

## Descargas Disruptivas Totales en Redes de Distribución de 13,2 kV

Marina M. Aquino<sup>a, b</sup>, Alfredo A. Marquez<sup>a, b</sup>, Juan P. Silva<sup>a, b</sup>, Roberto J. Cabral<sup>a, b, d</sup>,  
Mario O. Oliveira<sup>a, b</sup>, Fernando Boteron<sup>a, c, d</sup>

<sup>a</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (FI-UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.

<sup>b</sup> Laboratorio de Investigación y Desarrollo en Energía Eléctrica - LIDEE, FI-UNaM

<sup>c</sup> Grupo de Investigación y Desarrollo en Ingeniería Electrónica - GID-IE FI-UNaM

<sup>d</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - CONICET, Argentina

e-mails: [marinamagdalenas597@gmail.com](mailto:marinamagdalenas597@gmail.com), [freddy.andres.mar@gmail.com](mailto:freddy.andres.mar@gmail.com), [juampi.silva.12@gmail.com](mailto:juampi.silva.12@gmail.com),  
[robert\\_rjc@hotmail.com](mailto:robert_rjc@hotmail.com), [ingenioli@gmail.com](mailto:ingenioli@gmail.com), [botteron@gmail.com](mailto:botteron@gmail.com)

---

### Resumen

Este artículo presenta un estudio detallado sobre los cálculos de descargas disruptivas totales en las redes de distribución eléctrica en la provincia de Misiones, Argentina, siguiendo la norma IEEE 1410. Se analizan los parámetros críticos que afectan a las redes eléctricas por las descargas atmosféricas, las que pueden ser descargas directas e inducidas. Dichos parámetros de estudio incluyen: la resistividad del suelo, la geometría de la red, el tipo de blindaje circundante a la línea y las características meteorológicas de las tormentas eléctricas en la región. Para dicho análisis se utilizan recomendaciones de normativa internacional, utilizando ecuaciones específicas para modelar y cuantificar los efectos de las descargas en alimentadores de distribución, proporcionando un marco metodológico robusto para su análisis y mitigación. Los resultados muestran la importancia de considerar las características de los alimentadores y las condiciones locales para asegurar la protección efectiva de las redes de distribución.

**Palabras Clave** – Descargas directas, descargas inducidas, redes de distribución, resistividad del suelo, descargas atmosféricas, sistemas de protección.

### 1 Introducción

Las descargas atmosféricas son unas de las causas más comunes de fallas en las redes de distribución eléctrica, afectando la confiabilidad del suministro de energía debido a su nivel de aislación frente a las sobretensiones producidas por las descargas atmosféricas. En la provincia de Misiones, Argentina, la alta incidencia de tormentas eléctricas denominado índice cerámico representa un desafío significativo para las empresas distribuidoras de energía. Este artículo aborda los cálculos para determinar el número de descargas totales en estas redes, siguiendo las directrices de la norma IEEE Std. 1410, la cual proporciona un marco normativo para evaluar y mitigar estos efectos [1].

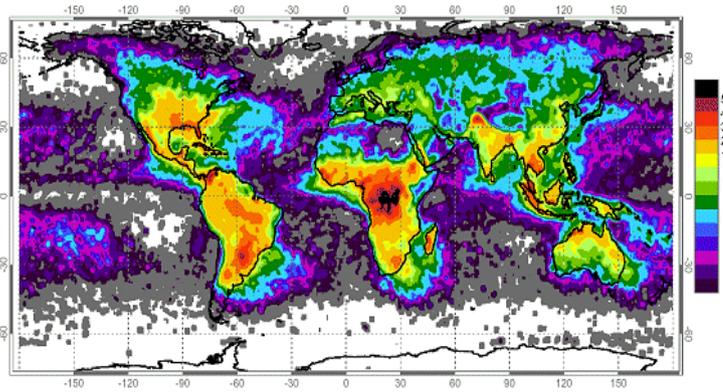
### 2 Parámetros de descarga atmosférica

La descarga atmosférica se da por la rotura del dieléctrico del aire, que se encuentra separando dos cuerpos cargados con polaridades opuestas, ocasionando entonces el surgimiento de una corriente eléctrica impulsiva [2]. A seguir se describen las consideraciones y diferentes variables para el cálculo recomendado por la normativa vigente IEEE Std. 1410 [1].

