



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Análisis del comportamiento eléctrico de textiles conductores usados en dispositivos portátiles de protección contra rayos ante corrientes tipo rayo

Juan Pablo Correa Pino

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Bogotá D.C., Colombia

2022

Análisis del comportamiento eléctrico de textiles conductores usados en dispositivos portátiles de protección contra rayos ante corrientes tipo rayo

Juan Pablo Correa Pino

Trabajo final de maestría presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería – Ingeniería Eléctrica

Director:

Ph.D. Francisco José Román Campos

Línea de Investigación:

Alta Tensión

Grupo de Investigación:

Grupo de Compatibilidad Electromagnética EMC-UN

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Bogotá D.C., Colombia

2022

Dedicatoria

A Dios, a mis padres y amigos.

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.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Juan Pablo Correa Pino', is written over a horizontal line.

Juan Pablo Correa Pino

Fecha 19/11/2022

Agradecimientos

Agradezco al grupo de Investigación en Compatibilidad Electromagnética de la Universidad Nacional de Colombia EMC-UN, en especial al profesor Francisco Román y los Ingenieros Jorge Rodríguez y Edwin Pineda. De igual forma al Laboratorio de Innovación en Alta Tensión y Energías Renovables por su apoyo en el proceso de simulación. Asimismo a mis colegas y amigos que me apoyaron durante el proceso.

Resumen

Análisis del comportamiento eléctrico de textiles conductores usados en dispositivos portátiles de protección contra rayos ante corrientes tipo rayo

El presente trabajo analiza el comportamiento de los tejidos conductores usados en refugios temporales de protección contra rayos, frente a corrientes tipo rayo, con el fin de determinar las densidades superficiales de corriente crítica que pueden causar la sublimación de los diferentes materiales conductores. Lo anterior por cuanto esta sublimación provoca disminución en la continuidad eléctrica del textil o incluso la destrucción de este, lo que provocaría la exposición a la corriente de rayo de los ocupantes del refugio. En este sentido se simulan los efectos térmicos por efecto Joule que genera la circulación de la corriente en forma de onda 10/350 μ s a través del tejido conductor.

Para esto se analizaron los cambios de temperatura para tejidos en material de constantán y de cobre de acuerdo con el estándar IEC 62305-1, considerando el fenómeno como adiabático, donde por la rapidez de la circulación de la corriente se considera que no existe un intercambio de calor entre el material conductor y su entorno. Posteriormente, se modela el tejido conductor en el software COMSOL Multiphysics, tanto considerando el constantán como el cobre, obteniendo valores de densidad superficial de corriente crítica, la cual genera un calentamiento en el material igual a su temperatura de fusión.

De dichas simulaciones se logra identificar que en el caso del constantán la densidad superficial de corriente es de 152 A/cm, mientras que para un tejido elaborado en cobre esta densidad es más de 5 veces mayor, llegando a los 781 A/cm.

Palabras clave: Textil conductor, tejido rip-stop, onda tipo rayo 10/350 μ s, fenómeno adiabático, efecto Joule, modelo de Heidler, densidad superficial de corriente.

Abstract

Analysis of the electrical behavior of conductive textiles used in portable lightning protection devices against lightning currents

The present work analyzes the behavior of conductive fabrics used in temporary lightning protection shelters, against lightning currents, to determine the critical current surface densities that can cause the sublimation of the conductive materials. This is because this sublimation causes a decrease in the electrical continuity of the textile or even its destruction, which would cause the exposure of the shelter occupants to the lightning current. In this way, the thermal effects due to the Joule effect generated by the circulation of the current in the form of a 10/350 μs wave through the conductive fabric are simulated.

For this purpose, temperature changes for fabrics in constantan and copper material were analyzed in accordance with IEC 62305-1 standard, considering the phenomenon as adiabatic, where due to the speed of the current circulation it is considered that there is no heat exchange between the conductive material and its environment. Subsequently, the conductive fabric is modeled in the COMSOL Multiphysics software, considering both constantan and copper, obtaining surface density values of critical current, which generates a heating in the material equal to its melting temperature.

From these simulations it is possible to identify that in the case of constantan the surface density of current is 152 A/cm, meanwhile for a fabric made of copper this density is more than 5 times higher, reaching 781 A/cm.

Keywords: Conductive fabric, rip-stop fabric, 10/350 μs waveform, adiabatic phenomenon, Joule effect, Heidler model, surface current density.

Contenido

	<u>Pág.</u>
Resumen	IX
Abstract	X
Lista de figuras	XII
Lista de tablas	1
Introducción	1
1. Planteamiento del problema	5
1.1 Antecedentes	5
1.2 Metodología.....	11
2. Modelo	13
2.1 Simplificación tejido conductor.....	13
2.2 Parametrización de forma de onda para corriente tipo rayo 10/350 μ s.....	16
3. Análisis de los resultados	18
3.1 Cambio de temperatura según IEC 62305-1.....	19
3.2 Simulación tejido conductor en constantán.....	24
3.3 Simulación tejido conductor en cobre.....	31
4. Conclusiones y recomendaciones	36
4.1 Conclusiones.....	36
4.2 Recomendaciones y trabajos futuros	37
A. Anexo: Memoria de cálculos	39
B. Anexo: Especificaciones equipo usado para simulación	47
C. Anexo: Paper para ICLP - 2022	48
Bibliografía	55

Lista de figuras

	<u>Pág.</u>
Figura 1: Densidad de rayos por kilómetro cuadrado por año (FRD)	1
Figura 1-1: Resultados de exploración mediante microscopio electrónico. a) Rip-stop, b) rip-stop retardante al fuego, c) tejido plano, d) no tejido [4].	7
Figura 1-2: Líneas perpendiculares al paso de la corriente [8].	9
Figura 2-1: Tejido conductor Tipo Rip-Stop.	14
Figura 2-2: Simplificación tejido conductor en constantán.	15
Figura 2-3: Función analítica onda 10/350 μ s	17
Figura 3-1: Temperatura teórica para diferentes magnitudes de corriente – Material constantán	22
Figura 3-2: Temperatura teórica para diferentes magnitudes de corriente – Material cobre	23
Figura 3-3: Dimensiones tejido conductor	24
Figura 3-4: Gráfico función analítica de corriente tipo rayo 10/350 μ s	25
Figura 3-5: Geometría para simulación	25
Figura 3-6: Resultado de potencial eléctrico en tejido conductor.	26
Figura 3-7: Montaje experimental de muestra de tejido conductor en KTH Suiza.	27
Figura 3-8: Resultado de potencial eléctrico en tejido conductor considerando la multifísica – material constantán	28
Figura 3-9: Temperatura en tejido conductor para una corriente pico $I = 1600A$ y $t = 350 \mu$ s	28
Figura 3-10: Aumento de temperatura en tejido conductor en constantán	29
Figura 3-11: Comparación de temperaturas para diferentes valores de corriente en tejido conductor en constantán – Simulador Vs. Cálculo teórico.	30
Figura 3-12: Resultado de potencial eléctrico en tejido conductor considerando la multifísica – material cobre	31
Figura 3-13: Temperatura en tejido conductor en cobre para $I = 1600A$ y $t = 350 \mu$ s	32
Figura 3-14: Comparación de temperaturas para corriente de 1500A – Tejido conductor en cobre y constantán	33
Figura 3-15: Aumento de temperatura en tejido conductor en cobre	34
Figura 3-16: Comparación de temperaturas para diferentes valores de corriente en tejido conductor en cobre – Simulador Vs. Cálculo teórico.	35

Lista de tablas

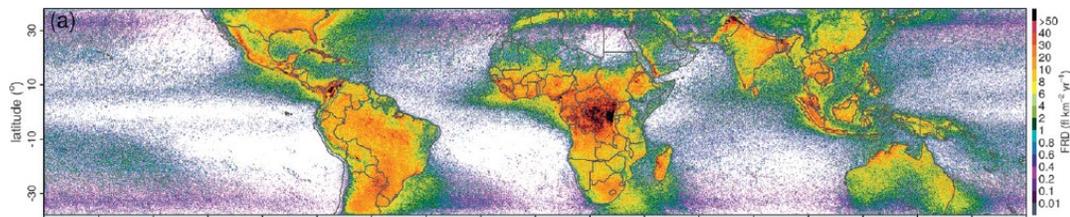
Pág.

Tabla 1	Top 10 de densidad de rayos por kilómetro cuadrado por año por masa continental [1].....	2
Tabla 3-1	Valores de constantes para el cálculo teórico de la corriente crítica constantán	21
Tabla 3-2	Valores de constantes para el cálculo teórico de la corriente crítica cobre.	22
Tabla 3-2	Tabla de parámetros para simulación.....	24
Tabla 3-3	Tabla de temperaturas simulación Vs. Teoría – Tejido conductor constantán	30
Tabla 3-4	Tabla de temperaturas simulación Vs. Teoría – Tejido conductor cobre	34
Tabla 1	Valores de constantes para el constantán.....	41
Tabla 2	Resultados para cambios de temperatura en constantán.....	42
Tabla 3	Valores de constantes para el cobre	43
Tabla 4	Resultados para cambios de temperatura en cobre.....	44
Tabla 5	Resultados para cambios de temperatura en constantán.....	45
Tabla 6	Resultados para cambios de temperatura en cobre.....	46

Introducción

Colombia es uno de los países con mayor índice de caída de rayos a nivel mundial [1]. En la **Figura 1** se muestra el mapa de densidad de rayos por kilómetro cuadrado por año en el mundo. En dicha figura se puede ubicar el norte de Suramérica y el centro de África como las regiones con mayor densidad de rayos a nivel mundial, esto representado por las zonas más oscuras de la **Figura 1**.

Figura 1: Densidad de rayos por kilómetro cuadrado por año (FRD)



Fuente: © American Meteorological Society. Used with permission [1].

En consecuencia, Colombia ubica cuatro de sus municipios en la lista de los 20 lugares con mayor densidad de rayos por kilómetro cuadrado por año a nivel mundial y siete lugares entre los primeros 10 de Suramérica, tal y como se indica en la **Tabla 1**.

Tabla 1 Top 10 de densidad de rayos por kilómetro cuadrado por año por masa continental [1].

TABLE 1. Top 10 FRD ($\text{fl km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$) for each continental landmass, indicating its position in the global ranking, latitude (Lat) and longitude (Lon) position on TRMM LIS 0.1° climatology grid, as well as the name of the nearest populated place name (PPL), position (PPL lat, PPL lon), and distance from grid point (Dist), according to the GeoNames database (www.geonames.org/). A minimum distance of 100 km from a previous ranked grid point was applied.

Global rank	FRD	Lat ($^\circ$)	Lon ($^\circ$)	PPL	Country	PPL lat ($^\circ$)	PPL lon ($^\circ$)	Dist (km)
South America								
1	232.52	9.75	-71.65	Lake Maracaibo (Lagunillas)	Venezuela	10.13	-71.26	60.1
4	172.29	7.55	-75.35	Cáceres	Colombia	7.58	-75.35	3.4
7	138.61	8.85	-73.05	El Tarra	Colombia	8.58	-73.09	30.9
11	124.26	5.75	-74.95	Norcasia	Colombia	5.58	-74.89	20.4
18	114.19	8.45	-74.55	Majagual	Colombia	8.54	-74.62	12.6
25	105.73	8.15	-76.85	Turbo	Colombia	8.09	-76.73	14.8
46	95.38	11.15	-72.95	Barrancas	Colombia	10.96	-72.79	27.8
74	87.96	-17.25	-65.05	Chimoré	Bolivia	-16.95	-65.14	34.9
78	87.61	10.35	-70.95	El Corozo	Venezuela	10.12	-71.04	27.5
136	77.02	10.45	-75.35	Santa Rosa	Colombia	10.44	-75.37	2.2

Fuente: © American Meteorological Society. Used with permission [1].

Considerando las condiciones propias de Colombia en relación con la cantidad de rayos por kilómetro cuadrado por año, se espera que para el territorio nacional exista una mayor probabilidad de accidentalidad derivada de impactos directos e indirectos de rayo. Asimismo, algunos factores como los tipos de construcciones y su concordancia con las medidas de protección contra rayos planteadas en normas internacionales como la IEC 62305-3; el trabajo agrícola en áreas abiertas; programas educativos relacionados con seguridad contra rayos y prácticas médicas para mitigar efectos de impactos contra rayos en personas, pueden atenuar o no los accidentes y muertes ocasionadas por impactos directos e indirectos de rayo [2].

En Colombia, entre los años 2000 y 2009 se presentaron entre 50 y 100 muertes anuales relacionadas con impactos de rayo, para un total de 757 muertes identificadas por el Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE) [2]. De estas muertes, el 62,2% se ubicaron en áreas rurales aisladas a pesar de que para el periodo de tiempo evaluado el 77% de la población colombiana se encontraba en las ciudades [2].

Teniendo en cuenta la proporción del número de muertes ocasionadas por rayos y su ubicación dentro del territorio nacional, las personas que desarrollan trabajos a campo abierto, especialmente en zonas rurales, se encuentran altamente expuestas a los efectos de los impactos directos e indirectos de rayo. Actividades de minería a cielo abierto y

actividades militares exponen situaciones donde los actores involucrados no cuentan con refugios aptos para la protección contra rayos, esto considerando que la ubicación de elementos de captación de acuerdo con el método electro geométrico no asegura la protección de zonas abiertas, así mismo, su transporte supone dificultad, esto teniendo en cuenta el peso de los materiales y el tamaño de las estructuras que se requerirían.

Como solución a lo anterior, El Grupo de Investigación en Compatibilidad Electromagnética de la Universidad Nacional de Colombia (EMC-UN) ha trabajado en el diseño y ha patentado dispositivos portátiles de protección contra rayos tipo tienda y hamaca. En el marco de desarrollo de la solución se someten a prueba cuatro tipos de textiles conductores, mediante el generador de impulsos de corriente del Laboratorio de Ensayos Industriales LABE de la Universidad Nacional de Colombia. En dicha prueba se aplicaron corrientes tipo rayo con forma de onda normalizada $4/10 \mu\text{s}$. De dichas pruebas se determinó que el material que presentó una mejor respuesta es la tela tipo rip-stop [3].

No obstante, las pruebas que se han realizado en los textiles conductores han mostrado la ruptura del material bajo determinadas magnitudes y tipos de onda. La ruptura o falla del textil conductor ante corrientes tipo rayo y maniobra podría plantear la pregunta sobre si el material seleccionado es o no el más adecuado para la solución de dispositivos portátiles de protección contra rayos tipo tienda y hamaca. Asimismo, se abre la posibilidad de evaluar otro tipo de textiles conductores y verificar si los tejidos conductores disponibles en el mercado cuentan con las características necesarias para brindar la protección requerida.

Es por esto, que en el presente Trabajo Final de Maestría se modela una aproximación del tejido conductor con el fin de evaluar el comportamiento eléctrico y térmico del material cuando este es sometido a una corriente tipo rayo. Esto con el fin de encontrar la densidad de corriente crítica que produce que el material conductor llegue a su temperatura de fusión y se destruya.

Esta densidad de corriente crítica propone un límite de corriente máximo que el material es capaz de soportar y que permite la circulación de corriente de forma segura, por encima de este valor, el material pierde continuidad eléctrica y la conducción de la corriente tipo rayo se da por fuera del tejido conductor.

Asimismo, se evaluó un material alternativo al constantán para revisar los cambios en la soportabilidad de corriente. No obstante, para asegurar que los resultados y valores simulados se aproximan a la realidad, se compararon los cambios de temperatura con valores obtenidos por aproximaciones teóricas derivadas del estándar internacional IEC 62305-1.

1. Planteamiento del problema

En las diversas pruebas a textiles conductores planteados para ser usados en los dispositivos portátiles de protección contra rayos tipo tienda y hamaca se han encontrado marcas de desgaste y rompimiento del material, que dan origen a discontinuidades eléctricas. Sin embargo, no se han determinado claramente las causas de la formación de discontinuidades en el material y se desconoce en gran medida el comportamiento eléctrico de los textiles ante corrientes de rayo.

