

ALTAE

2021



Congreso

ALTA TENSION Y AISLAMIENTO ELÉCTRICO

Declaración de interés público y nacional

Decreto 42557-MINAE (ALTAE2021)

6 AL 10
DE SETIEMBRE



PROTECCIÓN PERSONAL CONTRA RAYOS EMPLEANDO TEXTILES CONDUCTORES

Francisco Román. Ph-D.¹

fjromanc@unal.edu.co

Jorge Rodríguez, M.Sc¹

jrodriguezman@unal.edu.co

Edwin Pineda, M.Sc¹

efpinedav@unal.edu.co

Jorge Alejandro Cristancho, M.Sc¹

jacristanchoc@unal.edu.co

Daniel Rodríguez, M.Sc¹

danrodriguezman@unal.edu.co

Carlos Rivera, M.Sc¹

cariverag@unal.edu.co

María Barajas D.I.¹

maria.barajas.sa@gmail.com

Andrés Rojas, I.E.²

cienciatecnologia.eslog@cedoc.edu.co

*Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería,
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (1)
Escuela Logística del Ejército de Colombia (2)*

Resumen

La protección contra los efectos de los rayos con materiales livianos es un reto importante para la comunidad que investiga los rayos. En este artículo describimos las pruebas realizadas a un refugio contra rayos construido con un textil conductor. Se utilizó un maniquí instrumentado dentro del refugio para simular físicamente las tensiones y la energía inyectada que soportaría un cuerpo humano cuando circulan por el suelo corrientes indirectas del rayo. Para determinar el incremento del potencial causado por una corriente de rayo que impacta en la cercanía del refugio, se midieron y registraron las diferencias de voltaje entre los siguientes puntos del maniquí: Mano-Mano, Manos-Rodillas, Cabeza-Pies, para dos posiciones básicas del maniquí: en posición de gateo y acostado. En este trabajo se describe inicialmente la construcción del maniquí instrumentado y su sistema interno de medición. Posteriormente se presenta el montaje experimental y finalmente algunos de los resultados obtenidos y los problemas asociados al sistema de medida. Adicionalmente se muestra la simulación por software de los efectos de la resistividad del terreno en el incremento de potencial en la cercanía del refugio. Los resultados muestran que cuando circulan por el suelo corrientes indirectas de rayo, que son las causantes del mayor de fatalidades, la energía aportada al maniquí es inferior a 1 Julio, evidenciándose que este tipo de refugios pueden proteger la vida de las personas que se encuentran en su interior.

Palabras Clave: Sistemas portátiles livianos para la protección contra rayos, Textiles conductores, Maniquí instrumentado, Corriente del rayo

Abstract

Protection shielding against lightning discharges with lightweight materials is an important challenge to the lightning research community. In this paper we describe the use of conducting textiles to construct a lightweight portable lightning protection shelter. An instrumented dummy placed inside the shelter was used to physically simulate both voltage and energy injected by indirect lightning ground currents to a human body. To estimate the earth-potential-rise caused by a lightning current striking nearby of the shelter, the dummy voltage differences: Hand-to-Hand, Hands-to-Knee, and Head-to-Toe were measured and recorded, for two basic dummy positions: crawling position and lying. Initially in this paper are described the development of the instrumented dummy and its internal measuring system. Subsequently are presented the experimental set-up, some experimentally obtained results and finally, certain measurement problems. Moreover, software simulation to analyze the effects of the soil resistivity in the earth's potential rise are included. Results show that the maximum estimated energy in the instrumented dummy when an indirect lightning current flow on the earth surface, which are responsible for the most lightning-caused fatalities, is lower than 1 joule, evidencing that this type of shelter can protect the lives of the people who are inside.

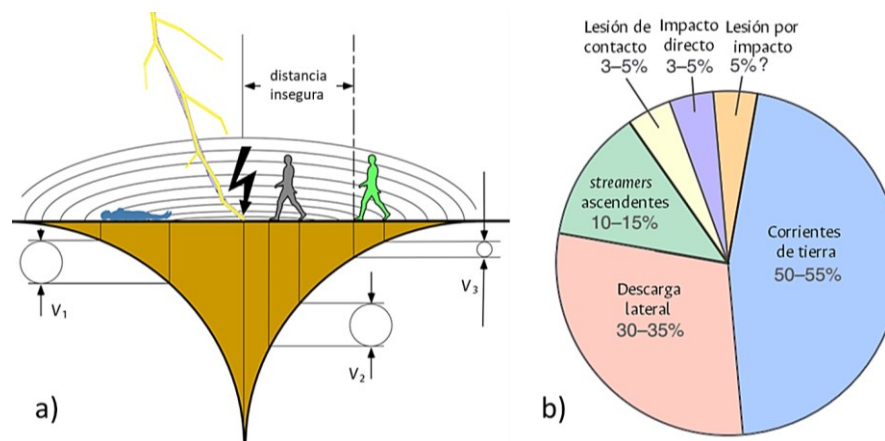
Keywords: Lightweight Lightning portable systems, Conducting textiles, Instrumented dummy, Lightning current.

