

DISEÑO DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS PARA EL EDIFICIO DE ELECTROTECNIA DE LA FI-UNLP

Carlos A. Wall*

María B. Barbieri*

Raúl Bianchi*

Patricia L. Arnera*

Pool Barrientos**

*IITREE-LAT-FI-UNLP

**FI-UNLP

48 y 116. La Plata. Buenos Aires. Argentina
caw@iitree-unlp.org.ar

1 y 47. La Plata. Buenos Aires. Argentina

Palabras claves:

Descargas Atmosféricas, simulación, software, pararrayos.

Introducción:

Toda edificación está expuesta a descargas atmosféricas, las cuales pueden causar importantes daños en la estructura y en mayor gravedad a las personas, por ejemplo, las plantas industriales que procesan y almacenan sustancias inflamables, se caracterizan por el alto riesgo frente a la caída de un rayo, pues podría desencadenar una explosión y/o incendio. Por esta razón surge la necesidad de un sistema de protección contra rayos, formado por un conjunto de dispositivos, normas y medidas constructivas especiales que tienen por objeto preservar las personas, edificios y otras construcciones contra los daños que podrían ocasionar las descargas atmosféricas.

Se considera que un Sistema de Protección Contra Rayos (SPCR) estará completo, cuando esté conformado por: el “sistema de protección externo” (el cual tiene por objetivo la captación del rayo y su derivación a la puesta a tierra) y el “sistema de protección interno” (mediante el cual se logra la equipotencialización de todas las instalaciones).

Se entiende como sistema de protección externo a la totalidad de los dispositivos e instalaciones en el exterior, encima, adosados o no, a la instalación que se debe proteger, para captar y derivar la corriente del rayo a la instalación de puesta a tierra.

Este SPCR externo consiste básicamente de [1]:

- El **Sistema de dispositivos captadores**: Parte de un SPCR externo formado por elementos metálicos tales como varillas, mallas o cables conductores destinados a interceptar el rayo.
- El **Sistema de conductores de bajada**: Parte de un SPCR externo destinado a conducir las corrientes de los rayos desde el sistema de dispositivos captadores al sistema de puesta a tierra.
- El **Sistema de puesta a tierra**: Parte de un SPCR externo destinado a conducir y dispersar las corrientes de los rayos en el suelo.

Para distribuir este sistema de protección externo de forma eficiente, en una zona o planta determinada, es necesario hacer un estudio para identificar en que estructura es más probable que impacten las descargas, cuáles son las que merecen mayor atención e identificar los objetos que cumplan la función de pararrayos natural.

Se denomina Pararrayo (PR) a los elementos que fueron diseñados para cumplir la función de captadores de las descargas del sistema de protección externo. Se denomina PR natural a los objetos que no fueron diseñados con este fin, pero que, por sus características constructivas, de acuerdo a las normas vigentes, pueden ser considerados como tal. Sin embargo, es imprescindible corroborar el estado de estos, de manera de asegurar el correcto cumplimiento de sus funciones.

El objetivo del presente trabajo es presentar la aplicación del software BLINSUB desarrollado en el IITREE-LAT-FI-UNLP, y destinado a la evaluación del sistema de protección externo (sistema aéreo de captación) ante descargas atmosféricas el cual

fue aplicado en el edificio de Electrotecnia de la FI-UNLP. Es importante aclarar que el software puede ser utilizado para evaluar todo tipo de instalaciones.

En una primera parte, se hace una descripción del programa BLINSUB de simulación probabilística tipo Monte Carlo, el cual se basa en el modelo electro-geométrico de la descarga y considera una distribución estadística empírica de corrientes de los rayos. Las probabilidades estimadas en este estudio equivalen a aproximadamente 20000 años de simulación. Luego se describen las potenciales aplicaciones del programa, y se analiza un caso práctico de aplicación, en el que se analizan dos métodos empleados para el análisis (estadístico y determinístico o esfera rodante).

