

Descargas Atmosféricas en Redes de Distribución de Media Tensión en la Provincia de Misiones – Estado del Arte

Demarchi Franco B. N. ^{a,b,*}, Viarengo Gino M. ^{a,b}, Cabral Roberto J. ^{a,b,c}, Oliveira Mario O. ^{a,b},
Botteron Fernando ^{a,c}

^a *Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.*

^b *Laboratorio de Investigación y Desarrollo en Energía Eléctrica (LIDEE), Oberá, Misiones, Argentina.*

^c *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.*

e-mails: demarchyfranco13@gmail.com, gino.viarengo@gmail.com, robert_rjc@hotmail.com,
mario.oliveira@fio.unam.edu.ar, botteron@gmail.com

Resumen

En este trabajo se aborda el estudio de las descargas eléctricas atmosféricas en redes de distribución de media tensión en la región de la provincia de Misiones, Argentina, presentando una revisión histórica del fenómeno y su importancia. Se explican los mecanismos físicos fundamentales y se analizan las diferentes fases del proceso de descarga atmosférica. Se definen los principales índices cuantitativos asociados a la formación de la descarga y su variabilidad en función de la región. Además, se presenta el estudio de algunos tipos de estructuras de alimentadores de distribución y sus componentes asociados para conformar la red eléctrica de media tensión comúnmente utilizadas en las prestatarias eléctricas de la región. Este trabajo contribuye con una revisión bibliográfica y síntesis estructurada de los aspectos teóricos y la terminología clave, facilitando el desarrollo de protecciones y estrategias de mantenimiento, no abordando la parte de desarrollo analítico de los mismos.

Palabras Clave – *Descargas atmosféricas, Estructuras de alimentadores, Líneas de media tensión, Redes de distribución.*

1 Introducción

Las descargas eléctricas atmosféricas constituyen una de las principales fuentes de interrupciones y fallas en los sistemas de distribución eléctrica, comprometiendo la continuidad y calidad del servicio. Estas fallas se originan principalmente por la limitada capacidad de los componentes de la red para soportar las sobretensiones transitorias generadas por los rayos [1]. En regiones como la provincia de Misiones, Argentina, la frecuencia elevada de tormentas eléctricas (medida mediante el índice cerámico) plantea un desafío particular para abordar los efectos que causan y los principales factores que afectan al mismo. El presente artículo aborda los fundamentos teóricos sobre el fenómeno como así también las principales estructuras que conforman la red eléctrica de distribución y los indicadores representativos del fenómeno y sus efectos, siguiendo como lineamiento la normativa IEEE Std 1410 [1].

2 Descripción del fenómeno de descarga atmosférica

Una descarga atmosférica o rayo es un fenómeno que ocurre a partir de la ruptura del aislamiento del aire entre dos superficies cargadas eléctricamente con superficies de polaridades opuestas. Las mismas pueden identificarse como la ionosfera del aire que recibe la incidencia de un campo eléctrico (alrededor de 1000 kV/m) de la superficie terrestre, en la cual dicho movimiento produce una diferencia de potencial de hasta 200 kV lo que provoca la aparición de una densidad de corriente eléctrica muy intensa hacia la tierra. El movimiento de los electrones intervinientes es

elevado lo cual produce un efecto lumínico a su alrededor y produce calor (alrededor de 20000°C), originando un sonido audible en un rango de distancia (rayo) [2]. La frecuencia de aparición de rayos y su observación es muy constante ya que hay de 30 a 100 descargas de rayo entre nubes y de nube a tierra por segundo en todo el mundo [3]; contabilizándolos, son alrededor de 9 millones de descargas por día en todo el mundo. El movimiento de las cargas presentes en el fenómeno de una descarga atmosférica entre la superficie terrestre y la ionosfera, se representa en la Fig. 1, en la cual se observa el circuito modelo conocido como teoría del capacitor esférico dado por R. Wilson [2], siendo las nubes cargadas (cumulonimbus) una acumulación de millones de gotas de agua suspendidas con cristales de hielo pequeños, y una mezcla de lluvia y granizo; las corrientes del buen tiempo las cuales poseen un campo eléctrico bajo conduciendo de forma continua y vertical a la superficie de la tierra y las corrientes tormentosas en las cuales, al descargarse, producen rayos.

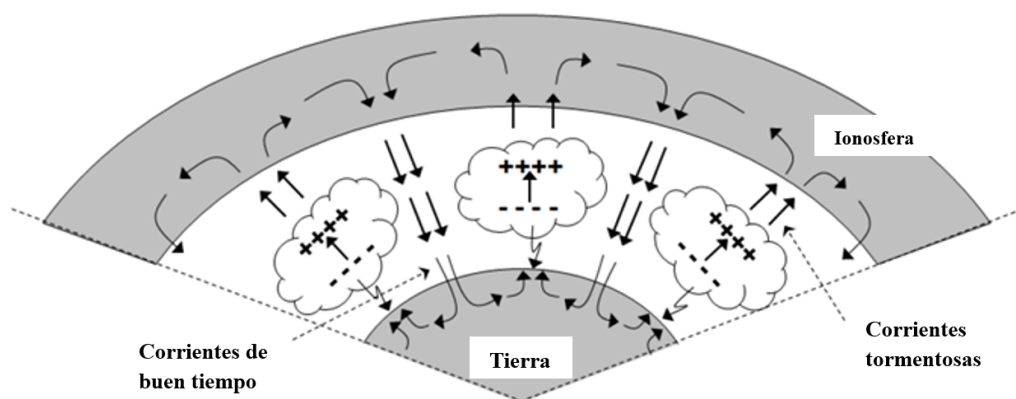


Fig. 1. Representación del circuito eléctrico del rayo (adaptado de [2]).