1. INTRODUCCIÓN

La exposición al riesgo de sufrir lesiones por rayos es determinada por la densidad de rayos del lugar medida en el número de rayos nube a tierra por kilómetro cuadrado por año (Rayos nube-tierra/km².año), la densidad de población y la disponibilidad de refugios adecuados para protegerse de los rayos (Cooper & Holle, 2019). En Colombia se presentan 7 sitios de los 10 más tormentosos de Sudamérica, de los cuales 3 están en la lista de los 10 más tormentosos del mundo (Albrecht et al., 2016). Esta es una de las razones por las cuales existen una gran cantidad de lesiones fatales en el Ejército Nacional de Colombia por causa de los rayos (Cruz Bernal, 2019; Navarrete-Aldana et al., 2014). Una de las poblaciones más expuestas al riesgo de los rayos son los soldados, que en razón a su servicio, se ven obligados a pernoctar al aire libre en cercanía de árboles y lugares expuestos, que son propensos a recibir impactos directos de rayos (Cristancho C. et al., 2017; Cruz Bernal, 2019).

Dentro de los principales mecanismos de lesión causados por el acoplamiento de las corrientes de los rayos con los seres humanos se encuentran: impacto directo, potencial de contacto, *streamers* ascendentes, descarga lateral, y potencial de paso o elevación del potencial de tierra (Cooray, 2010, 2014). Como muestra la Figura 1, de estos mecanismos de lesión, el que representa un mayor número de fatalidades, en un país desarrollado, corresponde al de elevación de potencial de tierra o corrientes de tierra con más del 50 % de las fatalidades primarias de todos los eventos de lesiones reportados como causados por los rayos (Cooper et al., 2016).

Figura 1. a) Elevación de potencial de tierra o potencial de paso y b) fatalidades producidas por los mecanismos de interacción de los rayos con seres humanos. Fuente: a) (Cristancho C., 2021) y b) adaptado de (Cooper et al., 2017).



En este mecanismo, las lesiones se producen por la circulación de corrientes peligrosas en el interior del cuerpo, debido a la elevación del potencial de tierra producida por la distribución de la corriente principal del rayo en el suelo. La tensión elevada que aparece entre dos puntos de contacto del cuerpo con el suelo induce la circulación de corriente. Cuando un rayo impacta el suelo, directa o indirectamente (por ejemplo, a través de una estructura o un árbol), en la cercanía de una persona que está caminando o de pie, la tensión que aparece entre los dos pies es también llamada potencial de paso.

Se ha evidenciado que muchos soldados que duermen en refugios convencionales, como carpas o tiendas, son víctimas del elevamiento del potencial de tierra, siendo afectados muchas veces por corrientes que circulan entre la cabeza y los pies (Cristancho C. et al., 2019, 2018). Para intentar resolver este problema, el Grupo de Investigación en Compatibilidad Electromagnética de la Universidad Nacional de Colombia ha patentado refugios personales portátiles que emplean telas conductoras (SIC Colombia, 2018), que en adelante llamaremos refugios contra rayos.

Como parte del proceso de análisis para el desarrollo de un refugio contra rayos liviano y portable que pueda reducir el riesgo, en este artículo se presenta la utilización de un maniquí instrumentado, desarrollado para medir las tensiones y estimar las energías que aparecerían entre: Mano-Mano, Manos-Rodillas y Cabeza-Pies, en dos posiciones básicas comunes que se tendrían al interior del refugio: acostado y en posición de gateo apoyado en rodillas y manos. Así mismo se muestran los montajes experimentales empleados para simular la corriente de rayo y obtener los diferentes voltajes y energías que podrían aparecer en el cuerpo de un ocupante dentro del refugio contra rayos. Finalmente se presentan las simulaciones de software desarrolladas para conocer la elevación del potencial de tierra cuando un rayo impacta en la cercanía del refugio contra rayos.

En los resultados y discusiones se analizan los valores de voltaje medidos y de energía estimados en el maniquí instrumentado, revelando el potencial que tendría la estrategia de protección estudiada para refugios contra rayos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS/METODOLOGÍA

En este numeral se presenta el desarrollo de la construcción del maniquí, su instrumentación y la disposición para la realización de las pruebas. Adicionalmente se incluyen algunas simulaciones por software para determinar las tensiones en el terreno cuando un rayo impacta cerca del refugio contra rayos.

