

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Departamento de Ingeniería Eléctrica



TESIS DOCTORAL

**CONTRIBUCIONES A LOS SISTEMAS DE
PROTECCIÓN CONTRA EL RAYO**

Presentada por: D. David Ruiz Muñoz

Dirigida por: Dr. D. Pedro Llovera Segovia
Dr. D. Vicente Fuster Roig

Valencia, Diciembre de 2015

TESIS DOCTORAL

**CONTRIBUCIONES A LOS SISTEMAS DE
PROTECCIÓN CONTRA EL RAYO**

que para la obtención
del grado de

Doctor Ingeniero Industrial

presenta

D. David Ruiz Muñoz

en el

Departamento de Ingeniería Eléctrica
de la Universitat Politècnica de València

Dirigida por

Dr. D. Pedro Llovera Segovia
Dr. D. Vicente Fuster Roig

Valencia, Diciembre de 2015

Tabla de contenido

RESUMEN	1
RESUM.....	3
ABSTRACT.....	5
PREFACIO	7
AGRADECIMIENTOS	9
Parte I: Memoria	11
1. INTRODUCCIÓN.....	12
1.1. Motivación y antecedentes.....	12
1.2. Objetivos.....	13
1.3. Organización y desarrollo de la Tesis.....	15
2. LA PROTECCIÓN CONTRA EL RAYO	17
2.1 Las descargas electrostáticas en gases	19
2.2 El fenómeno del rayo en la naturaleza	25
2.3 Sistemas de protección contra el rayo.....	40
2.4 Conclusiones parciales.....	45
Referencias del capítulo 2	47
3. ENSAYOS DE LABORATORIO.....	50
3.1. Tratamiento probabilístico de la descarga disruptiva en laboratorio.....	51
3.2. Tratamiento heurístico de la descarga disruptiva en laboratorio.....	55
3.3. Conclusiones parciales.....	65
Referencias del capítulo 3	67
4. ESTUDIOS DE CAMPO.....	69
4.1. Estrategias de medida de parámetros del rayo.....	70
4.2. Un nuevo planteamiento aplicado a la medida de parámetros del rayo	75
4.3. Evaluación de materiales y métodos mediante estudios de campo.....	85
4.4. Conclusiones parciales.....	86
Referencias del capítulo 4	88

5.	MODELOS DE PROTECCIÓN.....	90
5.1.	<i>Los modelos de protección contra el rayo en la actualidad.....</i>	91
5.1.1.	<i>El método del ángulo de protección (P.A.M.).....</i>	92
5.1.2.	<i>El método de la esfera rodante (R.S.M.).....</i>	94
5.1.3.	<i>El método de mallas (M.M.).....</i>	100
5.1.4.	<i>Otros modelos de protección.....</i>	103
5.1.4.1	<i>El método del volumen de colección.....</i>	103
5.1.4.2	<i>Leader progression model.....</i>	104
5.1.4.3	<i>Leader inception model.....</i>	105
5.1.4.4	<i>Modelos estocásticos.....</i>	105
5.2	<i>Consideraciones electrostáticas aplicables a los modelos de protección basados en la intercepción del rayo.....</i>	106
5.3	<i>Conclusiones parciales.....</i>	115
	<i>Referencias del capítulo 5.....</i>	117
6.	CONCLUSIONES Y PROYECCIÓN FUTURA.....	120
6.1	<i>Conclusiones.....</i>	120
6.2	<i>Proyección Futura.....</i>	122
6.3	<i>Transferencia tecnológica.....</i>	124
7.	RESUMEN DE LOS ARTÍCULOS.....	125
7.1	<i>Artículo 1.....</i>	125
7.2	<i>Artículo 2.....</i>	126
7.3	<i>Artículo 3.....</i>	127
	Parte II: Artículos.....	129
	<i>Artículo 1.....</i>	131
	<i>Artículo 2.....</i>	143
	<i>Artículo 3.....</i>	152

RESUMEN

En esta Tesis se aborda el estudio del estado actual de la protección contra el rayo, centrándose en la protección externa y concretamente en el proceso de intercepción. Bajo este planteamiento, se estudian tres pilares fundamentales que presentan un evidente interés para la evaluación y aplicación práctica de la protección contra el rayo en su primera fase, la intercepción del rayo:

- Los ensayos de laboratorio.
- Los estudios en campo
- Los modelos de protección.

Estos tres puntos pueden tratarse de forma individual, no obstante están relacionados entre sí, no sólo por el campo de la técnica al que pertenecen, sino también porque juntos plantean una evolución en la magnitud de la descarga eléctrica, comenzando con el estudio de la descarga eléctrica en laboratorio para comprender los procesos que gobiernan su comportamiento. Al no ser posible la completa reproducción del fenómeno del rayo en laboratorio, los estudios de campo resultan imprescindibles para poder caracterizar empíricamente los parámetros característicos de los rayos en la naturaleza. Con las medidas realizadas en la naturaleza, además de fundamentar algunos modelos de protección, también se realizan estadísticas que son empleadas en la definición de los niveles de protección que determinan la aplicación práctica de la protección contra el rayo.

El hecho de abarcar diferentes puntos de un campo de la técnica viene impuesto porque esta Tesis se ha realizado dentro del marco de una empresa privada especializada en la protección contra el rayo, lo cual implica una necesidad de conocimiento aplicado a todos los puntos que conciernen a su campo de aplicación.

Las principales contribuciones de la Tesis quedan recogidas en cada uno de los capítulos y las propuestas que se hacen en ellos, abriendo nuevas líneas de trabajo sobre las que fundamentar un conjunto de técnicas y prácticas que podrían complementar a las aplicadas actualmente.

Tras un capítulo introductorio, se trata el núcleo principal de la Tesis, formado por los capítulos 3, 4 y 5 donde se presentan las contribuciones del autor en forma de publicación.

En el capítulo 3 se revisan los ensayos en laboratorio, donde se pueden estudiar los procesos físicos asociados a los arcos eléctricos. En este punto y, tras una revisión, el

autor se centra en el parámetro U_{50} (amplitud de un pulso de tensión en una configuración determinada cuya aplicación implica un 50% de probabilidad de obtener una descarga disruptiva) empleando una herramienta basada en redes neuronales en la configuración de perceptrón multicapa (MLP) con la que se analiza el nivel de predicción del resultado de un impulso individual con diferentes configuraciones, datos de entrada y ventanas temporales, como indicativo de la influencia de una variable en el proceso de generación e intercepción del arco eléctrico.

Referente a los ensayos en campo, su aplicación implica normalmente la monitorización de estructuras de gran altura, el empleo de cohetes para el cebado artificial de rayos, o las redes de detección de rayos. En este punto se evalúan las diferentes estrategias de medida y se introduce un nuevo punto de vista que podría utilizarse para la obtención de estadísticas fiables en un tiempo reducido y que ha dado lugar a un artículo. También se menciona una metodología para la evaluación continua de los sistemas de protección contra el rayo con la que se podría comparar el rendimiento de los sistemas instalados, con el modelo de protección empleado para realizar el diseño de la instalación.

Sobre los modelos de protección, tras una revisión de los diferentes modelos de protección existentes, la Tesis se centra en los modelos normalizados, lo cuales, pese a sus carencias son los más utilizados en la actualidad. Tras evaluar el contexto actual bajo las normativas de protección contra el rayo, se indica que una vía para complementar físicamente los modelos de protección es la inclusión de métodos con fundamentación física cuya aplicación sea compatible con los modelos de protección normalizados existentes. En esta línea el autor presenta una aportación plasmada en un artículo.

Palabras Clave: Protección contra el rayo, modelos de protección, factor de intensificación del campo eléctrico, ensayos de campo, *triggered lightning*, ensayos en laboratorio, parámetro U_{50} , redes de detección.

RESUM

A aquesta Tesi s'aborda l'estudi del estat actual de la protecció contra el llamp, centrant l'objectiu en la protecció externa i amb èmfasi en el procés de intercepció. Baix aquest plantejament, s'estudien tres pilars fonamentals que presenten un evident interès per la avaluació y aplicació pràctica de la protecció contra el raig a la seua primera fase, la intercepció del llamp:

- Els assajos de laboratori.
- Els estudis de camp
- Els models de protecció.

Aquests tres punts poden tractar-se de forma individual, però estan relacionats entre si, no només pel camp de la tècnica al que pertanyen, sino també perquè junts plantegen una evolució en la magnitud de la descàrrega elèctrica, començant amb l'estudi de la descàrrega elèctrica al laboratori per a comprendre el processos que governen el seu comportament. Al no ser possible la completa reproducció del fenomen del raig al laboratori, els estudis de camp resulten imprescindibles per a poder caracteritzar empíricament els paràmetres característics dels rajos a la naturalesa. Amb les mesures realitzades a la naturalesa, amés de fonamentar alguns models de protecció, també es realitzen estadístiques que son emprades a la definició dels nivells de protecció que determinen la aplicació pràctica de la protecció contra el raig.

El fet de comprendre diferents punts d'un camp de la tècnica ve impost per el fet de que aquesta Tesi ha sigut realitzada dins del marc d'una empresa especialitzada en la protecció contra el llamp, i açò implica la necessitat de coneixement aplicat a tots els punts que concerneixen al seu camp d'aplicació.

Les principals contribucions de la Tesi queden arreplegades en cada un dels capítols i les propostes que se fan en ells, obrint noves línies de treball sobre les que fonamentar un conjunt de tècniques i practiques que podrien complementar a les aplicades actualment.

Després d'un capítol introductori, es tracta el nucli principal de la Tesi, format per els capítols 3, 4 y 5 on es presenten les contribucions de l'autor en forma de publicació.

Al capítol 3, es revisen els assajos en laboratori, a on es poden estudiar els processos físics associats als arcs elèctrics. En aquest punt i, després de una revisió, l'autor es centra en el paràmetre U_{50} (amplitud d'un impuls de tensió a una configuració determinada que implica un 50% de probabilitat de obtenir una descarrega disruptiva) emprant una ferramenta basada en xarxes neuronals amb configuració de

perceptró multicapa (MLP) en la que s'analitza el nivell de predicció del resultat d'un impuls individual amb diferents configuracions, senyals d'entrada i finestres temporals, com indicatiu de l'influència d'un variable en el procés de generació i intercepció de l'arc elèctric.

Referent als assajos en camp, la seua aplicació implica normalment la monitorització d'estructures de gran alçada, la utilització de coets per al encebat artificial de rajos, o les xarxes de detecció de llamps. En aquest punt s'avaluen les diferents estratègies de mesura i s'introdueix un nou punt de vista que es podria utilitzar per a l'obtenció d'estadístiques fiables en un temps reduït, del que també ha sorgit un article. També es menciona una metodologia per a l'avaluació continua dels sistemes de protecció contra el raig en la que se podria comparar el rendiment dels sistemes instal·lats, amb el model de protecció empleat per a realitzar el disseny de la instal·lació.

Sobre els models de protecció, tres una revisió dels diferents models de protecció existents, la Tesi es centra en els models normalitzats, el quals, a pesar de les seues carències segueix sent els mes utilitzats en l'actualitat. Després de avaluar el context actual baix les normatives de protecció contra el raig, s'indica que una via per a complementar físicament els models de protecció es la inclusió de mètodes amb fonamentació física que continuen sent compatibles amb els models de protecció normalitzats existents. En esta línia l'autor presenta un aportament plasmat en un article.

Paraules Clau: Protecció contra el raig, models de protecció, factor d'intensificació del camp elèctric, assajos de camp, *triggered lightning*, assajos en laboratori, paràmetre U_{50} , xarxes de detecció.