El tipo de descarga nube-suelo son las más peligrosas, por eso se aborda su estudio. En el fenómeno de descarga atmosférica el proceso de formación está compuesto de varias descargas simultáneas en cortos intervalos de tiempo, en la cual en la primera etapa se denomina líder escalonado [2]. En la Fig. 2 se representa la forma de onda del mismo en un intervalo de tiempo con la amplitud de corriente correspondiente.

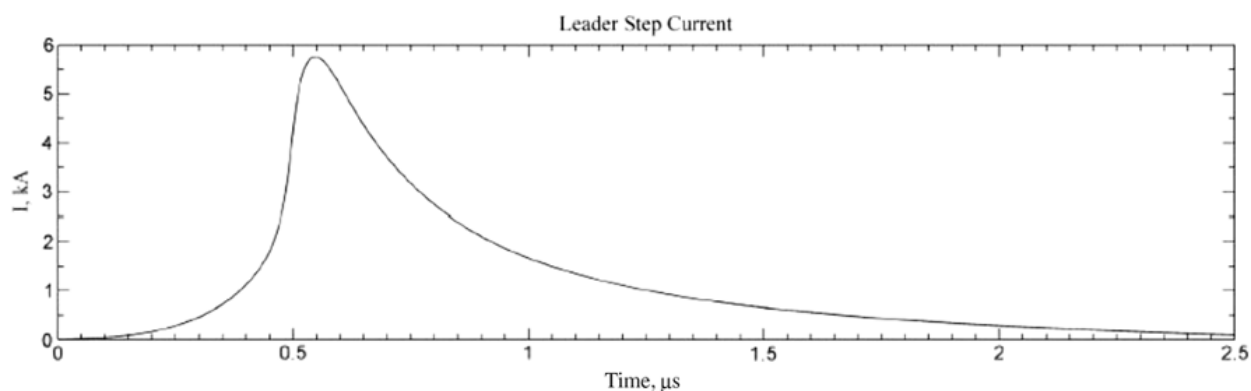


Fig. 2. Modelado de forma de onda de corriente un paso típico de líder escalonado [3].

3 Parámetros de descargas atmosféricas

3.1 Densidad de descargas

El valor de densidad de descargas nube-tierra N_g es un elemento clave para evaluar la severidad del impacto de los rayos sobre los sistemas eléctricos es la densidad de descargas atmosféricas. La cantidad de descargas que se producen en una zona está estrechamente relacionada con la probabilidad de interrupciones no deseadas en las redes eléctricas instaladas en esa región. En la mayoría de las regiones del mundo, la actividad de las descargas atmosféricas puede estimarse a partir de los llamados datos ceráunicos N_c , los cuales indican la cantidad de días con tormentas eléctricas por año por una determinada superficie [1]. La Fig.3 representa el mapa mundial de niveles isoceráunicos, que permite visualizar esta información a escala global, verificando que la frecuencia de dicho valor varía en gran medida dependiendo la zona geográfica localizada [4]. Dicho indicador representa una medida de la actividad regional de tormentas eléctricas, obtenida a partir de promedios históricos de observaciones meteorológicas [1].