Las pruebas y resultados que se han obtenido de forma experimental, hasta ahora, no permiten explicar en su totalidad la causa de la ruptura de los textiles conductores, como tampoco explican si la sublimación del material conductor producido por las altas corrientes de rayo se da durante o después de la circulación de la corriente por el tejido. Es por esto, que se propuso el modelado y simulación del textil conductor para dar respuesta a preguntas acerca del comportamiento eléctrico del tejido cuando se expone a altas corrientes, así como las posibles variaciones o no de la conductividad del textil a lo largo y ancho del material debido a las densidades de corriente críticas en el mismo.

1.1 Antecedentes

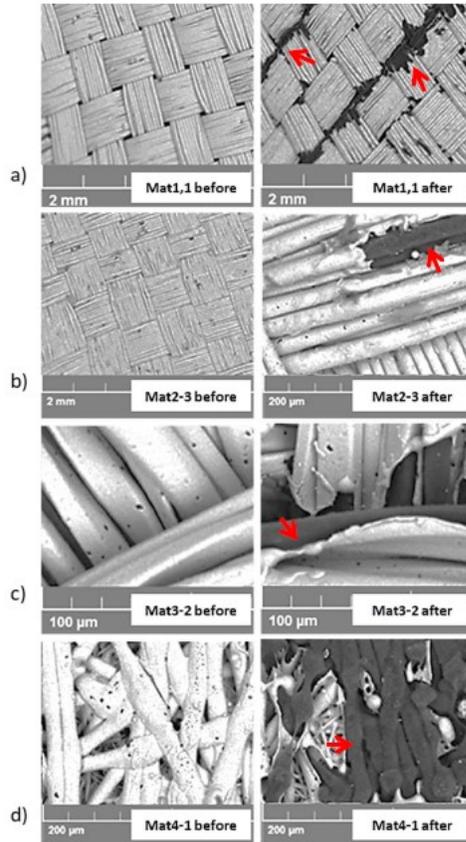
Una vez planteada la solución de dispositivos portátiles de protección contra rayos tipo tienda y hamaca se iniciaron pruebas de materiales con el fin de implementar dicha solución. El planteamiento inicial consideraba diversos tipos de textiles conductores compuestos por materiales como el níquel, el cobre, la plata y algunos polímeros conductores como el carbono y el grafeno [3]. Además del material de composición del textil, se consideró la geometría interna, es así como los textiles conductores seleccionados para pruebas de laboratorio tenían tres diferentes patrones de tejido, rip-

stop, planos y no tejidos. Sin embargo, el tipo de material de estos textiles fue el mismo, níquel y cobre.

Las pruebas llevadas a cabo para la selección del textil conductor a usar incluyeron formas de onda 4/10 μ s y magnitudes de decenas de kiloamperios, aplicando varios impulsos de corriente con una diferencia de cinco minutos entre cada uno de estos impulsos. La selección del tejido tipo rip-stop como material a considerar para la implementación se deriva de efectos ópticos y eléctricos mostrados en el material una vez realizadas las pruebas. Las telas de material tejido o rip-stop presentaron una mayor capacidad para la conducción de corrientes tipo rayo en comparación con el material plano y no tejido. Estos últimos presentaron un mayor número de líneas de desgaste después de las pruebas.

En relación con las pruebas a textiles conductores ya mencionados, el artículo “Lightning-type Current Pulse Tests on Conductive Fabrics” [4] muestra resultados mediante imágenes microscópicas antes y después de ejecutadas las pruebas, ver **Figura 1-1**. De forma visual, los materiales que mejor comportamiento presentan ante las pruebas de impulsos de corriente fueron los tejidos tipo rip-stop, Mat1 y Mat2 en la figura **Figura 1-1**.

Figura 1-1: Resultados de exploración mediante microscopio electrónico. a) Rip-stop, b) rip-stop retardante al fuego, c) tejido plano, d) no tejido [4].



Fuente: Lightning-type Current Pulse Tests on Conductive Fabrics [4].

Aunque los resultados de la experimentación relacionados por J. Cistancho et al. (2018) [4] sugieren la posibilidad de usar textiles conductores en sistemas portátiles de protección contra rayos, se requieren estudios adicionales que permitan observar y cuantificar el comportamiento eléctrico de dichos materiales.

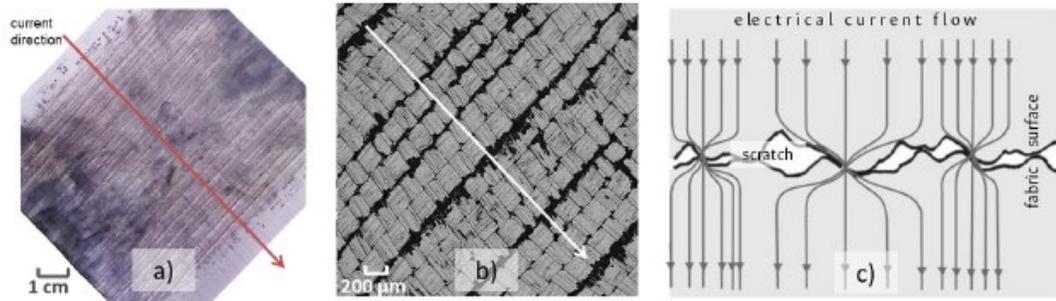
Posteriormente, se llevaron a cabo pruebas de laboratorio utilizando el textil conductor tipo rip-stop y un modelo de cuerpo humano de 1 k Ω para verificar comportamiento del material y las posibles tensiones a las cuales se vería expuesto el ocupante del dispositivo portátil de protección contra rayos tipo tienda. En esta ocasión se incluyeron impulsos de corriente en onda 8/20 μ s de hasta 20kA [5].

Se tiene un trabajo previo de simulación del textil conductor [6], donde se llevó a cabo una simulación electromagnética usando una caja de aire térmica y considerando un contorno abierto en todas las direcciones. El textil conductor fue modelado como una lámina conductora con pérdidas, utilizando un solucionador del método de elementos finitos en el dominio de la frecuencia. La mayor temperatura registrada se obtuvo alrededor del electrodo que inyecta la corriente en el textil conductor. De acuerdo con los resultados, el sobrecalentamiento del material producido por la corriente de impulso tipo rayo genera la sublimación de las capas metálicas del material conductor en el área de contacto entre el electrodo y el textil conductor.

Asimismo, en su trabajo Andrés Galeano (2020) utilizó el software COMSOL Multiphysics para caracterizar el textil conductor expuesto a impulso de corriente con forma de onda $8/20 \mu\text{s}$ [7]. En la simulación realizada a este tejido se encuentra que el cambio de dirección en la corriente, provocado por la misma geometría del tejido genera un aumento de la resistencia y por lo tanto un punto de concentración de calor, el cual se convierte en un punto con una mayor probabilidad de afectación del material. No obstante, dentro de las conclusiones del estudio se plantea la simulación del textil utilizando más recursos computacionales para lograr una simulación que contemple más características geométricas del conductor, como los cruces del tejido, con el fin de obtener un resultado más cercano a la realidad del comportamiento del tejido ante impulsos de corriente, esto considerando que la simulación incluyó únicamente hilos conductores paralelos.

Jorge Cristancho et al. (2019) consideran el modelado del material como un circuito con resistencias en serie y paralelo teniendo en cuenta el entrelazamiento dado por las fibras del tejido [8]. Para dicho modelado se considera la resistencia de los hilos conductores, así como la resistencia de contacto entre las fibras tejidas, no obstante, parámetros como la temperatura, humedad y presión deberían ser considerados [8].

Jorge Cristancho et al. (2019) [8] analizan la respuesta de los diversos textiles conductores ante impulsos de corriente, para el caso de las telas tejidas tipo rip-stop aparecen unas líneas de fisura del material en sentido perpendicular a la dirección de la corriente aplicada, sin embargo, de las pruebas de laboratorio realizadas no se puede concluir cómo se produce este patrón en el tejido conductor. En la Figura 1-2 se muestran las marcas presentadas en uno de los textiles probados en los ensayos de corriente.

Figura 1-2: Líneas perpendiculares al paso de la corriente [8].

Fuente: Lightning Impulse Current Tests on Conductive Fabrics [8].

John Pantoja et al. (2020) presentan algunos resultados del comportamiento de textiles conductores usados como parte de sistemas livianos de protección contra rayos, así mismo, evalúan la eficiencia de estos para dicha aplicación [9]. Las líneas perpendiculares a la dirección de la corriente aparecen nuevamente. En los materiales tejidos como las telas tipo rip-stop se concentra la corriente en las áreas de contacto (tejido), donde se generan altas densidades de corriente, produciendo evaporación del conductor cuando la energía disipada es lo suficientemente alta.

El contacto entre dos secciones, generado por el tejido de los hilos conductores, forma una resistencia adicional debido a la reducción del grosor del material en dicha unión. La aparición de tal resistencia representa un aumento de la densidad de corriente en esta zona [10]. Las resistencias modeladas dependen de la longitud de la sección, del radio de la fibra, el grosor de la capa conductora y el número de fibras por hilo [10]. En el artículo "Model for the Estimation of Partial Burst of Ripstop Electro-Conductive Fabrics" se plantea un parámetro, Acción Específica, para el análisis y estimación del comportamiento de conductores que se someten a impulsos de corriente de alta intensidad, dicho parámetro depende de la densidad de corriente del material y el tiempo de exposición [10].

En todas las pruebas realizadas se ha generado el rompimiento de las fibras del textil en varias de sus partes. Sin embargo, no se han determinado los puntos exactos de ruptura y el comportamiento de la corriente a través del elemento conductor, tampoco es claro si la corriente llega a tierra de forma segura antes de la sublimación de la tela o si el rompimiento se da antes de esto.

Algunos autores como Vassiliadis [11] han propuesto modelaciones numéricas de textiles conductores, utilizando para el modelado mecánico de las estructuras textiles el método de elementos finitos (FEM) y de elementos de contorno (BEM) [11]. Asimismo, autores como Zaidi et al. [12] han propuesto dentro de una simulación de tejidos usados en aplicaciones de electrónica el uso de del software Texgen para generar la estructura de la tela a usar en el software CST [12].

Finalmente, Casas (2021) [13] analiza dos pruebas realizadas a los textiles conductores seleccionados para la aplicación de los refugios temporales. Las dos pruebas realizadas fueron desarrolladas con el mismo tejido conductor pero con diferentes tipos de onda de rayo y dimensiones del tejido.

El primer montaje experimental revisado por Casas (2021) fue realizado en el Laboratorio de Altas Corrientes del Instituto de Energía y Medio Ambiente de la Universidad de Sao Paulo (IEE/USP). Para las pruebas se utilizó una muestra del tejido de tamaño 10 cm x 10 cm y un generador de corriente de Impulso de Rayo (LICG) [13] con una forma de onda 8/20 μs y magnitudes de corriente de entre 5 kA y 20 kA.

El montaje experimental en KTH/Royal Institute of Technology fue la segunda prueba abordada por casas con el fin de identificar variaciones en la densidad de corriente superficial en los textiles conductores tipo rip-stop. Para este montaje se utilizó una muestra de tejido conductor de 30 cm x 30 cm y la corriente de impulso utilizada fue en forma de onda 10/350 μs [13].

Uno de los resultados más importante del análisis desarrollado por Casas (2021) fue el cálculo de la resistencia teórica del tejido conductor [13], con lo cual, y mediante el análisis del conjunto de hilos tramados se logró llegar a una simplificación del tejido para su modelamiento y posterior simulación.

Para el cálculo de esta resistencia teórica del tejido conductor se partió de una conductividad eléctrica del material $\sigma = 2,041 \times 10^6 \frac{\text{S}}{\text{m}}$ y un área conductora de cada hilo del material calculada de $27,1434 \mu\text{m}^2$ [13]. Con el fin de definir la resistencia de un hilo de 10cm se realizó el cálculo mostrado en la ecuación (1-1) [13].

$$R_{hilo} = \frac{l}{\sigma A} = \frac{10000 \mu m}{2,041 \frac{S}{\mu m} * 27,143 \mu m^2} = 1805,067 \Omega \quad (1-1)$$

Donde l corresponde a la longitud del hilo, σ a la conductividad del material y A el área conductora calculada. El valor obtenido corresponde a un hilo de $10cm$ y un diámetro de $15\mu m$. Considerando el valor del diámetro de los hilos se procede a calcular la resistencia de un fragmento de tejido de conductor de $10cm * 10cm$, para lo cual se estima que la cantidad de hilos en esta longitud sería de $6666,67$ unidades.

$$R_{10x10} = \frac{R_{hilo}}{N_{hilos}} = \frac{1805,067 \Omega}{6666,67} = 0,271 \Omega \quad (1-2)$$

Siendo N_{hilos} la cantidad de hilos en una sección de tejido conductor de $10 cm$. Con el valor de $R_{10x10} = 0,271 \Omega$ se estimará el valor del espesor equivalente a un tejido sólido de área $10 cm * 10 cm$ y así simplificar el modelo a simular.

1.2 Metodología

La metodología llevada a cabo para el análisis del comportamiento eléctrico de los textiles conductores usados en dispositivos portátiles de protección contra rayos ante circulación de corrientes tipo rayo se desarrolló inicialmente evaluando el cambio de temperatura para el material de acuerdo con normatividad IEC 62305-1.

Posteriormente realizando el modelo y simulación del textil conductor mediante el software COMSOL Multiphysics, aplicando corriente tipo rayo usando una función analítica que describe el comportamiento de la forma de onda tipo rayo $10/350\mu s$. y evaluando el cambio de temperatura tanto en el constantán como en el cobre, esto con el fin de determinar un límite de densidad de corriente crítica relacionado con el punto de fusión del material.

Con el fin de llevar a cabo el análisis anteriormente planteado se procedió a realizar una simplificación del textil de acuerdo con trabajos de investigación desarrollados

anteriormente como el de Casas [13], donde fue posible asignar una resistencia teórica al material, la cual es escalable de acuerdo con la dimensión final del tejido conductor.

Tanto con el modelo simplificado, como con la función analítica probada, se realizaron cálculos teóricos del comportamiento del material de acuerdo con IEC 62305-1, los cuales fueron usados como punto de referencia para los resultados de la simulación.

2. Modelo

El material elegido a simular es constantán, siendo este una aleación 55% de cobre y 45% níquel. Este material corresponde al textil conductor evaluado por Crisancho [3], Pantoja [6] y Casas [13]. Para el modelado y simulación del textil conductor se hizo uso del software COMSOL Multiphysics haciendo uso de las físicas de Corrientes Eléctricas (ec) y Transferencia de Calor en Sólidos (ht) y la multifísica de Fuente de Calor Electromagnética (emh) que relaciona el calentamiento por efecto Joule que produce la corriente tipo rayo de la física de corrientes eléctricas y la transferencia de calor en sólidos.

2.1 Simplificación tejido conductor

Inicialmente se modeló tejido conductor usando AutoCAD, este considerando tanto la urdimbre como la trama del tejido y las dimensiones de este de acuerdo con sus fichas técnicas. En la **Figura 2-1** se observa parte de la figura construida, la cual posteriormente fue cargada en el software COMSOL Multiphysics para las respectivas pruebas, inicialmente de paso de corriente en forma de onda tipo rayo $10/350\mu s$.

No obstante, durante las pruebas de simulación se encontraron problemas con la geometría del tejido conductor, por lo tanto se empezaron a buscar alternativas para la simplificación de la geometría y así evaluar los cambios de temperatura en el tejido conductor debido a paso de corriente en forma de onda $10/350\mu s$.

Figura 2-1: Tejido conductor Tipo Rip-Stop.

Fuente: Elaboración propia

Es por esto, y considerando los resultados de casas [13], se maneja el tejido conductor como una placa conductora de constantán con resistencia de $R_{10 \times 10} = 0,271 \Omega$. De acuerdo con este valor de resistencia se estima el espesor del tejido para simular un objeto que corresponda en conductividad al tejido conductor de hilo con área conductora de $27,1434 \mu m^2$ [13]. Es importante considerar que esta conductividad sólo aplica hasta valores de densidad de corriente de hasta $233,34 \text{ A/cm}$ [13], para densidades superiores en el constantán deben considerarse modelos no lineales de conductividad.