ABSTRACT

This thesis addresses to the current status of lightning protection, focusing on the external protection with emphasis on the process of interception. Under this approach, three pillars are studied due to their obvious interest in the evaluation and practical application of lightning protection during the first phase, the lightning interception. Those pillars are:

- Laboratory Tests
- Field Tests
- Lightning Protection Models.

These three points can be treated individually; nevertheless, they are interrelated, not only for the technical field they belong to, all together pose an evolution in the magnitude of the electric discharge, starting by the study of the electric discharge in laboratory in order to understand the processes that involves its behavior. It is not possible reproduce the whole event of lightning in laboratory, so field tests are essential to characterize empirically the most important parameters of lightning in natural conditions. The measurements made in natural conditions, are employed to fundament some protection models, furthermore with the statistics, it is possible the definition of the lightning protection levels which determines the practical application of the lightning protection.

The fact of encompassing different points in a technical field is imposed because this thesis has been made in a company specialized in lightning protection, which implies a need of knowledge applied to all the points concerning its scope.

The main contributions of the thesis are collected in each of the chapters and in the proposals made in them, opening new lines of work on which to base a set of techniques and practices that could complement the ones currently applied.

After an introductory chapter, it is treated the main core of the Thesis, composed by the chapters 3, 4 and 5 where the contributions, published by the author are exposed.

In the chapter 3 it is made a revision of the laboratory tests studying the physical processes associated to the electric discharge. At this point and after the review, the author focuses on the U_{50} parameter (amplitude of a pulse voltage in a determined configuration whose application involves a 50% of probability to get a disruptive discharge) using a tool based on neural networks with a configuration of multilayer perceptron (MLP) with which the level of predictability of an individual pulse is

evaluated with different configurations, data input and time windows, as indicative of the influence of a variable in the process of generation and interception of the electric arc.

Regarding the field tests, its application typically involves monitoring high-rise structures, the use of rockets for artificial lightning triggering or lightning detection networks. At this point the different measurement strategies are evaluated and a new point of view that could be used to obtain reliable statistics in a short period of time is introduced, which resulted in a paper. The dissertation also introduces a methodology for continuous evaluation of lightning protection systems, comparing the performance of the installed systems and considering also the protection model used for the design of the installation.

About protection models, in a brief introduction the author discusses the different models of protection by extending information about those standardized which, despite their lacks, remain widely used today. After evaluating the current context under standardized lightning protection, it is indicated that one way to complement physically the protection models is the inclusion of methods whose application is consistent with standardized lightning protection models. In this line the author presents a contribution embodied in an article.

Keywords: Lightning protection, protection models, electric field enhancement factor, field tests, triggered lightning, laboratory tests, U_{50} parameter, detection networks.

PREFACIO

Esta Tesis Doctoral tiene sus orígenes en varios trabajos de investigación y publicaciones llevadas a cabo desde el marco de la empresa Aplicaciones Tecnológicas S.A., algunos de ellos en estrecha colaboración con el Instituto Tecnológico de la Energía (ITE). Dado el campo de interés de la empresa, esta Tesis trata diferentes aspectos relacionados con la protección contra el rayo, haciendo hincapié en la llamada protección externa y concretamente en la intercepción del rayo. En esta tesis se presentan investigaciones originales llevadas a cabo por el autor, salvo aquellas que sean explícitamente referenciadas.

La Tesis consta de dos partes diferenciadas, la primera de las cuales consiste en una memoria que trata una introducción al trabajo y describe los diferentes puntos abordados. En esta parte se incluyen resultados y conclusiones que forman parte de los artículos adjuntos. En la segunda parte de la tesis se muestra una colección con los siguientes tres artículos:

ARTICULO 1. D. Ruiz, P. Llovera, V.Pomar, A. Quijano. "Analysis of breakdown process at U_{50} voltage for plane rod discharges by means of Neural Networks". Journal of Electrostatics Vol.71, 2013, pp.336-340.

ARTICULO 2. D. Ruiz et al. "A new concept in lightning parameters measurement". Journal of Electrostatics. Vol 67, Issues 2+3 May 2009, pp. 496-500

ARTICULO 3. D.Ruiz, R.Serna, V.Pomar, S.Polo. "Influence of the Scenario in the Calculation of Electric Field Intensification Factor. Part I: 2D Approximation". IEEE Trans. on dielectrics and electrical insulation. Vol;20, Issue:4 Aug 2013, pp.1356-1360

Otras publicaciones del autor:

Además de las mencionadas anteriormente, el autor de la presente Tesis ha participado como autor principal o coautor en las siguientes publicaciones:

ARTICULO 1C. D.Ruiz, R.Serna "Improvements of EGM based on Electrostatic field calculation". International Lightning Protection Asociation Symposium. Mar. 2014. Chamonix, France.

ARTICULO 2C. D. Ruiz, P. Llovera, V.Pomar, V. Fuster. "A critical review of the lightning protection principles and practices". Actualmente en proceso de revisión en IEEE Proc. of Industry Applications.

ARTICULO 3C. V.Pomar, S.Polo, D.Ruiz “Instruments and Methods for Field Monitoring of Lightning Protection Systems”. International Lightning Protection Association Symposium. Mar. 2014. Chamonix, France.

ARTICULO 4C. D.Ruiz, S.Polo, V.Pomar, C.Pomar “Lightning protection: Basis & Praxis”. International Lightning Protection Association Symposium. Nov. 2011. Valencia, Spain

ARTICULO 5C. R.Serna, D.Ruiz “Design of optimized LPS for a fire station by means of Conventional Protection employing a Rolling Sphere Method Design Software”. International Lightning Protection Association Symposium. Mar. 2014. Chamonix, France.

ARTICULO 6C. C. Torralba, J Puchades, I. Olivé, D Ruiz, V. Pomar, P. Llovera “Storm detection by static electric field measurements without mobile elements”. Presentado como poster en 11th Conference on Electrostatics. May 2009. Valencia, Spain.

AGRADECIMIENTOS

Si bien parece un tópico repetido hasta la saciedad, es muy cierto al menos en mi caso, que han sido varias las personas que han sido determinantes para la realización de esta Tesis, sin las cuales habría sido imposible su ejecución. Con estas líneas quisiera expresar mi más profundo agradecimiento a todos ellos.

En primer lugar, gracias a la gerencia de la empresa Aplicaciones Tecnológicas S.A. constituida por la familia Pomar, por haber permitido la realización del doctorado enfocado a un tema completamente desconocido para mí cuando empecé, y sin el que a día de hoy, me resultaría complicado definirme a mí mismo. Gracias por toda la confianza que habéis depositado en mí.

La relación que la empresa ha mantenido con el Instituto Tecnológico de la Energía (I.T.E.) durante mucho tiempo, me ha permitido conocer, además de multitud de grandes profesionales del sector, a mis dos tutores, a los que les debo mi más sincero reconocimiento y toda mi gratitud al Dr. Pedro Llovera Segovia, infinidad de gracias por tu ayuda y guía en todo momento, has sido un referente para mí, tanto durante el desarrollo de esta Tesis como en cada uno de los proyectos en los que hemos trabajado, gracias por todas las aportaciones que has hecho a ésta Tesis. Al Dr. Vicente Fuster Roig, gracias por tu atención, por tus contribuciones y ayuda, y por tu amabilidad en todo momento.

Gracias a toda la gente tanto de Aplicaciones Tecnológicas S.A. como de I.T.E. por toda la colaboración, aportaciones, ideas, pruebas, debates, revisiones y un sinfín de puntos que, sin duda, han enriquecido en gran medida el trabajo aquí presentado. Gracias Jesús P. Carlos T. Iván O. Susana P. Rubén S. Ana U. Ángel M. Gustavo O. Armando R. y un largo etc... de compañeros, con especial consideración a E. Beltran y el gran trabajo de maquetación realizado.

Además de en el ámbito profesional, en lo que respecta a las amistades, me considero afortunado de contar con muy buenos amigos con los que he compartido penas y alegrías que han surgido en el camino, gracias por escucharme y entenderme, gracias Santi y Raúl (y a vuestras preciosas familias, especialmente las pequeñas Noa, Carla y Daniela).

Especialmente, muchas gracias por estar siempre ahí Santi M.S. y por saber escucharme siempre que me ha hecho falta. Has sido y eres un referente imprescindible para mí, tanto en ámbito profesional (y tu trayectoria lo demuestra), como sobre todo, en lo personal. Día a día demuestras que eres el tipo de persona que ayuda a los demás a ser mejores, a fuerza de mejorar tú mismo.

Un gran amigo y pilar fundamental para mí ha sido el Dr. Guillermo Rodrigo, todo un ejemplo a seguir en muchos aspectos de la vida y una referencia para mí en el ámbito académico y durante el desarrollo del doctorado. Gracias y enhorabuena por tu reciente paternidad.

En lo que respecta a la familia, gracias a todos ellos por estar siempre ahí incondicionalmente, este trabajo os ha restado tiempo y por ello os pido perdón. A mis hermanos, a Cami y a mi padre. Y por supuesto, a mi madre, la persona más influyente en mi vida, que tristemente nos dejó de forma temprana y cuya memoria siempre está y estará presente para mí.

A las dos personas más importantes en mi vida, las dos personas a las que no he podido dedicar todo el tiempo que se merecen (y que espero ir recuperando) y las que más consiguen darme fuerzas para seguir adelante en cualquier situación, mi mujer Jessica y mi hija Alice. Lo sois todo para mí.

Por último, gracias a los gigantes sobre los que muchos hemos tenido que apoyarnos para intentar ver más lejos: B. Franklin, Gay-Lussac, J.C. Maxwell, y un largo etc...

Parte I

Memoria

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación y antecedentes

Esta Tesis Doctoral tiene su origen en una parte de las actividades de investigación y desarrollo de la empresa Aplicaciones Tecnológicas S.A., cuyo interés principal se centra en el campo de la protección contra el rayo. La necesidad ineludible de investigar para mejorar productos y servicios en este campo de la electrotecnia ha conducido la creación de un departamento de I+D, desde el que han surgido multitud de trabajos de investigación en colaboración con diferentes institutos tecnológicos y de investigación, siendo el que mayor número de trabajos en colaboración ha prestado, el Instituto Tecnológico de la Energía (ITE).

La colaboración entre ambas entidades ha favorecido la creación de diferentes líneas de investigación en el campo de la protección contra el rayo, siendo principalmente tres las que han generado un mayor bagaje en investigación.

- **Protección preventiva**: Basada en la detección temprana de diferentes fases de la tormenta para poder establecer una secuencia de alarmas asociadas a los niveles de riesgo y consecuentemente a las correspondientes acciones preventivas, tanto para las personas, como para las instalaciones y equipos.
- **Protección externa**: Comprende los aspectos relacionados con la intercepción de impactos directos del rayo, la conducción de la corriente por un camino seguro y su posterior dispersión mediante los sistemas de puesta a tierra.
- **Protección interna**: Que hace referencia a los diferentes sistemas de mitigación de sobretensiones transitorias conducidas o inducidas causadas por el fenómeno del rayo. En este apartado se recogen protectores contra sobretensiones, apantallamientos, filtros,...

En cada una de las líneas mencionadas, se han realizado multitud de proyectos de investigación en los que se ha podido dilucidar, que la protección contra el rayo es un campo que aún está muy abierto a la investigación, debido a la gran cantidad de incógnitas que presenta aún hoy en día. La mayoría de estas incógnitas parten del mismo punto: el rayo es un fenómeno que no es completamente conocido, existen incógnitas en muchos de los puntos fundamentales de la protección contra el rayo, y prueba de ello, es la gran cantidad de artículos y conferencias que siguen surgiendo en la actualidad en torno a esta temática.

La línea que va a ser tratada en esta Tesis es la protección externa, concretamente el proceso de intercepción del rayo, que fue la primera línea de investigación aplicada al

rayo (por B. Franklin) y que además es la base en la que se fundamentan los modelos de protección vigentes en la actualidad.