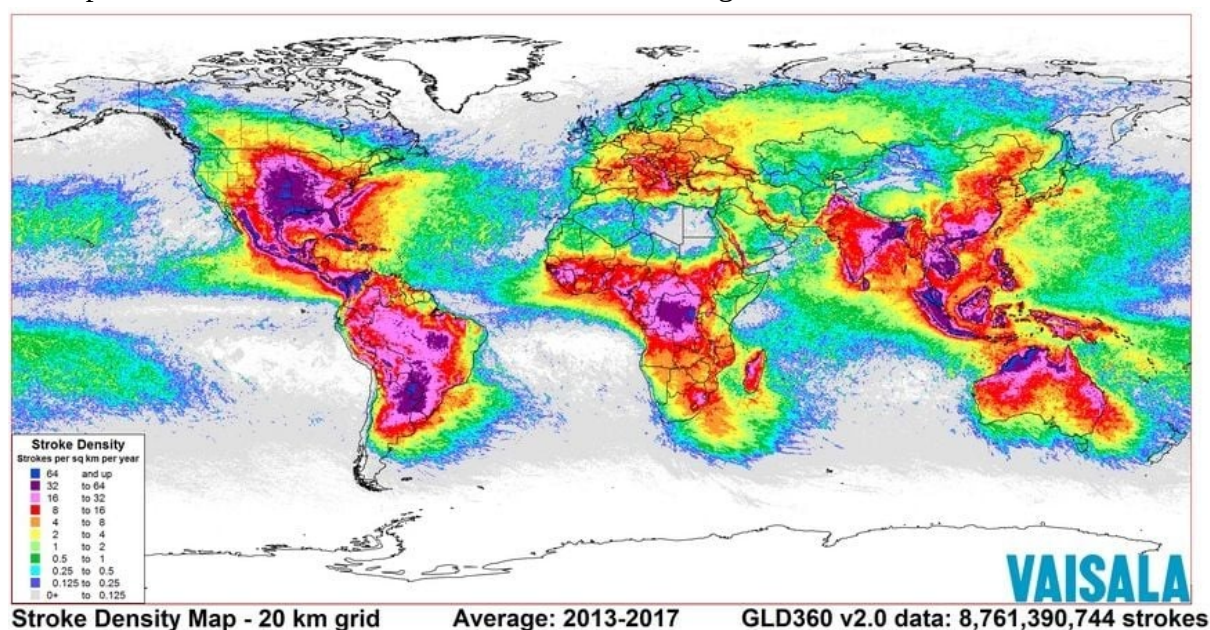


Fig. 3. Índice de descargas anuales mundiales por km^2 por año [4].

Además del mapa global, existen también mapas ceráunicos más detallados, elaborados para determinadas regiones del mundo, como el ilustrado en la figura 4, representando a la región del país de Argentina y particularmente la región de Misiones donde se visualiza como una de los mayores valores de índice, indicando que la actividad del fenómeno de descarga atmosférica en la región es elevada. En la normativa IRAM 2184-11 se pueden observar diferentes valores de índices ceráunicos y demás indicadores de fenómenos de descargas atmosféricas en cualquier región de Argentina.

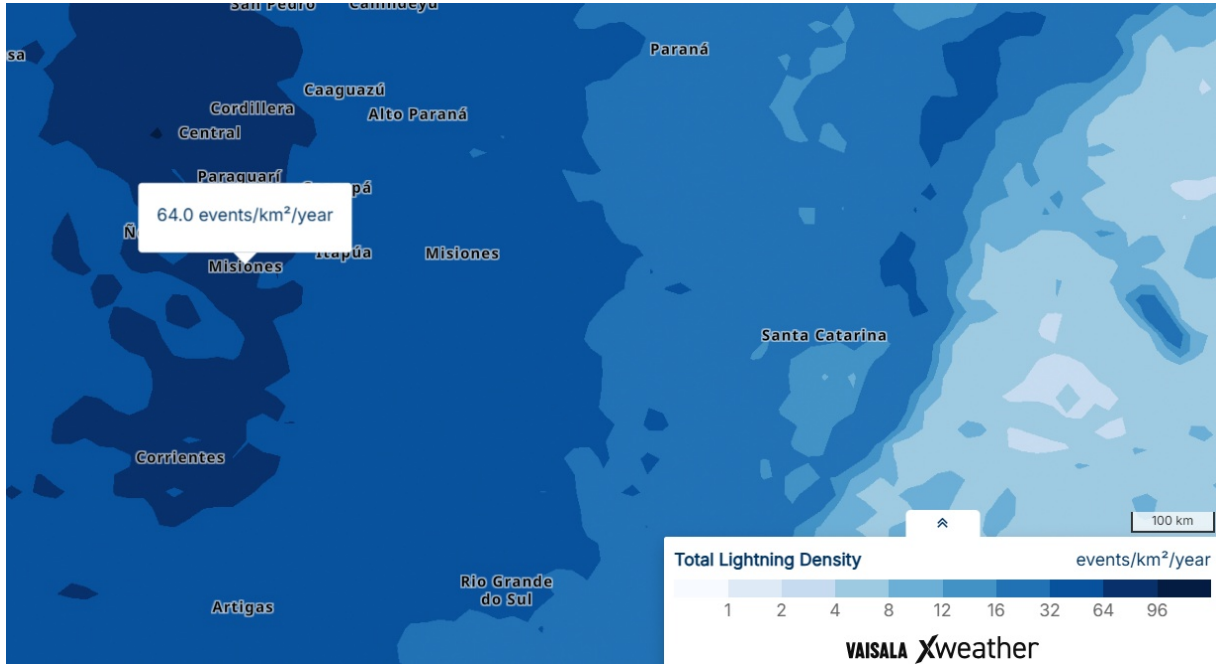


Fig. 4. Índice de descargas anuales mundiales por km² por año en la región de Misiones, Argentina (2024) [5].