2.1 Desarrollo del maniquí de pruebas instrumentado

El maniquí fue desarrollado empleando técnicas de software para modelado Rhinoceros®, mediante la función de intersección booleana, tal como se muestra en la Figura 2 a). El maniquí terminado se muestra en la Figura 2 b). El sistema eléctrico del maniquí se construyó considerando la resistencia total del cuerpo humano como de 1 k Ω (IEC TS 60479-1, 2018) utilizando resistencias fabricadas de diferentes valores y ubicadas entre las extremidades. La señal es enviada mediante cables coaxiales al osciloscopio conectado al sistema de medida. En la Figura 3 a) se muestra el esquema eléctrico del arreglo de resistencias considerando las posibles trayectorias de las corrientes. En la Figura 3 b) se muestra un detalle de los divisores de tensión diseñados y fabricados para la medición de las tensiones. En la Figura 3 c) se muestra la imagen general del maniquí instrumentado con las resistencias y algunos de los divisores de tensión del sistema de medida.

Figura 2. a) Modelo del maniquí desarrollado en el software Rhinoceros y b) Maniquí terminado sin recubrimiento

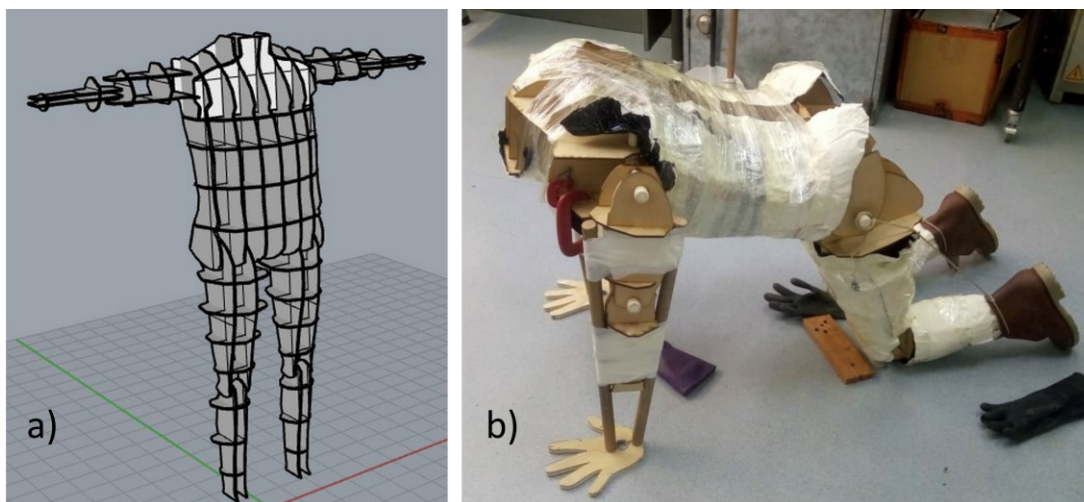
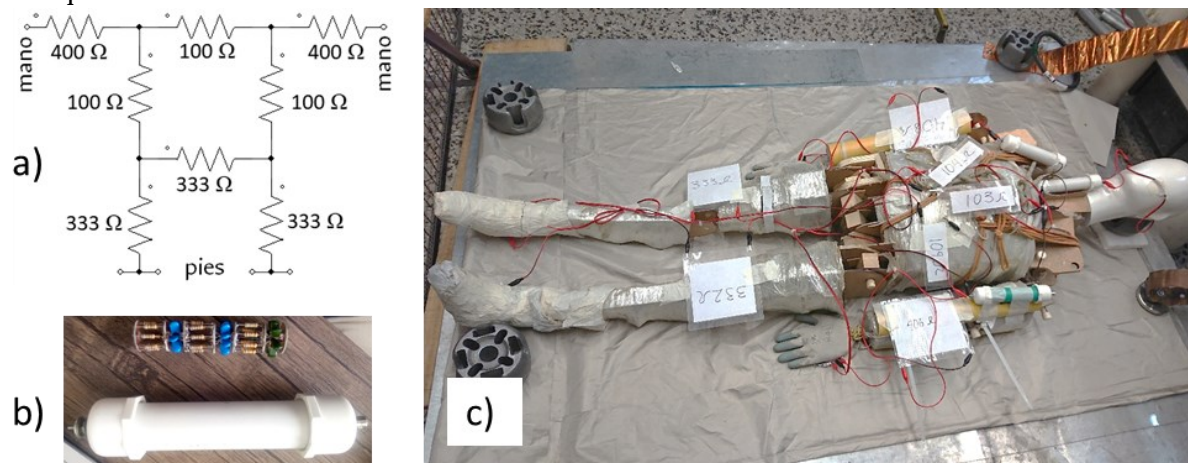


Figura 3. Maniquí mostrando algunas resistencias y parte de la instrumentación del sistema de medición. a) Esquema eléctrico con valores de resistencias aproximados usados en el maniquí, b) imagen de uno de los divisores usados, c) maniquí instrumentado.