1.2. Objetivos

A día de hoy, y pese a contar con una historia de más de 200 años, la protección contra el rayo continua siendo objeto de numerosos estudios e investigaciones. El avance de la física de estado sólido y la creciente dependencia del ser humano de equipos electrónicos e informáticos, sumado al hecho de que, por cuestiones de eficiencia, los niveles de tensión de trabajo son cada vez menores, hacen que dependamos cada vez más, de equipos electrónicos altamente sensibles a los efectos del rayo.

Desde el punto de vista de la evolución histórica, la protección contra el rayo básica, constituida únicamente por un terminal de intercepción del rayo y la conducción de la corriente hacia el sistema de tierra, no ha cambiado mucho desde tiempos de B. Franklin, apenas algunas consideraciones geométricas, lo cual es un indicativo de que este sistema es altamente eficaz, pero sin embargo, pese al tiempo transcurrido y los estudios realizados, sigue existiendo una carencia en la fundamentación física en la que se basa el proceso de intercepción del rayo.

El objetivo principal de esta Tesis es el de aportar herramientas, métodos o planteamientos que puedan servir como punto de partida para complementar el conocimiento actual sobre el proceso de intercepción del rayo, pero siempre desde el punto de vista de la aplicación práctica a la ingeniería, ya que, como se ha comentado anteriormente, esta Tesis se realiza dentro del marco de una empresa tecnológica.

En esta Tesis, se abordan tres puntos sobre los que se asienta actualmente la protección contra el rayo. Aunque los tres puntos estén relacionados dentro del mismo campo de la técnica, los objetivos de cada uno de ellos serán tratados por separado, siendo los que se indican a continuación:

LOS ENSAYOS DE LABORATORIO: Con los que poder comprobar o validar algunos aspectos de la física de la descarga, comprobar el efecto de la descarga sobre diferentes elementos y asegurar cierto nivel de fiabilidad de los elementos ensayados.

- Presentar el parámetro U_{50} como parámetro de referencia en muchos ensayos realizados en laboratorio de alta tensión y exponiendo la aleatoriedad inherente a este parámetro cuando se trata de una misma configuración y se aplica un único pulso de tensión.

-
- Enmarcar el parámetro U_{50} en el estudio de la física del rayo.
 - Analizar qué ocurre durante la descarga eléctrica aplicando un nivel de tensión correspondiente al valor de U_{50}
 - Presentar una metodología con la que evaluar la influencia de cierta información temporal en la capacidad de predicción del resultado de una herramienta heurística al aplicar un impulso de tensión de amplitud U_{50} .
 - Presentar los resultados obtenidos para ciertas configuraciones geométricas así como las conclusiones obtenidas tras el análisis de los resultados.

LOS ESTUDIOS DE CAMPO: Con los que se recogen medidas y se realizan estadísticas, análisis de los parámetros del rayo, verificación de pararrayos, y muchos otros estudios aplicables a la ingeniería.

- Realizar una revisión y análisis de los parámetros característicos del rayo, así como de los métodos y estrategias de medida empleadas en su adquisición en instalaciones reales.
- Plantear los inconvenientes y limitaciones existentes en dichas estrategias.
- Presentar un nuevo planteamiento que permitiría la adquisición de datos en un periodo de tiempo asumible, permitiendo además, la evaluación de la influencia del efecto de las condiciones particulares del emplazamiento (altura, orografía, localización,...).
- Presentar las particularidades del diseño de la herramienta con las que llevar a cabo la implementación del sistema de recolección de datos.
- Presentar un primer prototipo y los resultados obtenidos en laboratorio, con los que poder evaluar el rendimiento y viabilidad del mismo.

LOS MODELOS DE PROTECCIÓN: Que presentan la aplicación práctica de la protección contra el rayo y que son empleados en las normativas de aplicación internacional.

- Realizar una revisión y análisis de los modelos de protección vigentes, con especial interés en los modelos estandarizados empleados en normativas internacionales.
- Plantear los inconvenientes y limitaciones existentes en los modelos estandarizados. Este punto es el que abre la línea de investigación y desarrollo de trabajos futuros que permitan dotar de mayor fundamentación física.
- Presentar el concepto de protección de zonas o puntos en una estructura basado en parámetros de campo eléctrico, y considerando el efecto de modificación del campo eléctrico local debido a la influencia de estructuras adyacentes.

-
- Planteamiento de un algoritmo de cálculo de probabilidad de impacto basado en el campo eléctrico, considerando los casos de estructura aislada y conjunto de estructuras.

Como se puede ver, el objetivo principal de la Tesis, consiste en revisar los tres puntos mencionados anteriormente y ofrecer alternativas, planteamientos o herramientas diferentes a las empleadas actualmente con las que avanzar en la fundamentación física de este campo de la técnica.

1.3. Organización y desarrollo de la Tesis

La Tesis se organiza en dos bloques principales, el primero de los cuales consiste en una memoria que incluye una introducción al trabajo realizado para posteriormente centrarse en la protección contra el rayo, antes de presentar las aportaciones en los diferentes aspectos realizadas por el autor, mostrando también los resultados y las conclusiones obtenidas, así como algunas de las aplicaciones prácticas. En el segundo núcleo se presentan las aportaciones científicas publicadas por el autor como trabajos asociados a la presente Tesis.

La estructura de la memoria de la Tesis consta de 7 capítulos que se describen a continuación:

El primer capítulo consiste en una introducción en la que se presenta la motivación y los antecedentes del trabajo, los objetivos a cumplir y la estructura de la Tesis.

En el segundo capítulo se aborda la protección contra el rayo, primeramente con algunos conceptos propios de las descargas electrostáticas para posteriormente abordar el fenómeno del rayo en la naturaleza y finalmente los sistemas de protección contra el rayo.

Los ensayos de laboratorio son tratados en el capítulo 3, donde, tras una breve introducción, se presenta la aportación del autor que consiste en una metodología de análisis heurístico de variables de influencia en la transición *streamer-leader* para un arco eléctrico de 1,75m en configuración de campo eléctrico divergente. El análisis se basa en la capacidad de predicción del resultado, en una red neuronal convenientemente entrenada cuando se le muestran ciertos instantes temporales tempranos de las señales de corriente y/o fotoemisión aplicando un pulso de tensión de U_{50} . Este proceso se realiza sobre tres puntas captadoras con diferentes radios de curvatura. Al final del capítulo se recogen las conclusiones parciales del capítulo y las referencias bibliográficas específicas.

En el capítulo número 4 se comentarán las estrategias y métodos empleados actualmente en la realización de ensayos de campo, presentando también las limitaciones e inconvenientes que poseen cada uno de ellos. Con esto se dará paso al planteamiento realizado por el autor, y que presenta una serie de ventajas con respecto a las estrategias habituales, indicando también sus propias limitaciones. En este punto, se presenta la implementación de la herramienta desarrollada, así como la evaluación de la misma en condiciones de laboratorio. Al final del capítulo se recogen las conclusiones parciales del capítulo y las referencias bibliográficas específicas.

En el quinto capítulo se tratan los modelos de protección, pero centrando el interés en aquellos de mayor utilización, es decir, aquellos recogidos por las normativas internacionales. En este punto se comentarán las limitaciones de estos modelos, para dar paso a la exposición de la contribución realizada por el autor. El principal resultado es la evaluación de la influencia de los elementos de un escenario en el valor del factor de intensificación del campo eléctrico mediante la simulación electrostática, basada en análisis por el Método de Elementos Finitos (F.E.M.) del escenario a proteger, pero desde un punto de vista compatible con los modelos estandarizados. Este planteamiento, a pesar de tener sus propias limitaciones, presenta una serie de mejoras con respecto a la aplicación clásica de los modelos existentes. Al final del capítulo se recogen las conclusiones parciales del capítulo y las referencias bibliográficas específicas.

Las conclusiones generales obtenidas, la proyección futura y la transferencia tecnológica que se ha aportado a la empresa serán expuestas en el capítulo 6.

Por último, en el capítulo 7 se encuentra un resumen de los artículos científicos publicados por el autor y asociados a esta Tesis.

2. LA PROTECCIÓN CONTRA EL RAYO

Antes de la aparición de B.Franklin y sus conocidos experimentos sobre la electricidad, de entre los que resultó la invención del pararrayos, así como recomendaciones para su instalación, se creía que el rayo era un tipo de castigo divino, por lo que la única protección posible era mediante súplicas y oraciones implorando benevolencia. Paradójicamente, las iglesias y sus campanarios eran impactados frecuentemente debido a su altura.

No obstante, los mencionados experimentos pusieron de manifiesto, en primer lugar la naturaleza eléctrica del rayo, y en segundo lugar que una estructura con un terminal metálico conectado a tierra no sufría daños por el impacto de un rayo, aunque no por los motivos que B.Franklin había previsto inicialmente.

En experimentos previos, B.Franklin se dio cuenta que una esfera cargada podía descargarse cuando se le aproximaba una punta afilada conectada a tierra, debido a que se generaban pequeñas descargas eléctricas que disipaban lentamente la carga acumulada. B.Franklin intentó extrapolar este fenómeno a la protección contra el rayo tratando de proteger una estructura con un pararrayos.

En lugar de inhibir la formación del rayo, el rayo impactó en el pararrayos en lugar de en otro punto de la estructura y su corriente fue conducida hasta tierra y dispersada, de forma que la estructura no sufrió ningún tipo de daño. Este tipo de protección, basada en la intercepción del rayo, es tan eficaz que actualmente, más de 200 años después, se sigue empleando con un alto grado de efectividad.

La protección contra el rayo constituye un campo de la técnica cuya principal finalidad es la de minimizar las situaciones de riesgo para personas, estructuras, equipos y bienes debidas a los efectos directos o indirectos asociados a la caída de un rayo.

En la actualidad, la protección contra el rayo se suele dividir en bloques que contemplan diferentes aspectos de la descarga: detección temprana, protección frente a impactos directos y protección frente a impactos indirectos y acoplamientos.

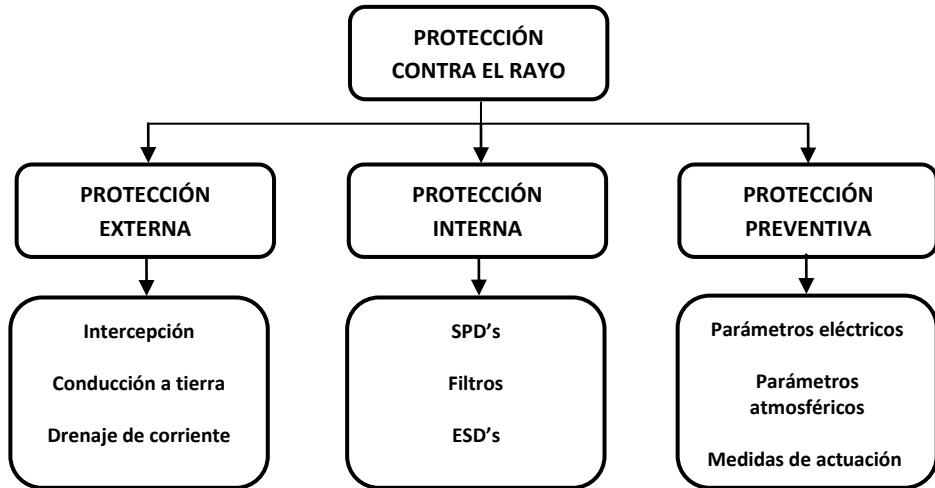


Figura 2.1. Posible división de diferentes aspectos involucrados en la protección contra el rayo.

