

Análisis del comportamiento electromagnético en tanques de techo flotante externo ante descargas eléctricas atmosféricas

Electromagnetic Behavior Analysis of External Floating Roof Tanks Subjected to Atmospheric Lightning Discharges

Darwin Fabio Marín¹, Juan David Losada², Camilo Younes³

^{1,2} Facultad de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Manizales.

³ Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación, Universidad Nacional de Colombia.

*Autor de correspondencia: dmariny@unal.edu.co

Resumen

Los datos evidencian una alta probabilidad de generación de descargas de chispas eléctricas cuando un tanque de techo flotante externo es impactado directamente por un rayo. En el caso particular de Colombia, se observa una coincidencia geográfica entre las zonas con mayor concentración de descargas nube-tierra y los departamentos que albergan las principales reservas de petróleo del país. Por esta razón, resulta fundamental analizar y evaluar la eficacia de las medidas actuales de protección contra rayos en estos sistemas. El objetivo de este trabajo es contribuir al estudio de los campos electromagnéticos generados en tanques de almacenamiento de hidrocarburos expuestos a descargas eléctricas atmosféricas, y determinar la corriente eléctrica disipada en la unión entre la carcasa del tanque y el techo flotante mediante un conjunto de conexión a tierra retráctil (RGA). La simulación del sistema se llevó a cabo utilizando el software FEKO. Se utilizó una forma de onda de impacto 10/350 μ s con una corriente de pico de 30 kA, los resultados indican que con un dispositivo RGA instalado en el tanque, la intensidad del campo eléctrico alcanza un valor máximo de 200kV por metro.

Palabras clave: Tanques de techo flotante externo, rayos, descargas eléctricas atmosféricas.

Abstract

Simulation data show a high probability of spark discharges occurring when an external floating roof tank is directly struck by lightning. In Colombia, there is a notable geographical overlap between areas with a high density of cloud-to-ground lightning strikes and departments with the largest oil reserves. For this reason, it is essential to analyze and evaluate the effectiveness of current lightning protection systems in such contexts. This study aims to contribute to the analysis of electromagnetic fields generated in hydrocarbon storage tanks subjected to atmospheric electrical discharges, and to determine the electric current dissipated at the junction between the tank shell and the floating roof using a Retractable Grounding Assembly (RGA). The system was simulated using FEKO software. A 10/350 μ s lightning current waveform with a peak value of 30 kA was applied. The results indicate that, with an RGA installed, the electric field intensity can reach up to 200 kV/m.

Keywords: External floating roof tanks, lightning, atmospheric electrical discharges.

1. Introducción

Estudios de incendios en tanques de almacenamiento de hidrocarburos indican la alta probabilidad de que se produzcan incendios por el impacto directo de un rayo sobre el techo, la placa flotante y la torre alta o el pararrayos cercano al tanque. [1-4] Además, muestran que, los tanques de almacenamiento de hidrocarburos con techo flotante externo presentan una mayor probabilidad de incendio en presencia de descargas eléctricas atmosféricas. [5,6]

En el año 2009 el instituto americano de petróleo (API) crea la norma API-RP 545 con recomendaciones prácticas para proteger los tanques de almacenamiento de líquidos inflamables o combustibles de los rayos. Hasta el año 2009, los sistemas de protección del tanque se desarrollaban en los sistemas de derivación como un elemento equipotencial entre el techo y la pared del tanque. Estos elementos equipotenciales se construían sobre el techo flotante. Sin embargo, las recomendaciones técnicas descritas en esta norma tuvieron un impacto positivo y gran acogida por expertos del sector de hidrocarburos, lográndose posicionar como norma general y obligatoria para el diseño de sistemas de protección contra rayos en este tipo de tanques.

Por otro lado, estudios basados en teledetección para el registro y análisis de descargas eléctricas atmosféricas, utilizando bases de datos sobre la ocurrencia de rayos en Colombia durante el periodo 2013–2020 proporcionadas por sistemas de localización de descargas atmosféricas (LLS), muestran que las zonas con mayor cantidad de descargas nube-tierra son la Orinoquía y el Amazonas (ver Fig. 1) [7]. Además, según este estudio, durante este periodo algunos municipios de los departamentos de Vichada, Meta y Guaviare presentan las mayores concentraciones de descargas nube-tierra, lo cual es especialmente relevante, dado que estos departamentos —según el informe de recursos y reservas del ministerio de minas y energía con corte a diciembre de 2022— aportan más de la mitad de las reservas de petróleo del país. Esta información se corrobora con los datos abiertos del servicio geológico colombiano, relacionados con el registro de pozos del banco de información petrolera, como también se muestra en la figura 1.