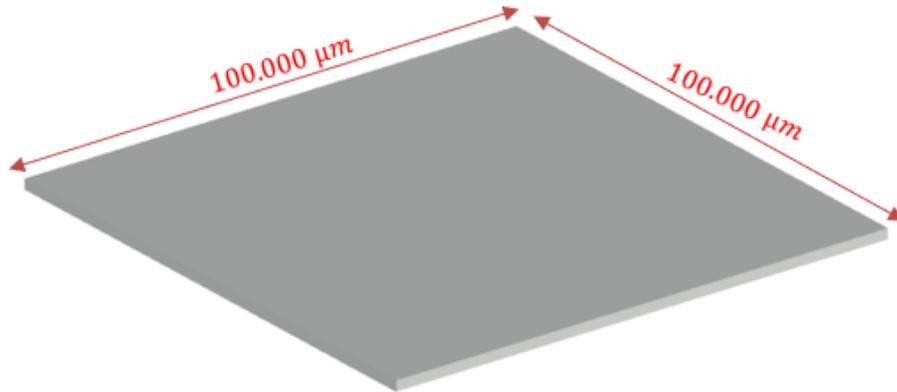
Considerando una tela de $10 \text{ cm} * 10 \text{ cm}$ y una conductividad del material $\sigma = 2,041 \times 10^6 \frac{\text{S}}{\text{m}}$ [13] se calculará el grosor t el material. Asimismo, se tiene una resistencia de material para un tejido con esta área de $R_{10 \times 10} = 0,271 \Omega$ [13]. Y considerando que la resistencia está relacionada con la longitud, el área y la conductividad se tiene que:

$$R = \frac{L}{\sigma A} \quad (2-1)$$

Con un área $A = 100.000 \mu m * t$, por lo tanto, y luego del despeje se tiene que el espesor $AT = 1,81 \mu m$.

El objetivo de la simplificación del tejido conductor fue pasar de una geometría como la presentada en **Figura 2-1** a una geometría tipo placa como la mostrada en la **Figura 2-2** ambos equivalentes en resistencia.

Figura 2-2: Simplificación tejido conductor en constantán.



Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, la geometría tipo placa fue construida directamente desde el software COMSOL Multiphysics para su posterior evaluación. Inicialmente se encontraron problemas de convergencia en la simulación debido a errores en el enmallado de la geometría, por lo tanto, se fue variando el grosor del tejido, hasta llegar a 2 μm, valor con el que finalmente convergió la simulación de prueba.

De acuerdo con la simplificación del tejido, y considerando el tejido como un conductor plano de 2 μm de grosor se calcula la profundidad de penetración de la circulación de corriente debido al efecto piel en el material, esto con el fin de determinar si hay distribuciones de corriente a considerar. El Skin Depth se calcula de acuerdo con la ecuación (2-2) [14].

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}} \quad (2-2)$$

Con f como la frecuencia de la señal en Hz. De acuerdo con Mäkaelä [15], las altas frecuencias presentes en una descarga de rayo están en valores de entre 3MHz y 30 MHz. Por lo tanto, se calculará la profundidad de descarga para el cobre y constantán en el valor máximo de este rango, 30 MHz.

$$\delta_{cobre} = \sqrt{\frac{1}{\pi * 30 * 10^6 \text{ Hz} * \left(1 * 4\pi * 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}\right) * \left(1 * 5,8 * 10^7 \frac{\text{S}}{\text{m}}\right)}}$$

$$\delta_{cobre} = 12,065 \mu\text{m}$$

$$\delta_{constantán} = \sqrt{\frac{1}{\pi * 30 * 10^6 \text{ Hz} * \left(270,55 * 4\pi * 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}\right) * \left(2,04 * 10^6 \frac{\text{S}}{\text{m}}\right)}}$$

$$\delta_{constantán} = 3,9 \mu\text{m}$$

De acuerdo con las profundidades de descarga calculadas para el cobre y el constantán a 30MHz, se considera que la distribución de corriente por el tejido conductor no se ve afectada por el efecto piel, esto considerando que el Skin Depth es mayor al grosor del tejido conductor.

2.2 Parametrización de forma de onda para corriente tipo rayo 10/350 μs

Con el fin de modelar correctamente la forma de onda tipo rayo con un tiempo de subida de 10 μs y de bajada de 350 μs y convertirla en una función analítica para cálculos tanto teóricos como para el simulador, se hará uso de una formulación basada en las ecuaciones del telegrafista obteniendo una forma de onda de acuerdo con el modelo de Heidler, ecuación (2-3) [16].

$$I(t) = \frac{I_{pico}}{\eta} * \frac{\left(\frac{t}{T_1}\right)^n}{\left(\frac{t}{T_1}\right)^n + 1} * e^{-\frac{t}{T_2}} \quad (2-3)$$

Donde η corresponde al factor de corrección del valor de la corriente pico y se define de acuerdo con la ecuación (2-4) [16].

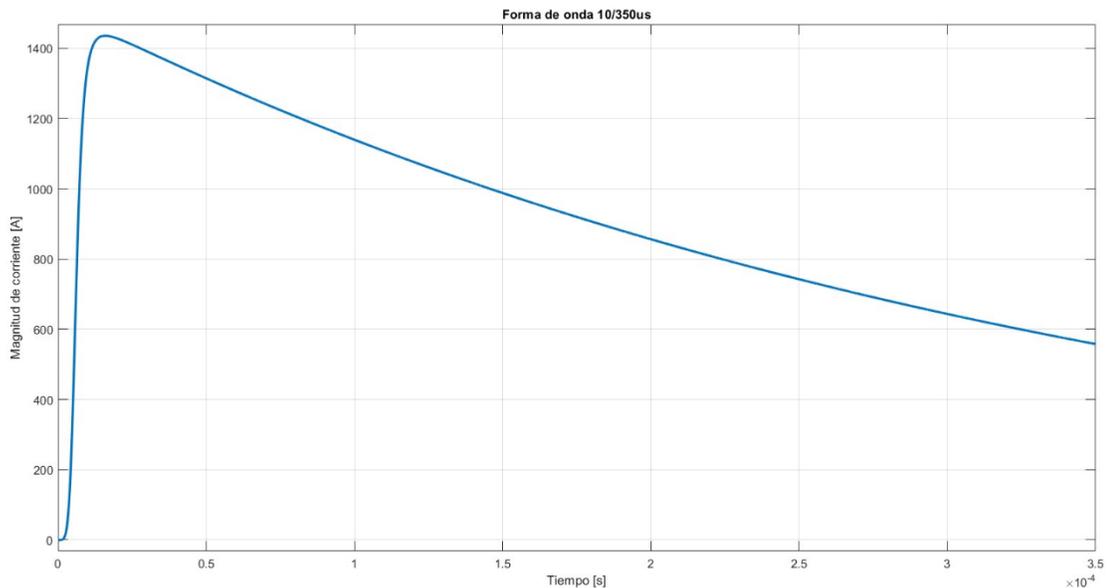
$$\eta = e \left(\frac{T_1}{T_2} \right) \left(\frac{nT_1}{T_2} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (2-4)$$

Donde:

- I_{pico} Valor de la corriente pico de la señal [A]
- T_1 Tiempo de subida [s]
- T_2 Tiempo de bajada [s]
- n Factor de concavidad (usualmente $n=5$) [16]

No obstante, el tiempo de subida T_1 relacionado en las ecuaciones anteriores corresponde a 1.6 veces el tiempo para pasar del 30% al 90% del valor máximo de la cresta. Por lo tanto el T_1 usado en los cálculos será de $6,25 \mu\text{s}$ en vez de $10 \mu\text{s}$. La forma de onda resultante se visualiza en la **Figura 2-3**.

Figura 2-3: Función analítica onda 10/350 μs



Fuente: Elaboración propia

3. Análisis de los resultados

Con el fin de analizar el comportamiento eléctrico de los textiles conductores y determinar las corrientes críticas que destruyen el material, se hizo uso de la temperatura de fusión como límite térmico del material. Es por esto, que se calcularon los efectos térmicos de diferentes magnitudes de corriente para encontrar el valor máximo que puede soportar el material antes de romperse.

Fueron analizados los cambios de temperatura teóricos, de acuerdo con IEC 62305-1, a fin de establecer este como criterio de comparación entre las simulaciones propuestas. Esto teniendo en cuenta las características geométricas, eléctricas y térmicas de los diferentes materiales, constantán, y cobre como material alternativo.

El análisis de cambio de temperatura realizado de acuerdo con IEC 62305-1 se encuentra en el anexo D, donde se revisan los posibles efectos de la circulación de corriente de rayo en los componentes de un sistema de protección contra rayos típico. Más precisamente se evaluarán los efectos térmicos. Para efectos del análisis, el tejido conductor es considerado como un elemento conductor, dado que la corriente de rayo analizada pasa a través del tejido y no impacta como tal en este, por lo tanto se desprecian efectos de arco eléctrico.

No obstante, es importante aclarar que para la evaluación del cambio de temperatura del tejido conductor se toman únicamente las expresiones analíticas para el análisis del calentamiento resistivo que proporciona la IEC 62305-1. Esto considerando que demás parámetros normativos consideran elementos convencionales del sistema de protección contra rayos, y que el tejido conductor a analizar no hace parte de este tipo de elementos.

3.1 Cambio de temperatura según IEC 62305-1

Fenómenos de corta duración como es el caso de la corriente de rayo generan cambios en el material por el que circulan. Para este trabajo se analizó específicamente el cambio de temperatura, el cual, por ser de corta duración, no se ve interferido de manera significativa por el intercambio de calor en el medio en el que se encuentra presente el material, por lo tanto puede considerarse un fenómeno adiabático [17].

De acuerdo con lo anterior, el estándar IEC 62305-1 en su anexo D indica las relaciones necesarias para calcular el cambio de temperatura en materiales usados como conductores en sistemas de protección contra rayo. La ecuación (3-1) [17] muestra el cambio de temperatura de un material.

$$\theta - \theta_0 = \frac{1}{\alpha} \left[\exp \frac{\frac{W}{R} * \alpha * \rho_0}{q^2 * \gamma * C_w} - 1 \right] \quad (3-1)$$

Donde:

$\theta - \theta_0$	Corresponde al cambio de temperatura [K]
α	Es la constante de expansión térmica [1/K]
W/R	Es la energía específica del impulso de corriente [J/ Ω]
ρ_0	Resistividad específica a temperatura ambiente [Ω m]
q	Es el área de sección transversal [m^2]
γ	Es la densidad del material [Kg/m^3]
C_w	Es la capacidad térmica [J/KgK]

Así mismo, W/R se calcula de acuerdo con la ecuación (3-2) [17].

$$\frac{W}{R} = \int i^2 dt \quad (3-2)$$

Teniendo en cuenta que la corriente i está dada por la ecuación (2-3) [16]. Reemplazando la ecuación (2-3) en la ecuación (3-2) y esta en (3-1) llegamos a la expresión dada en (3-3).

$$\theta - \theta_0 = \frac{1}{\alpha} \left[\exp \frac{\int \left(\frac{I_{pico}}{\eta} * \frac{\left(\frac{t}{T_1}\right)^n}{\left(\frac{t}{T_1}\right)^n + 1} * e^{-\frac{t}{T_2}} \right)^2 dt * \alpha * \rho_0}{q^2 * \gamma * C_w} - 1 \right] \quad (3-3)$$

Como aproximación de los cálculos se utilizarán constantes para el cálculo del incremento de la temperatura tanto para el material constantán como cobre (Ver tablas 3-1 y 3-2). Esta aproximación implica que se evalúa el comportamiento estático de los materiales, por lo tanto, y para establecer un punto de comparación y calcular posibles errores, se calcularán efectos dinámicos en el cambio de temperatura. La resistividad del material está afectada por los cambios de temperatura y se calcula de acuerdo con la expresión (3-4).

$$\rho_T = \rho_{20^\circ C} + \rho_{20^\circ C} \cdot \alpha (T - 20^\circ C) \quad (3-4)$$

Donde α corresponde al coeficiente de variación de la temperatura en Ω por $^\circ C$. Para el caso del constantán, la resistividad específica a $20^\circ C$ es de $4,9 \times 10^{-7} [\Omega m]$ y $\alpha = 2,0 \times 10^{-5} \Omega/^\circ C$. Para un cambio de temperatura de $1000^\circ C$, el cambio de resistividad es:

$$\rho_{1000^\circ C} = 4,9 \times 10^{-7} + 4,9 \times 10^{-7} * 2,0 \times 10^{-5} (1000 - 20)$$

$$\rho_{1000^\circ C} = 4,996 \times 10^{-7} [\Omega m]$$

Siendo esto que para una temperatura de $1000^\circ C$ el error en el coeficiente de resistividad en comparación para temperatura ambiente es de 1,96%. Otro factor para considerar es el cambio de área por temperatura, el cual está expresado según la ecuación (3-5).

$$A_f = A_0 (1 + Y \Delta T) \quad (3-5)$$

Siendo $Y = 2\alpha$ con α el coeficiente de dilatación lineal. Para el caso del constantán $\alpha = 14,9 \times 10^{-6} \frac{1}{^\circ C}$. Por lo tanto, para una temperatura de $1000^\circ C$ sería:

$$A_f = 2,0 \times 10^{-7} (1 + (2 * 14,9 \times 10^{-6}) * 980)$$

$$A_f = 2,058 \times 10^{-7} m^2$$

De acuerdo con lo anterior, el error en el cambio de área por temperatura es de 2,9% para 1000°C.

Inicialmente, para el material constantán, el valor del punto de fusión es de 1207°C, y considerando la temperatura ambiente de 20°C el $\Delta\theta$ es de 1187°C. El valor de la energía específica del impulso de corriente, dado por la integral de la corriente se evalúa de 0 a 350 μs con el fin de determinar el cambio de temperatura en el tiempo T_2 donde se considera que la señal de corriente ya está por debajo del 50% de la corriente pico evaluada.

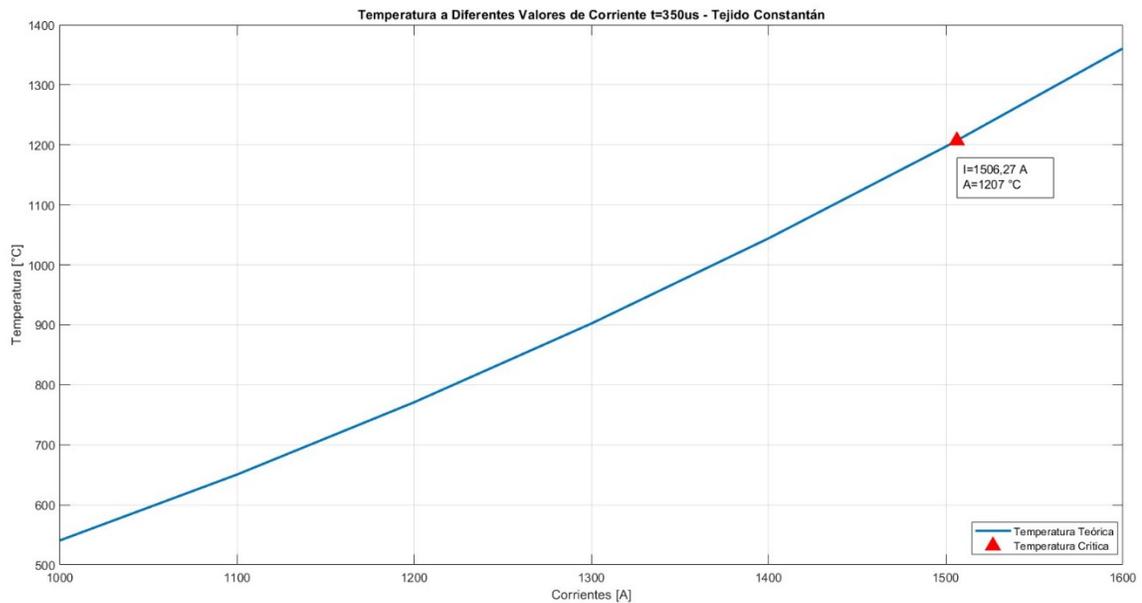
Este límite superior elegido está enfocado en optimizar los tiempos de simulación dados los recursos computacionales, esto sin desconocer que después del tiempo $T_2 = 350 \mu s$ sigue existiendo un aporte de energía. Esta aproximación considera un 84,5% de la energía específica W/R de la corriente de rayo (Ver Anexo A.1). En la **Tabla 3-1** se muestran los valores de constantes del material constantán, los cuales son usados tanto para el análisis teórico como para la simulación.