El programa BLINSUB permite la modelación de instalaciones y la representación de objetos complejos que la conforman, como así también el comportamiento aleatorio de la actividad atmosférica. Presenta un desempeño satisfactorio, y ha mostrado ser es una herramienta útil para la evaluación de distintas alternativas de protección contra las descargas atmosféricas.

Descripción del BLINSUB

El programa BLINSUB fue desarrollado con el fin de obtener la ubicación del sistema de protección externo (pararrayos) [2]. El mismo se basa en el modelo electro-geométrico del rayo [3]. Este método se basa en la física de la descarga del rayo, donde se considera una esfera cuyo centro se corresponde con la cabeza de la descarga directriz, la cual, al aproximarse a la tierra, efectúa su salto final al objeto más cercano. El radio de la esfera se asocia con dicho salto final y es la distancia de captación del rayo, también llamado “radio de salto” (R) que se obtiene por medio de la ecuación (1) [3].

$$R = K \cdot I^n \quad (1)$$

Donde K y n son constantes, R se expresa en [m] e I en [kA].

Se puede realizar un análisis estadístico, en el cual se adopta una distribución probabilística de valores de corriente de rayos y se toma una distribución plana de los lugares donde caen las descargas aleatoriamente, eligiendo la cantidad de descargas de acuerdo con la densidad de descargas anuales del lugar por unidad de superficie y la cantidad de años que se quiere representar.

También se puede realizar un análisis determinístico denominado “Esfera Rodante” que consiste en “hacer rodar” una esfera de radio fijo por toda la instalación a estudiar [4]. El radio de esta esfera está relacionado con una determinada corriente de acuerdo a (1). Si utilizamos el programa BLINSUB para este análisis se fijará un único valor de corriente de acuerdo al radio elegido que representa un nivel de protección [5] y se tiene que asegurar un número de descargas lo suficientemente grande para que se cubran todos los puntos posibles (x,y) de la superficie estudiada.

La versión anterior del programa fue desarrollada en la década del '80, en el entorno de programación de DOS, lo cual dificulta su utilización en los medios informáticos actuales. Además, en dicha versión todos los elementos eran representados por medio de paralelepípedos, lo cual implicaba que para un gran número de elementos debía recurrirse a simplificaciones. Por estos motivos, se decidió realizar una nueva versión del programa, en el entorno de programación de Matlab, lo que permitió incorporar recursos gráficos adicionales y elementos que con la versión anterior no se podían representar, como esferas, cilindros, verticales y horizontales, cañerías elevadas, etc. Además, se implementó una interfaz más amigable para el operador [2]. El BLINSUB permite la modelación de instalaciones y la representación de objetos complejos que la conforman.

El programa permite modelar la instalación a estudiar, donde se aprecian todas las estructuras apoyadas sobre la zona. Los resultados se muestran en forma de gráficos y tablas para su análisis.

Tipos de Elementos que soporta el software

Los datos de entrada referidos al *layout* de la instalación, consisten en las instalaciones emplazadas sobre la superficie de la región a estudiar y los objetos aledaños que puedan influir en los cálculos. Las mismas se deben ingresar con sus respectivas coordenadas geográficas, abscisas y ordenadas, respecto de la referencia (0,0) adoptado para el estudio.

Los objetos sobre la superficie se pueden representar mediante las siguientes formas: Paralelepípedos ortogonales (con cuatro coordenadas sobre el terreno en los ejes X e Y, y su altura), Cilindro vertical (indicando el centro del mismo en los ejes X e Y, su altura y el radio), Esferas (indicando el radio, las coordenadas del centro en los ejes X e Y, y la altura del centro), Cilindro vertical con una cúpula en la parte superior semiesférica (indicando el radio, el centro del mismo en los ejes X e Y, y la altura del cilindro)¹, Cilindro horizontal con o sin terminación semiesférica en los extremos.