Esta Tesis se centra en la parte de protección externa, concretamente en el proceso de intercepción del rayo. La intercepción del rayo contempla múltiples aspectos de la descarga, desde los fenómenos microscópicos que se generan en pequeñas descargas de apenas unos pocos electrones, hasta la aplicación práctica de la protección contra el rayo ubicando una serie de terminales de intercepción.

Entre ambos extremos existe todo un universo de aspectos físicos de las descargas que se pueden evaluar en un laboratorio, medidas de diferentes parámetros asociados al rayo en la naturaleza, que permiten obtener información estadística con la que dimensionar la protección práctica, empleando los modelos de protección contra el rayo.

En este primer capítulo, se va a realizar una revisión conceptual que abarcará desde las descargas electrostáticas en gases, de apenas unos pocos picoamperios (pA) hasta el rayo, con magnitudes de centenas de kiloamperios (kA). Posteriormente se verá el rayo en la naturaleza, formación, clasificación y parámetros asociados a la caída del rayo y por último, se verán los sistemas de protección contra el rayo, donde se revisará la parte aplicada de la protección, la cual se basa en los modelos de protección existentes.

2.1 Las descargas electrostáticas en gases

Una descarga electrostática en un medio gaseoso, tiene lugar cuando dicho gas, que normalmente no conduce la electricidad, comienza a hacerlo debido a diferentes procesos de ionización. En este apartado se van a abordar los diferentes fenómenos y magnitudes asociadas a las fases que constituyen la formación de un arco eléctrico. Una descarga eléctrica completa o arco eléctrico, consta de varias fases en su desarrollo y propagación y, en cada una de las fases puede sufrir una transición hacia un estado de mayor magnitud o extinguirse.

En condiciones normales, un gas como el aire, es un excelente aislante eléctrico ya que presenta una gran resistencia al flujo de cargas eléctricas a su través. La distancia que es capaz de recorrer una partícula en el aire viene determinada por la siguiente fórmula [1]:

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{N \cdot \sigma} \quad (2.1)$$

En la ecuación (2.1) N es la densidad del gas y σ es el área de colisión de cada partícula, lo que viene a indicar que cuanto más denso sea el gas y mayor tamaño tengan las partículas, menor recorrido promedio tienen.

Cuando un gas es sometido a la acción de un campo eléctrico, si este aporta una energía superior a la energía de enlace de los electrones, se puede producir la fuga de electrones ligados al átomo. Estos electrones, al encontrarse en el seno de un campo eléctrico E adquieren cierta energía que puede determinarse mediante la siguiente expresión:

$$\Delta W = e \cdot E \cdot \bar{\lambda}_e \quad (2.2)$$

Donde $\bar{\lambda}_e$ es la distancia promedio que recorre un electrón.

Si la energía adquirida es mayor que la energía de ionización de una molécula, la colisión del electrón con dicha molécula puede producir la ionización de la misma, y los electrones resultantes pueden continuar la ionización en un proceso parecido a una avalancha con crecimiento exponencial.

Este tipo de descargas de corriente, se les conoce como avalanchas de electrones o descargas tipo Townsend y constituyen la primera fase de una descarga completa. Seguidamente, al aumentar el campo eléctrico, pueden suceder una serie de transiciones hacia otros tipos de descargas eléctricas de mayor magnitud o extinguirse.

Tras la descarga Townsend, a presión atmosférica, nos encontramos con la descarga corona, que consiste en una descarga de baja magnitud ocasionada por la ionización del aire, cuando el campo eléctrico supera cierto umbral (*inception electric field*), al ser un fenómeno local, está sujeto a la intensificación local del campo eléctrico, por lo que estas descargas son más comunes en zonas prominentes como puntas o aristas. Las descargas corona se caracterizan por pulsos de corriente de baja magnitud (10-20 μA), con una cadencia de repetición proporcional al campo eléctrico. En las descargas corona los iones predominantes son los de la polaridad de la descarga y, se considera que para que comiencen las primeras descargas electrónicas se requiere de un campo eléctrico suficiente como para que la ionización por colisión genere una avalancha de electrones con suficiente energía [4]. El valor de este campo eléctrico está en el orden de 3MV/m.

Para que la descarga corona avance y se genere la transición a un *streamer*, se precisa que el campo eléctrico aplicado supere el campo eléctrico existente en el interior del canal (*stability field*), cuyo valor está en torno a 500kV/m [4]. Las descargas de tipo *streamer* tienen su origen en descargas corona de elevada longitud; en este caso las cargas generan una distorsión del campo eléctrico que provoca la adición de nuevas avalanchas que se unen a la cabeza del *streamer* aumentando su longitud, como se puede ver en la figura 2.3.

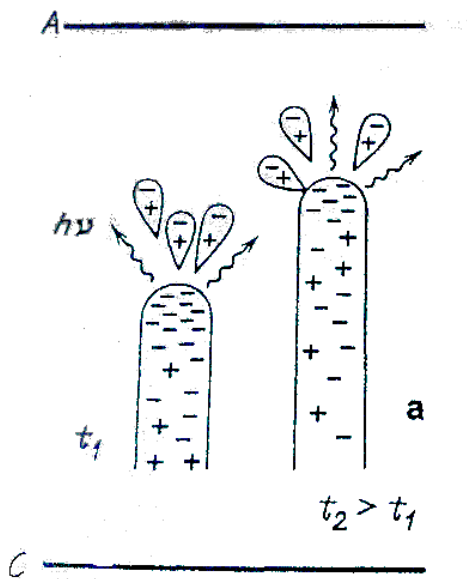


Figura 2.2. Evolución de un streamer [3].

Si el *streamer* sigue avanzando, se convertirá en una descarga tipo *leader*. La mayor diferencia entre un *streamer* y un *leader*, son las condiciones termodinámicas e hidrodinámicas. La transición de *streamer* a *leader*, tiene su origen en la raíz del

streamer (stem), y debido a la convergencia de corriente ocasionada por los *streamers*, se produce un incremento de temperatura en el canal por efecto Joule desde 300°K hasta 1000-1200°K; este incremento de energía térmica genera varios cambios en el canal:

- Incremento de la temperatura de las moléculas de gas
- Expansión hidrodinámica
- Reducción de la densidad del gas
- Separación de iones negativos

Estos fenómenos provocan un súbito incremento en la conductividad del canal y en el campo eléctrico en su punta, lo cual posibilita la aparición de nuevos *streamers* que conducen el avance del *leader* [5][6][7]. El canal del *leader* transporta el potencial del electrodo de una forma mucho más eficiente de la que lo hacen los *streamers* y finalmente, cuando el *leader* alcanza el electrodo contrario, se genera el arco eléctrico. En ese momento, se produce la transferencia de carga entre electrodos en forma de pulso de corriente.

A grandes rasgos y de una manera muy simplificada se puede decir que un *streamer* se alimenta de avalanchas electrónicas y un *leader* se alimenta de *streamers*.

En la figura 2.3 se muestra la progresión de un arco eléctrico y las diferentes magnitudes implicadas, junto al campo eléctrico asociado a cada estado.

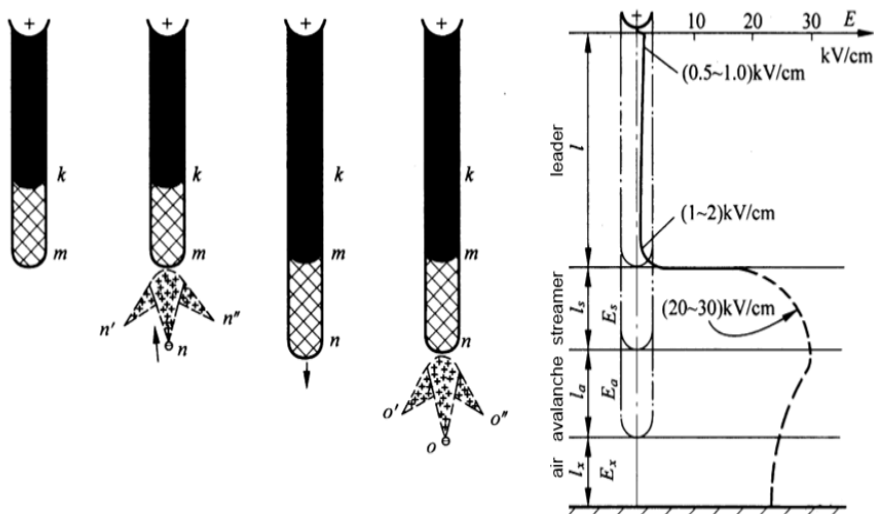


Figura 2.3. Progresión de un arco eléctrico y el campo eléctrico asociado a cada estado.

Como se puede ver en la figura 2.3, las avalanchas electrónicas generan una región de ionización por delante de la punta del *streamer* definiendo su trazado, hasta que estas avalanchas constituyen un nuevo *streamer* el cual alimenta la progresión del *leader*. Si en alguna de las fases, el campo eléctrico disminuye su valor por debajo de un valor umbral, no se generan las transiciones necesarias para el avance de la descarga y el proceso se extingue, mientras que si permanece por encima de dicho umbral, se generarán las transiciones necesarias para concluir en una descarga disruptiva [3].

Como se ha visto, una descarga eléctrica completa consta de varias fases, que pueden ser entendidas en función de su magnitud, pero desde el punto de vista de la evolución y propagación del arco eléctrico, resulta más interesante la asociación de la evolución del campo eléctrico (o del voltaje) con el estado de la descarga, y su evolución espacial. En la figura 2.4, podemos ver un ejemplo extraído de [8].

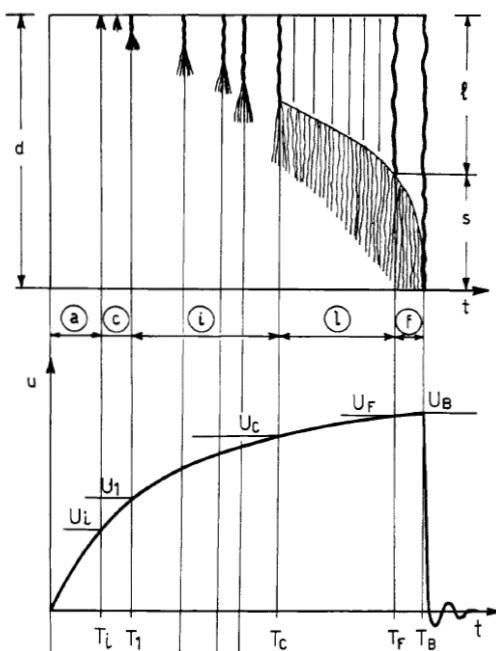


Figura 2.4. Evaluación de la descarga en base a su evolución espacio-temporal [8].

Los parámetros que hacen que una descarga se propague o se extinga, han sido fruto de multitud de estudios, en los cuales suele asociarse un determinado nivel de tensión a una probabilidad de que se produzca el *breakdown* [9]. Aunque puede tener más sentido físico evaluar las fases y transiciones en la formación de la descarga eléctrica empleando valores de campo eléctrico, es el nivel de tensión para

una configuración dada el que se ha impuesto en la bibliografía (*Corona Inception Voltage, Leader Inception Voltage,...*).

Todo el proceso implica una serie de transiciones, desde el origen de la avalancha electrónica hasta el arco eléctrico en las que la descarga alcanza diferentes estados de magnitud y parámetros característicos (temperatura, densidad, conductividad, etc...).

En la formación de descargas eléctricas de gran longitud, hay que tener en cuenta que existen diferentes magnitudes de descarga que dependen de la evolución de la descarga y de su propagación entre los dos electrodos. Existen, por ello varias transiciones de una magnitud a la otra.

En [10] se considera que la descarga eléctrica completa implica cuatro magnitudes fundamentales: la descarga corona, el *streamer*, el *leader*, y finalmente el arco eléctrico (Ver figura 2.5).