Tabla 3-1 Valores de constantes para el cálculo teórico de la corriente crítica constantán

Constante	Valor de la constante
α	$14,9 \times 10^6 [1/K]$
ρ_0	$4,9 \times 10^{-7} [\Omega m]$
q	$2,0 \times 10^{-7} [m^2]$
γ	$8885 [kg/m^3]$
C_w	$390 [J/kgK]$

Realizando los respectivos despejes en la ecuación (3-3) se tiene que se requiere una corriente pico de 1506 A para lograr un aumento de temperatura de 1187°C en el tejido conductor. Dicho valor se consideraría como la corriente crítica, esto considerando que tal aumento de temperatura provoca la sublimación del material e impediría el paso de la corriente por un camino seguro. En la **Figura 3-1** se muestran las diferentes temperaturas en el material dependiendo del valor de corriente.

Figura 3-1: Temperatura teórica para diferentes magnitudes de corriente – Material constantán



Fuente: Elaboración propia

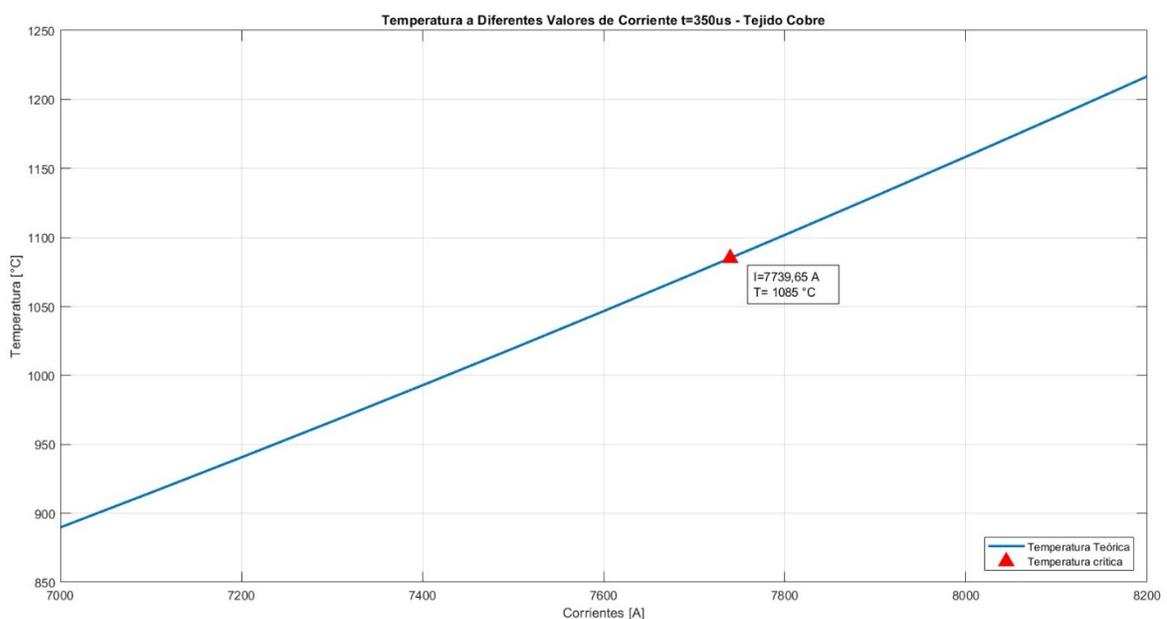
Ahora, considerando el tejido simplificado en material de cobre, sin variar las dimensiones, con un valor de punto de fusión de 1085°C, y considerando la temperatura ambiente de 20°C, se tiene que el $\Delta\theta$ es de 1065°C. En la **Tabla 3-2** se muestran los valores de constantes del material cobre, los cuales son usados tanto para el análisis teórico como para la simulación.

Tabla 3-2 Valores de constantes para el cálculo teórico de la corriente crítica cobre.

Constante	Valor de la constante
α	17×10^6 [1/K]
ρ_0	$1,68 \times 10^{-8}$ [Ωm]
q	$2,0 \times 10^{-7}$ [m^2]
γ	8966 [kg/m^3]
C_w	390 [J/kgK]

El valor de la energía específica del impulso de corriente, dado por la integral de la corriente se evalúa de 0 a 350 μs con el fin de determinar el cambio de temperatura en el tiempo T_2 . Dado el material y el $\Delta\theta$ se calcula el valor de corriente pico crítica para el cobre, dando como resultado 7739,65 A. En la **Figura 3-2** se muestran las temperaturas alcanzadas por el material de acuerdo con diferentes magnitudes de corriente.

Figura 3-2: Temperatura teórica para diferentes magnitudes de corriente – Material cobre



Fuente: Elaboración propia

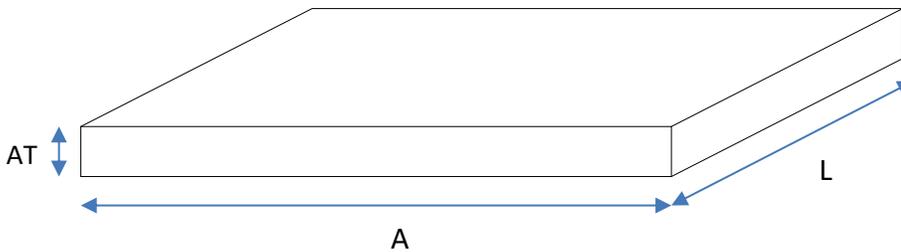
Es necesario convertir los resultados de densidad de corriente crítica en densidad de corriente superficial, esto para separar el valor con las dimensiones del tejido conductor que se evalúe. Siendo esto así, el valor de densidad de corriente crítica superficial para el tejido conductor en constantán es **150 A/cm** y para el tejido en cobre de **774 A/cm**.

3.2 Simulación tejido conductor en constantán.

Teniendo un punto de comparación teórico en cuanto a la densidad de corriente crítica superficial para el tejido conductor en constantán y cobre se procede a implementar el modelo geométrico y de corriente de acuerdo con lo indicado en el capítulo 2 de este documento.

Inicialmente, se modela tejido conductor como una placa sólida de material de acuerdo con **Figura 3-3**, donde $AT = 2\mu m$, $A = 100\text{ mm}$ y $L = 100\text{ mm}$.

Figura 3-3: Dimensiones tejido conductor



Fuente: Elaboración propia

Con el fin de simular el modelo planteado en la **Figura 3-3** y la función analítica mostrada en la ecuación (2-3) se procede a parametrizar desde el software COMSOL Multiphysics tanto las dimensiones de la geometría como los parámetros de entrada que requiere la ecuación (2-3). En la **Tabla 3-3** se muestra la tabla con parámetros usados en el software para la simulación.

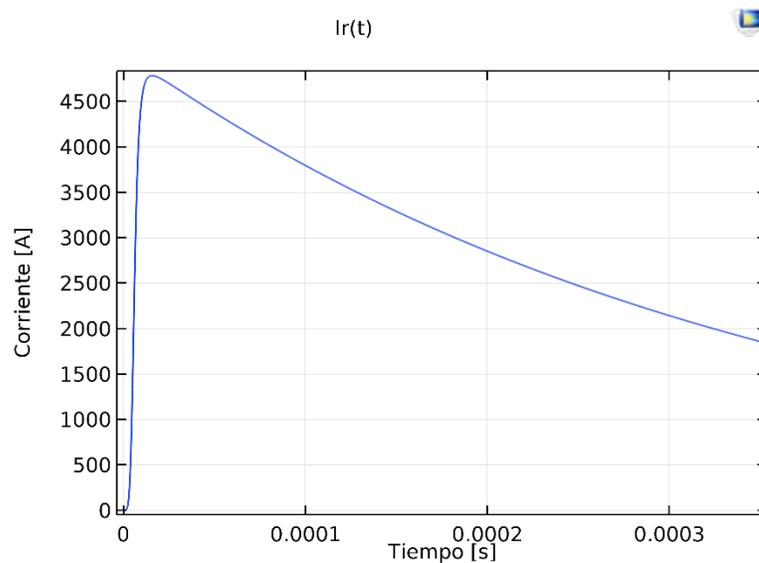
Tabla 3-3 Tabla de parámetros para simulación.

Nombre	Expresión	Descripción
A	100[mm]	Ancho
L	100[mm]	Largo
AT	2[um]	Espesor
I0	5000[A]	Corriente
T1	6.25e-6[s]	Tiempo de subida
T2	350e-6[s]	Tiempo de bajada
cn	5	Factor de concavidad
n	$\exp(-(T1/T2)*(cn*T1/T2)^{(1/cn)})$	Factor de corrección de amplitud

Fuente: Elaboración propia

Una vez parametrizados los valores a utilizar se procede a valuar la forma de onda de la función analítica planteada. En la sección de definiciones del software se procede a relacionar la expresión de la ecuación (2-3). La **Figura 3-4** muestra la gráfica de la función analítica aplicada.

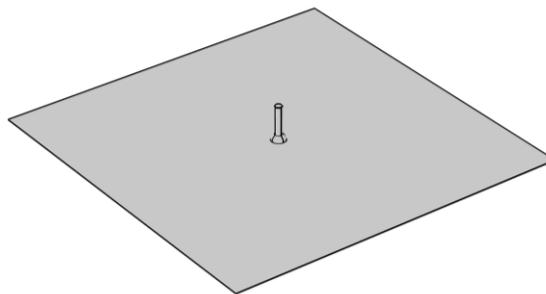
Figura 3-4: Gráfico función analítica de corriente tipo rayo 10/350 μs



Fuente: Elaboración propia – COMSOL Multiphysics

Posteriormente se construye la geometría del tejido conductor simplificado considerando un electrodo central para el ingreso de corriente. En la **Figura 3-5** se muestra el resultado de la geometría para simulación.

Figura 3-5: Geometría para simulación

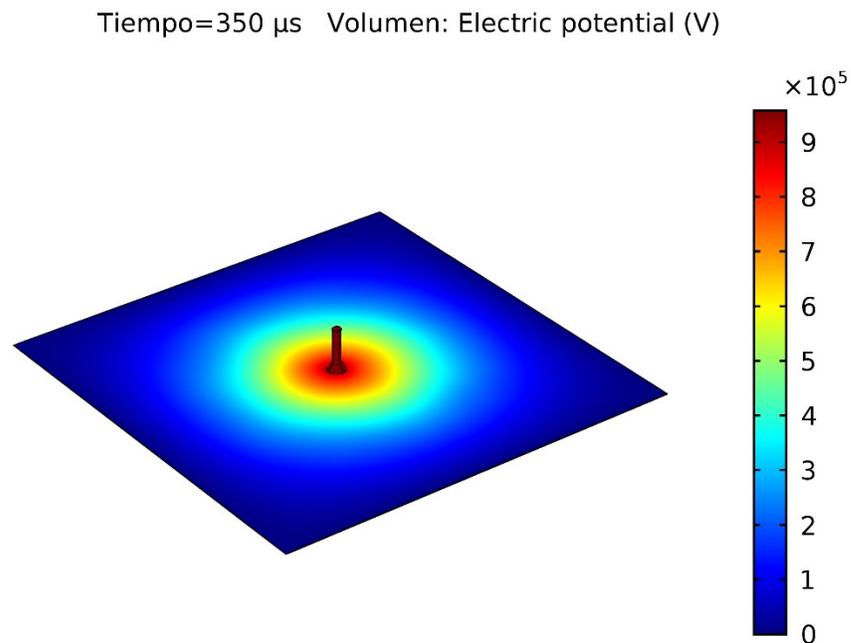


Fuente: Elaboración propia – COMSOL Multiphysics

Una vez construida la geometría y revisada la función analítica se selecciona la física de corrientes eléctrica (ec) para probar la circulación de corriente en el tejido conductor. Para esto se relaciona la expresión de la función analítica con una densidad de corriente normal y el área superior del electrodo, esto para indicar que este será el puerto de entrada de la corriente es la parte superior del electrodo central.

Una vez completado el procedimiento de definición de parámetros para la física de corriente eléctrica y realizado el enmallado el sistema se agrega el estudio considerando la dependencia del tiempo. Dentro de los resultados para un tiempo de simulación de 0 – 350 μs se encuentra que se tienen resultados de diferencias de potencial diferentes a 0 según se muestra en la **Figura 3-6**. No obstante, el valor de la densidad de corriente en el tejido conductor es 0A.

Figura 3-6: Resultado de potencial eléctrico en tejido conductor.

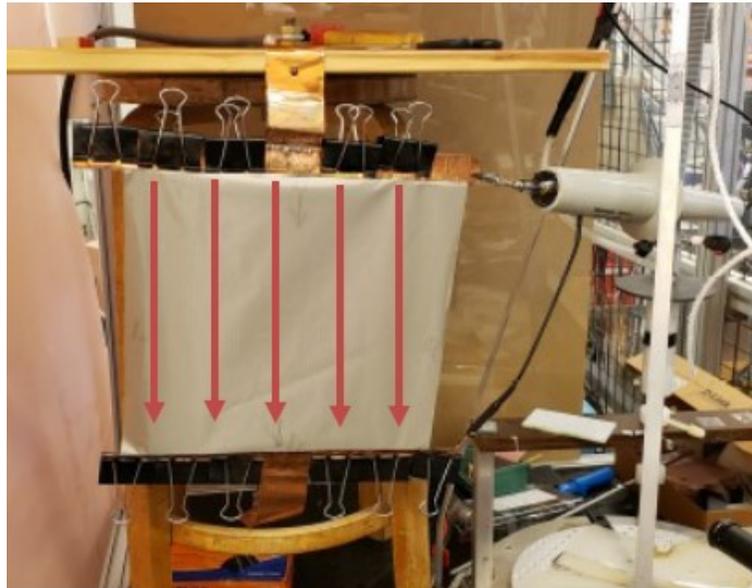


Fuente: Elaboración propia – COMSOL Multiphysics

Considerando lo anterior, y al verificar problemas de acople entre el electrodo y el tejido conductor se considera el cambio de la geometría. Se cambia el electrodo central por dos bloques cuadrados ubicados en dos extremos del tejido conductor, uno usado como

electrodo de entrada de corriente y el otro como tierra, esto en correspondencia con las pruebas de generador de impulsos de corriente realizadas en el Royal Institute of Technology in Stockholm – KTH en 2019, analizadas por Rodríguez [18]. En la **Figura 3-7** se muestra el montaje experimental realizado en KTH en el año 2019, las flechas indican la dirección de circulación de la corriente aplicada.

Figura 3-7: Montaje experimental de muestra de tejido conductor en KTH Suiza.

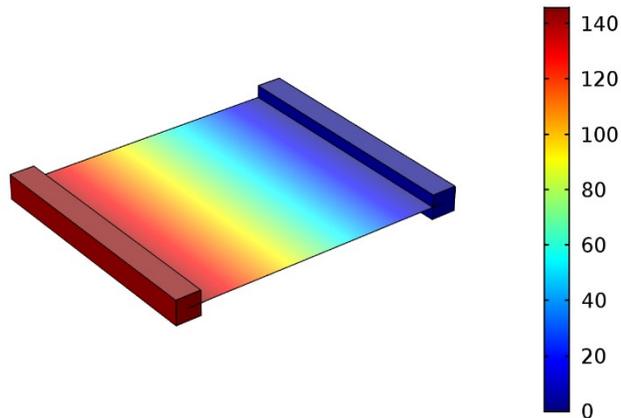


Fuente: Notas personales “Configuración de montaje en KTH” [19] recuperado de Effects on conductive fabrics of different lightning current densities [18].

De acuerdo con el montaje mostrado en la **Figura 3-7** se hace la respectiva reconfiguración de la geometría en el software de simulación obteniendo los resultados de diferencia de potencial que se muestran en la **Figura 3-8**, estos ya relacionando los efectos del calentamiento del material por efecto Joule y que son originados por la circulación de corriente tipo rayo. En dicha figura se puede ver como la diferencia de potencial entre la tierra y el electrodo de ingreso del material para una magnitud de corriente de 1600 A no logra superar los 140 V.