2.2 Montajes de prueba para el maniquí instrumentado

Para realizar los ensayos al maniquí, se empleó un generador de impulsos de corriente de forma de onda aproximada $8/20 \mu s$ con valores de corriente del orden de 1 kA hasta 10 kA. El esquema del generador se muestra en las Figuras 4 y 5. Adicionalmente en estas Figuras 4 y 5 se muestra el maniquí en las dos configuraciones de estudio, tanto acostado como en posición de gateo. Para realizar las mediciones de las tensiones en las dos posiciones, de gateo y acostado. Para la posición de gateo: Mano derecha-Mano Izquierda, Mano derecha-Rodilla Izquierda, Mano Izquierda-Rodilla Izquierda; y para la posición acostado Cabeza-Pies, Mano-Pies y Cabeza-Mano. A partir de los datos obtenidos se estima la energía respectivamente. Se utilizaron divisores de tensión como el mostrado en la Figura 3 b), los cuales se diseñaron y fabricaron específicamente para este proyecto considerando el tipo de señales a medir.

Figura 4. Montaje experimental empleado para obtener el voltaje Cabeza-Pies al aplicar impulsos de corriente de $8/20 \mu\text{s}$. Esquema del generador de impulsos de corriente empleado (a) en los ensayos y maniquí recostado sobre el textil conductor (b).

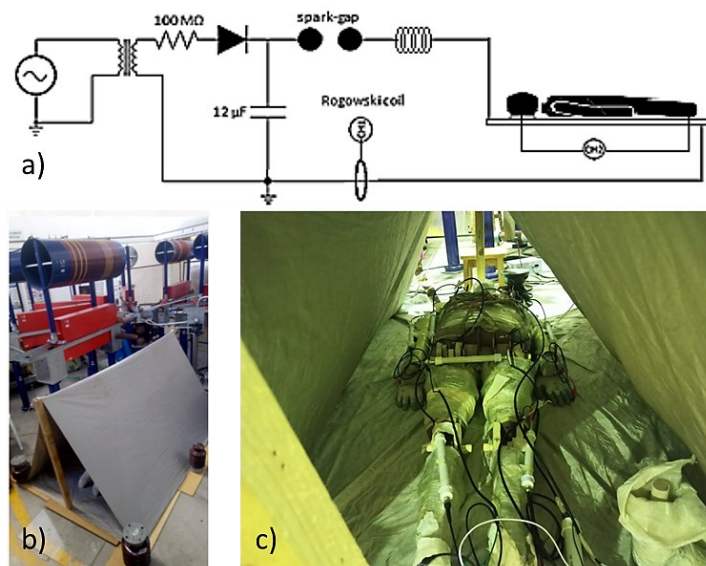
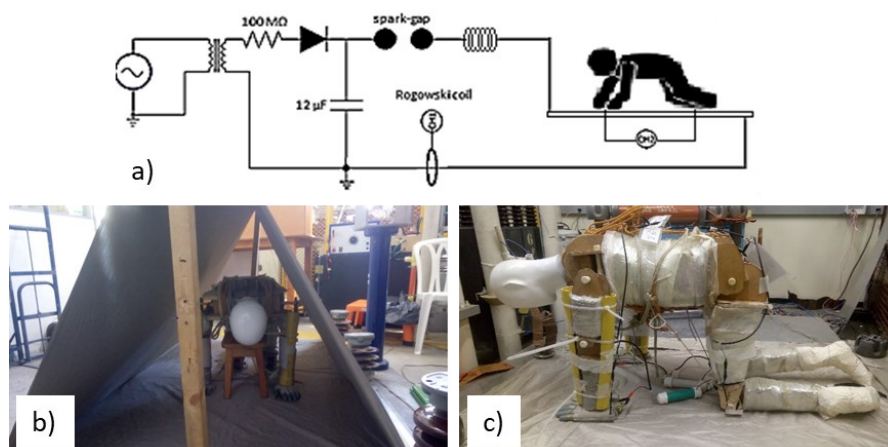


Figura 5. Montaje experimental empleado para obtener el voltaje Mano-Mano y Manos-Rodillas al aplicar impulsos de corriente de $8/20 \mu\text{s}$. Esquema del generador de impulsos de corriente empleado en los ensayos (a) y maniquí apoyado en manos y rodillas en posición de gateo sobre el textil conductor (b).



2.3 Simulaciones Electromagnéticas

Las simulaciones electromagnéticas de onda completa para un impacto de rayo en las cercanías del refugio contra rayos se realizaron en el programa CST Studio®. Para efectos de las simulaciones se consideró un rayo con una corriente en el canal de 50 kA pico y forma de onda estándar $10/350 \mu\text{s}$. Los esquemas de los montajes para los dos escenarios de impacto a 1 m y 5 m del refugio se muestran en la Figura 6.

Para modelar el suelo, se consideró una resistividad entre $10 \Omega\cdot\text{m}$ y $200 \Omega\cdot\text{m}$, mientras que el cuerpo humano se modeló como una resistencia de $1 \text{ k}\Omega$ (IEC TS 60479-1, 2018). Las Figuras 7 y 8 muestran los resultados de simulación para los casos de 1 m y 5 m del sitio del impacto del rayo en función del tiempo y la resistividad del terreno.