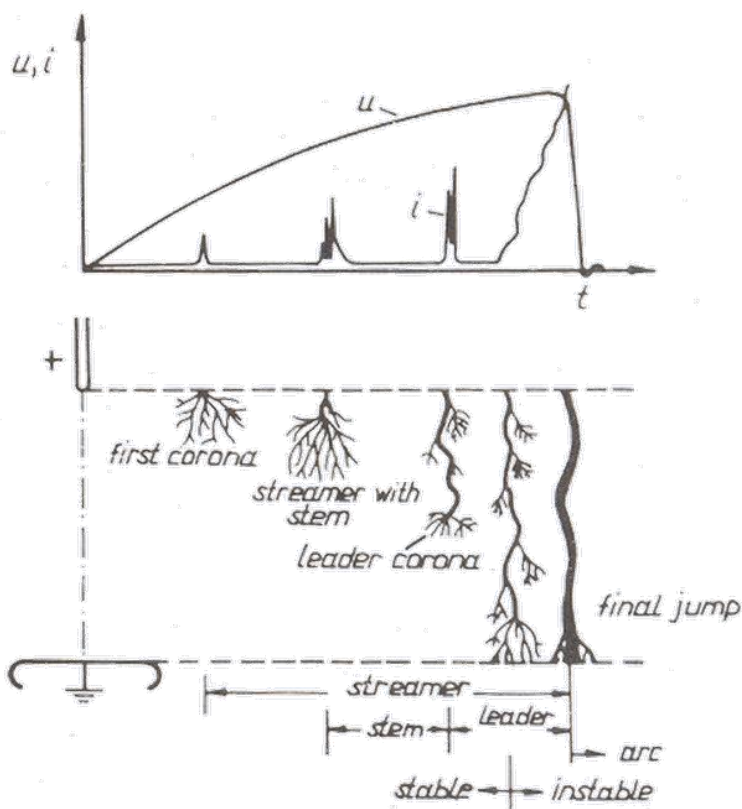


Figura 2.5. Evolución de una descarga eléctrica al aplicar un impulso de tensión [10].

Como ejemplo de descarga disruptiva, en la figura 2.6 se muestra la fotografía de un arco eléctrico de aproximadamente 1,5m producido en laboratorio de alta tensión con una configuración plato-punta y aplicando un pulso de tensión de tipo maniobra.



Figura 2.6. Arco eléctrico en laboratorio de alta tensión (ITE)

En los ensayos de laboratorio, se aplican impulsos de tensión de cierto nivel de amplitud y, en el caso de una configuración de campo eléctrico divergente, se suele asumir que la probabilidad de obtener una descarga disruptiva depende únicamente del nivel de tensión aplicado, teniendo así una función $p(U)$ llamada función de probabilidad de descarga disruptiva. Presenta un especial interés el nivel de tensión asociado a una probabilidad de descarga disruptiva del 50%; este parámetro es conocido como U_{50} y es un valor de referencia en muchos ensayos, tanto normativos como de investigación.

El parámetro U_{50} depende de la configuración geométrica del ensayo, aunque existen otras variables de influencia, como las condiciones ambientales, composición del aire,... Existen precedentes en los que se analizan diversos factores que influyen en el valor del parámetro U_{50} , no obstante, bajo las mismas condiciones geométricas,

eléctricas y ambientales, el resultado de aplicar un único impulso de tensión se considera impredecible.

Desde el punto de vista de la física del rayo, el parámetro U_{50} resulta de especial interés ya que los fenómenos que determinan el resultado de un impulso individual tienen la misma probabilidad de producirse que de no producirse, lo cual permite el estudio de la transición *streamer-leader* desde un punto de vista probabilístico.

En esta línea el autor aporta el **Artículo 1**, donde se presenta una nueva herramienta de análisis basada en un tratamiento heurístico de las señales eléctricas y luminosas adquiridas en un conjunto de impulsos de tensión con una configuración de campo eléctrico divergente, con diferentes radios de curvatura, y con una amplitud igual a U_{50} .

Por otro lado, los ensayos realizados en laboratorios de alta tensión, no permiten la completa reproducción de las condiciones de los rayos naturales ni tampoco todo su rango de magnitudes, formas de onda, campo eléctrico,..., por lo que los resultados obtenidos en este tipo de instalaciones tampoco pueden ser la base sobre la que se fundamente un modelo de protección.

Es por ello, por lo que resulta imprescindible la caracterización de las magnitudes asociadas al fenómeno del rayo en la naturaleza, sin esta caracterización sería imposible la realización de cualquier tipo de protección contra el rayo fundamentada. Los datos medidos en la naturaleza son empleados para obtener estadísticas con las que determinar las probabilidades de ocurrencia de rayos con parámetros superiores o inferiores a un determinado valor.

En el siguiente apartado se va a presentar el fenómeno del rayo en la naturaleza, contemplando diversos puntos de interés, la formación de las nubes de tormenta y acumulación de carga eléctrica por diferentes mecanismos, los tipos de rayos, la progresión del rayo en su avance y finalmente los parámetros físicos asociados a la caída de un rayo.

2.2 El fenómeno del rayo en la naturaleza

Para que se produzca un rayo, es necesario que haya nubes para lo cual, es necesaria la existencia de una o varias tormentas. Las tormentas pueden tener diferentes orígenes, pero en cualquiera de los casos, es necesario que exista una inestabilidad atmosférica que genere un gradiente de temperaturas, que permita que una masa de aire húmedo ascienda. En función de su origen, las tormentas se clasifican principalmente como termales, si su origen procede de una masa de aire húmedo

que se encuentra con una zona montañosa que le hace ascender o frontales, si su origen está en la interacción de dos o más frentes.

Las nubes de tormenta suelen ser de tipo *cumulo-nimbus*, procedentes de cúmulos que han crecido y convergido, y su formación está caracterizada por tres etapas principales:

- **Formación:** Varios núcleos de tipo cúmulo convergen en una sola nube. Para que la nube madure, la temperatura interior de la celda debe ser mayor a la temperatura ambiente, de lo contrario la celda se extinguiría. Cuando se alcanzan capas frías, el vapor de agua se condensa formando gotas de agua y partículas de hielo y, al producirse la precipitación, se alcanza la etapa de madurez.
- **Madurez:** Al producirse la precipitación de algunas partículas que ya han adquirido cierto tamaño, se produce una fricción que favorece la aparición de corrientes de aire descendentes, cuya temperatura es menor que la ambiental, lo cual provoca un enfriamiento de la nube. Si las corrientes ascendentes que calientan la nube llegan a desaparecer, dando comienzo a la fase de disipación.
- **Disipación:** Cuando la precipitación cesa también cesa el flujo de corrientes descendentes de aire frío, lo cual hace que la nube adquiera nuevamente la temperatura ambiente.

Como se ha comentado previamente, el rayo es un fenómeno eléctrico, por lo que durante los procesos de formación de la nube de tormenta, tienen que darse ciertos mecanismos por los que la nube adquiera carga eléctrica. Estos mecanismos se conocen como mecanismos de electrificación y actualmente son tres los mecanismos más aceptados [16]:

- **Mecanismo convectivo:** Se basa en el hecho de que durante la formación de la nube existen corrientes ascendentes que transportan iones positivos existentes en la base de la nube, siendo estos atrapados por las partículas de agua. Seguidamente, las partículas negativas circundantes son atraídas hacia el exterior de la nube, siendo atrapadas por las propias partículas superficiales. Las partículas cargadas negativamente son transportadas por corrientes descendentes hacia las zonas más bajas.
- **Mecanismo inductivo:** Este mecanismo de electrificación se basa en que un campo eléctrico externo puede inducir cargas en las partículas de la nube que, al colisionar entre ellas, generan una transferencia de carga.
- **Mecanismos no inductivos:** Este tipo de mecanismos no consideran ningún campo eléctrico exterior, se basan en la carga transferida por la adhesión de partículas de agua a la superficie de pequeños cristales de hielo.

Cuando la nube ha adquirido carga eléctrica, se genera un campo eléctrico que, al superar un umbral puede dar lugar a descargas eléctricas de diversas magnitudes, siendo el rayo la de mayor magnitud (de las que aquí nos conciernen). Aunque existen muchos más rayos entre nubes (rayos C-C) y, dentro de la misma nube entre diferentes zonas de carga (I-C), los que mayor interés presentan, desde el punto de vista de la protección contra el rayo son los rayos de nube a tierra (C-G), ya que son los que más daños y pérdidas ocasionan.

Existen 4 tipos de rayos nube-tierra, según la clasificación establecida por Berger [11][12], tal como se muestra en la figura 2.7, aunque los más habituales (sobre el 90% de los casos) son los rayos descendentes negativos (caso 1).

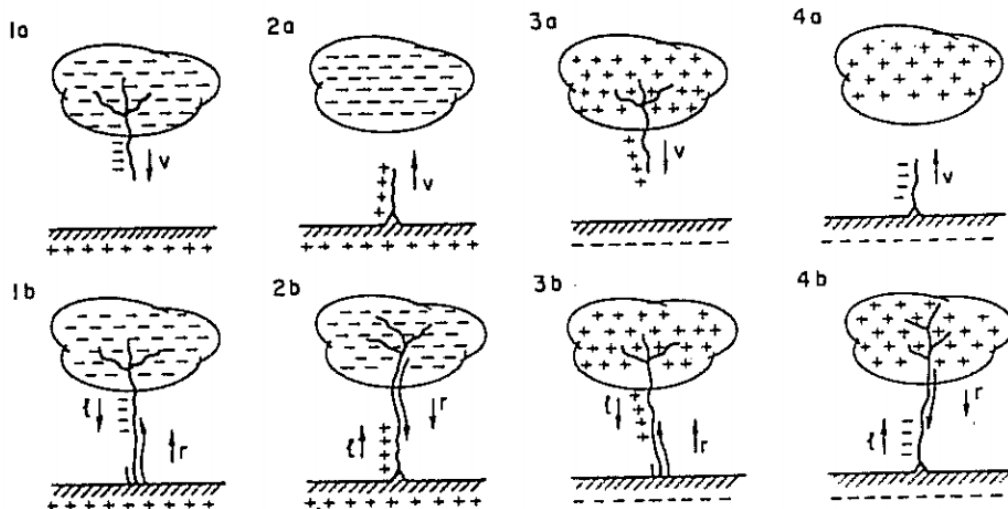


Figura 2.7. Clasificación de los rayos nube-tierra, según Berger [11][12].

Los rayos que se generan entre nube y tierra comienzan cuando, en el proceso de formación de las nubes de tormenta, se produce una agrupación de cargas mediante alguno de los mecanismos de electrificación ya comentados. En la mayoría de los casos, la parte baja de las nubes queda cargada negativamente induciendo una carga positiva en la tierra y los elementos situados sobre ella, alcanzándose niveles de campo eléctrico a nivel de suelo de decenas de kilovoltios.

Debido a la geometría y altura de los objetos puestos a tierra, en estos se produce una intensificación local del campo eléctrico que multiplica al campo eléctrico ambiental y, cuando este campo eléctrico local supera cierto umbral (normalmente entre 2.5 y 3MV/m [13]), se empiezan a producir las primeras descargas corona, que consisten en pequeñas ráfagas de corriente que surgen de los elementos puestos a

tierra y que se extinguen mientras el campo eléctrico ambiental no tenga una magnitud suficiente como para sostener la propagación de las descargas corona.

Cuando el *leader* descendente sale de la nube portando parte de la carga de esta, va avanzando con una serie de pasos discretos, propagándose a una velocidad media de aproximadamente $2 \cdot 10^5$ m/s y con una corriente de entre 100 y 1000 A. En ese momento el campo eléctrico ambiental sufre un súbito incremento en su valor y, a nivel de suelo, el valor de campo eléctrico es suficiente como para que surjan descargas corona desde varios puntos, alguno de los cuales se convertirá en el punto de impacto.