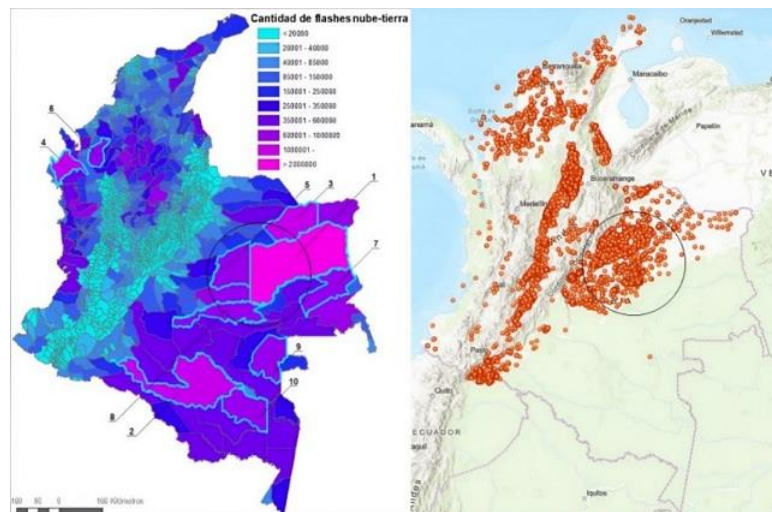


Fig.1 Mapa de Colombia a la izquierda corresponde a la cantidad de flashes nube-tierra por municipios para el periodo 2013-2020. Fuente: Referencia [7]. Mapa de la derecha corresponde al registro de pozos del Banco de Información Petrolera (BIP) 2022. Fuente: (datos.sgc.gov.co).

Licencia CC BY 4.0.

Este trabajo se centra en el estudio de los tanques de techo flotante externos, y analiza el efecto directo de los impactos de rayos en el contexto de la actividad eléctrica atmosférica en Colombia. Se calcula la energía disipada en el tanque cuando un rayo impacta directamente sobre su parte superior y este cuenta con un conjunto de conexión a tierra retráctil (RGA) instalado. Para este

análisis se utilizó el software especializado para electromagnetismo computacional FEKO, el cual permite calcular el campo eléctrico y el campo magnético generados en el sistema. Finalmente, se concluye acerca de la energía disipada a través del cable de derivación del conjunto de conexión y de la probabilidad de la ocurrencia de un incendio en el sistema comparando los resultados obtenidos con la literatura.

2. Materiales y Métodos

Para la simulación realizada en el software FEKO, se llevó a cabo la equipotencialización de todo el techo junto con la estructura del tanque. Adicionalmente, se calculó el impacto directo de la primera descarga de retorno, con una corriente de pico de 30 kA, según la ecuación 1. Se simuló un pulso de rayo tipo 10/350 μ s, representado en la Fig. 2. El modelo de ingeniería utilizado para describir la corriente es:

$$I(t) = I_0 [e^{-at} - e^{-bt}] \quad (1)$$

Donde I_0 corresponde a la magnitud de la corriente constante, y a , b son constantes del tiempo en segundos.