Para determinar el valor de densidad de descargas atmosféricas N_g o *GFD* (*Ground Flash Density*) a partir del nivel cerámico N_t de cada región, la estimación recomendada de la densidad de descargas en el suelo es [1]:

$$N_g = \frac{N_t}{3} [\text{descargas}/\text{km}^2/\text{año}] \quad (1)$$

3.2 Número de descargas directas por la línea protegida

Elementos del entorno próximos a las líneas y estructuras de distribución eléctrica, como construcciones o vegetación de gran porte, pueden actuar como interceptores de las descargas atmosféricas que, en ausencia de estos, impactarían directamente sobre las instalaciones. Esta influencia del entorno se traduce en un efecto de protección parcial a las líneas, conocido como factor de apantallamiento S_f (*Shielding factor*) en la cual varía su valor de 0 (la línea no dispone de objetos cercanos) y 1 (la línea está completamente protegida contra descargas directas atmosféricas) [1]. En la Fig. 5 se observa la gráfica para determinar dicho valor de S_f , teniendo en cuenta una línea de distribución de 10 m de altura (valor presente en las estructuras de media tensión de 13,2 kV en la región de Misiones [2]), en donde:

- El eje de abscisas muestra la distancia del objeto a la línea de distribución [m].
- El eje de ordenadas representa el Factor de apantallamiento (S_f).
- Se visualizan seis curvas según las distintas alturas del objeto en cercanías [m].
- Dicho valor de S_f puede determinarse tanto para elementos que están por izquierda a la línea (S_{fIzq}) como por derecha (S_{fDer}).

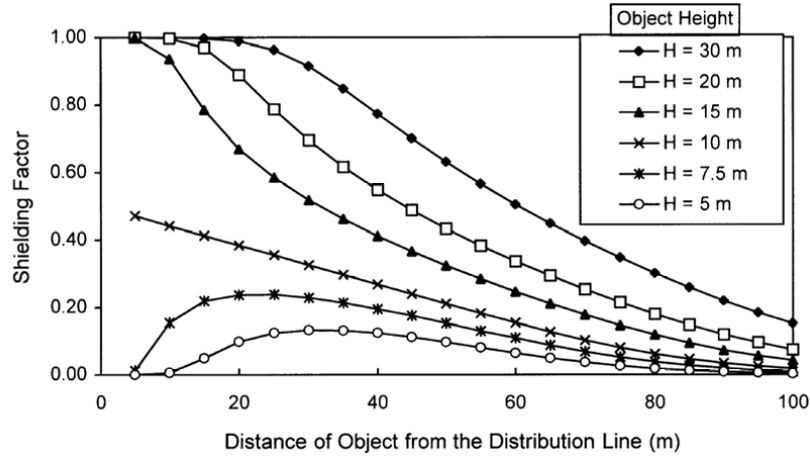


Fig. 5. Factores de apantallamiento S_f debido a objetos cercanos de diferentes alturas para una línea de distribución de 10 m de altura [1].

La tasa de recolección de impactos (N), en terreno abierto (sin árboles o edificios de tamaño significativo cerca), es un valor necesario para determinar el número de descargas directas por la línea protegida y se estima mediante (2) [1]:

$$N = N_g * \left(\frac{28 * h^{0.6} + b}{10} \right) [descargas / 100 km / año] \quad (2)$$

Donde h : Altura del conductor más alto en el polo [m] y b : Ancho de la estructura [m].

Con los valores descritos se puede determinar, por medio de (3), el valor de número de descargas directas por la línea protegida [1]:

$$N_{dir} = N * (1 - (S_{f_{Izq}} + S_{f_{Der}})) [descargas / 100 km / año] \quad (3)$$

3.4 Tasa de falla por descargas indirectas

La tasa de falla por descargas indirectas de sobretensiones inducidas, corresponden a aquellas en las cuales se producen en campo abierto y dependen del nivel de aislamiento de la línea aérea de distribución como así también de la conductividad del suelo. En la Fig. 6 se puede determinar valores característicos del mismo valor bajo la normativa [1], en donde:

- El eje de abscisas representa el valor de aislamiento del sistema de distribución (CFO) [kV]. El CFO (*Critical Flashover Voltage*), o voltaje crítico de descarga disruptiva, se define como el valor de tensión de cresta, para el cual existe una probabilidad del 50 % de que el aislador sufra una ruptura dieléctrica y una probabilidad del 50 % de que la sobretensión inducida sea soportada sin fallo por el sistema.
- El eje de ordenadas representa el valor de frecuencia de *flashover*.
- Se visualizan seis curvas según las distintas conductividades del suelo [mS/m].

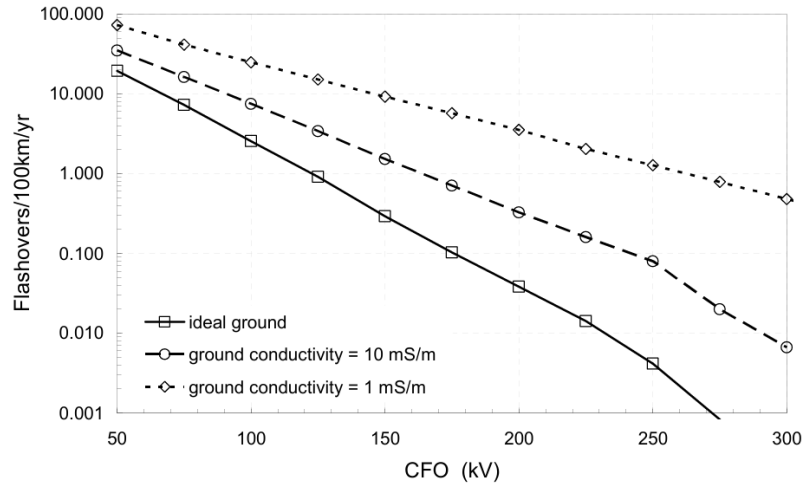


Fig. 6. Número de frecuencia de *flashover* en función del CFO [1].