Cuando el rayo está lo suficientemente cerca del suelo y se cumple la condición de campo eléctrico ambiental suficiente para la auto-propagación, uno o varios de los puntos, lanzarán una descarga corona que se convertirá en un *leader* ascendente y empezará a avanzar hacia el *leader* descendente. El primero de los *leaders* ascendentes que alcance al descendente, será el que cree el camino de descarga entre nube y tierra. En la figura 2.8 se muestra el proceso.

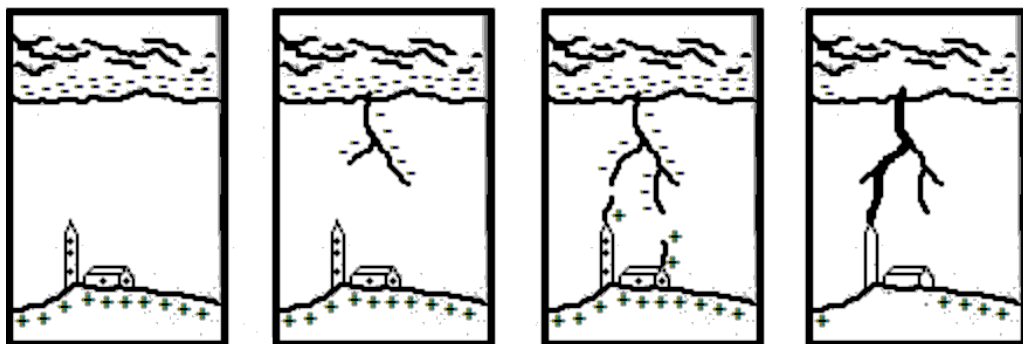


Figura 2.8. Proceso de formación de un rayo entre nube y tierra.

Una vez los trazadores conectan, comienza la transferencia de carga por medio de una onda ionizante que se propaga hacia la nube a lo largo del canal previamente ionizado. Este proceso se conoce como primera descarga de retorno o *return stroke*. La velocidad de la corriente de retorno del rayo, típicamente toma valores de $\frac{1}{3}$ a $\frac{1}{2}$ de la velocidad de la luz, y decrece con la altura. El tiempo total transcurrido en la propagación de tierra a la nube es del orden de $70 \mu\text{s}$, y la primera descarga de retorno produce un pico de corriente que tiene un valor promedio del orden de 30kA, aunque su valor puede ir desde 2kA hasta más de 300kA.

Cuando la descarga de retorno cesa, si la nube dispone todavía de carga adicional, pueden aparecer nuevos arcos de retorno, llamados arcos subsiguientes, u otros componentes en forma de pulsos de corriente o componentes de continua. Estos

pulsos de corriente pueden propagarse por el canal creado por el primer arco de retorno (en este caso, no aparecen ramificaciones en el camino de la corriente), aunque también puede darse el caso en el que produzca la creación de segundos canales, cuyo proceso de formación es como el primero de los arcos de retorno. En la figura 2.9 se ilustra el proceso.

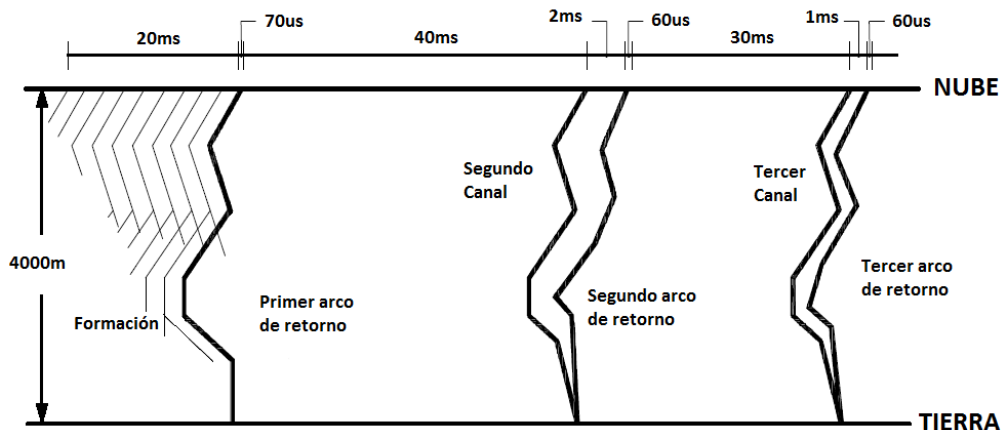


Figura 2.9. Evolución temporal de un rayo [14].

El pulso de corriente ocasionado por la transferencia de carga, tiene una forma de onda caracterizada por un tiempo de subida corto (unos $5\mu\text{s}$) seguido de uno de bajada más largo (típicamente $75\mu\text{s}$ para impactos negativos). Y aunque como se ha comentado, otros componentes de corriente pueden presentarse bajo ciertas condiciones, el pulso de mayor magnitud es el del primer arco de retorno. En la figura 2.10 se puede ver un ejemplo de forma de onda de corriente del primer arco de retorno.

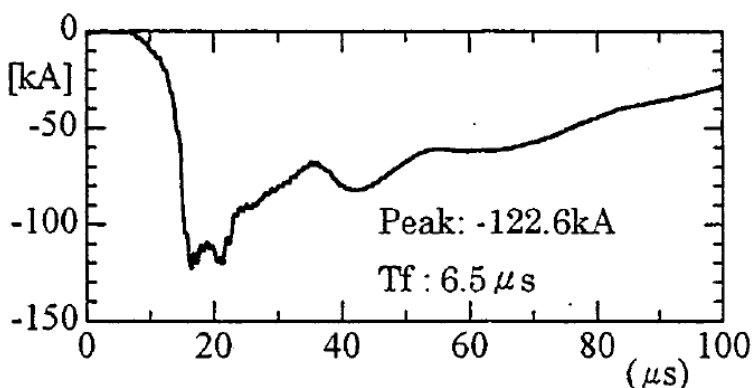


Figura 2.10. Forma de onda de corriente del primer arco de retorno de un rayo [15].

Cuando se crea el canal conductor y se realiza una transferencia de carga, la corriente se dispersa por la tierra tanto en profundidad, como superficialmente de forma radial, como se puede ver en la figura 2.11.

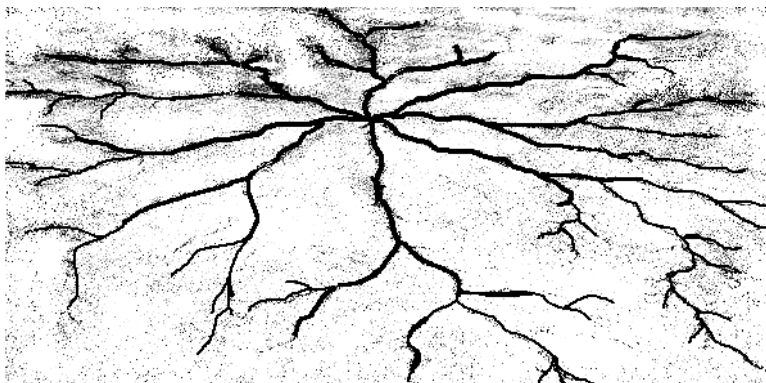


Figura 2.11. Trazas del paso de corriente ocasionadas por un rayo (fuente: exdya.com consultado en 10/10/2015).

La disipación de la corriente por el suelo depende de las características del mismo, sobre todo de la resistividad, que depende de la composición, estratificación, humedad, etc..., pero en cualquiera de los casos, se generan diferencias de potencial en el suelo que pueden producir grandes daños, tanto en personas y animales, como en objetos y estructuras, además del posible riesgo de incendio si hay materiales combustibles en las cercanías.

La caída de un rayo tiene derivados una serie de efectos que pueden presentar peligro de pérdidas personales o materiales, entre las principales causas se encuentran las sobretensiones transitorias, que pueden ser conducidas o inducidas, los efectos térmicos, los efectos mecánicos y los electromagnéticos.

La medida de parámetros del rayo en la naturaleza es fundamental desde el punto de vista de la ingeniería, ya que permite diseñar y dimensionar muchos aspectos concernientes a los elementos empleados en la protección contra el rayo, además de ser un punto de gran interés científico aún hoy en día, debido a que siguen existiendo muchas incógnitas en torno a la física del rayo.

Los parámetros que pueden ser medidos en la naturaleza asociados al rayo son muy variados. A continuación, se exponen algunos de los más habituales, así como su relevancia en la caracterización del fenómeno del rayo. Esta caracterización es el punto de partida en el que se fundamenta la estrategia de adquisición empleada en el diseño de los equipos de medida descritos en el **Artículo 2**.

- **Campo Eléctrico:** La medida de campo eléctrico resulta de especial interés durante un periodo de actividad tormentosa, puesto que nos puede dar información de la estructura de la nube, la dinámica de la tormenta y de la cantidad de carga transferida o neutralizada [16]. En la figura 2.12 se puede ver la medida del campo eléctrico durante una tormenta.

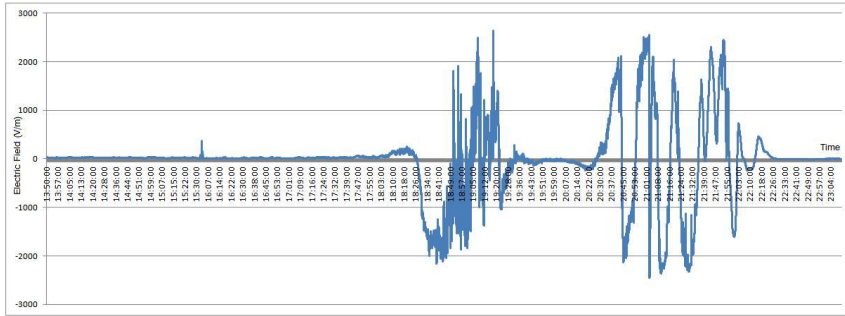


Figura 2.12. Campo eléctrico registrado en una tormenta en Valencia el 17/09/2009 (fuente Aplicaciones Tecnológicas S.A.).

- **El campo electromagnético:** La caída de un rayo genera una variación brusca de tensión y corriente que llevan asociado un pulso electromagnético de corta duración en banda ancha con componentes frecuenciales típicos entre 0.1Hz y 100MHz. La energía radiada se propaga en el aire a la velocidad de la luz, induciendo niveles de tensión en los conductores eléctricos, lo que puede ocasionar la destrucción de los circuitos y componentes electrónicos cercanos.

Estos pulsos pueden ser medidos por una antena y los parámetros de la señal pueden ser empleados para detectar o medir la magnitud y polaridad del evento en cuestión. Un ejemplo de la señal medida con un sistema de antena lo podemos encontrar en [17][19] (figura 2.13).

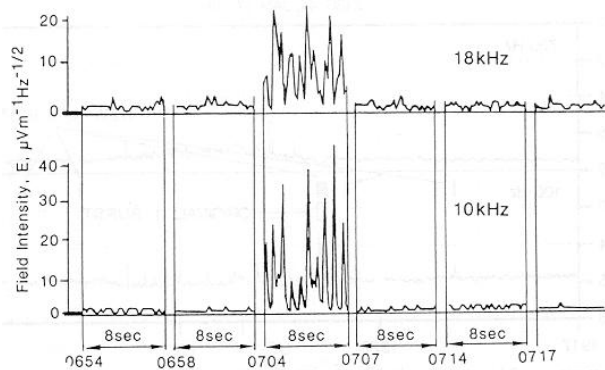


Figura 2.13. Señal obtenida por una antena en el instante de la caída de un rayo medida en dos frecuencias 10kHz y 18kHz [17].