#### 2.1 Densidad de descarga

La densidad de descargas a tierra es un índice  $N_g$  que generalmente representa el número promedio de descargas de nube a tierra por kilómetro cuadrado por año en una determinada región. En el mapa

de la Fig. 1 se observan los valores promedios de densidad de descargas por unidad de superficie para cada región del globo. La densidad de descargas atmosféricas, también llamada índice cerámico de una región, es el número de descargas atmosféricas por km cuadrado por año. (rayos/km<sup>2</sup>/año), obtenido del trabajo de la NASA [1].



**Fig. 1: Número de descargas anuales mundiales por km<sup>2</sup> por año [1].**

En la provincia de Misiones, se registra una densidad de 20 descargas por kilómetro cuadrado por año.

### 2.2 Tasa de falla por descargas directas

Es posible determinar la densidad de descargas atmosféricas  $N_g$  o *GFD (Ground Flash Density)* por medio de la densidad de ópticos según la siguiente ecuación:

$$N_g = N_t/3 \quad (1)$$

Donde  $N_t$  es la densidad total de ópticos [rayos por km<sup>2</sup> por año].

### 2.3 Número de descargas directas por la línea protegida

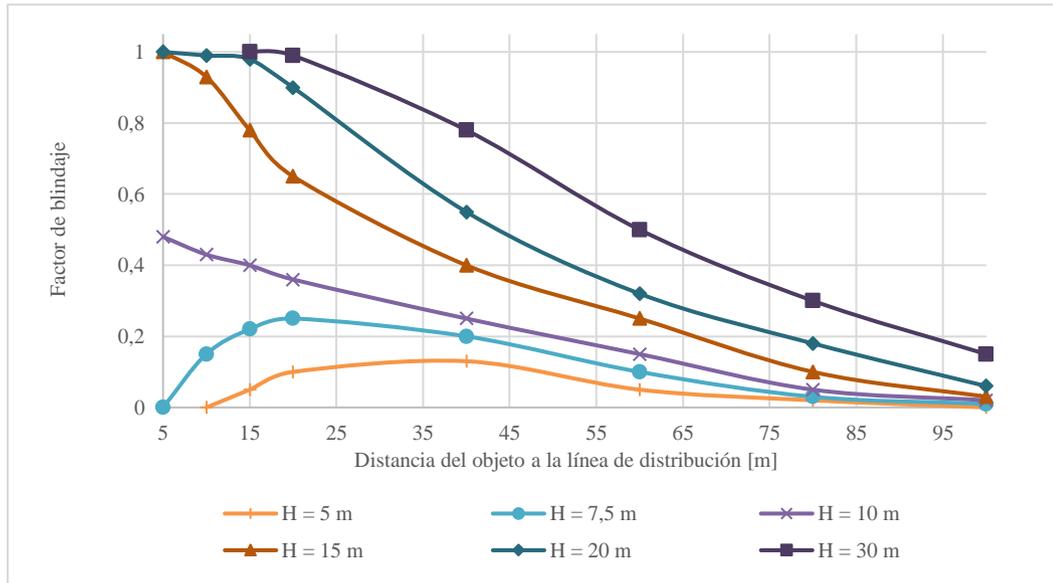
Los objetos cercanos a las líneas y estructuras de distribución de energía eléctrica, como edificios y árboles, pueden interceptar las descargas atmosféricas que, de otro modo, impactarían directamente en las líneas. La presencia de estos objetos contribuye a un factor de blindaje, conocido como  $S_f$ . [1]

$$N_{dir} = N(1 - (S_{f_{Izq}} + S_{f_{Der}})) \quad (2)$$

Donde  $N_{dir}$  es el número de descargas interceptadas por la línea protegida, y  $N$  es la densidad de descargas en campo abierto y se obtiene como:

