1.

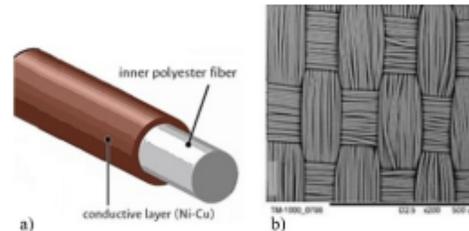


Fig. 1. a) Structure of a conductive thread; b) Micrograph of a conductive fabric. [8]

TABLE I. CHARACTERISTICS OF THE TESTED CONDUCTIVE FABRIC

Item	Characteristic	Unit
Fabric Pattern	Rip-Stop	---
Weight	$90 \pm 10$	$\text{g/m}^2$
Width	$0.10 \pm 0.01$	mm
Resistance	0.05	$\Omega/\text{square}$
Material	Ni-Cu	---

\*Built from the technical sheet of conductive fabrics [3]



### ICLP2022 Technical Committee

*Private Bag 3, WITS, 2050, South Africa  
Email: [info@iclp2022.org](mailto:info@iclp2022.org)  
Phone: +27 82 902 4606  
Reference: extabs-218.pdf*

4 March 2022

Juan P. Correa P.  
Universidad Nacional de Colombia  
Colombia  
[jpcorreap@unal.edu.co](mailto:jpcorreap@unal.edu.co)

Dear Juan P. Correa P.,

### Extended Abstract Accepted

We are pleased to inform you that your Extended Abstract submission (ID #218) titled

**Effects on the behavior of conductive fabrics under the influence of different current densities**

authored by

Daniel Rodríguez M., Juan P. Correa P., Jorge E. Rodríguez M., Laura Y. Casas L., Francisco J. Román C.

has been accepted for the 36th International Conference on Lightning Protection (ICLP) that will be held in Cape Town, South Africa from 2-7 October 2022. Please refer to the conference website <https://iclp2022.org> for further updates and information.

Yours sincerely,

Hugh Hunt,  
Technical Chair  
ICLP2022 Local Organizing Committee

Ken Nixon  
Vice-Chair





## Design and construction of a dummy to evaluate the electrical potential rise caused by lightning impulse current on a shelter

1<sup>st</sup> Jorge E. Rodríguez M.  
EMC-UN Research Group  
Universidad Nacional de Colombia  
Bogotá D.C., Colombia  
jerodriguezman@unal.edu.co

2<sup>nd</sup> Daniel Rodríguez Manrique  
EMC-UN Research Group  
Universidad Nacional de Colombia  
Bogotá D.C., Colombia  
danrodriguezman@unal.edu.co

3<sup>rd</sup> Edwin F. Pineda V.  
EMC-UN Research Group  
Universidad Nacional de Colombia  
Bogotá D.C., Colombia  
efpinedava@unal.edu.co

4<sup>th</sup> María Barajas.  
EMC-UN Research Group  
Universidad Nacional de Colombia  
Bogotá D.C., Colombia  
maria.barajas.sa@gmail.com

5<sup>th</sup> Francisco J. Román C.  
EMC-UN Research Group  
Universidad Nacional de Colombia  
Bogotá D.C., Colombia  
fjromanc@unal.edu.co

6<sup>th</sup> Jorge A. Cristancho C.  
EMC-UN Research Group  
Universidad Nacional de Colombia  
Bogotá D.C., Colombia  
jacristancho@unal.edu.co

**Abstract**—This experimental research work presents the design and construction of a dummy with a shape and weight that resembles a real person. The dummy was used to determine the increase in electrical potential that a person could experience due to lightning currents while lying on the surface of the conducting floor of a Faraday Cage-like shelter, constructed to mitigate the effects of ground lightning currents. The experimental arrangement used and the results of the voltage transferred to the dummy are presented. The dummy is placed in two different positions inside the conductive shelter, when 8/20  $\mu$ s currents of different amplitudes are applied to the floor of the conducting shelter. Finally, the energy transferred to the dummy is estimated and compared with the levels that could represent a risk for a person.

**Keywords**—Dummy, lightning, shelter, conductive fabrics, step voltage, head to feet voltage, design, laser cut.

### I. INTRODUCTION

Lightning protection has been one of the research lines from the EMC-UN research group for more than 20 years. In that way, the EMC-UN group has studied and analyzed lightning accidents in Colombia where people are involved in order to understand the effects on human health [1-5].