Es necesario indicar para cada elemento, si el mismo actúa como pararrayo, es decir objeto protegido, o si el mismo no actúa como tal. También se debe especificar el número y descripción de cada estructura

Datos del Tipo de Simulación a ingresar en el software

Cargados los datos de la planta o zona a estudiar, se deben declarar los parámetros y variables para la ejecución del programa. Si se realiza un análisis estadístico se debe indicar la densidad de descargas deseada (número de descargas por km² por año), y la cantidad de años a evaluar. Si se quiere realizar un análisis determinístico (Esfera Rodante) se debe indicar el radio de salto y el número de descargas a tener en cuenta (suficientemente grande).

Para el radio de salto, se puede elegir entre 20, 30, 45 y 60 metros (estudio determinístico), según un análisis de riesgo y el nivel de protección deseado [4][5]. Para el estudio estadístico, se puede elegir los coeficientes K y n de la (1), tanto para la tierra como para el objeto [6].

Tipo de Resultados que entrega el Software

Con todos los datos cargados y definidos los parámetros de cálculo, se realiza la simulación. Los resultados obtenidos, se pueden apreciar en un gráfico, en donde se superpone el *layout* de la planta y las descargas que impactarían en las estructuras que no fueron especificadas como Pararrayos naturales (color rojo) y las que impactarían a tierra (color verde). Además, es posible visualizar los resultados obtenidos por medio de tablas, en archivos cuyo formato es "*.xlsx", donde se detallan las coordenadas de cada descarga, sobre qué elemento impactarían, la magnitud de la corriente y el radio de salto asociado a cada una de ellas, tiempo de simulación equivalente, fallas de blindaje en 100 años y tiempo promedio entre fallas.

Caso de estudio

Como caso de estudio, se pretende diseñar la protección externa contra rayos para el Edificio de Electrotecnia de la FI-UNLP, indicado como "A" en la Fig. 1, que está ubicado en el campus de la FI, rodeado de árboles y otros edificios, como por ejemplo los correspondientes a los Departamentos de Mecánica (B), Hidráulica (C) y otros (D, E, F y G), los cuales se consideran sistemas naturales de protección, debido que influyen en la simulación que se realizará.

¹ La altura total de este objeto se obtiene con la suma de la altura del cilindro y el radio de la esfera (el radio de la esfera es igual a la del cilindro).

El edificio tiene una altura de 24 m (terracea más alta) y una superficie de 0,0042 km². En el techo se encuentran tanques de agua, aires acondicionados, un generador eólico y un panel solar, los cuales necesitan ser protegidos, con todo el edificio. Para optimizar el proceso de evaluación se dividió al edificio, en diferentes partes (39 en total), lo que permite identificar en que sector impactarán las descargas (Fig. 2).

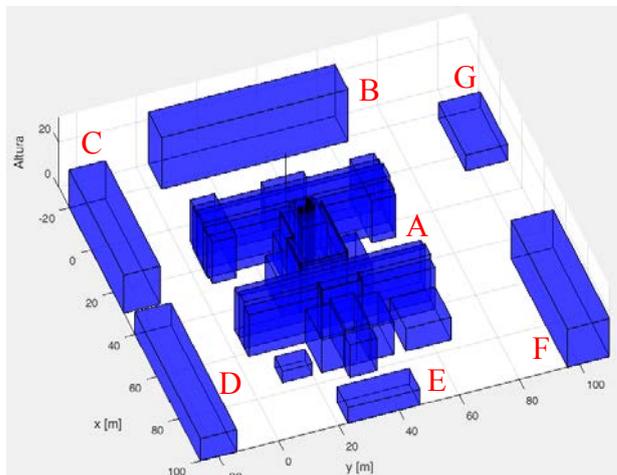


Fig. 1. Layout del modelo



Fig. 2. Vista en planta del edificio, identificación de sus partes.