$$N = N_g \left( \frac{28h^{0.6} + b}{10} \right) \quad (3)$$

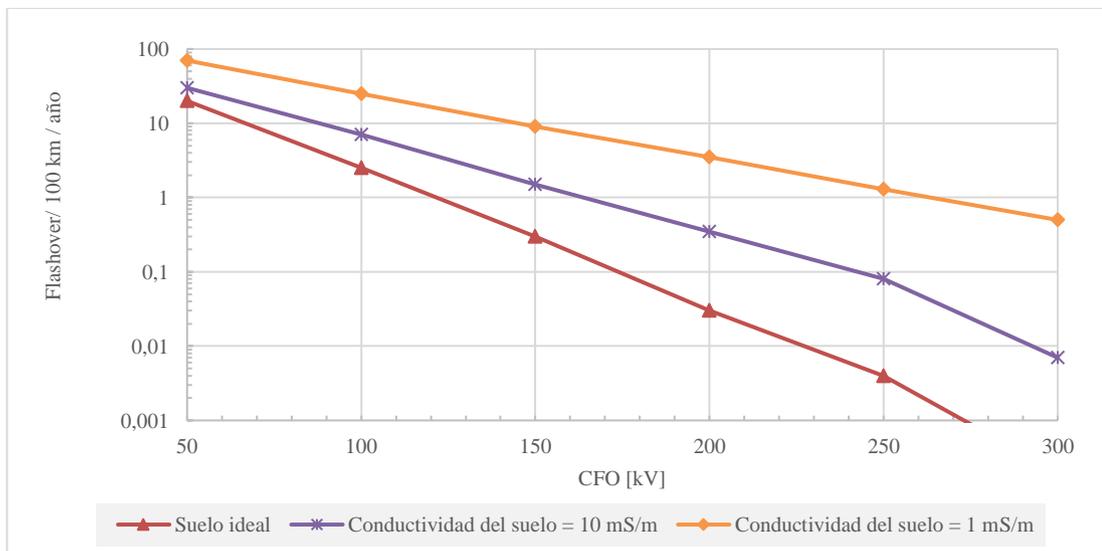
En tanto,  $S_{f_{Izq}}$  y  $S_{f_{Der}}$  son los factores de blindaje a cada lado de la línea que dependen de la altura de la estructura como se observa en la Fig. 2.



**Fig. 2. Factor de blindaje debido a objetos cercanos de diferentes alturas – Adaptada de [1].**

#### 2.4 Tasa de falla por descargas indirectas

El número de fallas por sobretensiones inducidas por descargas indirectas, cada 100km de línea al año puede estimarse a partir de la (4). En la Fig. 3 se observa el Número de descargas disruptivas por tensiones inducidas versus nivel de aislamiento de la línea aérea de distribución.



**Fig. 3: Número de descargas disruptivas de voltaje inducido versus nivel de aislamiento de la línea aérea de distribución – Adaptada de [1].**

Donde CFO (*Critical Flashover Voltage*) se define como el voltaje crítico en el cual hay una probabilidad estadística del 50% de que ocurra una descarga disruptiva en el aislador y un 50% de que el sistema lo soporte dicha sobretensión inducida. Es decir, es el punto en el que la probabilidad

de que se produzca un fallo en el aislador por descarga atmosférica es igual a la probabilidad de que el sistema resista sin problemas [1]. Las fallas inducidas se pueden obtener de la siguiente manera:

$$N_{ind} = N_g (tabla) * \left( \frac{Descargas}{100km/año} \right) \quad (4)$$

### 2.5 Tasa de falla por descargas totales

Si se asume que todas las descargas directas  $N_{dir}$  resultarán en una descarga disruptiva, y conociendo el  $N_{ind}$ , se puede estimar el número total de descargas  $N_{total}$  y se calcula de acuerdo a:

$$N_{total} = N_{dir} + N_{ind} \quad (5)$$

## 3 Protección de las redes de distribución contra descargas atmosféricas

### 3.1 Protección de las líneas aéreas de distribución con hilos de guardia

Los alimentadores o líneas aéreas de distribución dependiendo del nivel de tensión poseen hilos de guardia. Los hilos de guardia son conductores con conexión a tierra ubicados sobre los conductores de fase para interceptar rayos y proteger los conductores de fases evitando así fallas y manteniendo el sistema funcionando adecuadamente. Cuando un rayo impacta en el hilo de guardia, el mismo desvía la corriente del rayo a tierra a través de los cables de bajada a tierra del poste. Su efectividad depende de estar conectados a tierra en cada poste. La corriente de sobretensión puede causar un aumento de potencial, generando una gran diferencia de voltaje entre el cable de tierra y los conductores de fase, lo que puede provocar *flashovers* [1].