Cabe aclarar que los valores de la Fig. 6 presentan la frecuencia de *flashover* [Flashovers/100km/año] en función del voltaje de flameo crítico (CFO) de una línea de 10 m de altura y de longitud infinita que consiste en un solo conductor sobre un terreno conductor. Con esto, se puede determinar el número de descargas indirectas empleando (4):

$$N_{ind} = \dots$$

3.5 Tasa de falla por descargas totales

Suponiendo que todas las descargas directas (N_{dir}) provocan una descarga disruptiva, y conociendo el número de descargas inducidas (N_{ind}), es posible estimar el número total de descargas (N_{Tot}), el cual se determina mediante (5):

$$N_{tot} = N_{dir} + N_{ind} [\text{descargas} / 100 \text{ km} / \text{año}] \quad (5)$$

4 Determinación de resistividad del suelo y resistencia de dispersión a tierra

La resistividad del suelo es una propiedad que cuantifica la capacidad que tiene un terreno de oponerse al paso de la corriente eléctrica. Según la norma [6], equivale a la resistencia que tiene un cubo de 1m de arista, y se puede determinar mediante el método de Wenner, y su procedimiento [7] consiste en enterrar en el suelo cuatro electrodos iguales, a la misma profundidad “b” y a la misma distancia entre sí “a” (ver Fig. 7). Luego, se inyecta una corriente eléctrica “I” a través de los electrodos exteriores “C1” y “C2”, al mismo tiempo que se mide la tensión “V” en bornes de los electrodos interiores “P1” y “P2”, y se calcula la resistencia “R” mediante la Ley de Ohm (6):

$$R = \frac{V}{I} [\Omega] \quad (6)$$

Finalmente, la resistividad aproximada promedio “ ρ ” que tiene suelo a la profundidad “ a ”, se puede determinar mediante (7):

$$\rho = 2 * \pi * R * a [\Omega * m] \quad (7)$$

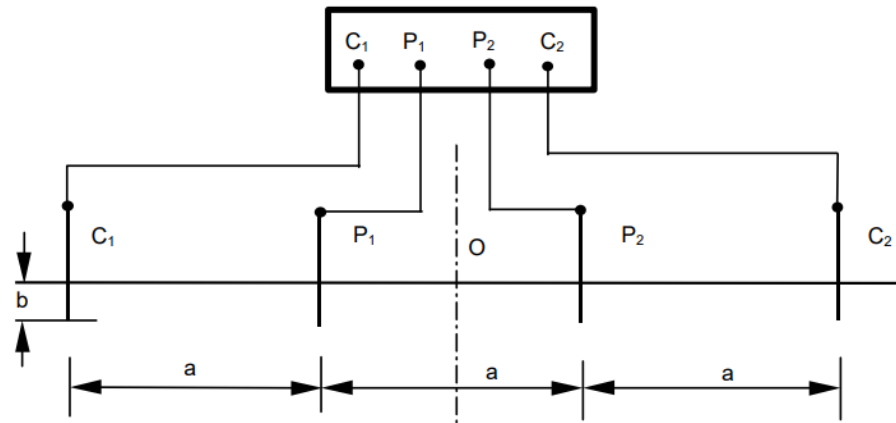


Fig. 7. Esquema de conexiones para el método de los cuatro puntos (Wenner) [7].

Por otro lado, la resistencia de dispersión a tierra “ R_d ” de un electrodo o jabalina, de diámetro “ d ” y longitud “ L ”, se puede estimar con (8), sólo si se cumple que $L \gg d/2$ [6].

$$R_d = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \left(\frac{2L}{D} \right) [\Omega * m] \quad (8)$$

5 Alimentadores de distribución

5.1 Hilos de guarda

Los conductores de hilo de guarda, también denominados como OHGW (*overhead ground wires*), son aquellos que se instalan por encima de las fases y se encuentran vinculados a la tierra. Su función es interceptar las descargas atmosféricas directas y conducir su corriente eléctrica a tierra, para proteger a las fases. Para que los OHGW sean eficaces, deben estar conectados a tierra en cada poste y se deben cumplir con dos requisitos [1]:

- Emplear buenas prácticas de diseño del aislamiento: Para ofrecer suficiente tensión crítica de descarga disruptiva de impulso (CFO) entre el conductor de bajada de tierra y las fases.
- Obtener bajas resistencias de puesta a tierra: Las resistencias de tierra deben ser inferiores a 10Ω si el CFO es inferior a 200 kV. Mientras que, con un CFO de 300 kV a 350 kV, una resistencia de tierra de 30Ω proporcionará un rendimiento similar.