Figura 3-8: Resultado de potencial eléctrico en tejido conductor considerando la multifísica – material constantán

$I_0(7)=1600$ Tiempo= $350 \mu s$ Volumen: Electric potential (V)

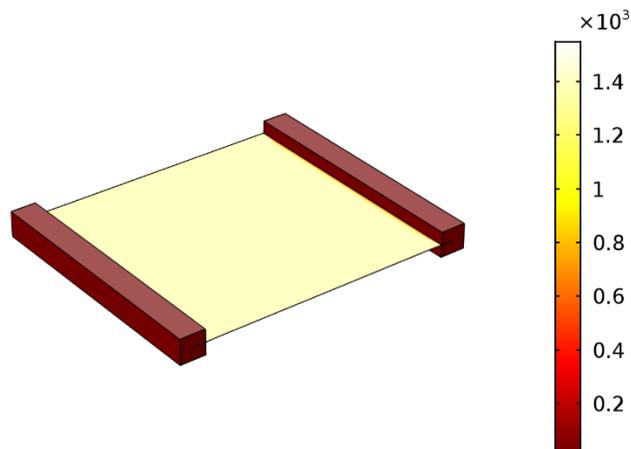


Fuente: Elaboración propia – COMSOL Multiphysics

Asimismo, en la **Figura 3-9** se muestra el resultado de temperatura para el tejido en constantán para una corriente de 1600 A y en un tiempo de $350 \mu s$.

Figura 3-9: Temperatura en tejido conductor para una corriente pico $I = 1600A$ y $t = 350 \mu s$

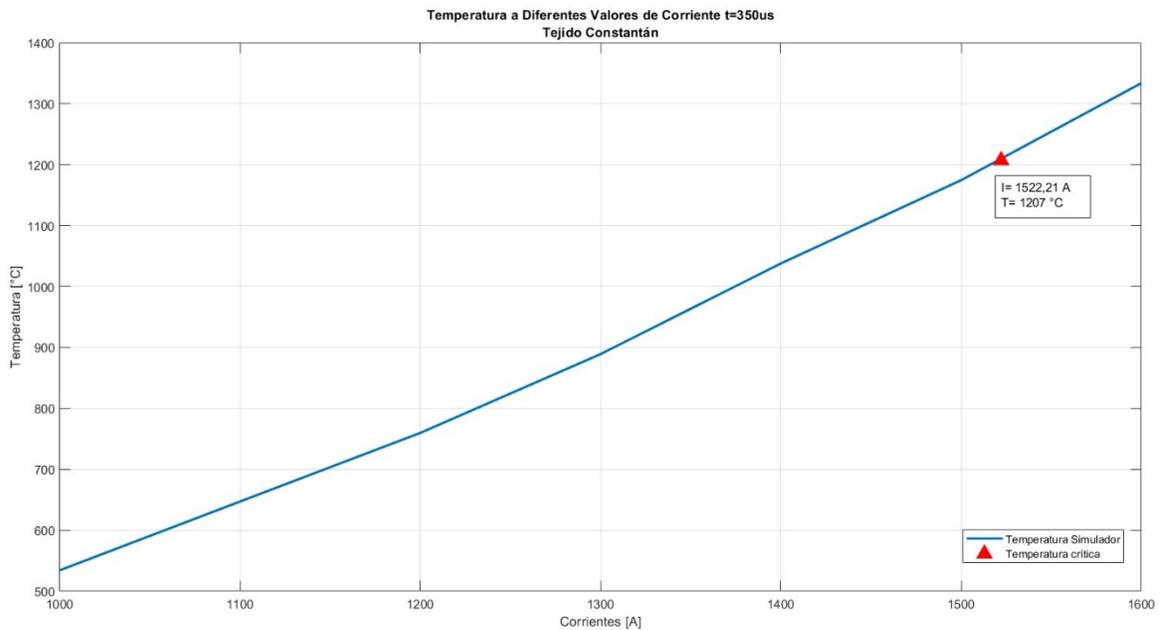
$I_0(7)=1600$ Tiempo= $350 \mu s$ Superficie: Temperature (degC)



Fuente: Elaboración propia – COMSOL Multiphysics

No obstante, para el análisis requerido se hace un barrido paramétrico variando la magnitud de corriente pico aplicada desde 1000 A y hasta 1600 A para calcular el punto donde la corriente genera un incremento de la temperatura tal que se llega al punto de fusión del material. En la **Figura 3-10** se muestran las temperaturas del material en el tiempo $t = 350 \mu\text{s}$ para diferentes valores de corriente. De los datos analizados se encontró que el valor de magnitud de corriente que se considera crítico es de 1522 A, que en densidad superficial de corriente corresponde a 152 A/cm.

Figura 3-10: Aumento de temperatura en tejido conductor en constantán



Fuente: Elaboración propia

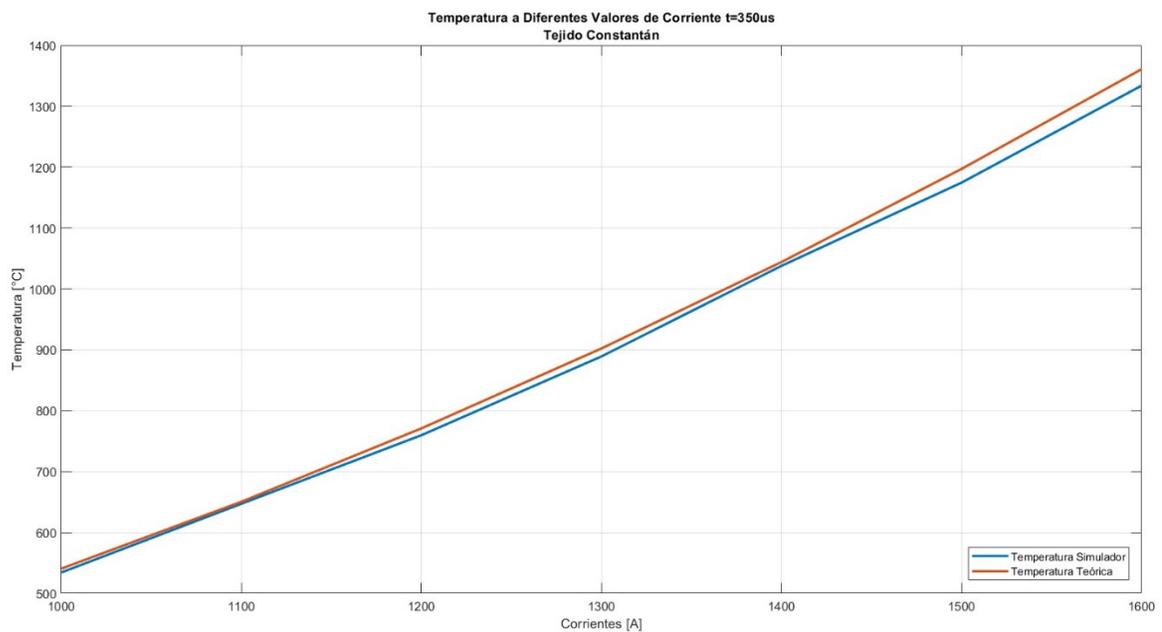
Con el fin de verificar la correspondencia de valores entre los calculados de acuerdo con IEC 62305-1 y los obtenidos de la simulación se genera tabla comparativa punto a punto con cálculo porcentual de la diferencia, cuyo valor máximo fue del 1,99% (Ver **Tabla 3-4**). En la **Figura 3-11** se puede ver la gráfica con la comparación de dichos resultados.

Tabla 3-4 Tabla de temperaturas simulación Vs. Teoría – Tejido conductor constantán

Corriente Pico [A]	Temperatura software [°C]	Temperatura Teórica IEC 62305-1 [°C]	Diferencia
1000	534,31	540,61	1,17%
1100	647,16	650,45	0,51%
1200	759,76	770,96	1,45%
1300	889,12	902,18	1,45%
1400	1037,9	1044,19	0,60%
1500	1174,5	1197,06	1,88%
1600	1333,8	1360,84	1,99%

Fuente: Elaboración propia

Figura 3-11: Comparación de temperaturas para diferentes valores de corriente en tejido conductor en constantán – Simulador Vs. Cálculo teórico.



Fuente: Elaboración propia

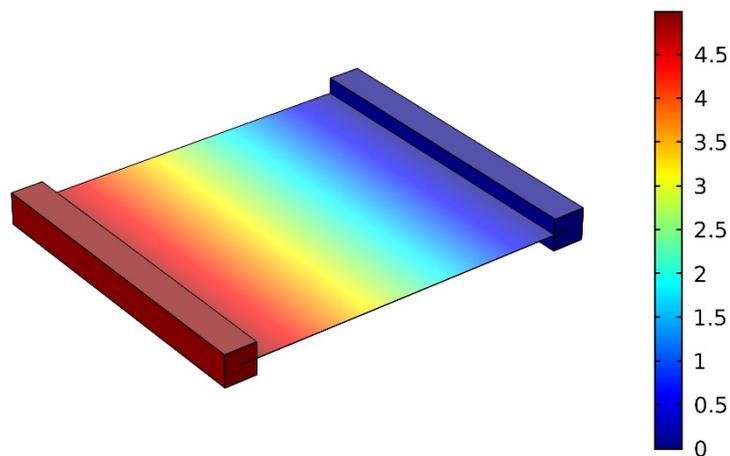
3.3 Simulación tejido conductor en cobre.

Teniendo un punto de comparación teórico en cuanto a la densidad de corriente crítica superficial para el tejido conductor en cobre. Para el caso del tejido conductor en cobre se continúa con las dimensiones geométrica planteadas para el caso del constantán, y cuyo esquema se encuentra en la **Figura 3-3**, donde $AT = 2\mu m$, $A = 100\text{ mm}$ y $L = 100\text{ mm}$.

Inicialmente, y con el fin de comparar el comportamiento del tejido tanto en cobre como constantán, se procede a realizar en el material de cobre el respectivo barrido paramétrico en magnitud de corriente entre 1000 A y hasta 1600 A, al igual que se hizo para el constantán. En este caso, la diferencia de potencial entre el electrodo de ingreso de la corriente y la tierra no es mayor a 5 V, indicando esto un mejor comportamiento del material en términos de conducción de la corriente. En la **Figura 3-12** se muestra el comportamiento del potencial eléctrico en el tejido de cobre.

Figura 3-12: Resultado de potencial eléctrico en tejido conductor considerando la multifísica – material cobre

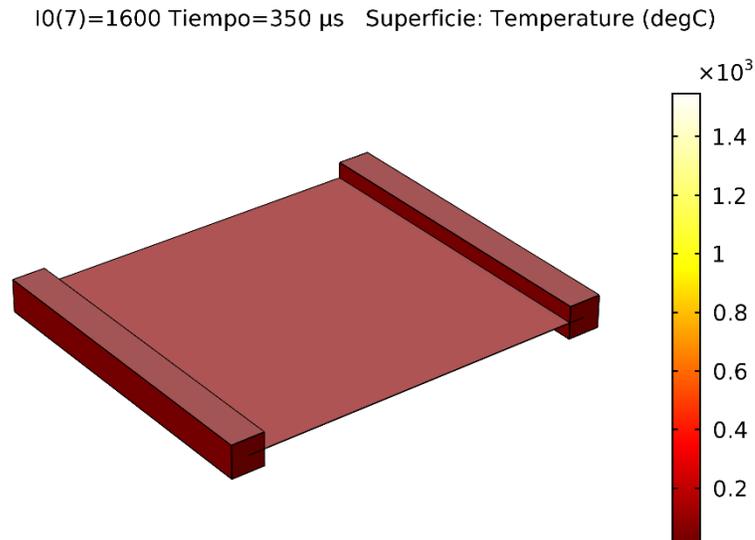
I0(7)=1600 Tiempo=350 μs Volumen: Potencial eléctrico (V)



Fuente: Elaboración propia – COMSOL Multiphysics

Asimismo, se evalúa en la simulación la temperatura en el tiempo $t = 350 \mu s$ y una corriente $I = 1600 A$ para el caso del tejido conductor en cobre. En este caso, la temperatura máxima alcanzada por el tejido fue de $58,6^\circ C$, ver **Figura 3-13**. Siendo notablemente inferior a la temperatura alcanzada por el tejido conductor en constantán bajo los mismos parámetros de prueba.

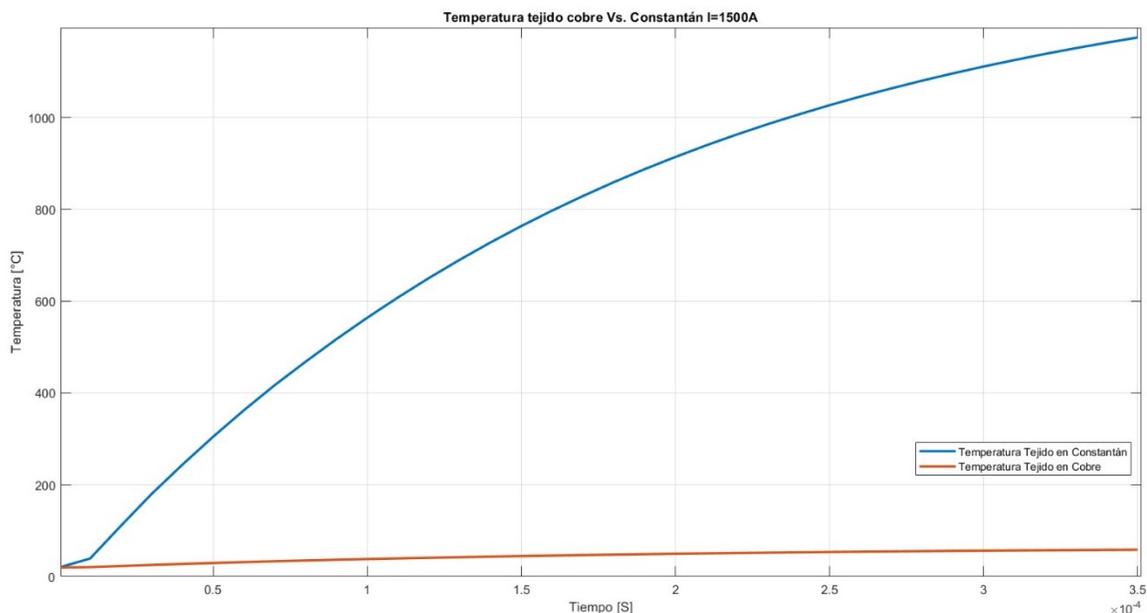
Figura 3-13: Temperatura en tejido conductor en cobre para $I = 1600 A$ y $t = 350 \mu s$



Fuente: Elaboración propia – COMSOL Multiphysics

En la **Figura 3-14** se puede ver la comparación de las temperaturas generadas por efecto joule a una corriente de $1500 A$, para dos diferentes materiales de tejido conductor, cobre y constantán. En la imagen se evidencia la gran diferencia del comportamiento térmico entre ambos materiales. Y aunque el punto de fusión del cobre es menor que la del constantán, $1085^\circ C$ para el cobre y $1207^\circ C$ para el constantán, los efectos térmicos que produce una corriente en el tejido de cobre son mucho menores que los producidos en un material de mismas dimensiones, pero fabricado en constantán.