Como se mencionó, en la parte superior del edificio existen algunos elementos que deben considerarse, estos se presentan en la Fig. 3. En a) se aprecia la parte superior del frente del edificio, en donde existe un mástil, este será considerado como un PR natural (Parte 34, Fig. 2). En b) se presenta una imagen con la parte posterior del edificio, allí existe actualmente un PR (Parte 35, Fig. 2). En c) se observa la parte central del edificio, con los elementos de mayor altura (Parte 26, Fig. 2), se pueden identificar en la misma los tanques de agua, un aerogenerador y un PR, en esta imagen se destaca que la altura del aerogenerador, supera la del PR existente. En d) se presenta el panel solar (Parte 5, Fig. 2).

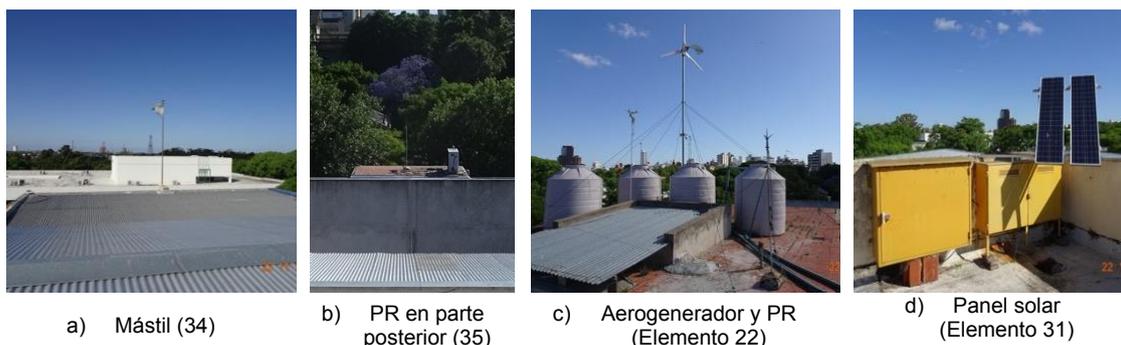


Fig. 3. Elementos particulares sobre el edificio.

Condiciones de Simulación

Los elementos considerados como sistemas naturales de protección fueron: el mástil y los edificios vecinos. Se consideraron dos casos, según el siguiente detalle:

- **Caso 1:** Análisis estadístico (radio de salto aleatorio), tomando como valores K igual a 10, n igual a 0.65, densidad de descargas igual a 2 y 238 descargas para obtener 20.000 años de simulación.
- **Caso 2:** Análisis determinístico con un radio de salto de 45 metros, correspondiente al nivel de protección 3, según un análisis de riesgo analizado

[4][5], este caso representa una corriente fija de 10 kA considerando $K=10$ y $n=0,65$.

Resultados obtenidos

A continuación, se presentan los resultados gráficos obtenidos en las condiciones actuales del edificio.

Un punto en color rojo en las figuras mostradas a continuación, indica la coordenada en el plano por donde se asume que descenderá verticalmente el rayo, la cual varía aleatoriamente dentro de la zona de análisis con una distribución uniforme.

La cantidad de rayos por año a simular, en todos los casos, se obtiene considerando la densidad de descargas (rayos/km²*año) de la zona en donde se encuentra la instalación y la superficie de ésta.

El Caso 1 corresponde a un método donde además las amplitudes de las corrientes de los rayos varían (aproximadamente entre 2 y 250 kA) de acuerdo con una distribución estadística asumida como gaussiana. Por lo tanto, así lo hará también el 'Radio de salto' (R) de acuerdo con (1). Este un método utilizado generalmente en el diseño de líneas de transmisión de energía eléctrica.

En la Fig. 4 se presentan los resultados para el Caso 1, indicándose en la misma, en color rojo, sólo las coordenadas de las descargas que impactarían en los elementos desprotegidos.