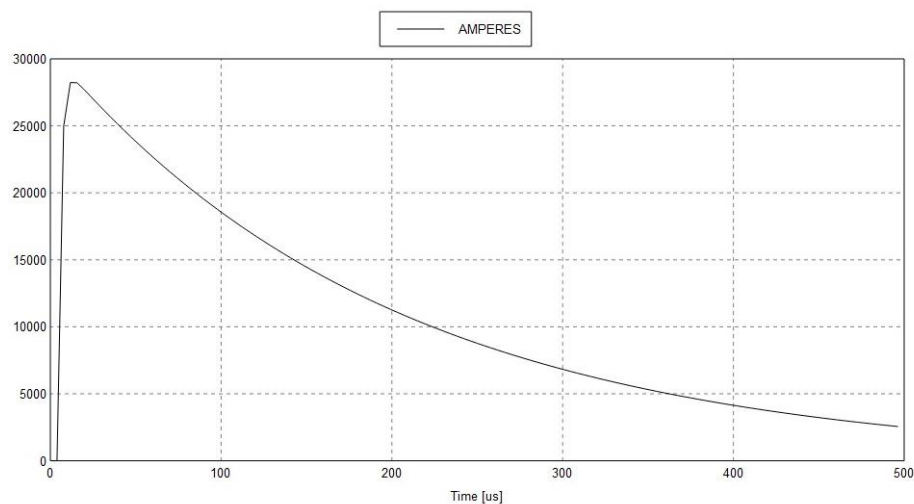


Fig.2 Forma de onda modelada. Fuente: Adaptación desde el software FEKO.

Para determinar los valores de \mathbf{E} y \mathbf{B} (Campo eléctrico y magnético) se desarrollaron las ecuaciones de Maxwell [8]:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \mathbf{J} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (5)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (6)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (7)$$

Donde \mathbf{E} Corresponde al campo eléctrico, \mathbf{H} el campo magnético, \mathbf{J} la densidad de corriente, ε la permitividad eléctrica y la μ permeabilidad magnética.

$$\nabla \times \mathbf{H}^{n-\frac{1}{2}} = \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}^{n-\frac{1}{2}}}{\partial t} + \mathbf{J}^{n-\frac{1}{2}} = \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}^{n-\frac{1}{2}}}{\partial t} + \sigma \mathbf{E}^{n-\frac{1}{2}} \quad (8)$$

Donde:

\mathbf{E} = Intensidad del campo eléctrico [V / m].

\mathbf{H} = Intensidad del campo magnético [A / m].

\mathbf{J} = Densidad de corriente [A / m²].

σ = Conductividad eléctrica [S / m].

$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$ = Ley de Ohm.

ε = Permitividad eléctrica [F / m].

$n-1/2$ = Pasos numéricos de tiempo.

Finalmente, la ley de Faraday es expresada como:

$$\nabla \times \mathbf{E}^n = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}^n}{\partial t} \quad (9)$$

Donde:

\mathbf{E} = Intensidad del campo eléctrico [V / m].

\mathbf{H} = Intensidad del campo magnético [A / m].

μ = Permeabilidad magnética [H / m].

n = Pasos numéricos de tiempo.

Se añadió un cable conductor de derivación para conectar la parte superior de la pared del tanque con la superficie del techo flotante (ver Fig. 2). El cable simulado equivale a un cable de cobre de 120 mm². Por otro lado, las dimensiones del tanque son 16 metros de diámetro y 12 metros de altura. La Tabla 1 muestra los parámetros más relevantes con los que se modela el tanque.

Tabla 1. Parámetros del tanque modelo

Propiedades del tanque modelado		
Diámetro (m)	Altura (m)	Altura del techo (m)
16	12	8
Acero al Carbón	Acero al Carbón	Acero al Carbón
Permeabilidad relativa (μ_0)	Conductividad (σ)	Tangente de pérdida magnética ($Tan\alpha$)
1	3×10^6	0

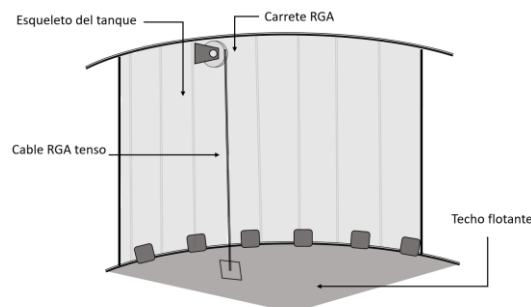


Fig.3 Esquema del tanque de almacenamiento de hidrocarburos con techo flotante externo y sistema RGA. Fuente: Elaboración propia.

3. Resultados y Discusión

En las figuras 4 y 5 se observa el comportamiento de la intensidad de los campos electromagnéticos a través de toda la superficie del tanque. También, se puede apreciar la zona de impacto del rayo. En esta zona se forma una superficie equipotencial entre la unión del techo y el esqueleto del tanque con el conductor de derivación (RGA).