Figura 3-14: Comparación de temperaturas para corriente de 1500A – Tejido conductor en cobre y constantán



Fuente: Elaboración propia

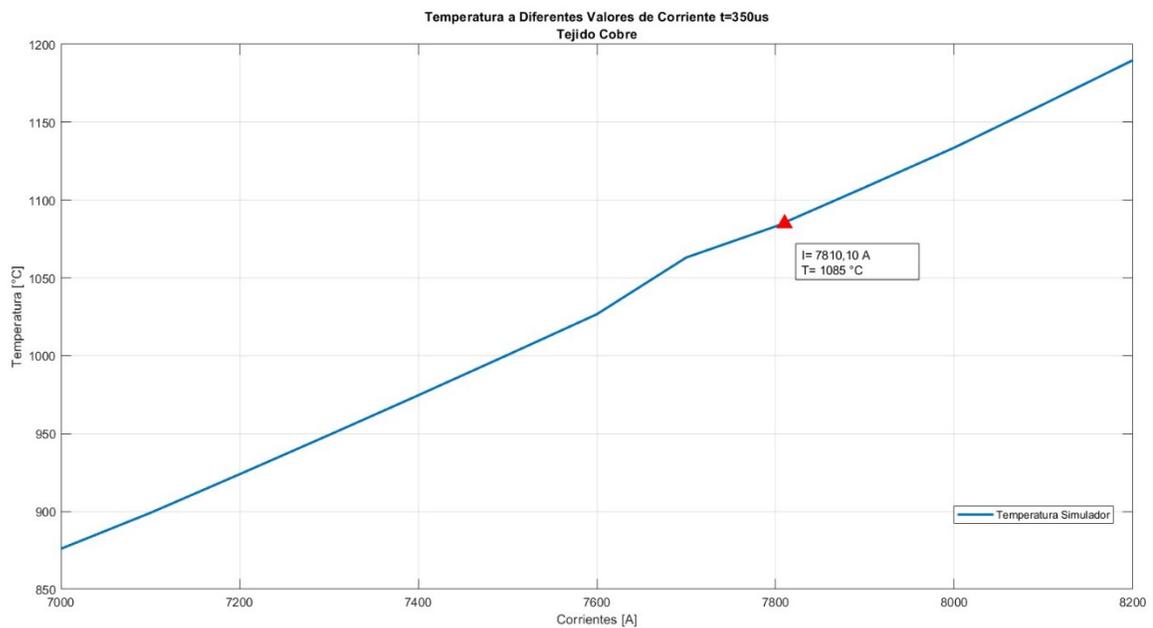
En la **Figura 3-15** se muestran las temperaturas del tejido conductor en material de cobre en el tiempo $t = 350 \mu s$ para diferentes valores de corriente. De los datos analizados se encontró que el valor de magnitud de corriente que se considera crítico es de 7810 A, que en densidad superficial de corriente corresponde a 781 A/cm.

De igual forma, y para verificar la correspondencia de valores entre los calculados de acuerdo con IEC 62305-1 y los obtenidos de la simulación se genera tabla comparativa punto a punto con cálculo porcentual de la diferencia, cuyo valor máximo fue del 2,21% (Ver **Tabla 3-5**). En la **Figura 3-16** se puede ver la gráfica con la comparación de dichos resultados.

Tabla 3-5 Tabla de temperaturas simulación Vs. Teoría – Tejido conductor cobre

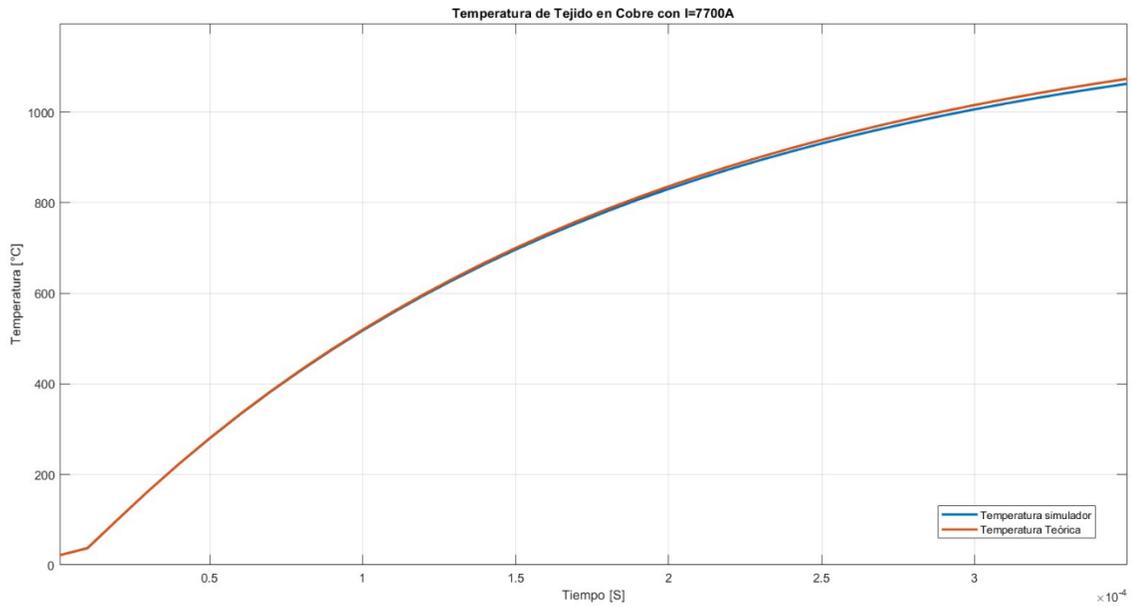
Corriente Pico [A]	Temperatura software [°C]	Temperatura Teórica IEC 62305-1 [°C]	Diferencia
7000	875,99	889,75	1,55%
7100	899,02	914,96	1,74%
7200	923,87	940,55	1,77%
7300	949,06	966,50	1,80%
7400	974,6	992,83	1,84%
7500	1000,5	1019,52	1,87%
7600	1026,7	1046,59	1,90%
7700	1063,1	1074,02	1,02%
7800	1083,1	1101,83	1,70%
7900	1108,2	1130,01	1,93%
8000	1133,7	1158,56	2,15%
8100	1161,6	1187,48	2,18%
8200	1189,9	1216,78	2,21%

Fuente: Elaboración propia

Figura 3-15: Aumento de temperatura en tejido conductor en cobre

Fuente: Elaboración propia

Figura 3-16: Comparación de temperaturas para diferentes valores de corriente en tejido conductor en cobre – Simulador Vs. Cálculo teórico.



Fuente: Elaboración propia

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

Inicialmente, el uso de la simplificación del modelo del tejido conductor permitió evaluar el tejido conductor como un bloque de material y no hilo a hilo como había desarrollado Galeano anteriormente [7]. Esta simplificación permitió además realizar pruebas simuladas mediante software que sean comparables con las realizadas de forma experimental en KTH/Royal Institute of Technology [19]. De igual forma, la simplificación de la geometría permitió reducir los recursos computacionales y tiempos de simulación, volviendo razonables los tiempos de espera.

Por otro lado, la evaluación del cambio de temperatura del material gracias al estándar IEC 62305-1, y considerando el fenómeno como adiabático, permitió generar un punto de comparación en términos de temperatura que pudieran soportar los resultados de las simulaciones en COMSOL Multiphysics. Asimismo, el considerar el comportamiento térmico del material como adiabático permitió obviar los efectos por intercambio de calor con el aire, hecho que también logra una simplificación importante en el análisis, no obstante, esta simplificación se acerca a la realidad debido al rápido aumento de temperaturas que produce el fenómeno del rayo, por lo que el intercambio de calor es prácticamente nulo para el tiempo de $350 \mu s$.

Los resultados tanto de simulación como de los cálculos teóricos resultaron aproximados entre sí, es por esto por lo que para el tejido conductor en material de constantán se determinó que la densidad superficial de corriente crítica para el evento simulado fue de $152,221 \text{ A/cm}$ en comparación a los $150,627 \text{ A/cm}$ calculados teóricamente. Tal diferencia corresponde al 1,05%.

Al evaluar el comportamiento del tejido conductor usando un material alternativo al constantán, en este caso cobre, se calculó que la densidad superficial de corriente crítica

teórica fue de 773,965 A/cm, siendo 0,95% menor a la encontrada mediante simulación, 781,010 A/cm.

Es importante notar la diferencia entre las densidades superficiales de corriente críticas entre el tejido conductor en constantán y cobre, siendo la densidad de corriente del cobre 5 veces mayor que la soportada por el constantán, aun cuando la temperatura de fusión del cobre es menor que la del constantán.

4.2 Recomendaciones y trabajos futuros

En este trabajo se establecieron densidades superficiales de corriente críticas de acuerdo con límites térmicos del material, no obstante, valdría la pena incluir en la simulación física de plasma para verificar comportamiento de corriente de rayo cuando hay sublimación del material. En este sentido, se hace pertinente considerar la simulación de la degradación del material a determinados valores de corriente o temperatura y así lograr ver el paso de corriente por el plasma.

Asimismo, sería importante evaluar la viabilidad técnica y económica de fabricar textiles conductores con cobre en lugar de constantán, esto considerando los resultados de soportabilidad de corriente obtenidos.

Finalmente, para futuras simulaciones en COMSOL Multiphysics es importante tener en cuenta la constante de expansión térmica del material dentro de las características que se introducen manualmente, sin dicha constante los resultados difieren considerablemente de los resultados teóricos que resultan de hacer cálculos de acuerdo con la IEC 62305-1.

A. Anexo: Memoria de cálculos

A1. Aproximaciones

Con el fin de que los cálculos teóricos sean comparables con las evaluaciones de la simulación es importante calcular el cambio de temperatura en condicione iguales a la simulación. En este caso la energía específica W/R de la corriente de impulso se debe calcular de 0-350 μs , esto considerando que por temas de optimización de tiempos de simulación se truncó el análisis en 350 μs .

Siendo la corriente 1 p.u. el valor de energía específica de 0 a 350 μs según la ecuación (3-2) es:

$$\int_0^{350 \times 10^{-6}} \left(\frac{1}{0.98905} \frac{\left(\frac{t}{6.25 \times 10^{-6}}\right)^5 \exp\left(-\frac{t}{350 \times 10^{-6}}\right)}{\left(\frac{t}{6.25 \times 10^{-6}}\right)^5 + 1} \right)^2 dt = 0,000146697 \frac{J}{\Omega}$$

Y el análisis para un tiempo de 2000 μs es:

$$\int_0^{2000 \times 10^{-6}} \left(\frac{1}{0.98905} \frac{\left(\frac{t}{6.25 \times 10^{-6}}\right)^5 \exp\left(-\frac{t}{350 \times 10^{-6}}\right)}{\left(\frac{t}{6.25 \times 10^{-6}}\right)^5 + 1} \right)^2 dt = 0,000170906 \frac{J}{\Omega}$$

De acuerdo con los resultados, esta aproximación considera el 84,5% de la energía específica de la corriente de rayo.

A2. Cálculo de temperatura para Constantán

La ecuación (3-1) [16] muestra el cambio de temperatura de un material.

$$\theta - \theta_0 = \frac{1}{\alpha} \left[\exp \frac{\frac{W}{R} * \alpha * \rho_0}{q^2 * \gamma * C_w} - 1 \right] \quad (3-1)$$

Donde:

$\theta - \theta_0$	Corresponde al cambio de temperatura [K]
α	Es la constante de expansión térmica [1/K]
W/R	Es la energía específica del impulso de corriente [J/ Ω]
ρ_0	Resistividad específica a temperatura ambiente [Ωm]
q	Es el área de sección transversal [m^2]
γ	Es la densidad del material [Kg/m^3]
C_w	Es la capacidad térmica [J/KgK]

Así mismo, W/R se calcula de acuerdo con la ecuación (3-2) [17].

$$\frac{W}{R} = \int i^2 dt \quad (3-2)$$

Teniendo en cuenta que la corriente i está dada por la ecuación (2-2) [16]. Reemplazando la ecuación (2-3) en la ecuación (3-2) y esta en (3-1) llegamos a la expresión dada en (3-3)

$$\theta - \theta_0 = \frac{1}{\alpha} \left[\exp \frac{\int \left(\frac{I_{pico}}{\eta} * \frac{\left(\frac{t}{T_1}\right)^n}{\left(\frac{t}{T_1}\right)^n + 1} * e^{-\frac{t}{T_2}} \right)^2 dt * \alpha * \rho_0}{q^2 * \gamma * C_w} - 1 \right] \quad (3-3)$$

Tabla 1 Valores de constantes para el constantán

Constante	Valor de la constante
α	$14,9 \times 10^6$ [1/K]
ρ_0	$4,9 \times 10^{-7}$ [Ωm]
q	$2,0 \times 10^{-7}$ [m^2]
γ	8885 [kg/m^3]
C_w	390 [J/kgK]

Inicialmente se calculan los resultados de la integral relacionada en la ecuación (3-2), en este caso para 7 valores de corriente pico, empezando con 1000 A y con aumentos de 100 A en cada caso. La integral a evaluar es la siguiente:

$$\int_{0 \text{ s}}^{350 \mu\text{s}} \left(\frac{I_{\text{pico}}}{\eta} * \frac{\left(\frac{t}{T_1}\right)^n}{\left(\frac{t}{T_1}\right)^n + 1} * e^{-\frac{t}{T_2}} \right)^2 dt$$

Donde η corresponde al factor de corrección del valor de la corriente pico y se define de acuerdo con la ecuación (2-4) [16].

$$\eta = e^{\left(\frac{T_1}{T_2}\right)\left(\frac{nT_1}{T_2}\right)^{\frac{1}{n}}} \quad (2-3)$$

Donde:

I_{pico} Valor de la corriente pico de la señal [A]

T_1 Tiempo de subida [s] = 6,25 μs

T_2 Tiempo de bajada [s] = 350 μs

n Factor de concavidad (usualmente $n=5$) [16] = 5

De acuerdo con esto:

$$\eta = e^{\left(\frac{T_1}{T_2}\right)\left(\frac{nT_1}{T_2}\right)^{\frac{1}{n}}} = e^{\left(\frac{6,25 \times 10^{-6}}{350 \times 10^{-6}}\right)\left(\frac{5 * 6,25 \times 10^{-6}}{350 \times 10^{-6}}\right)^{\frac{1}{5}}} = 0,98905$$

Por lo tanto, la integral para una corriente pico de 1000 A sería:

$$\int_0^{350 \times 10^{-6}} \left(\frac{1000}{0.98905} \frac{\left(\frac{t}{6.25 \times 10^{-6}}\right)^5}{\left(\frac{t}{6.25 \times 10^{-6}}\right)^5 + 1} \exp\left(-\frac{t}{350 \times 10^{-6}}\right) \right)^2 dt = 146,697$$

Y el cambio de temperatura se calcularía como:

$$520,61 = \frac{1}{14,9 \times 10^6 [1/K]} \left[\exp \frac{146,697 * 14,9 \times 10^6 [1/K] * 4,9 \times 10^{-7} [\Omega m]}{2,0 \times 10^{-7} [m^2]^2 * 8885 [kg/m^3] * 390 [J/kgK]} - 1 \right]$$

Teniendo en cuenta que este valor es sólo el cambio de temperatura es importante sumarle la temperatura ambiente, que para efectos tanto del cálculo como el simulador será de 20 °C. Por lo tanto la temperatura del tejido conductor a una corriente de 1000 A en el tiempo $t = 350 \mu s$ es de 540,61 °C.

Los resultados para los demás valores de corriente se indican en la tabla 2.

Tabla 2 Resultados para cambios de temperatura en constantán

Corriente [A]	Resultado Integral	Cambio de temperatura [°C]	Temperatura [°C]
1000	146,70	520,61	540,61
1100	177,50	630,45	650,45
1200	211,24	750,96	770,96
1300	247,92	882,18	902,18
1400	287,53	1024,19	1044,19
1500	330,07	1177,06	1197,06
1600	375,54	1340,84	1360,84

Despejando un valor de corriente que genera un aumento de temperatura de 1187 °C, se encuentra que es 1506,27 A.

A3. Cálculo de temperatura para Cobre

Siguiendo el mismo procedimiento utilizado para el cálculo de variación de temperatura del constantán se procede a realizar los cálculos para el cobre.

Los valores de constante para la ecuación (3-3) son propios para cada material, por lo tanto, en la tabla 3 se indican los valores utilizados para el cálculo del cobre, los cuales dependen de los valores registrados en COMSOL para el material predeterminado de cobre.