En este caso, los elementos que recibirían el impacto de rayos son el aerogenerador, el panel solar, las cubiertas del edificio, los muros y la salida de este (Elementos 1, 13, 22, 31, 35, 36, 37, 38 y 39). De las 238 descargas, 64 impactarían en el aerogenerador, 22 en el panel solar, 55 en las cubiertas y la salida y 19 en los muros. Las descargas restantes impactan en la tierra y en los elementos considerados como pararrayos naturales. El promedio de fallas de blindaje, en 100 años, es de 0,69; lo que da lugar a un tiempo promedio entre fallas de 145 años. Estos datos se obtienen a través de las tablas que brinda el programa en formato ".xlsx" y filtrando lo que sea conveniente para el usuario.

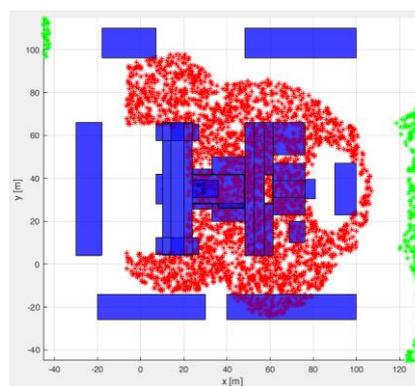
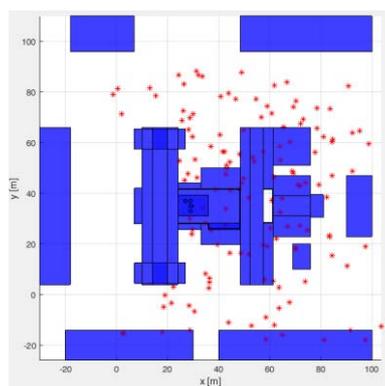


Fig. 4. Resultados obtenidos para el caso 1 Fig. 5. Resultados obtenidos para el caso 2.

El Caso 2 corresponde al método normalizado [1][4][7], generalmente utilizado para el análisis de protección de instalaciones civiles, que consiste en hacer rodar una esfera de un radio fijo (igual al radio de salto y por lo tanto correspondiente a una amplitud fija de la corriente del rayo), por sobre el plano donde se encuentran los edificios objeto del estudio.

En este método, por lo tanto, todas las amplitudes de las corrientes de los rayos son iguales, y es determinada por las normas en función del 'grado de seguridad' deseado para la instalación.

Se indican en la figura las coordenadas del centro de la esfera que hace contacto con elementos desprotegidos. Esto permite localizar sobre el modelo todos los puntos posibles de descarga de rayo y las zonas de posibles descargas laterales.

En la Fig. 5 se muestran los resultados obtenidos para el Caso 2, en color rojo se indican las descargas que impactarían en los distintos elementos desprotegidos y en color verde las que impactarían en tierra.

En este caso se observa, que los elementos a proteger además de los detallados en el Caso 1, son el 14, 15, 17, 32, 33 y 44 (Fig. 2).

La diferencia en la cantidad de 'puntos rojos' entre ambas figuras se debe a que en el Caso 1, dado que las amplitudes varían aleatoriamente, sólo algunos de los rayos tienen la amplitud equivalente al radio de la esfera utilizada para el Caso 2.

En ambos casos, sin embargo, se aprecia que será necesario la instalación de PRs, para proteger la totalidad del edificio ya que varios elementos están expuestos a recibir descargas.

Se puede ver de forma clara, en qué lugares se deberán colocar los sistemas de protección para asegurar que los elementos desprotegidos queden resguardados y no sean impactados.

Medidas de Mitigación consideradas

Considerando los resultados obtenidos para los Casos 1 y 2, se concluye que es necesario adoptar medidas de mitigación para proteger aquellos elementos desprotegidos. En el caso del método determinístico aparecen elementos adicionales a proteger.

En la Fig. 6 se presenta una propuesta de distribución de PRs, elaborada considerando las recomendaciones indicadas en las normas IRAM 2184-11[1], IEC 62305-3[5], la NFPA 780[7] y los resultados del Caso 2 (también sería válida para el Caso 1). Como solución se propone instalar un PR (en amarillo) de 7,5 m de altura (el aerogenerador tiene una altura de 6,26 m), 24 pararrayos 0,4 m (en rojo), se reubica el pararrayo existente en la zona del aerogenerador, en la zona en donde se encuentra el panel solar (color naranja) y se deja el PR existente en la parte posterior del edificio (color verde).