Figura 6. a) Modelo del refugio contra rayos en perspectiva cuando el rayo impacta lateralmente a 1 m y el incremento de potencial de la tierra se mide en una varilla ubicada fuera del refugio contra rayos y b) Vista frontal del modelo del refugio contra rayos cuando el rayo impacta lateralmente a 5 m y el incremento de potencial de la tierra se mide en una varilla ubicada fuera del refugio contra rayos.

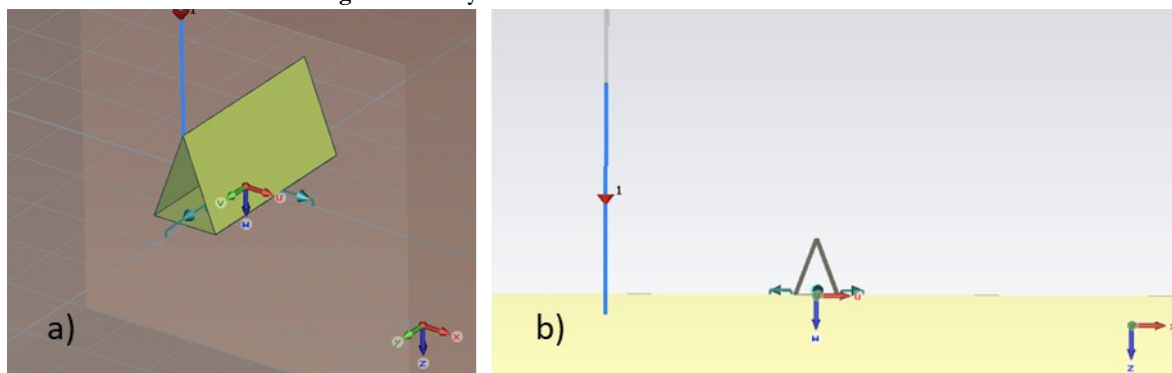
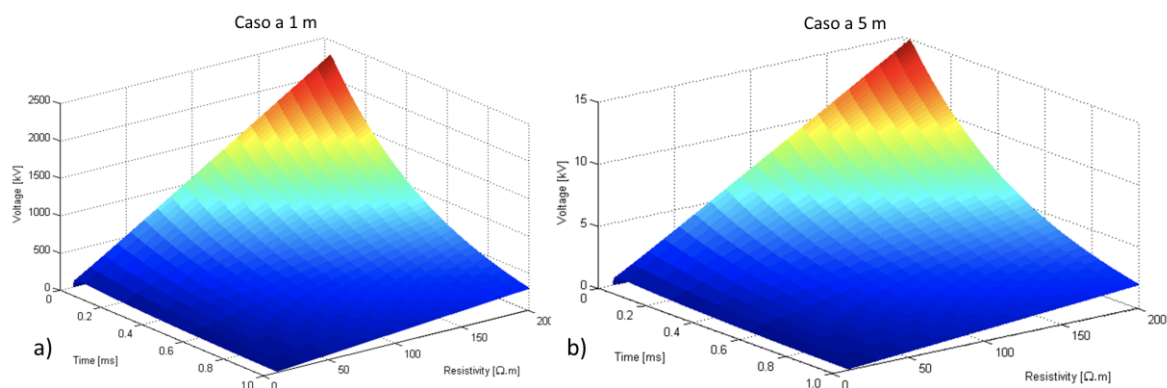


Figura 7. Simulación electromagnética para la estimar el incremento del potencial de tierra en función del tiempo y la resistividad del terreno, empleando una varilla ubicada a 1 m fuera del refugio contra rayos. Se simula un rayo de 50 kA con forma de onda 10/350 μ s impactando a: a) 1 m y b) 5 m de la varilla ubicada a 1m del refugio contra rayos.



3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las Figuras 8 a) y b) muestran ejemplos de las tensiones medidas en el maniquí ubicado en el interior de refugio contra rayos, obtenidas al aplicar impulsos de corriente tipo rayo de 8/20 μ s, de acuerdo con los montajes mostrados en las Figuras 4 y 5. Las Tablas 1 y 2 presentan las diferencias de tensión medidas en las diferentes pruebas al aplicar diferentes impulsos de corriente tipo rayo al refugio.

Un parámetro importante del análisis de los rayos es el denominado energía específica o integral de acción. En un conductor sometido a una corriente eléctrica se genera calentamiento por efecto Joule. Si la corriente es lo suficientemente alta puede producir el cambio de fase y fundirlo. La energía específica se relaciona con la energía por unidad de resistencia en el punto de impacto del canal del rayo y se puede decir que es la energía disipada por una resistencia de un 1 Ω cuando la corriente de rayo pasa a través de ella (Cristancho C., 2021; Golde & Lee, 1976).