It is known that one of the lightning injury mechanisms that cause the most damage is the earth's potential rise due to lightning currents. This mechanism, also known as step potential, is responsible for causing between 50 and 55% of fatalities associated with lightning accidents [6].

As part of the lightning protection research line, the EMC-UN research group has been working on the designing and evaluating of a portable Faraday Cage-like protection shelter [7]. In this context, it is important to evaluate the step potentials transferred to the user by the conducting shelter floor under the presence of lightning ground currents [8].

For all the previously mentioned reasons and in order to evaluate the risk due to lightning on way near real cases a human dummy was employed. The idea was to emulate a person inside the prototype of a portable lightning protection system.

The dummy was designed and constructed to simulate the weight and dimensions of a real person. The electrical resistance of the human body was also taken into account. This was important because it was possible to measure the electrical potential between different parts of the body during simulated lightning strikes in the laboratory.

The next sections describe the design, construction, and test processes of the dummy. Also, the description of the experimental setup employed and some results of the step potential measured on the dummy are presented.

### II. DESIGN OF DUMMY

In order to have a dummy with dimensions very close to those of a real human being, one of the members of the group from which the body dimensions were taken was used as a model. The dummy was named ED, in relation to the name of the person whose body measurements and dimensions were taken.

Based on this record, a computer design was created that adapted a 3D model of a simplified human body, with the same dimensions as the person. Figure 1 shows the 3D model obtained.

After having the 3D model with the real dimensions required, using software, the designer positioned horizontal and vertical planes in a certain way to create a solid structure that can be built by laser cutting.

## Bibliografía

1. IEC - Commission, IEC 62305-2 "Protection against lightning - Part 2: Risk management", edición 2.0 de 2010.
2. IEC - Commission, IEC 62305-2 "Protection against lightning - Part 3: Physical damage to structures and life Hazard", edición 2.0 de 2010.
3. K. P. Naccarato, O. Pinto Jr, L. R. Pinto, A. M. Siquiera, and L. H. Alonso, "Assessment of lightning threats in Brazil and the use of lightning warning systems for human life protection," in International Conference on Grounding and Earthing & 6th International Conference on Lightning Physics and Effects, 2014, p. 6.
4. M. A. Cooper, C. J. Andrews, R. L. Holle, R. Blumenthal and N. Navarrete. "Lightning-Related Injuries and Safety" In book: Wilderness Medicine (pp.60-101) Edition: 7th edition Chapter: 5, 2016.
5. Rojas, Herbert E., Santamaría, Francisco, Escobar, Oscar F., Román, Francisco J. (2017). Lightning research in Colombia: Lightning parameters, protection systems, risk assessment and warning systems. *Ingeniería y Desarrollo*, 35(1), 240-261. <https://doi.org/10.14482/inde.35.1.8951>
6. Younes-Velosa, C. (2020). Caracterización de parámetros del rayo en Colombia con base en sistemas de localización terrestres y satelitales, 20 años de análisis. *RACCEFYN*, 44(173), 960–973. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1171>.
7. C. Younes, H. Torres, E. Pérez, L. Gallego, G. Cajamarca, and A. Pavas, "Lightning parameters evaluation in the Colombian highest atmospheric activity zone", in 27th International Conference on Lightning Protection ((ICLP)), 2004.
8. N. Navarrete-Aldana, M.A. Cooper, R. L. Holle, "Lightning fatalities in Colombia from 2000 to 2009", in International Conference on Lightning Protection (ICLP). Shanghai, China, 2014.
9. F. Roman, F. Vega, "Lightning accidents in Colombia: Lightning threats in the Colombian army" in American Electromagnetics Conference (AMEREM)). Albuquerque, New Mexico, USA, 2014.