El ángulo de apantallamiento o de protección (*shielding angle*) es aquel que se encuentra entre la línea vertical que pasa por el hilo de guarda y la línea que conecta a este último con el conductor de fase protegido, tal como se puede ver en la Fig. 8.

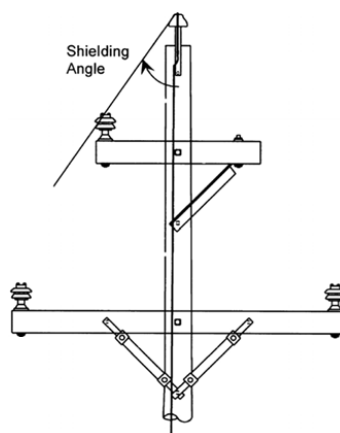


Fig. 8. Ubicación del ángulo de protección en un poste de media tensión [1].

El estándar IEEE [1] recomienda un ángulo de protección menor o igual a 45° , para que la mayoría de las descargas terminen en el OHGW, en lugar de en las fases. Esta directriz sólo es válida para líneas de menos de 15 m de altura, con una separación entre conductores inferior a 2 m. Mientras que, las líneas más altas requieren ángulos menores. Se pueden dar dos casos:

- En líneas de distribución existentes, que estén funcionando bien con un ángulo de 45° , esta práctica puede continuar.
- Para nuevas construcciones o estándares de diseño, se recomienda utilizar un ángulo de apantallamiento de 30° .

En la Fig. 9 se puede ver a dos operarios de EMSA. instalando un hilo de guarda en un poste de media tensión, de la línea de 33 kV San Ignacio-Garita. Mientras que en la Fig. 10, se aprecia otra estructura de hormigón de media tensión, con diferente disposición de los conductores de fase.



Fig. 9. Instalación de un hilo de guarda en poste de 33 kV, de la línea San Ignacio-Garita [8].



Fig. 10. Fotografía de un poste de hormigón de 33 kV [9].

5.2 Aisladores

Los aisladores son dispositivos que se utilizan para impedir la circulación de corrientes de fuga desde conductores cargados, hacia las estructuras de soporte. Las sobrecorrientes producidas por una descarga atmosférica derivada a tierra, provocan una gran diferencia de potencial entre las fases y el OHGW. Esta elevada tensión podría causar un flameo inverso (*back flashover*), que es una descarga disruptiva alrededor o a través de un material aislante, desde la puesta a tierra hasta los conductores de fase [1]. Por lo tanto, en el diseño de los aisladores, se busca que éstos sean capaces de soportar sobretensiones producidas por impulsos de descargas atmosféricas y maniobras en la línea. En la Tabla 1, se pueden ver algunos valores de tensiones de impulso atmosféricas que deben resistir los aisladores, según su nivel de tensión nominal, estandarizados por IRAM [10].

Tabla 1. Algunas tensiones resistidas de impulsos atmosféricos, estandarizadas por la IRAM y adaptada de [10].

Tensión nominal del sistema [kV_{RMS}]	Tensión máxima del equipamiento [kV_{RMS}]	Cursiva Tensión resistida de impulso atmosférico nominal [kV_{CRESTA}]
3,3	3,6	45
6,6	7,2	60
13,2	14,5	95
33	36	170
66	72	325

Si bien en la Tabla 1 se pueden ver las tensiones de impulsos resistidas a diferentes niveles de media tensión, se debe tener en cuenta que en la Provincia de Misiones, la compañía proveedora del servicio de energía eléctrica es Electricidad de Misiones S.A. (EMSA) y la misma define en su reglamento [11] como valores de media tensión solamente a los sistemas de 13,2 y 33 kV.

5.3 Estructuras

Las estructuras son elementos físicos que sirven como soporte de los conductores y otros componentes de la línea. Se componen principalmente de postes, crucetas, aisladores y herrajes, y presentan diferentes configuraciones según el tipo de red, ya sea urbana o rural, o según sus aspectos técnicos o económicos [2]. Los postes pueden ser de madera o de hormigón y sus dimensiones dependen del nivel de tensión de la línea, como así también de sus propiedades mecánicas. En la Fig. 11 de la AEA [12], se puede ver un esquema general de las conexiones de los postes de media tensión.