Tabla 1. Corrientes y tensiones medidas en el refugio para impulsos 8/20 μ s para posición de gateo

Polaridad	I max [kA]	Máxima tensión MD - MI [V]*	Máxima tensión MD - RI [V]*	Máxima tensión MI - RI [V]*	Impedancia MD - Ref *	Impedancia MI - Ref *	Impedancia RI - Ref *	Energía específica [J/ Ω]
+	7,6	251	93	158	0,36	0,39	0,37	586,75
+	9,7	403	160	243	0,34	0,38	0,36	972,05
+	11,3	420	225	194	0,32	0,36	0,34	1498
-	6,0	235	30	237	0,40	0,43	0,40	189,68
-	8,6	346	100	336	0,40	0,44	0,40	390,60
-	12,1	469	114	347	0,38	0,42	0,39	787,43

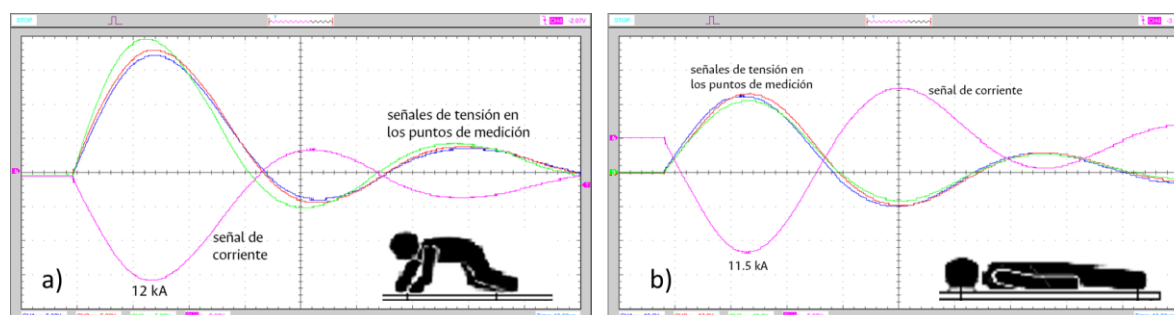
* Mano derecha (MD), mano izquierda (MI), rodilla izquierda (RI). Referencia del generador (Ref)

Tabla 2. Corrientes y tensiones medidas en el refugio para impulsos 8/20 μ s para posición acostado

Polaridad	I max [kA]	Máxima tensión CB - MI [V]*	Máxima tensión MI - PS [V]*	Máxima tensión CB - PS [V]*	Impedancia MI - Ref *	Impedancia CB - Ref *	Impedancia PS - Ref *	Energía específica [J/ Ω]
+	7,2	132	270	403	0,40	0,42	0,36	567,25
+	9,5	171	321	492	0,39	0,41	0,36	1006,14
+	11,5	384	193	578	0,37	0,41	0,36	1427,57
-	7,1	158	89	274	0,39	0,41	0,38	575,03
-	9,5	165	262	427	0,38	0,40	0,35	996,15
-	11,5	201	314	515	0,38	0,40	0,36	1454,15

* Cabeza (CB), mano izquierda (MI), pies (PS). Referencia del generador (Ref)

Figura 8. Señales de corriente aplicada y tensión medida en el maniquí entre cabeza y pies en la posición de gateo apoyado en rodillas y manos para +12 kA (a) y en posición de acostado (b). Nótese que la señal de corriente aparece invertida debido a la conexión de la resistencia shunt utilizada.



A partir de las diferencias de potencial entre los puntos en contacto del maniquí con el suelo del refugio contra rayos y considerando una resistencia aproximada de 1 k Ω (IEC TS 60479-1, 2018), se estimó la energía a la que se sometería una persona en similares condiciones. Debido a la magnitud de las diferencias

de potencial y la duración de la señal de corriente tipo rayo, las energías estimadas para el maniquí son del orden de algunos cientos de microjulio, por lo cual se tabula como $< 1 \text{ mJ}$ ($= < 1000 \text{ } \mu\text{J}$) en todos los casos. Las Tablas 3 y 4 presentan las máximas energías estimadas para cada posición.

Tabla 3. Máximas tensiones y energías estimadas en el maniquí dentro del refugio contra rayos para posición de gateo

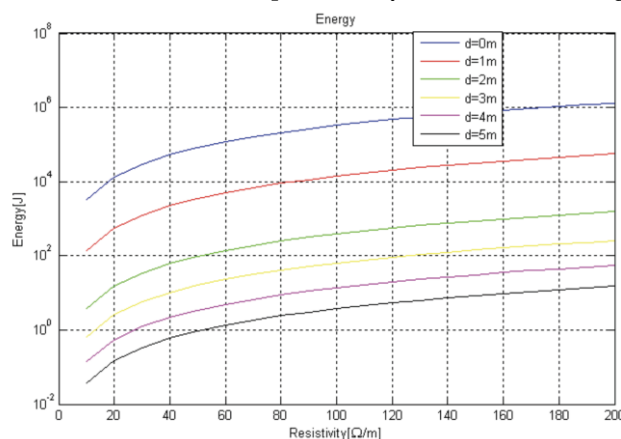
VARIABLE	Máxima Corriente (kA)	Tensión máx. (V)	Energía (mJ)
Mano derecha-Mano Izquierda	+ 12	469	< 1
Mano derecha-Rodilla Izquierda	+ 12	114	< 1
Mano Izquierda-Rodilla Izquierda	+ 12	347	< 1