- La corriente:** Es uno de los principales parámetros físicos que caracteriza a un rayo puesto que determina la magnitud y la polaridad del mismo. De este parámetro hacen uso algunos modelos de protección, ya que se considera que la longitud del *final jump* (que determina el área protegida por un terminal) viene determinada por esta magnitud, como se mostrará en los siguientes apartados. Ejemplos de medida de corriente de rayo los podemos encontrar en puntos de impacto de rayos monitorizados, tal como se muestra en [11][12][18] y en la figura 2.14, donde se pueden ver ejemplos de formas de onda de corriente en impactos de polaridad positiva y negativa.

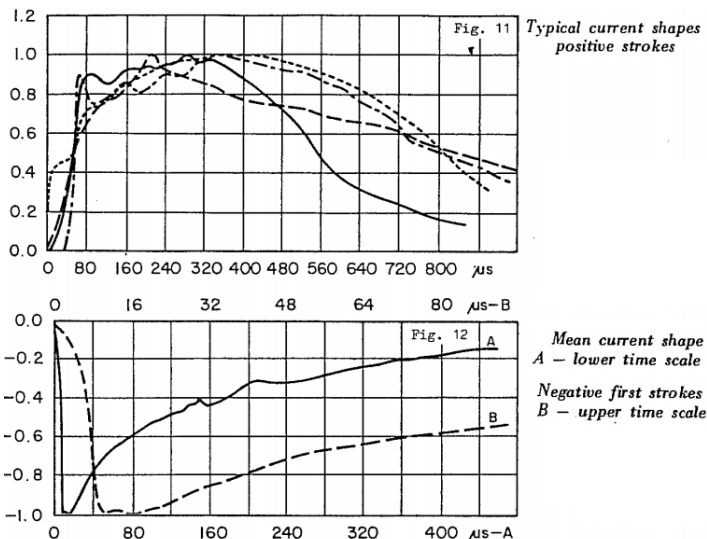


Figura 2.14. Formas de onda de corriente medidas por K.Berger [11].

De estas medidas se pueden obtener muchos parámetros útiles en la protección contra el rayo, como los tiempos de subida y de cola, además, de la carga transferida, determinada por la ecuación 2.3 o la energía específica determinada por la ecuación 2.4.

$$Q = \int_0^T I dt \quad (2.3)$$

$$W = \int_0^T I^2 dt \quad (2.4)$$

- **Intensidad Luminosa:** La intensidad luminosa que genera el paso de la corriente por el canal ionizado tal vez sea el efecto más espectacular del rayo. Este destello óptico, debido a su luminosidad y tortuosidad puede iluminar el cielo dibujando las más peculiares formas y ramificaciones. La emisión de luz, asociada al paso de corriente por un canal ionizado permite la captura de imágenes que pueden ser útiles en la naturaleza ya que, en el momento de la caída del rayo, se pueden determinar los posibles competidores, poniendo de manifiesto puntos preferentes de impacto, tal como se puede ver en la figura 2.15 y 2.16.



Figura 2.15. Identificación de un streamer ascendente en el momento de la caída de un rayo. (fuente nationalgeographic.com.es, consultado en 09/02/2015)

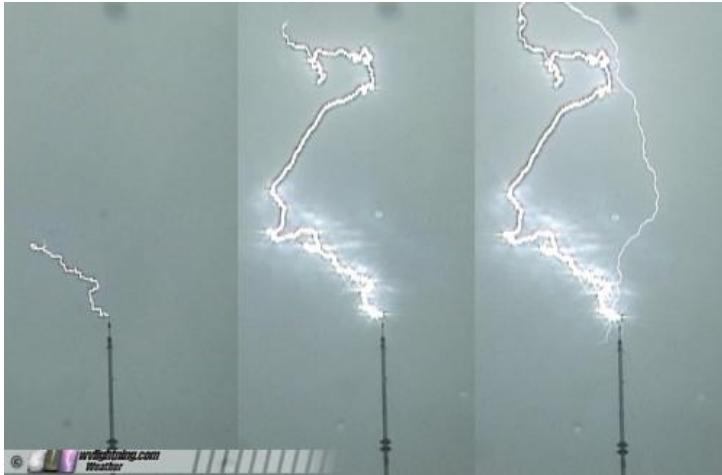


Figura 2.16. *Leader ascendente e intercepción en el momento de la caída de un rayo.*
(fuente Stormhighway.com, consultado en 12/02/2015)

Además, la reciente aplicación de las cámaras de alta velocidad (con velocidades de hasta 1 millón de FPS) a la captura de imágenes de rayos en condiciones naturales está mostrando nuevos aspectos sobre el trazado del rayo hasta ahora desconocidos. En particular, estas cámaras han permitido observar el camino que sigue el rayo antes de la conexión con la tierra o con los elementos puestos a tierra, tal como se puede ver en la figura 2.17.



Figura 2.17. *Dos ejemplos de la trayectoria de rayos nube-tierra (10.000 FPS) [20].*

Estas imágenes hacen necesaria la revisión de la mayoría de modelos de propagación e intercepción que consideran la influencia de un único canal, de propagación vertical y rectilínea [21][22][23][24][25]. Tal como se puede ver en la figura 2.18, en la bibliografía específica hay varios ejemplos de este tipo de modelos de intercepción, algunos de los cuales se mencionan en [26].

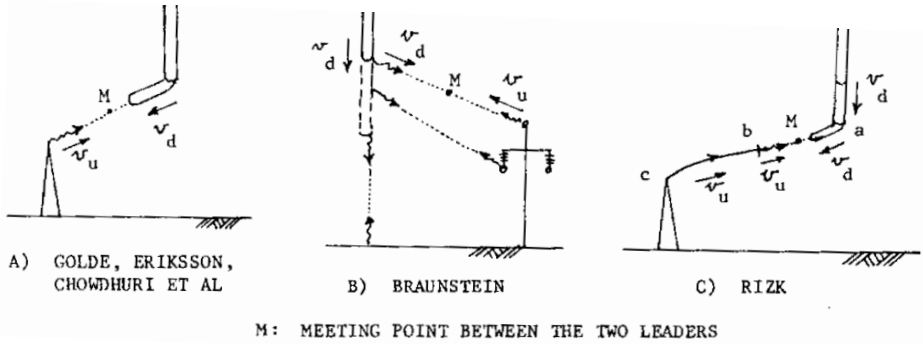


Figura 2.18. Diferentes modelos de propagación basados en un solo leader [26].

Parece necesario considerar la posibilidad de que dentro del mismo escenario, incluso en los últimos metros cercanos al suelo, podría existir más de un canal del rayo debido a una ramificación, lo cual tendría un efecto de repulsión sobre el otro canal que se sumaría al efecto de atracción del *leader* ascendente. Por comparación, en la figura 2.17 se pueden ver claramente un gran número de ramificaciones avanzando en todas las direcciones.

Existen ciertos modelos de propagación, algunos de ellos basados teorías de fractales que, a pesar de carecer de una base física sólida aplicable al caso del rayo, ofrecen patrones de propagación aparentemente más parecidos, tanto a los arcos eléctricos de baja magnitud [28], como a los rayos naturales [29]. En estos trabajos asocian el índice de fractalidad con la probabilidad de ramificación [28] con la finalidad obtener diferentes patrones de propagación en los casos de arcos eléctricos de baja magnitud y de rayos, como se puede ver en la figura 2.19 y 2.20 respectivamente.

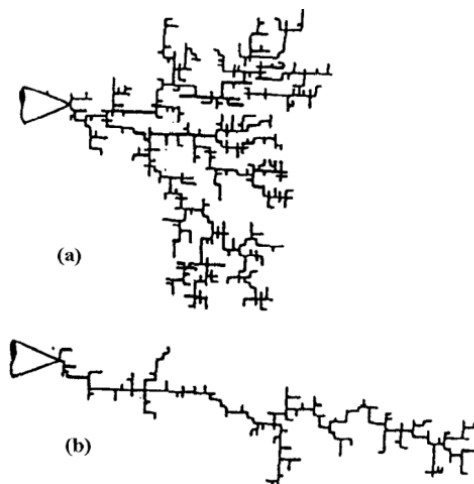


Figura 2.19. Arco eléctrico en base a la probabilidad de ramificación [27]

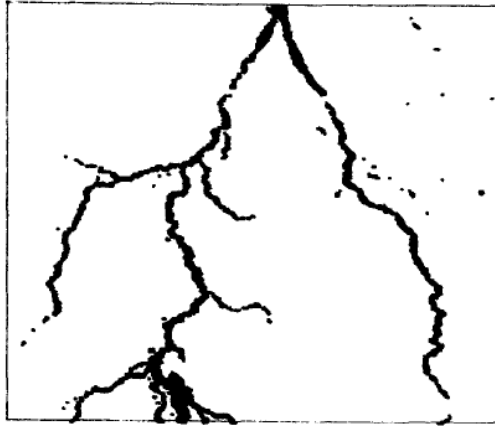


Figura 2.20. Imagen de rayo nube-tierra para el análisis de su fractalidad en [29].

- **Ondas de presión:** Es la magnitud asociada al rayo más perceptible por el ser humano, ya que las ondas de presión son las que propagan el sonido del trueno y, en la mayoría de los casos, es este sonido el que avisa de la presencia de rayos en la cercanía. La onda de presión u onda acústica producida por el rayo, se debe al calentamiento del aire en un periodo de tiempo muy corto, lo cual provoca una onda de presión que se expande a velocidad ultrasónica. Esta onda es la que provoca el estruendo asociado al trueno. Algunos sistemas de detección se basan en la adquisición y posterior filtrado de las señales acústicas del entorno para identificar las pertenecientes a rayos. Otro tipo de sistemas se basan en la detección de ondas infra sónicas (por debajo de 20Hz) para implementar sistemas de detección de algunos tipos concretos de rayos o incluso para diferenciar el tipo de rayo que ha producido la onda acústica.
- **Rayos X:** Algunos estudios muestran que momentos previos a la generación del *leader*, se produce un pulso de rayos X cuya energía depende de la intensidad del rayo y de la derivada con el tiempo del campo eléctrico. Este fenómeno se puso de manifiesto por primera vez en un radar de observación de descargas electrostáticas de elevada altura y, posteriores estudios han asociado las variaciones de corriente abruptas, a la emisión de ráfagas de rayos X de baja energía y de amplitud proporcional a di/dt . En [30] se detectan emisiones de rayos X de baja energía (entre 10 y 20 KeV) asociados a descargas disruptivas de unos 50ns de duración. En la figura 2.21 puede verse un ejemplo de la medida realizada.

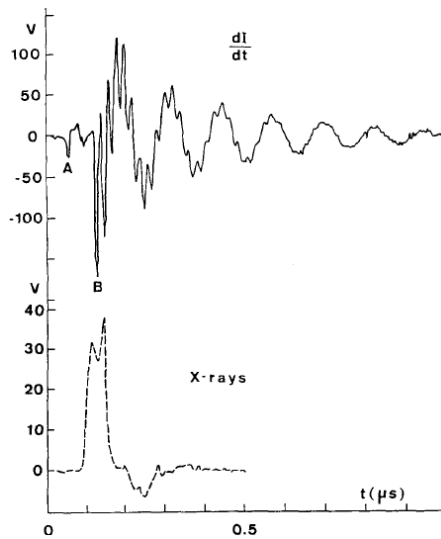


Figura 2.21. Detección de rayos X asociados a una descarga eléctrica [30].

En base a esto, se podría realizar la medición de rayos X con la finalidad de detectar rayos. No obstante, además de requerir de un sistema de detección relativamente complejo, existe el problema de la atenuación de los rayos X con el cuadrado de la distancia y al atravesar materiales. Por ello, para la medida práctica de parámetros del rayo resulta poco viable, limitando su interés al laboratorio o emplazamientos controlados.