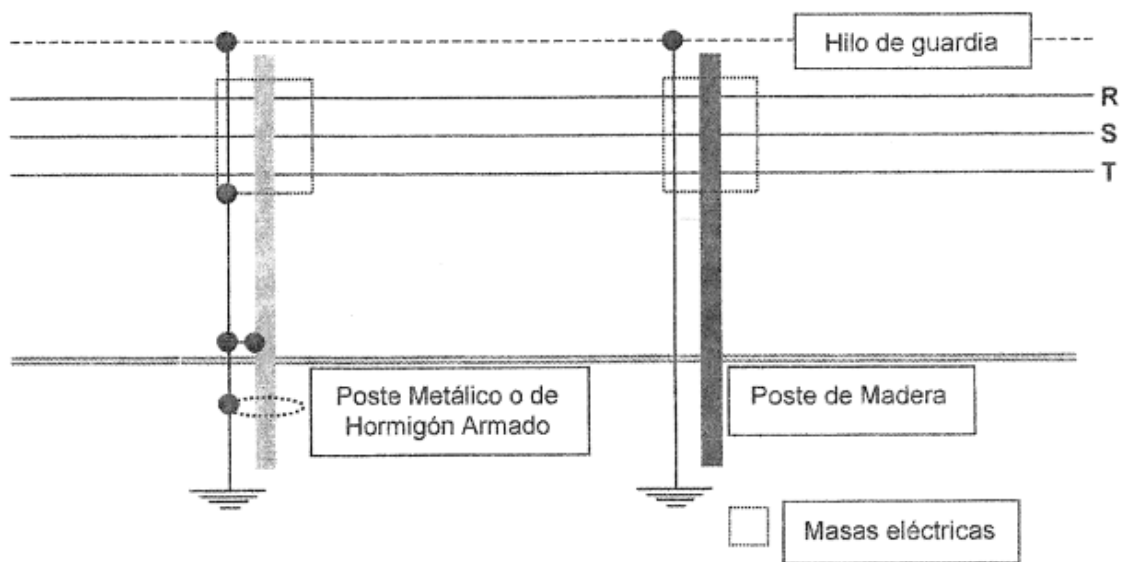


Fig. 11. Esquema general de conexiones con la estructura [12].

6 Efectos de las descargas atmosféricas

Las descargas atmosféricas pueden generar varios efectos negativos sobre las estructuras y la calidad del servicio de energía eléctrica. En la Tabla 2 se indican los efectos de los rayos en diferentes tipos de estructuras, tal como lo define la AEA [13]. También, se pueden generar daños en los seres vivos por el impacto eléctrico, debido a las tensiones de paso y de contacto, lo cual representa un riesgo potencial para la vida y la salud de las personas y animales. La relación entre los riesgos y los tipos de daños y pérdidas se pueden ver en la Fig. 12.

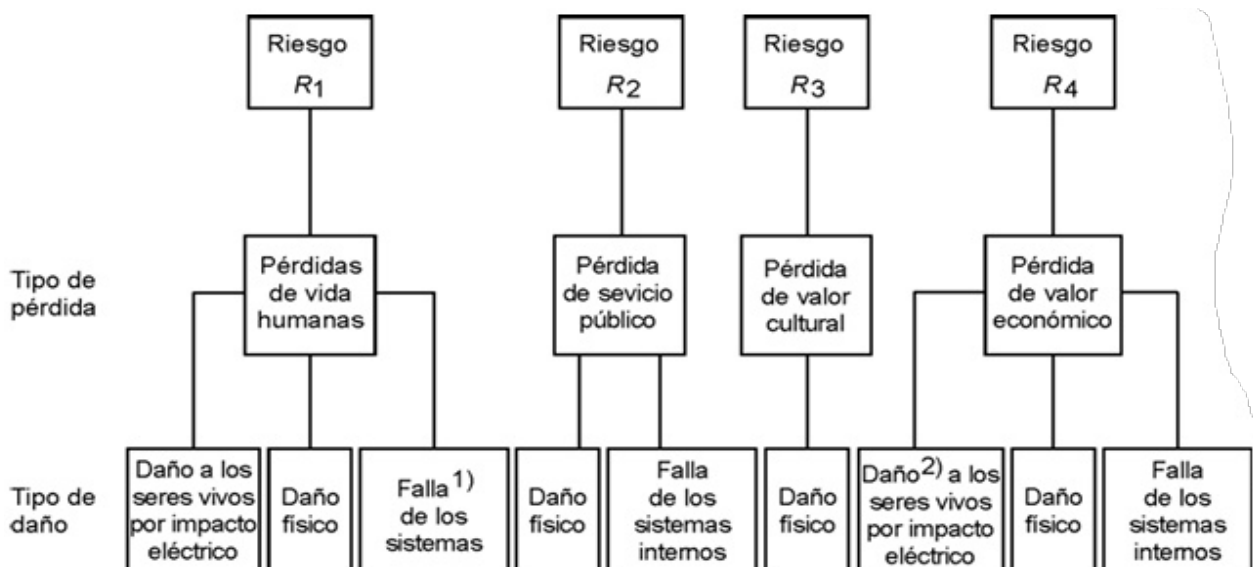


Fig. 12. Resumen de los tipos de riesgos, pérdidas y daños, y la relación entre ellos [13].

Tabla 2. Efectos de las descargas atmosféricas sobre distintos tipos de estructuras, adaptada de [13].