Tabla 4. Máximas tensiones y energías estimadas en el maniquí dentro del refugio contra rayos para posición de acostado

VARIABLE	Máxima corriente (kA)	Tensión máx. (V)	Energía (mJ)
Cabeza-Pies	+ 11,5	578	< 1
Mano-Pies	+ 11,5	193	< 1
Cabeza-Mano	+ 11,5	384	< 1

Los resultados de la estimación de la energía a partir de las simulaciones de los impulsos de corriente tipo rayo normalizadas de 50 kA y forma de onda 10/350 μs , que impactan entre 1 m y 5 m del refugio para diferentes valores de resistividad del terreno, se presentan en la Figura 9. En la Figura 9 se presenta la energía que afectaría a una persona que saca los pies del refugio contra rayos, lo cual se representa en las Figuras 7 y 8 como el electrodo ubicado a 1 m frente al refugio contra rayos. Partiendo del hecho de que la energía soportable por una persona es de 10 Julios, es posible evidenciar en la Figura 9 que si un rayo de 50 kA impacta cerca al refugio contra rayos a una distancia mayor de 5 m y la resistividad del terreno es inferior a 40 $\Omega\cdot\text{m}$, la energía que recibe la víctima es inferior a 10 Julios. Para distancias menores y resistividades mayores la energía que recibe la víctima supera ampliamente los 10 Julios. Por lo anterior es importante garantizar que los refugios contra rayos no permitan que las personas saquen los pies del refugio contra rayos.

Figura 9. Valores estimados de energía entre cabeza y pies cuando el ocupante saca los pies del refugio, calculado para 5 valores diferentes de distancia de impacto del rayo con relación al refugio.



Dada la naturaleza de la descarga eléctrica atmosférica y su distribución en el suelo, se puede considerar que la corriente se distribuye de manera uniforme asumiendo un suelo homogéneo y la

ausencia de ionización en el mismo. Por tanto, la corriente del canal del rayo se distribuiría en todas las direcciones a partir del punto de impacto, de modo que el refugio se vería sometido a una fracción de la corriente total de rayo.

Considerando la resistividad del suelo y la corriente del rayo, se producen diferencias de potencial en la superficie que pueden llegar a generar lesiones a una persona o animal que se encuentre en contacto con el mismo. Las tensiones generadas entre los puntos de contacto dan lugar a corrientes que circulan dentro del organismo que podrían provocar daños y lesiones permanentes en órganos vitales. De allí la importancia de minimizar estas diferencias de potencial mediante el concepto de equipotencialización o jaula de Faraday.

El refugio propuesto al emplear materiales conductivos permite dirigir las corrientes externamente al cuerpo humano y se comportaría como una superficie equipotencial. Debido a la baja resistencia del material, del orden de algunas decenas de miliohmios, se lograría disminuir las tensiones entre los puntos de contacto. Los resultados obtenidos a partir de las mediciones de laboratorio permiten evidenciar que las tensiones producidas al interior del refugio frente a corrientes de impulso tipo rayo, son de valores considerablemente inferiores a las que podría experimentar una persona sin ningún tipo de protección.

Es importante mencionar que la energía a la que se ve sometida una persona en este tipo de situaciones depende en gran medida de la magnitud de la corriente que pasa a través de su cuerpo y de la duración de la misma. Como se mencionó anteriormente, esta corriente depende directamente de las diferencias de potencial en los puntos de contacto con el suelo. Por lo tanto, una considerable reducción en estas tensiones disminuye la energía a la que se ve sometida una persona, mitigando el riesgo de sufrir lesiones permanentes o incluso la muerte.

Las simulaciones muestran que los niveles de tensión en un terreno típico podrían alcanzar el orden de los megavoltios (2.3 MV) y considerando la cercanía al punto de impacto, pondría en riesgo mortal a una persona o un animal en contacto con dicho terreno. Como la resistividad del terreno puede tomar un amplio rango de valores dependiendo de las características eléctricas del suelo, es una variable que no puede ser controlada. Frente a esta situación, se hace necesario establecer un mecanismo de protección como el refugio contra rayos propuesto. Las Tablas 1 y 2, muestran que es posible reducir la elevación de la tensión en el interior del refugio hasta valores por debajo de los 600 V para las dos posiciones estudiadas con corrientes de hasta 12 kA. Este nivel de tensión puede ser fácilmente aislado con materiales convencionales que no requieren tener una gran rigidez dieléctrica.