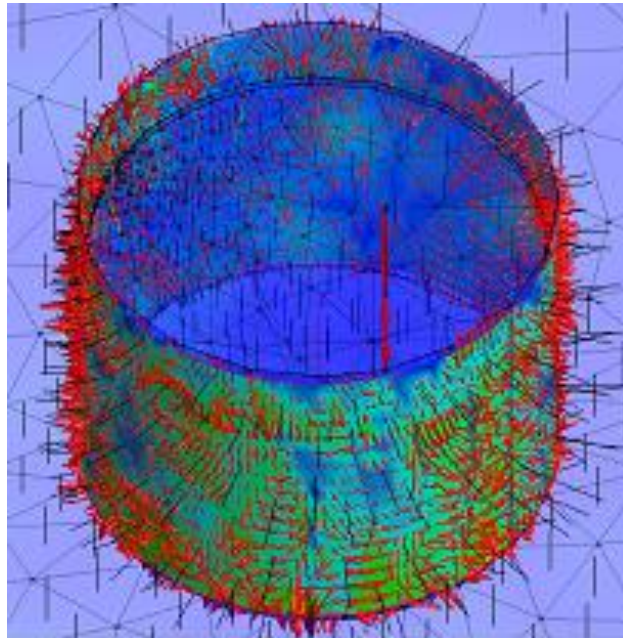


Fig.4 Intensidad del campo magnético [A/m] en el tanque con conductor de derivación, vista isométrica. Fuente: Adaptación con el software FEKO.

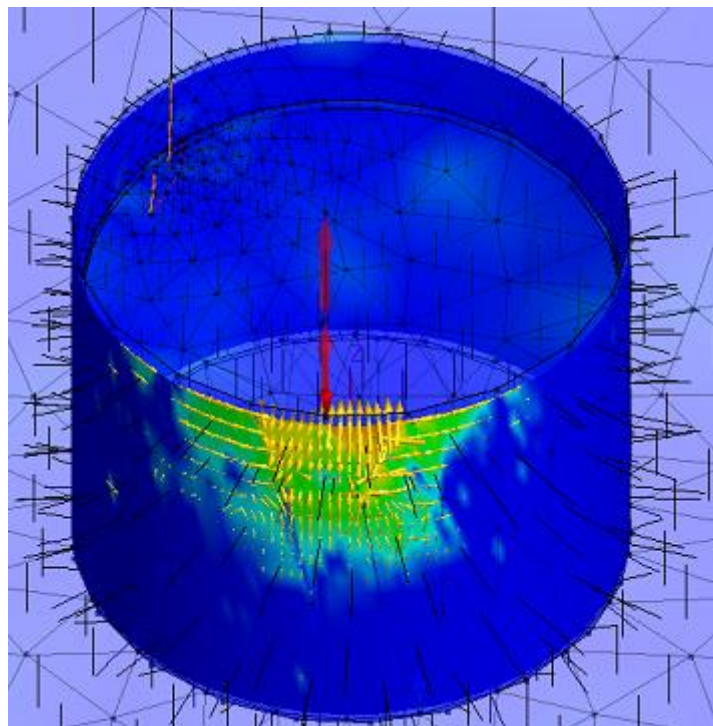


Fig.5 Intensidad del campo eléctrico [kV/m] en el tanque con conductor de derivación, vista isométrica. Fuente: Adaptación con el software FEKO.

Las imágenes muestran que las mayores intensidades se presentan en el punto más alto del esqueleto del tanque y en la unión con el conjunto de conexión (RGA). En la zona de unión entre el techo y la pared es en donde existe la mayor probabilidad de presencia de gases y vapores inflamables. El petróleo y el gas se concentran debido a la influencia del peso propio y el campo de flujo, estos compuestos que se acumulan sobre el techo flotante no se dispersan fácilmente y pueden contribuir a una explosión [8]. Adicionalmente, las referencias [9] y [10] demuestran que, tanto en impactos directos e indirectos, la amplitud de la forma de onda de la corriente del rayo influye significativamente en la intensidad del campo eléctrico. Un aumento en dicha amplitud genera un incremento en las sobretensiones de la red. Por último, se reporta que la tensión inducida entre el techo flotante y el esqueleto del tanque disminuye a medida que aumenta la distancia, obteniendo que para una corriente de rayo de 30kA a una distancia de 1 metro, la intensidad máxima del campo es de 344,5 kV/m. Sin embargo, según el análisis realizado en [11], las chispas en las láminas conductoras se empiezan a generar cuando la intensidad del campo alcanza los 200kV/m.