Tipo de estructura	Efectos del rayo
Viviendas Granjas	Perforación de las instalaciones eléctricas, fuego y daños materiales. Daños limitados normalmente a los objetos expuestos al punto de impacto o al paso de la corriente del rayo. Falla de los equipos y sistemas eléctricos y electrónicos instalados (por ejemplo, televisores, ordenadores, módems, teléfonos, etc).
Teatros Hoteles Escuelas Almacenes Zonas deportivas	Riesgo primario de incendio y de tensiones de paso peligrosas, así como daños materiales. Riesgo secundario debido a la pérdida de la alimentación eléctrica, y de peligro de muerte del ganado por falla del control electrónico de la ventilación y de los sistemas de distribución de la alimentación, etc.
Bancos Compañías de seguros Compañías comerciales, etc.	Daños en las instalaciones eléctricas (por ejemplo, la iluminación) susceptibles de provocar el pánico. Falla en las alarmas de incendio y retraso en las medidas contra incendios.
Hospitales, centros de salud Prisiones	Como en el apartado anterior, además de problemas por pérdida de las comunicaciones, falla de los ordenadores y pérdidas de datos.
Industria	Como en el apartado anterior, además de problemas de personas en cuidados intensivos, y dificultades de rescate de personas inmovilizadas.
Museos y lugares arqueológicos Iglesias	Efectos complementarios en función del contenido de las fábricas, en un rango que va desde daños menores hasta daños inaceptables y pérdida de la producción.
Telecomunicaciones Centrales de potencia	Pérdidas irreparables de patrimonio cultural.
Fábricas pirotécnicas Municiones	Pérdidas inaceptables de servicios para el público.
Fábrica química, refinería Planta nuclear	Consecuencias del incendio y la explosión de la planta y sus alrededores
Fábrica química, refinería	Incendio y mal funcionamiento de la planta con consecuencias perjudiciales para el medio ambiente local y global.

7 Conclusiones

Se presentó una revisión bibliográfica en el cual se analizaron los diferentes apartados del fenómeno de las descargas atmosféricas y su impacto en redes de distribución de media tensión, con énfasis en los sistemas instalados en la provincia de Misiones, una región caracterizada por un alto índice ceráunico y elevada incidencia de tormentas eléctricas. Los resultados del estudio evidencian la necesidad de aplicar criterios de diseño y mantenimiento en estructuras y elementos de redes de media tensión. Las estrategias de mitigación deben considerar tanto la protección contra impactos directos como la resistencia del sistema ante descargas inducidas.

Referencias

- [1] Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE Std.1410-2010: IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines, New York, 2010.
- [2] L.C. VILSON, “ANÁLISE DO DESEMPENHO DE REDES AÉREAS DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO FRENTE À AÇÃO DAS”. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. Florianópolis, 2010.
- [3] Dwyera Joseph R., Uman Martin A., The physics of lightning, Florida Institute of Technology, Melbourne,

- USA, University of Florida, Gainesville, USA.
- [4] Vaisala Releases Global Lightning Data Strokes from 2013 through 2017, [Online]. Disponible: <https://www.vaisala.com/en/press-releases/2018-04/vaisala-releases-global-lightning-data-strokes-2013-through-2017>.
 - [5] Interactive Global Lightning Density Map, VAISALA Weather, [Online]. Disponible: <https://www.vaisala.com/en/press-releases/2018-04/vaisala-releases-global-lightning-data-strokes-2013>.
 - [6] IRAM (Instituto Argentino de Normalización y Certificación), IRAM 2281-1-1996: Puesta a tierra de sistemas eléctricos, consideraciones generales, Buenos Aires, 1996.
 - [7] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, IRAM 2281-2-2002: Guía de mediciones de magnitudes de puesta a tierra (resistencias, resistividades y gradientes), Buenos Aires, 2002.
 - [8] Energía de Misiones S.A. - EMSA, “Culminamos obra de postación en línea de doble terna 33 kV (San Ignacio – Garita)”, Argentina, Ago. 2, 2025. [Online]. Disponible: <https://www.energiademisiones.com.ar/culminamos-obra-de-postacion-en-linea-de-doble-terna-33-kv-san-ignacio-garita/>.
 - [9] Energía de Misiones S.A. - EMSA, “Refuerzan línea de 33kV con nuevos postes de hormigón”, Argentina, Ago. 2, 2025. [Online]. Disponible: <https://www.energiademisiones.com.ar/refuerzan-linea-de-33kv-con-nuevos-postes-de-hormigon/>.
 - [10] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, IRAM 2211-1972: Coordinación de la Aislación Eléctrica, Buenos Aires, 1972.
 - [11] Energía de Misiones S.A. - EMSA, “Reglamento”, Argentina, Ago. 2, 2025. [Online]. Disponible: <https://www.energiademisiones.com.ar/reglamento/>.
 - [12] Asociación Electrotécnica Argentina, AEA 95301: Reglamentación para líneas eléctricas aéreas, Líneas de Media y Alta Tensión, Buenos Aires, 2007.
 - [13] Asociación Electrotécnica Argentina, AEA 92305-1: Reglamentación para la protección contra los rayos, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, 2015.