Tabla 3 Valores de constantes para el cobre

Constante	Valor de la constante
α	17×10^6 [1/K]
ρ_0	$1,68 \times 10^{-8}$ [Ωm]
q	$2,0 \times 10^{-7}$ [m^2]
γ	8966 [kg/m^3]
C_w	390 [J/kgK]

Para el cálculo del cambio de temperatura se encontró que para corrientes pico cercanas a los valores tomados para el constantán no se percibían cambios considerables de temperatura, por lo tanto, se decidió usar valores cercanos al punto de fusión y se arrancó con una corriente pico de 7000 A, haciendo incrementos de 100 A hasta llegar a 8200 A. El cálculo de la integral para 7000 A es el siguiente:

$$\int_0^{350 \times 10^{-6}} \left(\frac{7000}{0.98905} \frac{\left(\frac{t}{6.25 \times 10^{-6}}\right)^5}{\left(\frac{t}{6.25 \times 10^{-6}}\right)^5 + 1} \exp\left(-\frac{t}{350 \times 10^{-6}}\right) \right)^2 dt = 7188,13$$

Y el cambio de temperatura se calcularía como:

$$869,75 = \frac{1}{17 \times 10^6 \text{ [1/K]}} \left[\exp \frac{7188,13 * 17 \times 10^6 \text{ [1/K]} * 1,68 \times 10^{-8} \text{ [\Omega m]}}{2,0 \times 10^{-7} \text{ [m}^2\text{]}^2 * 8966 \text{ [kg/m}^3\text{]} * 390 \text{ [J/kgK]}} - 1 \right]$$

Teniendo en cuenta que este valor es sólo el cambio de temperatura es importante sumarle la temperatura ambiente, que para efectos tanto del cálculo como el simulador será de 20 °C. Por lo tanto la temperatura del tejido conductor de cobre a una corriente de 7000 A en el tiempo $t = 350 \mu\text{s}$ es de 889,75 °C.

Los resultados para los demás valores de corriente se indican en la tabla 4.

Tabla 4 Resultados para cambios de temperatura en cobre

Corriente [A]	Integral	Cambio de temperatura [°C]	Temperatura [°C]
7000	7188,13	869,75	889,75
7100	7394,97	894,96	914,96
7200	7604,75	920,55	940,55
7300	7817,46	946,50	966,50
7400	8033,10	972,83	992,83
7500	8251,68	999,52	1019,52
7600	8473,19	1026,59	1046,59
7700	8697,64	1054,02	1074,02
7800	8925,02	1081,83	1101,83
7900	9155,33	1110,01	1130,01
8000	9388,58	1138,56	1158,56
8100	9624,76	1167,48	1187,48
8200	9863,87	1196,78	1216,78

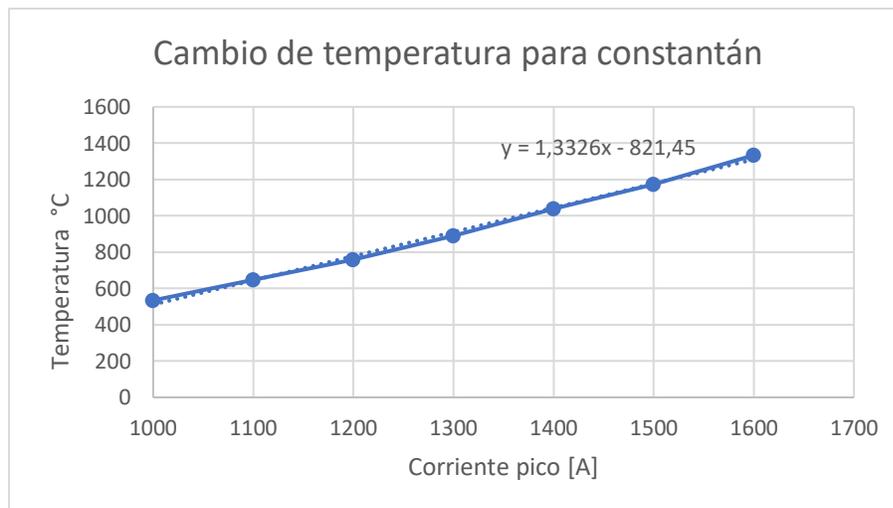
Despejando un valor de corriente que genera un aumento de temperatura de 1065 °C, se encuentra que es 7739,65 A.

A4. Despeje de valor de corriente crítica constantán – Simulación

Se descargan los datos del simulador y se linealizan los datos y se grafican con el fin de obtener una expresión lineal para despejar el valor pico de corriente crítica. Siendo este valor 1522,21 A.

Tabla 5 Resultados para cambios de temperatura en constantán

Corriente pico[A]	Temperatura software [°C]
1000	534,31
1100	647,16
1200	759,76
1300	889,12
1400	1037,9
1500	1174,5
1600	1333,8

Gráfico 1 Cambios de temperatura para constantán

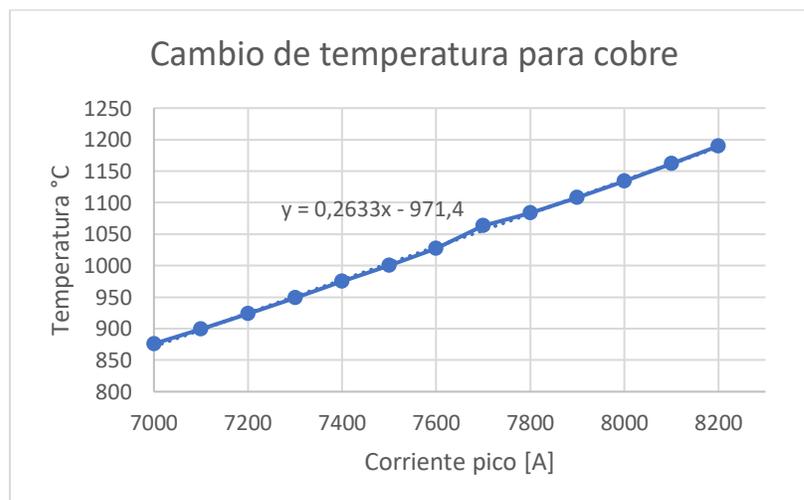
A5. Despeje de valor de corriente crítica cobre – Simulación

Se descargan los datos del simulador y se linealizan los datos y se grafican con el fin de obtener una expresión lineal para despejar el valor pico de corriente crítica. Siendo este valor 7810,10 A.

Tabla 6 Resultados para cambios de temperatura en cobre

Corriente Pico [A]	Temperatura software [°C]
7000	875,99
7100	899,02
7200	923,87
7300	949,06
7400	974,6
7500	1000,5
7600	1026,7
7700	1063,1
7800	1083,1
7900	1108,2
8000	1133,7
8100	1161,6
8200	1189,9

Gráfico 2 Cambios de temperatura para cobre



B. Anexo: Especificaciones equipo usado para simulación

El equipo usado para realizar la simulación en el software COMSOL Multiphysics hace parte del Laboratorio de Innovación en Alta Tensión y Energías Renovables-LIATER de la Universidad Nacional de Colombia. Las características técnicas del equipo y software de simulación se describen a continuación:

Procesador	AMD Ryzen Threadripper 2950X 16-Core Processor 3.50 GHz
RAM Instalada	128 GB
Tipo de Sistema	Sistema operativo de 64 bits, procesador basado en x64
Sistema operativo	Windows 10 Education
Software de simulación	COMSOL Multiphysics 5.5
Licencia No.	2092283

C. Anexo: Paper para ICLP - 2022

Se adjunta certificado de presentación del paper: Effects on conductive fabrics of different lightning current densities, presentado para la trigésima sexta Conferencia Internacional en Protección Contra Rayos (ICLP), llevada a cabo en Cape Town, Sudáfrica entre el 2-7 de octubre de 2022. Asimismo se adjunta paper aprobado y presentado para dicha conferencia.



ICLP₂₀₂₂ SOUTH AFRICA

2-7 OCTOBER 2022 CAPE TOWN



36TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION

Paper Presentation Certificate

This is to certify that

Juan P. Correa P.

presented the paper titled

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

at the

36th International Conference on Lightning Protection held in
Cape Town, South Africa from 2 – 7 October 2022

Carlo Alberto Nucci

Carlo Alberto Nucci
ICLP President

Ian R. Jandrell
36th ICLP Chair



Effects on conductive fabrics of different lightning current densities

1nd Daniel Rodríguez M.
EMC-UN Research Group
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá D.C., Colombia
danrodriguezman@unal.edu.co

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

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

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

5th 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.

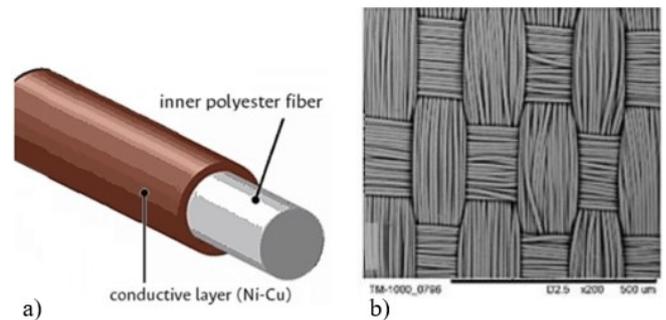


Fig. 1. a) Structure of a conductive thread; b) Micrograph of a conductive fabric. [8]

TABLE I. CHARACTERISTICS OF THE TESTED CONDUCTIVE FABRIC

Item	Characteristic	Unit
Fabric Pattern	Rip-Stop	---
Weight	90 ± 10	g/m^2
Width	0.10 ± 0.01	mm
Resistance	0.05	Ω/square
Material	Ni-Cu	---

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

B. Previous laboratory work

Previous investigations performed by the EMC-UNC research group, mentioned in [1, 3, 7 and 8], have been performed in two universities HV labs: IEE-US in Brazil and KTH University in Sweden.

The results of the above mentioned experiments have shown patterns of transversal brown scratches perpendicular to the direction of the current flow. Microscopic observations of the scratches show sublimation of the threads conducting layer of the conductive fabric shown in Fig. 1 a). The objective of the present research work is to relate the observed conduction material losses with an increase in the conducting textile resistance caused by the current density when it exceeds certain thresholds values.

III. METHODOLOGY

To study the behavior of the conductive fabrics resistance as a function of the current density, there are two groups of experiments are performed with 8/20 μs and 10/350 μs LICGs, which are described in the following.

A. 8/20 μs waveform experiments

The 8/20 μs LICG experiments were performed at the IEE-US (Brazil) to 10x10 cm^2 test samples of conductive fabrics. Figures 2 and 3 shows the experimental set-up of the used LICG.

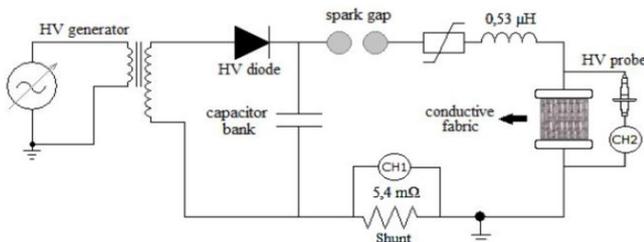


Fig. 2. Schematic representation of the 8/20 μs , LICG at IEE-US, Brazil [8]



Fig. 3. Experimental assembly to fix the 10x10 cm^2 conductive fabrics test samples connected to the 8/20 μs LICG at the IEE-US, Brazil [8]. Notice that current flows from left to right in this assembly

B. 10/350 μs waveform experiments

The 10/350 μs LICG experiments are performed at KTH (Sweden) to 30x30 cm^2 test samples of conductive fabrics. Figure 4 shows the schematics representation of the LICG and Figure 5 some details of the experimental assembly to fix the 30x30 cm^2 test samples.

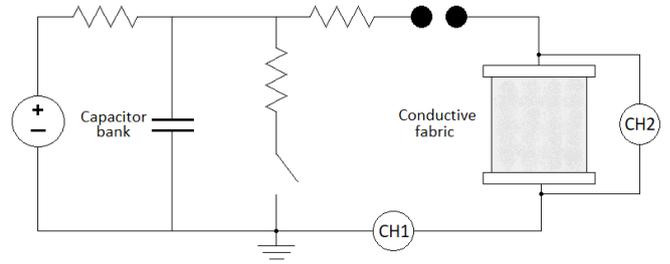


Fig. 4. Schematic representation of the 10/350 μs , LICG at KTH, Sweden. [3]



Fig. 5. Experimental assembly to fix the 30x30 cm^2 conductive fabrics test samples connected to the 10/350 μs LICG at KTH, Sweden [2]. Notice that in this assembly current flows from the upper to lower side in this assembly

As it can be seen in Figs. 3 and 5, to ensure a constant current density along the test sample, both, the current in and out sides of the squared test sample are fixed to the plane electrodes at a constant mechanical pressure. In both experiments the opposite sides of the squared test samples are fixed at conducting terminals to ensure the injection of a constant current density to the test sample.

To study the response of the conductive fabric test samples to different current densities and energy levels, LICs of different amplitudes are applied to the conductive fabrics test samples

IV. RESULTS

Figures 6 and 7 show examples of the recorded LICs and the voltage response signature in conductive fabric test samples when 8/20 μs and 10/350 μs where respectively applied to 10x10 cm^2 and 30x30 cm^2 conductive fabric test samples.

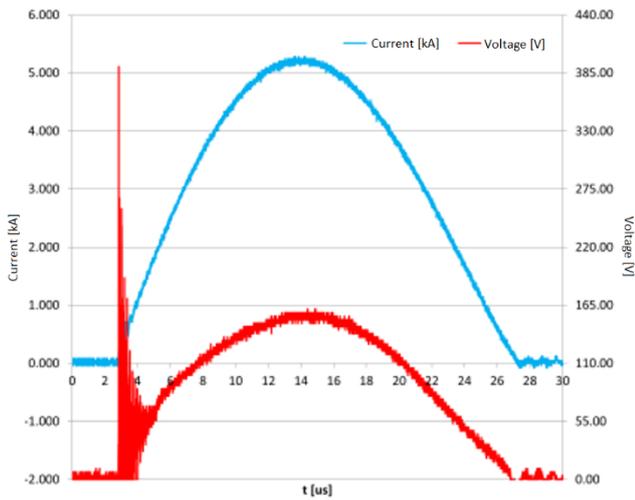


Fig. 6. 5,2 kA, 8/20 μ s LIC and voltage signature obtained in a 10x10 cm² conductive fabric test sample tested at IEE-US Brazil [8]

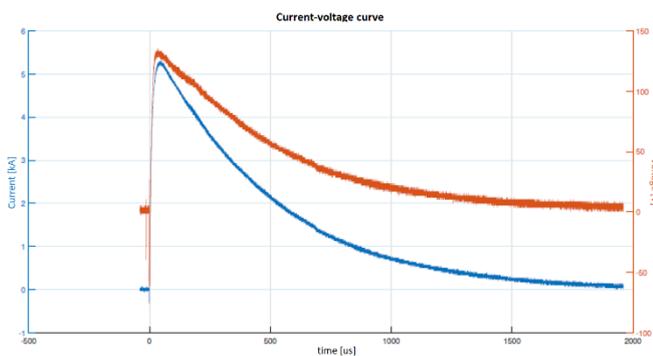


Fig. 7. 6,2 kA, 10/350 μ s LIC and voltage signature measured in a 30x30 cm² conductive fabric test sample tested at KTH, Sweden [8].

The behavior of the conductive textile impedance was obtained from the experimentally measured voltage and current signatures. As a result of the experiments, a resistive behavior is observed for small lightning impulse current densities: less than 1 kA/cm for 8/20 μ s LICs and less than 233.34 A/cm for 10/350 μ s respectively. Additionally, for the before mentioned current amplitudes, the conductive textile samples support the mechanical stresses caused by the heating processed produced by the by the LIC. However, both LIC signatures 8/20 and 10/350 μ s and for higher current densities as the previously mentioned, the conductive threads are deteriorated increasing its resistance, mainly due to sublimation of its conductive layer. These material losses are reflected in a weight reduction of the conductive fabric test sample and an increase in its resistance.

The experimentally obtained conductive fabric resistance values are compared with the calculated ones, based on the microscopic threads geometry, manufacturing method and properties of the conductive fabrics. For this purpose, the conductivity value of the conducting material: Constant, are obtained from the technical data sheet. The obtained values are the following: conductive area: 27.14 μ m², resistance of the conductive fabric test sample: 2.7 Ω for each section of the 1 cm wide by 10 cm long sample and 8.13 Ω for each section of the 1 cm wide by 30 cm long sample.