Las energías calculadas, para todas las situaciones estudiadas en el maniquí, mostraron en todos los casos valores inferiores a 1 julio, los cuales por su corta duración y amplitud no tendrían un efecto importante sobre la salud de una persona ubicada dentro del refugio contra rayos.

4. CONCLUSIONES

El tejido conductivo usado en la construcción de los refugios contra rayos permite implementar de manera eficaz el concepto de equipotencialización debido a su muy baja resistencia eléctrica y a que su gran capacidad conducir amplitudes importantes de corrientes de impulso tipo rayo distribuidas en toda su superficie.

Las diferentes pruebas de laboratorio realizadas sobre un mismo prototipo de refugio contra rayos,

muestran que el material tiene una alta capacidad de conducir varios impulsos tipo rayo sin sufrir afectaciones importantes en su estructura y características eléctricas. El modelo probado de refugio contra rayos fue afectado por más de 40 impulsos de corriente durante el desarrollo de esta investigación.

El refugio contra rayos propuesto empleando tejido conectivo reduce de manera considerable las tensiones de paso o diferencias de potencial entre los puntos de contacto del individuo que se encuentre dentro del mismo, reduciendo el riesgo de lesiones importantes o muerte.

Las pruebas de laboratorio permiten establecer una reducción importante de los niveles de energía a los que se ve expuesta una persona cuando se tiene corriente de rayo circulando por tierra.

5. REFERENCIAS

- Albrecht, R. I., Goodman, S. J., Buechler, D. E., Blakeslee, R. J., & Christian, H. J. (2016). Where Are the Lightning Hotspots on Earth? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97(11), 2051–2068. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00193.1>
- Cooper, M. A., Andrews, C. J., Holle, R. L., Blumenthal, R., & Navarrete-Aldana, N. (2016). Lightning related-injuries and safety. In P. S. Auerbach (Ed.), *Auerbach's Wilderness Medicine* (7th edition, pp. 71–117). Elsevier.
- Cooper, M. A., Andrews, C. J., Holle, R. L., Blumenthal, R., & Navarrete-Aldana, N. (2017). Lightning-Related Injuries and Safety. In P. S. Auerbach (Ed.), *Auerbach's Wilderness Medicine* (7th edition, Vol. 1, pp. 71-117.e7). Elsevier.
- Cooper, M. A., & Holle, R. L. (2019). *Reducing Lightning Injuries Worldwide*. Springer International Publishing. <http://www.springer.com/la/book/9783319775616>
- Cooray, V. (2010). *Lightning Protection*. The Institution of Engineering and Technology.
- Cooray, V. (Ed.). (2014). *The Lightning Flash* (2 edition). The Institution of Engineering and Technology.
- Cristancho C., J. A. (2021). *Analysis and Development of a Personal Portable Lightning Protection System* [Tesis de Doctorado en conclusión - trabajo no publicado]. Universidad Nacional de Colombia.
- Cristancho C., J. A., Pantoja, J. J., Rivera, C. A., & Roman, F. (2017). Analysis of two nonfatal lightning accidents in Colombia. *Electric Power Systems Research*, 153, 159–169. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.12.021>
- Cristancho C., J. A., Rodriguez M., J. E., Rivera G., C. A., Román, F., Herrera, L. K., & Pantoja, J. J. (2019). Conductive Fabric Potential Rise due to Lightning Impulse Currents. *2019 International Symposium on Lightning Protection (XV SIPDA)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/SIPDA47030.2019.8951605>
- Cristancho C., J. A., Rodriguez M., J. E., Rivera G., C. A., Roman, F., & Pantoja, J. J. (2018). High Current Tests over Conductive Fabrics. *2018 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, 428–432. <https://doi.org/10.1109/ICEAA.2018.8520351>
- Cruz Bernal, A. (2019). *Evaluación del riesgo por rayos para Colombia* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá]. https://www.researchgate.net/publication/341714057_Evaluacion_del_riesgo_por_rayos_para_Colombia



- Golde, R. H., & Lee, W. R. (1976). Death by lightning. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 123(10), 1163–1180. <https://doi.org/10.1049/piee.1976.0210>
- IEC TS 60479-1, Effects of current on human beings and livestock-Part 1: General aspects § Part 1 (2018).
- Navarrete-Aldana, N., Cooper, M. A., & Holle, R. L. (2014). Lightning fatalities in Colombia from 2000 to 2009. *Natural Hazards*, 74(3), 1349–1362. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1254-9>
- SIC Colombia. (2018). *Patente de invención 15131006—Dispositivo portátil de protección contra rayos en tiendas de campaña*. <http://sipi.sic.gov.co/sipi/Extra/IP/Mutual/Browse.aspx?sid=636627801680947504>