### 3.2 Efecto de la puesta a tierra y el nivel de aislamiento

La eficacia del hilo de guardia, también llamado en la bibliografía de OHGW (*overhead ground wire*) depende de la conexión al sistema de puesta a tierra. Para un diseño efectivo, las resistencias a tierra deben ser inferiores a  $10 \Omega$  si el CFO es inferior a 200kV. Con un CFO de 300-350kV, una resistencia de  $30\Omega$  es adecuada. El hilo de guardia o OHGW debe estar conectado al sistema de puesta a tierra en cada poste. La Fig. 4 muestra el rendimiento y el efecto de la puesta a tierra en simulaciones con CFOs de 175kV y 350kV. Estudios de rayos activados confirman el comportamiento de los sistemas de puesta a tierra ante condiciones reales de sobretensión producidas por rayos.

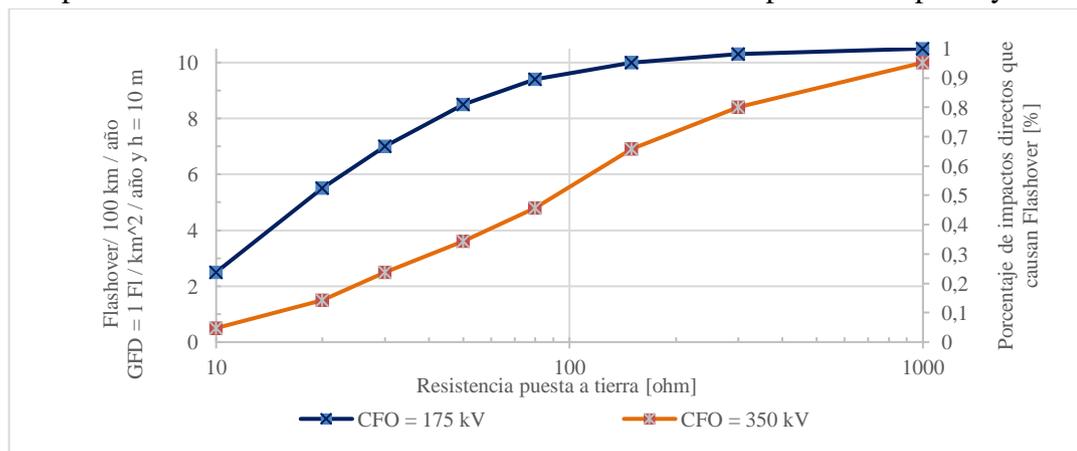


Fig. 4: N° de descargas disruptivas en función de % desc. dir. y resistencia de puesta a tierra – Adaptada de [1].

## 4 Metodología utilizada para determinar parámetros del suelo

### 4.1 Método de Wenner

Para medir la resistividad del suelo, se emplean diversos métodos, siendo el método de Wenner el más utilizado. Este método consiste en colocar cuatro electrodos en línea recta, separados a distancias iguales, para determinar la resistencia del suelo (ver Fig. 5).

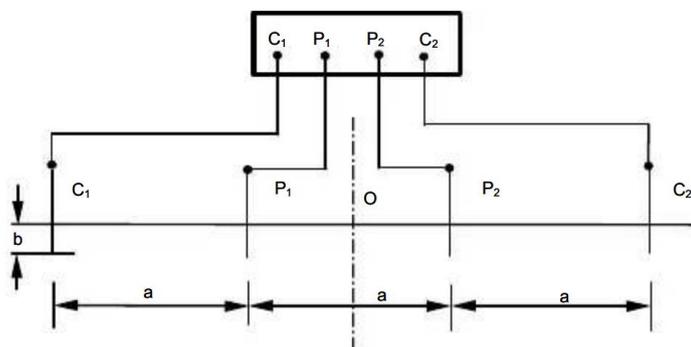


Fig. 5: Esquema de conexiones para medir resistividad utilizando el método de Wenner [3].

Para determinar la resistividad del suelo  $\rho$  se utiliza el método de Wenner, para el cual se debe aplicar la siguiente ecuación:

$$\rho = 2\pi aR \quad (6)$$

Donde  $a$  es la distancia entre los electrodos y  $R$  es la resistencia medida entre los electrodos interiores.

### 4.2 Método de 3 electrodos

Este método consiste en un electrodo de tierra bajo prueba E, un electrodo de corriente C y un electrodo de potencial P (ver Fig. 6). De las mediciones se obtiene directamente el valor de puesta a tierra.