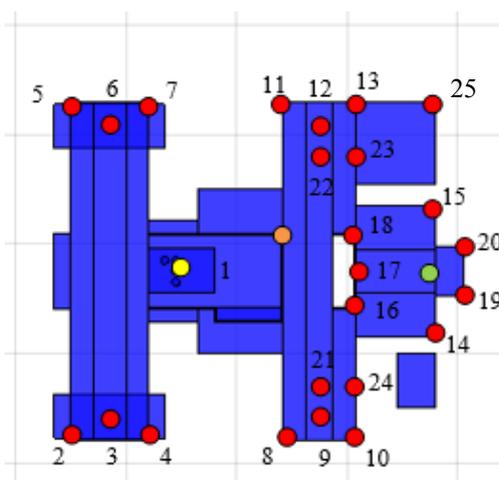


Fig. 6. Vista en planta del edificio con la ubicación de los PR.

Con la incorporación de los elementos de protección, descritos, se repitieron los cálculos, para los dos Casos. En la Fig. 7, se presentan los resultados obtenidos, a) para el Caso 1 y b) para el Caso 2. Al agregar al modelo, los elementos que representan el sistema de protección y simulando las descargas en el edificio con las modificaciones realizadas, se llegó a la conclusión que para la protección total fue necesario instalar todos los pararrayos descritos.

También se hubiera podido instalar menos cantidad de pararrayos, pero de mayor altura, esto requiere estructuras de soporte que consideren la acción del viento y elementos más altos provocarían un impacto visual mayor.

Con estas consideraciones, se observa que todas las estructuras a proteger no son impactadas por descargas.

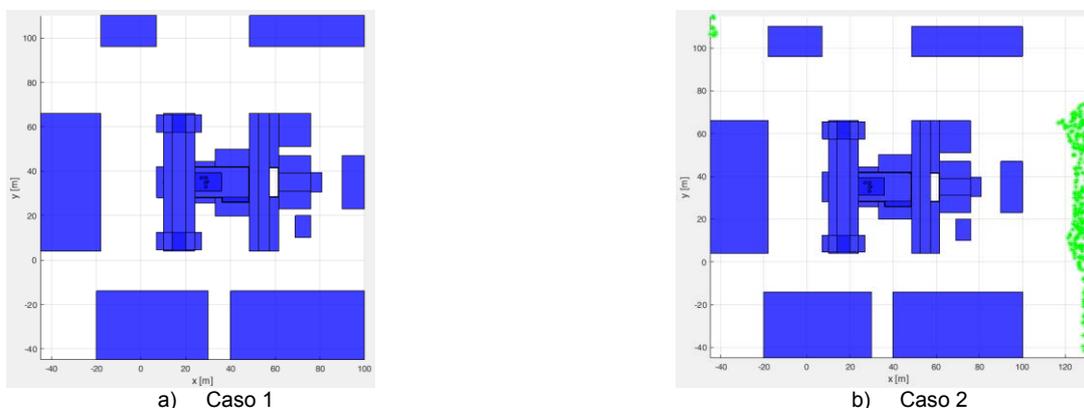


Fig. 7 Resultados obtenidos con las medidas de mitigación y condiciones de los casos 1 y 2.

A partir de los resultados obtenidos en el ejemplo de aplicación, se observa que no es necesario instalar sistemas de protección en todos los objetos a proteger.

Se muestra en una primera simulación aquellos elementos en los que impactan un mayor número de descargas, teniendo de esta manera una indicación aproximada de dónde habría que instalar puntas captoras. Luego en simulaciones posteriores se verifica y ajusta la posición de estas puntas captoras para cubrir eficientemente toda la instalación.