Once the conductive fabric samples are tested, the voltage and current signatures could give information about changes in the conductive fabric resistance caused by an overflow of the threshold value of the surface current density [3]. The calculation of the conductive fabric test sample resistance is obtained by means of a geometrical calculation of the conducting material of all the threads which compose each conductive fabric test samples of 10x10 cm² and 30x30 cm² respectively tested at IEE/USP [1] and KTH [2]. Subsequently, the calculated resistance values are compared with the experimentally obtained values.

Figures 8 and 9 show the variation of the textile impedance as a function of the applied current obtained in the experiments performed at IEE/USP Brazil, with a 8/20 μ s LICs. Figure 8 shows the time variation of the conductive fabric impedance as a function of time for a 8/20 μ s lightning impulse current density of 500 A/cm. The variation of the conductive fabric impedance was obtained with the voltage and current waveforms shown in Figure 6. However, Figure 9 shows a nonlinear variation of the conductive fabric sample impedance that occurs for current densities greater than 1500A/cm. This change in conductivity could be explained by variations in the resistance caused by sublimation of the conductive layer of some threads of the conducting fabric samples. This could be caused by the energy associated with the large current density injected in the test sample.

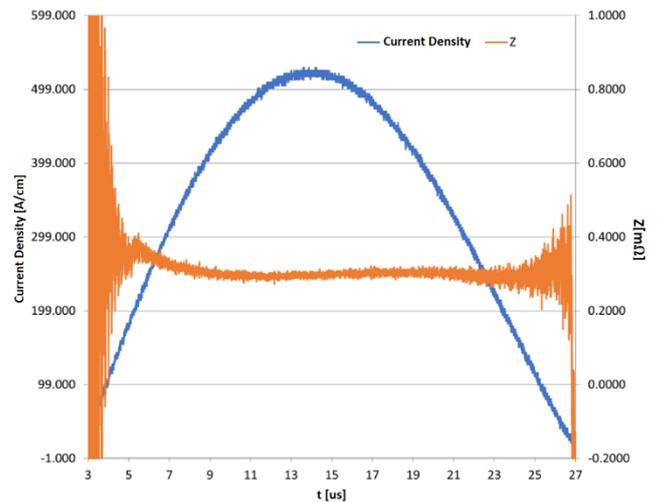


Fig. 8. Time variation of the conductive fabric impedance for a 8/20 μ s lightning impulse current density of 500A/cm, performed at IEE-USP Brazil [3]. Notice the linear behavior of the conducting fabric impedance

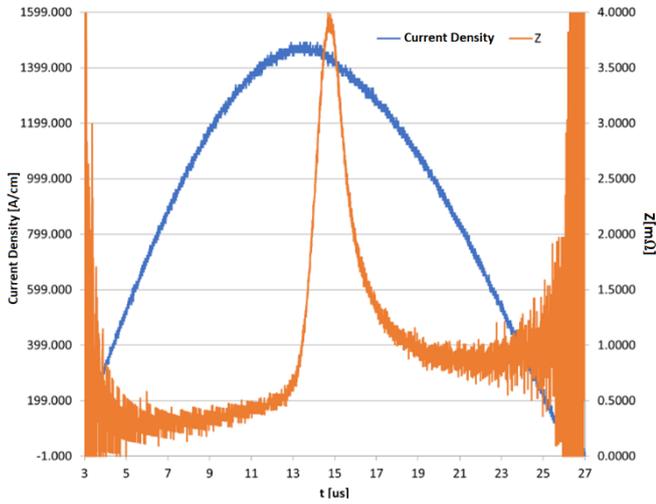


Fig. 9. Time variation of the conductive fabric impedance for a 8/20 μs lightning impulse current density of maximum 1500 A/cm, performed at IEE-USP Brazil [3]. Notice the non-linear behavior of the conducting fabric impedance.

Figures 10 and 11 show the variation of the textile impedance as a function of the applied current obtained in the experiments performed at KTH Sweden, with a 10/350 μs LICs. Figure 10, which is derived from the measured values shown in Figure 7, shows an almost constant conductive fabric impedance value. This could be explained by the fact that the conductive fabric resistance is not affected by the applied current density of 167 A/cm. However, this is not the case for the conductive fabric impedance behavior shown in Figure 11. In Figure 11 the maximum current density amplitude of the 10/350 μs LICs was 500 A/cm. This high current density produces a non-linear behavior of the conducting fabric impedance, possibly caused by sublimation of the fabrics threads conductive layer.

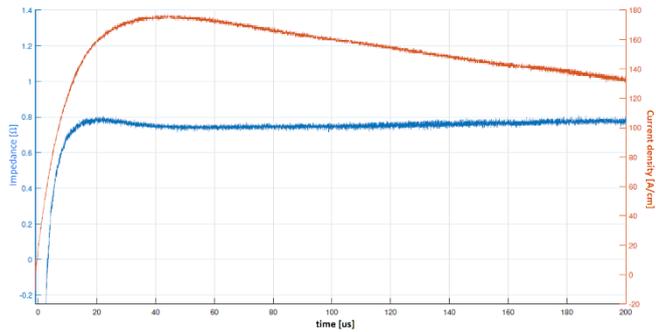


Fig. 10. Time variation of the conductive fabric impedance for a 10/350 μs lightning impulse current density of 167 A/cm, performed at KTH, Sweden [3]. Notice the linear behavior of the conducting fabric impedance.

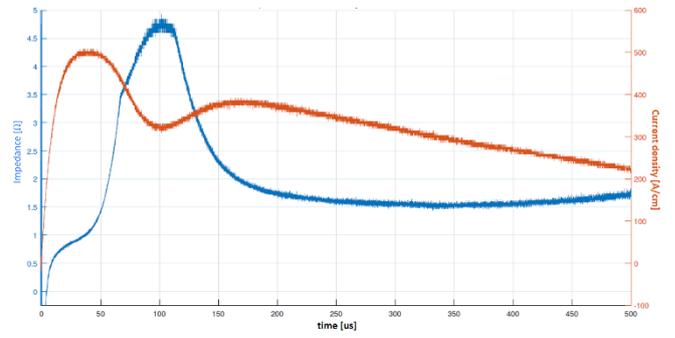


Fig. 11. Time variation of the signal and wavefront resistance in IEE-USP test for 500 A/cm [3] conductive fabric impedance for a 10/350 μs lightning impulse current density of 500 A/cm, performed at KTH, Sweden [3]. Notice the non-linear behavior of the conducting fabric impedance.

V. DISCUSSION AND CONCLUSIONS

From the experimental results obtained in the present research work, it has been observed that the conductive fabric impedance could be different depending on the lightning current density amplitude and the LIC waveform. For 8/20 μs LICs, the conductive fabric resistance is linear for current densities lower than 500 A/cm, while for 10/350 μs LICs is 167 A/cm. Above these current densities values the conductive fabric impedance become non-linear. This fact is shown in Figures 9 and 11. In the former figure, a large impedance variation is observed at 16 μs , when a 1500 A/cm lightning impulse current density of 8/20 μs LIC is applied to a 10x10 cm^2 test sample, while in the later a large impedance variation is observed at 100 μs , when a 500 A/cm lightning impulse current density of 10/350 μs LIC is applied to a 30x30 cm^2 test sample [3].

After analyzing several experiments, Casas observed that the conductive fabric impedance is linear until the upper limits of 1 kA/cm for 8/20 μs lightning impulse current densities, while 10/350 μs the upper limit is 233.34 A/cm [3].

Above these values, the fabric is degraded, and current conduction mechanism could involve an increase in the conductive fabric resistivity, probably caused by sublimation of the thin shells of conducting material.

However, to estimate the critical current density supported by the conductive fabric thin conducting shell material. Therefore, it is necessary to simulate the conductive fabric by modelling it in a software capable of involving different physical variables.

Casas proposes the conductive fabric modeling and simulation in [3], as a 30x30 cm^2 solid conductive plate, by involving as input variables the values of resistance per wire, the number of wires and the conductivity of the conductive layer. After this procedure the thickness of the solid conductive plate is estimated in 1.81 μm .

As it was mentioned before, as a result of the test performed on conductive fabrics, two conduction mechanisms are identified for 8/20 μs current densities. At current densities lower than 1 kA/cm there is a resistive conduction mechanism. For higher current densities there is conductive

material losses due to a sublimation phenomenon caused by the large temperature increase of the conductive layer. The sublimation phenomenon could develop a plasma conduction mechanism, which could increase the conducting textile resistance. Additionally, for lightning current densities up to 2 kA/cm for 8/20 μ s, the conducting textiles mechanically withstands this lightning current densities without a mechanical destruction.

Finally, for the experiments with waveform 10/350 μ s, it is observed that the resistive behavior occurs up to a current density of 233.34 A/cm. However, a plasma phenomenon, as mentioned in the previous paragraph, is observed due to sublimation of the conductive material. For the tests performed with 10/350 μ s and current densities of 500 A/cm, the tested conductive fabric is not able to support this mechanical stress.

VI. FUTURE WORKS

It is necessary to carry out new laboratory tests with 10/350 μ s lightning impulse currents, to determine the lightning current density at which the material mechanically breaks. On the other hand, the conducting textiles numerical simulations models must be improved in order to include most of the electrical and mechanical characteristics in order to determine the temperature conditions that are reached by the conducting materials at the moment of plasma appearance. On the other hand, it is necessary to understand the electrical current conduction mechanism in the conducting fabric, which causes perpendicular scratches in the test sample.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank to the active members from the Electromagnetic Compatibility Research Group EMC-UN and the entire team at the Institute of Energy and Environment IEE-USP (Brazil) and KTH Royal Institute of Technology (Sweden). Laura Casas' participation is based on her graduate work to obtain her degree on Electrical Engineering from the Universidad Nacional de Colombia.

REFERENCES

- [1] [1] J. A. Cristancho, J. E. Rodriguez, C. A. Rivera, M. Shigihara, C. Y. Kodairaand, A. Piantini and F. Roman, "Behavior of an Electroconductive Ripstop Fabric under 8/20_s Lightning Current: Preliminary Results" ICLP – SIPDA 2020 - OpenConf Abstract Submission, Peer Review, and Event Management System., Sept. 2020. https://iclp2020.org/paper-submission-system/modules/request.php?module=oc_program&action=summary.php&id=160
- [2] F. Roman, "Assembly configuration in KTH" Dec. 2019. Personal notes.
- [3] L. Y. Casas López, Efectos de la variación de la densidad de corriente superficial tipo rayo en el comportamiento de los textiles conductivos, Bogotá D.C., 2021.
- [4] A. Cruz-Bernal, H. Torres-Sánchez, H. Aranguren-Fino and J. Inampués-Borda, "Lightning mortality rate in Colombia for the period 1997 {2014", Revista UIS Ingenierías, vol. 17, no. 2, pp. 65-74, 2018. Available: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/article/view/7981/8143>.

- [5] IEC/TR 62713, Safety procedures for reduction of risk outside a structure, vol. IEC/TR 62713:2013. 2013.
- [6] J. A. Cristancho C., J. J. Pantoja, C. A. Rivera, and F. Roman, "Analysis of two nonfatal lightning accidents in Colombia," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 153, pp. 159–169, Dec. 2017.
- [7] Jorge Alejandro Cristancho C., Jorge Enrique Rodríguez, Carlos Andrés Rivera G., Francisco Román, Liz Karen Herrera, John J. Pantoja, 10/350 μ s Lightning Impulse Current Behavior of a Conductive Fabric, International Conference on Lightning Protection (35th ICLP) and International Symposium on Lightning Protection (XVI SIPDA), Sri Lanka, 20th - 24th September 2021.
- [8] J. A. Cristancho, J. E. Rodriguez, C. A. Rivera, M. Shigihara, C. Y. Kodairaand, A. Piantini and F. Roman, "Behavior of an Electroconductive Ripstop Fabric under 8/20us Lightning Current: Preliminary Results" ICLP – SIPDA 2020 - OpenConf Abstract Submission, Peer Review, and Event Management System., Sept. 2020. https://iclp2020.org/paper-submission-system/modules/request.php?module=oc_program&action=summary.php&id=160

Bibliografía

- [1] R. I. Albrecht, S. J. Goodman, D. E. Buechler, R. J. Blakeslee y H. J. Christian, «Where are the lightning hotspots on Earth?,» *Bulletin of the American Meteorological Society*, nº 97, pp. 2051-2068, 2016.
- [2] N. Navarrete-Aldana, M. A. Cooper y R. L. Holle, «Lightning fatalities in Colombia from 2000 to 2009,» *Natural Hazards*, vol. 74, p. 1349–1362, 30 Mayo 2014.
- [3] J. A. Cristancho C., J. E. Rodríguez M., C. A. Rivera G., F. Roman y J. J. Pantoja, «High Current Tests over Conductive Fabrics,» *2018 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, pp. 428-432, 2018.
- [4] J. Cistancho, C. Rivera, J. Rodríguez, J. Pantoja y F. Román, «Lightning-type Current Pulse Tests on Conductive Fabrics,» *34th International Conference on Lightning Protection ICLP*, 2018.
- [5] J. A. Cristancho, J. E. Rodríguez, C. A. Rivera, F. Román, L. K. Herrera y J. J. Pantoja, «Conductive Fabric Potential Rise due to Lightning Impulse Currents,» *2019 International Symposium on Lightning Protection (XV SIPDA)*, 30th September – 4th October 2019.
- [6] J. J. Pantoja, C. Rivera, J. Cristancho, J. Rodríguez y F. Román, «Thermal Simulation of a Conductive Fabric Sheet Subjected to a Lightning-like Current,» *International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES)*, 2020.
- [7] A. F. Galeano, *Caracterización de un tejido conductivo mediante impulsos de corriente tipo rayo*, Bogotá D.C., 2020.
- [8] J. A. Cristancho, C. A. Rivera, R. J. E., P. J. J., L. K. Herrera y F. Román, «Lightning Impulse Current Tests on Conductive Fabrics,» 2019.
- [9] J. J. Pantoja, J. A. Cristancho, J. E. Rodríguez, C. A. Rivera, F. Román, F. Vega, C. Kasmi y F. AlYafei, «Efficiency Assessment of Conductive Fabrics as a Part of Lightweight Lightning Protection Systems,» 2020.
- [10] J. J. Pantoja, J. Cristancho, J. Rodríguez, C. Rivera, F. Román, F. Vega, C. Kasmi y F. AlYafei, «Model for the Estimation of Partial Burst of Ripstop Electro-Conductive

- Fabrics,» *XXXIIIrd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science U.R.S.I.*, 2020.
- [11] S. Vassiliadis, A. Kallivretaki, D. Domvoglou y C. Provatidis, «Mechanical Analysis of Woven Fabrics: The State of the Art,» *Advances in Modern Woven Fabrics Technology*, pp. 41-64, 2011.
- [12] N.I.Zaidi, M.T.Ali, N.H.A.Rahman, M.F.Yahya, M. Nordin y A. A. Shah, «Accurate Simulation of Fabric and Analysis of Antenna Performance on Different Substrate Materials,» de *IEEE International RF and Microwave Conference*, Penang, Malaysia, 2018.
- [13] L. Y. Casas López, *Efectos de la variación de la densidad de corriente superficial tipo rayo en el comportamiento de los textiles conductivos*, Bogotá, 2021.
- [14] R. Thottappillil, *Electromagnetic Compatibility (EMC). Part II*, Uppsala, 2000.
- [15] J. Mäkelä, «Electromagnetic signatures of lightning near the HF frequency band,» *Finnish Meteorological Institute*, 2009.
- [16] D. Requena, E. Contreras y J. Roque, *Modelación de la onda del rayo a través de las ecuaciones el telegrafista*, Universidad, Ciencia y Tecnología - UNEXPO, 2013, pp. 83-91.
- [17] International Electrotechnical Commission, *International Standard IEC 62305-1*, 2.0 ed., Ginebra, 2010.
- [18] D. Rodriguez, J. P. Correa, J. E. Rodriguez, L. Y. Casas y F. Román, «Effects on conductive fabrics of different lightning current densities,» de *36th International Conference on Lightning Protection*, Cape Town, 2022.
- [19] F. J. Román, *Notas personales "Configuración de montaje en KTH"*, Estocolmo, 2019.