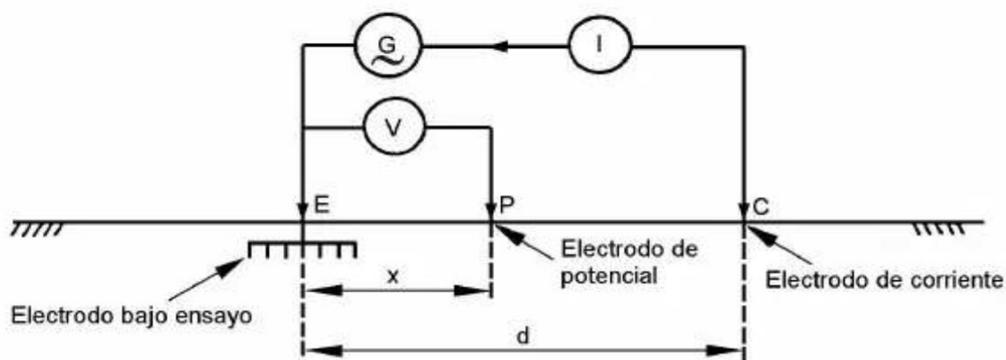


Fig. 6: Esquema de conexiones para resistencia de puesta a tierra [3].

### 4.3 Cálculo del desempeño de un poste de suspensión de 13.2 kV, con hilo de guardia

El análisis que se realiza a continuación es el de la estructura analizada en Fig. 7, la cual está compuesta por un hilo de guardia como sistema de protección contra descargas atmosféricas (OHWG - overhead ground wire).

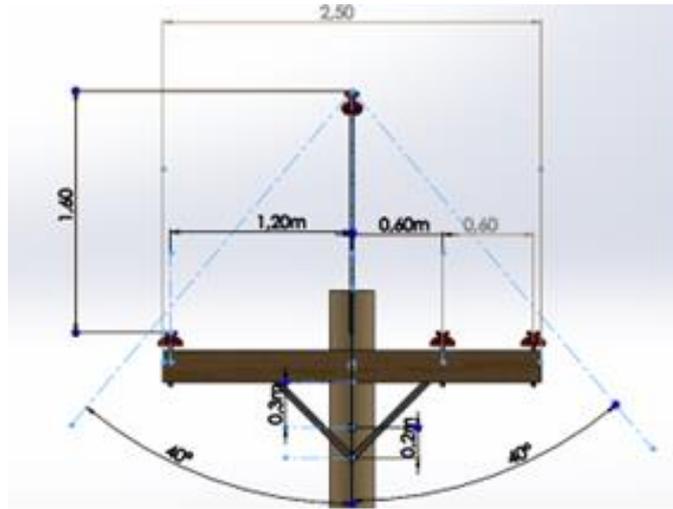


Fig. 7. Estructura de poste con hilo de guarda [4].

A continuación, se presentará el cálculo de una estructura similar con los valores medidos en campo de puesta a tierra y resistividad de terreno.

#### 4.4.1 Niveles de aislación CFO

De acuerdo con los estudios presentados en [4], para el tipo de estructura analizado, el valor más crítico del nivel de aislamiento es de 197 kV.

#### 4.4.2 Descargas directas

La densidad de descarga para un conductor a campo abierto se calcula según (3), reemplazando valores se tiene (7).

$$N = 6.6 \left( \frac{28(11.8)^{0.6} + 2.24}{10} \right) = 79.77 \left[ \frac{\text{Descargas}}{\frac{\text{km}^2}{\text{año}}} \right] \quad (7)$$

Debido a la presencia de objetos cercanos como árboles y edificios es conveniente determinar un factor de blindaje  $S_f$  el cual puede ser obtenido de la Fig. 2. Para el caso de estudio, a la izquierda de la línea se tiene árboles de 10m de altura a una distancia de 10m de la línea resultando en un  $S_{f_{izq}} = 0,18$  y a la derecha de la misma se obtiene objetos a 20m de distancia que en su mayoría responden a una altura de 15m, por lo tanto,  $S_{f_{der}} = 0.64$  [4].