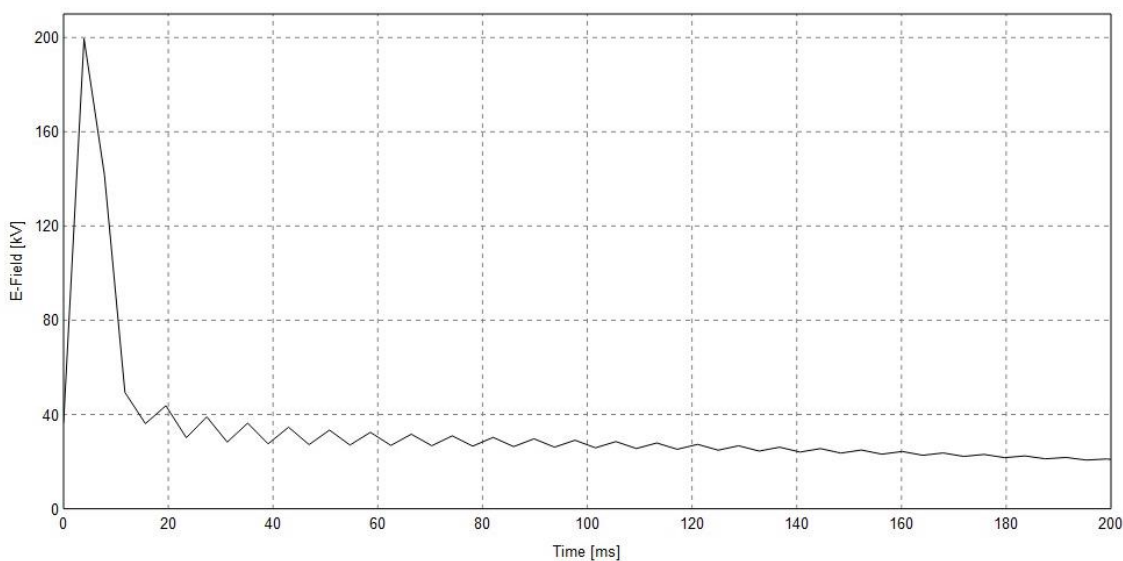


Fig.6 Intensidad del campo eléctrico. Fuente: Adaptación con el software FEKO.

En la figura. 6 se puede observar que el valor máximo es 200 kV, lo que indica que el dispositivo contribuye a disminuir la probabilidad de que se presente la ignición ante una descarga atmosférica, sin embargo, aún se presenta la posibilidad de incendio.

Por otro lado, el sistema de puesta a tierra retráctil permite lograr la conexión de cable más corta entre el techo flotante y la carcasa del tanque. Estudios muestran que existe una relación lineal entre la impedancia del conjunto de conexión a tierra retráctil y la longitud estirada del cable. Adicionalmente, indican que cuando el nivel del tanque es el más bajo se alcanza el mayor valor para la diferencia de potencial entre el techo flotante y el esqueleto del tanque. La diferencia de potencial máxima es de 634 kV si se instala un conjunto de conexión a tierra retráctil, además, al instalar 13 conjuntos de estas conexiones, la diferencia de potencial máxima es de 45 kV disminuyendo la probabilidad de una descarga de ruptura. [12]

4. Conclusiones

Los resultados de la simulación muestran que, durante el impacto directo de una descarga atmosférica de 30 kA sobre el borde superior del tanque, se generan campos eléctricos con intensidades que pueden superar el umbral de ignición en las zonas críticas del tanque, particularmente en la unión entre el techo flotante y la carcasa. La implementación de un conjunto

de conexión a tierra retráctil (RGA) permite reducir la diferencia de potencial entre estas estructuras, disminuyendo significativamente la probabilidad de formación de chispas. No obstante, los valores de campo eléctrico aún pueden superar los 200 kV/m en condiciones específicas, lo que sugiere que la solución RGA reduce, pero no elimina por completo, el riesgo de ignición. Por tanto, se recomienda complementar este tipo de dispositivos con otras medidas de seguridad, como un aumento en el número de conexiones equipotenciales y la implementación de estrategias de monitoreo continuo en zonas de alta actividad eléctrica.