El edificio considerado en este trabajo posee una afluencia masiva de personas y además alberga grupos de trabajo que poseen equipamiento, en muchos casos sensible a los efectos de las descargas atmosféricas.

Es importante contar con la protección adecuada contra este tipo de fenómenos y contar con herramientas como el BLINSUB permiten evaluar alternativas que presenten un desempeño técnico económico aceptable.

En este edificio, se observa que la superficie que presenta es amplia, además sobre la parte superior existen elementos de diferentes alturas, lo que requiere de la disposición de varios elementos para lograr una adecuada protección.

La solución adoptada resulta eficiente ya que Fig. 7 no se observan impactos en elementos desprotegidos. Se logró el objetivo planteado, logrando proteger al edificio con 27 elementos, dos de ellos existentes, uno de los cuales no cumple su función, ya que en su entorno existen elementos de mayor altura. Se mantuvo uno de los existentes y se relocalizó el que estaba desaprovechado. Con la incorporación de elementos de 40 cm de alto y uno de 7,5 m se cumple el objetivo de proteger el edificio. Es importante aclarar que el sistema de protección externo se debe complementar con el sistema de bajada a tierra y el sistema de puesta a tierra.

Conclusiones

El programa desarrollado, BLINSUB, permite realizar simulaciones considerando las condiciones indicadas en las normas de referencia, con resultados satisfactorios. El mismo fue desarrollado con herramientas informáticas disponibles actualmente. Permite extraer resultados, en forma gráfica y a través de tablas, lo que da lugar a un análisis específico de las instalaciones. Posee una interfaz gráfica más flexible y amigable para el operador, permitiendo realizar diferentes modificaciones, directamente sobre un modelo ya cargado previamente.

La simulación de las descargas a través del programa depende del nivel de seguridad que el usuario requiera. Para verificar que los resultados son viables, se podrá hacer la cantidad de pruebas que resulten necesarias, variando los parámetros de simulación como por ejemplo el radio de salto (aleatorio o específico), densidad de descargas, tiempo de simulación, etc.

Se ha desarrollado una herramienta que permite analizar diferentes tipos de instalaciones, gracias a los distintos tipos de elementos que se pueden representar. En los casos en que resulte necesario adoptar alguna medida de mitigación, será posible comparar diferentes tipos de soluciones para diseñar sistemas de protección de forma eficiente y considerando la opción que signifique la mejor solución desde el punto de vista técnico y económico.

Bibliografía

- [1] IRAM 2184 – 11: 2016. *“Protección contra los rayos – Parte 11: Guía para la elección de los sistemas de protección contra los rayos (SPCR) para usar en la República Argentina”*. Segunda Edición 2016 – 09 - 01.
- [2] *“DESARROLLO Y UTILIZACIÓN DE UN SOFTWARE PARA EVALUAR LA EFECTIVIDAD DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN EXTERNO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN INSTALACIONES”*. C. WALL*, B. BARBIERI*, R. BIANCHI*, P. ARNERA*, P. BARRIENTOS**, G. ADGI**. XVIII ERIAC, DÉCIMO OITAVO ENCONTRO REGIONAL IBERO-AMERICANO DO CIGRE. Foz do Iguaçu, Brasil, 19 a 23 de maio de 2019.
- [3] IEEE Working Group Report Estimating Lightning Performance of Transmission Lines II - Updates to Analytical Models. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 3, July 1993
- [4] IEC 62305-1:2010. *“Protection against lightning - Part 1: General principles”*.
- [5] IEC 62305-3:2010. *“Protection against lightning - Part 3: Physical damage to structures and life hazard”*.
- [6] Cigré TB 63. *GUIDE TO PROCEDURES FOR ESTIMATING THE LIGHTNING PERFORMANCE OF TRANSMISSION LINES*. Working Group 01 (Lightning) of Study Committee 33 (Overvoltages and Insulation Coordination). October 1991.
- [7] NFPA 780. *“Standard for the installation of Lightning Protection Systems”*. 2020 Edition.