El número de descargas directas  $N_{dir}$  por la línea protegida se calcula por la (4), reemplazando valores se tiene (8):

$$N_{dir} = 79.77(1 - 0.82) = 14.36 \left[ \frac{\text{Descargas}}{\frac{\text{km}^2}{\text{año}}} \right] \quad (8)$$

Debido a que el ángulo de blindaje es inferior a  $45^\circ$  recomendado por bibliografía [4]. se supone que todas las descargas en la línea de distribución impactan en el hilo de guarda (OHGW) protegiendo los conductores de fases. El número de descargas disruptivas se puede determinar

utilizando el porcentaje de descargas directas que provocan descargas disruptivas, según la ecuación (2). Para calcular las descargas directas  $N_{dir}$ , es necesario emplear la Fig. 4 con los valores de resistencia de puesta a tierra. Se toma un valor promedio de resistencia de puesta a tierra de 32.3 Ohm, obtenido de mediciones en el campo donde estará emplazada la línea, y la curva de CFO = 350 kV, resultando en una aproximación del 25%. Esto implica que las descargas directas son  $0.25 * 14.36$  descargas/km<sup>2</sup>/año, resultando en siguiente cálculo:

$$Descargas\ directas = 3.59 \left[ \frac{Descargas}{\frac{km^2}{año}} \right] \quad (9)$$

#### 4.4.3 Descargas inducidas

A partir de [4], con el CFO de 197 kV, la curva para conductividad moderada de  $\sigma = 5.04$  mS/m, y escalado por la GFD calculada. Las descargas inducidas en terreno abierto resultan, Descargas inducidas<sub>Terreno abierto</sub> = 1.5 desc/100 km/año [4].

Y como estimación, supondremos que las descargas disruptivas de voltaje inducido son dos veces las descargas disruptivas inducidas en campo abierto, resultando 3 desc/100 km/año [4].

#### 4.4.4 Fallas totales

Todas las descargas disruptivas son causadas por descargas directas, y se asume que todas las descargas disruptivas provocan fallas. Según se puede estimar el número total de descargas  $N_{total}$  como la suma de  $N_{dir}+N_{ind}$ , y se calcula de acuerdo a (5), el total de fallas para la configuración del caso de estudio resulta de aplicar  $N_{total} = N_{dir}+N_{ind} = 6.59$  desc/100 km/año).

## 5 Análisis de resultados

Esto significa que, en promedio, se pueden esperar aproximadamente 6.59 incidentes de falla debido a descargas disruptivas totales por cada 100 km de línea en un año. Este resultado pone de manifiesto la necesidad urgente de mejorar los sistemas de puesta a tierra y la protección contra rayos.

Las descargas disruptivas, causadas por descargas directas, representan un riesgo significativo para la integridad y continuidad del suministro eléctrico. Cada falla no solo puede dañar equipos costosos, sino también interrumpir el servicio de suministro eléctrico, afectando a usuarios residenciales, comerciales e industriales. Las interrupciones pueden resultar en pérdidas económicas, reducir la confiabilidad en el sistema de distribución eléctrica y, en casos extremos, poner en peligro la seguridad de las personas.

Para reducir la incidencia de estas fallas, es crucial implementar sistemas de hilo de guardia vinculado al sistema de puesta a tierra efectivos que disipan tanto las corrientes por impactos directos como de las corrientes inducidas por rayos indirectos en proximidad de la línea, de manera segura. Además, la instalación de dispositivos de protección adecuados, como pararrayos,

descargadores en los conductores de fases y hilos de guarda, se puede desviar la energía de los rayos y minimizar el impacto sobre las líneas de distribución. La normativa internacional IEEE Std. 1410-2010 [1] proporciona directrices valiosas para diseñar y mantener estos sistemas de protección.

En conclusión, invertir en mejoras de puesta a tierra y protección contra rayos no solo es una medida preventiva, sino también una inversión en la fiabilidad y seguridad de las redes de distribución. A largo plazo, estas mejoras pueden reducir significativamente las fallas, asegurar un suministro eléctrico más estable y proteger tanto los equipos como a las personas que dependen de ellos.

### Referencias

- [1] IEEE 1410 *Guide for Improving the Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines*, New York, 2010.
- [2] V. L. Coelho, *Análise do desempenho de redes aéreas de distribuição de média tensão frente à ação das descargas atmosféricas*, Florianópolis , 2010.
- [3] IRAM 2281-2\*- *Puesta a tierra de los sistemas eléctricos*, Instituto Argentino de Normalización, BsAs, Argentina, 2002.
- [4] A. Marquéz, M. Aquino, J. P. Da Silva and R. Cabral, *Calculation of Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines. Case Study in 13,2 kV Distribution Networks*, in XX Reunión de trabajo en Procesamiento de la Información y Control - RPIC 2023 , Oberá, 2023.