Este trabajo se limitó a analizar los campos electromagnéticos, mediante el software FEKO, al instalar solamente una conexión del sistema RGA en el tanque. Como trabajo futuro, se propone evaluar el efecto de múltiples RGA y considerar descargas directas e indirectas, y sus efectos acumulativos.

Referencias

1. Benkaouha, B., Chiremsel, Z. & Bellala, D. *Integration of Fire Safety Barriers in the Probabilistic Analysis of Accident Scenarios Triggered by Lightning Strike on Atmospheric Storage Tanks*. Journal of Failure Analysis and Prevention. 22, 2326–2351 (2022). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11668-022-01500-y>
2. Cheng Y, Luo Y. *Analysis of Natech risk induced by lightning strikes in floating roof tanks based on the Bayesian network model*. Proc Safety Prog, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/prs.12164>
3. Jia, Pengyu & Lv, Jianyu & Sun, Wengang & Jin, Hang & Meng, Guodong & Li, Junfeng. *Modified analytic hierarchy process for risk assessment of fire and explosion accidents of external floating roof tanks*. Process Safety Progress, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/prs.12520>.
4. Adekitan, A. I., & Rock, M. (2020). Analytical computation of lightning strike probability for floating roof tanks. En Topical Issues of Rational Use of Natural Resources: Saint-Petersburg Scientific Conference Abstracts (Vol. 1). <https://www.researchgate.net/publication/352373902>
5. Moshashaei, P., Alizadeh, S. S., Jafarabadi, M. A., & Khazini, L. *Prioritizing the causes of fire and explosion in the external floating roof tanks*. 2018. Journal of Failure Analysis and Prevention. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11668-018-0556-8>
6. Wei, T., Qian, X., Yuan, M., *Quantitative risk assessment of direct lightning strike on external floating roof tank*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2018, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.08.019>
7. Villamil, D. E. *Estudio de riesgo por rayos en Colombia a partir de la correlación entre mortalidad, densidad de descargas a tierra y densidad poblacional*. Tesis de maestría 2024. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/11349/37733>
8. Xue, Han & Tao, Jing. *Numerical Simulation Study on Oil and Gas Leakage and Diffusion under the Floating Roof Safety Landing Protection System in Large External Floating Roof Storage Tanks*. Academic Journal of Science and Technology. 14. 118-124. (2025). DOI: <https://doi.org/10.54097/4vb78m14>
9. Liu, Y., Fu, Z., Jiang, A., Liu, Q., & Liu, B. *Analysis of the effect on the large floating roof oil tanks struck by indirect lightning based on FDTD*. International Conference on Lightning Protection (ICLP).2014. (pp. 911–916).
10. Neyshabouri, H., Niasati, M. *Transient investigations on lightning overvoltages applied on oil tanks roof considering grounding configurations*. Electr Eng 104, 2437–2447 (2022). DOI: <https://doi.org/10.1007/s00202-021-01452-w>
11. Z. G Wang. *The reason and counter method of oil gas space explode and fire in the first and second seal of oil floating roof tank*. Fire Science and Technology, pp: 654-655, (2007).

12. Hu, H., & Liu, Q. *Research on lightning sparks discharge and protection measures of large floating roof tank*. International Conference on Lightning Protection (ICLP). (pp. 1–8). IEEE. (2012).

Conflicto de Intereses

Los autores declaran la inexistencia de conflicto de interés con institución o asociación comercial de cualquier índole.

Contribución de los autores

Darwin Fabio Marín. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2709-361X>

Participó en el diseño metodológico de la investigación, la formulación de la fundamentación teórica, en la revisión y análisis del contenido; Redacción y edición del manuscrito.

Juan David Losada Losada. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9935-9977>

Participó en la redacción y edición del manuscrito original; Revisión y análisis del contenido.

Camilo Younes Velosa. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9685-8196>

Participó en el diseño metodológico, supervisión y validación de la investigación.