10. J. A. Cristancho, C. Rivera, J. J. Pantoja, F. Román. "Nonfatal Lightning Injuries in Colombia: Case Reports" in International Symposium on Lightning Protection (XIII SIPDA), Balneário Camboriú, Brazil, 2015.
11. V. Cooray, "Lightning Protections". London, UK: The Institution of Engineering and Technology IET Power & Energy, 2010.
12. C. Cruz, E. Rentería, and F. Román, "Statistics of the Colombian National Army lightning accidents," in 2013 International Symposium on Lightning Protection (XII SIPDA), 2013, pp. 324–328.
13. Y. Zhao, J. Tong, C. Yang, Y. Chan, and L. Li, "A simulation model of electrical resistance applied in designing conductive woven fabrics," *Text. Res. J.*, vol. 86, no. 16, pp. 1688–1700, Oct. 2016.
14. S. Varnaitė-Žuravliova, J. Baltušnikaitė-Guzaitienė, L. Valasevičiūtė, R. Verbienė, and A. Abraitienė, "Assessment of Electrical Characteristics of Conductive Woven Fabrics," *Am. J. Mech. Ind. Eng.*, vol. 1, no. 3, p. 38, Oct. 2016.
15. ASTM F390-11, "Test Method for Sheet Resistance of Thin Metallic Films With a Collinear Four-Probe Array". 2011, p. 5.
16. ASTM D4496-13, "Test Method for D-C Resistance or Conductance of Moderately Conductive Materials". 2013.
17. SIC Colombia. (2018). Patente de invención 15131006—Dispositivo portátil de protección contra rayos en tiendas de campaña. <http://sipi.sic.gov.co/sipi/Extra/IP/Mutual/Browse.aspx?sid=636627801680947504>
18. J. A. Cristancho C., J. E. Rodríguez M., C. A. Rivera G., F. Roman, and J. J. Pantoja, "High Current Tests over Conductive Fabrics," in 2018 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA), 2018, pp. 428–432.
19. J. A. Latorre, J. E. Rodríguez, C. A. Martínez, J. A. Cristancho C., and F. Román, "Characterization of a Metallic Pearl-like Necklace stroked by lightning: preliminary results," in 2016 International Conference on Lightning Protection, Estoril, Portugal, 2016.
20. Q. C. A. Martínez, F. Román and J. A. Cristancho, "Determination of the lightning current from its thermal effects," 2016 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP), 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICLP.2016.7791464.
21. P. Gharghabi, J. Lee, T. Colmer, M. S. Mazzola, T. E. Lacy, and J. Kluss, "Investigating the Composite/Metal Interface and its Influence on the Electrical Resistance Measurement," Apr. 2018.
22. J. Cristancho, J. Rodríguez, C. Rivera, F. Roman, and J. J. Pantoja, "Lightning-type Current Pulse Tests on Conductive Fabrics" September 2018.
23. J. A. Cristancho C., J. E. Rodríguez M., L. K. Herrera Q., C. A. Rivera G., F. Roman, and J. J. Pantoja, "Lightning Impulse Current Tests on Conductive Fabrics" July 2019.

24. J. A. Cristancho C., J. E. Rodríguez M., C. A. Rivera G., L. K. Herrera Q., F. Roman, and J. J. Pantoja, "Conductive Fabric Potential Rise due to Lightning Impulse Currents" October 2019.
25. J. Cristancho, J. Rodríguez, F. Roman, M. Shigihara, C. Y. Kodaira, "Behavior of an Electroconductive Rip-stop Fabric under 8/20  $\mu$ s Lightning Current: Preliminary results" September 2020.
26. H. Zhu, K. Fu, B. Yang, Y. Li, "Nickel-coated nylon sandwich film for combination of lightning strike protection and electromagnetic interference shielding of CFRP composite" (2021)
27. F. Roman, D. Rodríguez, J. Rodríguez, J. Cristancho, C. Acosta, M. Rahman, A. Lobato, "10/350  $\mu$ s Lightning Impulse Current Behavior of a Conductive Fabric" in 35th International Conference on Lightning Protection (ICLP-SIPDA), 2021.
28. Zhejiang Saintyear Electronic Technologies Co., Ltd., "Structure of conductive fabric," 11-Nov2017.
29. Cristancho, J., Rodríguez, J., Rivera, C., Pantoja, J., Herrera, L., & Román, F. (2023). Lightning Impulse Current Tests on some Electroconductive Fabrics. *Journal of Applied Research and Technology*, 21(2), 241-255. <https://doi.org/10.22201/icat.24486736e.2023.21.2.1605>
30. UNE-EN 61000-4-5:2015/A1:2018 "Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4-5: Técnicas de ensayo y de medida. Ensayos de inmunidad a las ondas de choque".