Como se puede ver, hay una gran cantidad de parámetros de los que se puede extraer información asociada a la física del rayo pero, tanto para la comprensión del fenómeno, como para su caracterización, es necesario la generación de estadísticas fiables, para lo que se requiere una cantidad de datos adecuada.

Como trabajo más representativo de medidas de los parámetros del rayo en la naturaleza, se suele aludir al trabajo desarrollado a principios de los años 70 por K. Berger basado en una colección de medidas efectuadas entre 1963 y 1971 en el monte San Salvatore en Suiza y cuyos datos estadísticos, hoy en día se emplean como referencia en normativas internacionales para el diseño y posicionamiento de sistemas de protección contra el rayo [11].

En este trabajo, se agrupan las amplitudes de los primeros arcos de retorno con polaridad negativa, los arcos subsiguientes y los rayos de polaridad positiva obteniendo las probabilidades de ocurrencia para cada caso. De la misma manera, en la figuras 2.22a y 2.22b se pueden ver las gráficas correspondientes a los parámetros de carga transferida y energía específica.

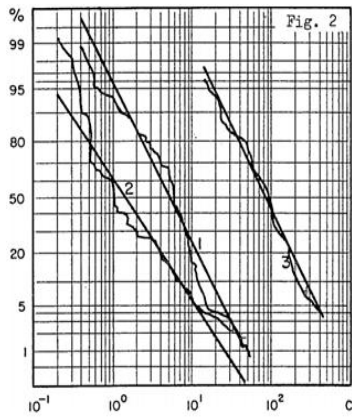


Fig. 2
Stroke charge - Q (stroke)
(1) Negative first strokes
(2) Negative following strokes
(3) Positive strokes

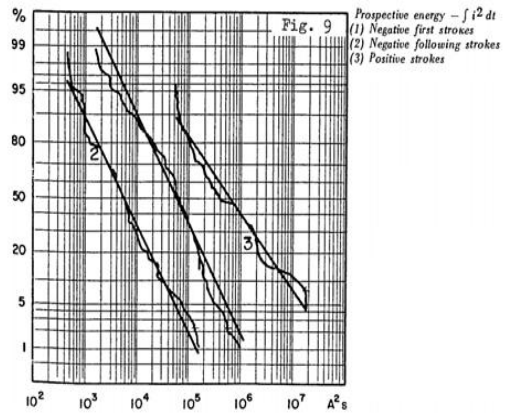


Fig. 9
Prospective energy - $f^2 dt$
(1) Negative first strokes
(2) Negative following strokes
(3) Positive strokes

a)

b)

Figura 2.22. a). Carga transferida en C. b). Energía específica del rayo en A^2s [11][12].

Partiendo de estos datos, se obtuvieron una serie de estadísticas que fueron completadas posteriormente por Anderson y Erikson en [12]. En estos trabajos, se pueden encontrar multitud de medidas, de forma que se pueden caracterizar estadísticamente las propiedades del rayo, estableciendo una serie de parámetros porcentuales de probabilidad de sobrepasar cierto valor para diferentes parámetros de la descarga, como amplitudes, tiempo de subida y bajada, duración de la onda, etc...

En la figura 2.23 se puede ver la tabla presentada en [12] donde se agrupan los valores asociados a las probabilidades de 5%, 50% y 95% para diferentes parámetros

Paramètre Parameter	N	Unités Units	Approximation par une distribution log-normale Approximation by log-normal distribution			Pourcentage de cas où la valeur du tableau est dépassée Percent of cases exceeding tabulated value		
			μ	σ log	Test positif Positive test	95 %	50 %	5 %
Décharges principales First stroke								
T-10	80	μ s	4,5	0,25	non	1,8	4,5	11,3
T-30	80	μ s	2,3	0,24	no	0,9	2,3	5,8
TAN-10	75	kA/ μ s	2,6	0,40	yes	0,6	2,6	11,8
S-10	75	kA/ μ s	5,0	0,28	non	1,7	5,0	14,1
S-30	73	kA/ μ s	7,2	0,27	oui	2,6	7,2	20,0
TAN-G	75	kA/ μ s	24,3	0,26	yes	9,1	24,3	65,0
PEAK-1	75	kA	27,7	0,20	oui	12,9	27,7	59,5
PEAK	80	kA	31,1	0,21	yes	14,1	31,1	68,5
RATIO (P-1)/P	—	—	0,9	0,10	non	—	—	—
Décharges secondaires Subsequent strokes								
T-10	114	μ s	0,6	0,40	non	0,1	0,6	2,8
T-30	114	μ s	0,4	0,44	no	0,1	0,4	1,8
TAN-10	108	kA/ μ s	18,9	0,61	non	1,9	18,9	187,4
S-10	114	kA/ μ s	15,4	0,41	oui	3,3	15,4	72,0
S-30	114	kA/ μ s	20,1	0,42	yes	4,1	20,1	98,5
TAN G	113	kA/ μ s	39,9	0,37	oui	9,9	39,9	161,5
PEAK-1	114	kA	11,8	0,23	yes	4,9	11,8	28,6
PEAK	114	kA	12,3	0,23	oui	5,2	12,3	29,2
RATIO (P-1)/P	—	—	0,9	0,09	yes	—	—	—

Figura 2.23. Tabla estadística de parámetros del impacto principal y subsiguientes [12].

En el mismo trabajo, se ofrece una revisión de los datos estadísticos medidos en otros emplazamientos referentes a los tiempos de duración de la descarga y de las amplitudes de la corriente. La disparidad existente entre los experimentos realizados por los diversos autores pone de manifiesto que el emplazamiento tiene una influencia fundamental en las características de los rayos, por lo que no se deberían de obviar durante el diseño de una instalación.

Para la obtención de estadísticas fiables, es necesario un número de datos significativo. Sin embargo, los estudios de campo de instalaciones de protección contra el rayo, presentan una serie de inconvenientes derivados del hecho de que el número de rayos que impactan en un único punto, no es suficiente como para obtener estadísticas fiables en un tiempo asumible. Es por ello, por lo que normalmente, los puntos donde se pretende medir parámetros del rayo, son estructuras elevadas que reciben un número de impactos por año relativamente

elevado. Aun así, se suele precisar un periodo de tiempo largo para la obtención de datos y, existe el inconveniente de que los parámetros estadísticos obtenidos están sesgados por las particularidades del emplazamiento.

También se puede recurrir al cebado artificial de rayos mediante el lanzamiento de cohetes con un terminal conductor conectado a tierra o *triggered lightning*. Esta técnica aumenta la cantidad de datos recolectados, pero las estadísticas obtenidas difieren de las obtenidas con rayos naturales y además, se sigue manteniendo el problema de la influencia en los resultados de las particularidades del entorno, a lo que se le añade el elevado coste de este tipo de instalaciones. También hay que considerar el hecho de que los rayos cebados artificialmente presentan unas características diferentes a las de los rayos naturales [31].

Otro planteamiento es el empleado en las redes de detección de rayos, las cuales monitorizan una gran área mediante antenas omnidireccionales con las que determinan la dirección y la magnitud del rayo pero, además de plantear dudas sobre la extrapolación del modelo aplicado, que suele ser el modelo de líneas de transmisión, no se ofrece información sobre la forma de onda de la corriente, lo cual limita la información de interés, como la carga transferida o la energía. Tampoco se ofrece información sobre el punto exacto del impacto, debido a su limitada resolución espacial [32].

Es por ello, por lo que en el **Artículo 2**, se presenta la aportación del autor que consiste en el planteamiento de una nueva estrategia de recolección de datos basada en una red distribuida de estaciones de medida de parámetros del rayo, con multitud de instalaciones monitorizadas en diversos emplazamientos. Con este planteamiento, se podrían adquirir datos estadísticos de rayos en condiciones naturales y correlacionarlos con las particularidades de cada emplazamiento, lo cual permitiría la aplicación de un modelo de protección contra el rayo empleando datos más adecuados, en función del entorno a proteger.

Como se ha podido ver, las estrategias de adquisición, posibilitan la medida de parámetros del rayo en la naturaleza, que se emplean para obtener estadísticas, mediante las cuales, se pueden diseñar los sistemas de protección contra el rayo, de los que vamos a hablar en el siguiente apartado.

2.3 Sistemas de protección contra el rayo

Los sistemas de protección contra el rayo, en la actualidad constan de varios elementos, con los que se pretenden mitigar todos los efectos del rayo, o al menos minimizarlos hasta niveles aceptables. No obstante, hasta hace algunas décadas la protección contra el rayo consistía, en la gran mayoría de los casos, de uno o varios

terminales de intercepción convenientemente ubicados, que conducían la corriente del rayo hasta tierra, donde se disipaba mediante los electrodos de tierra.

En la actualidad, los sistemas de protección contra el rayo parten de un análisis del riesgo, cuyo cálculo se detalla en la normativa de referencia UNE-EN 62305 [33] mediante un procedimiento que implica un cálculo de una serie de parámetros de riesgo, que se comparan con lo que se concibe como riesgo tolerable, si el riesgo derivado del cálculo es mayor que el riesgo tolerable, la estructura requerirá de elementos de protección, en caso contrario, se considerará protegida. En la figura 2.24 se ilustra el algoritmo simplificado descrito en [34].

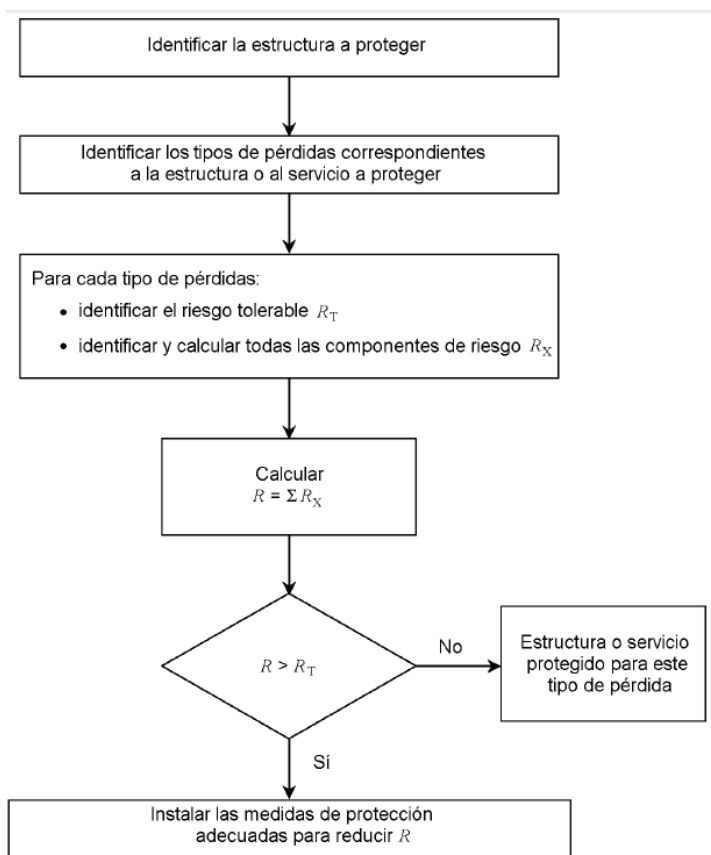


Figura 2.24. Algoritmo para la determinación del riesgo por impacto de rayo [34].

En caso de considerarse necesaria la protección contra el rayo, se realiza un estudio económico para evaluar si resulta rentable o no aplicar medidas de protección, y en caso de rentabilidad positiva, mediante otro procedimiento, se determinan los elementos o estrategias de protección a emplear.

Si la estructura requiere de un sistema de protección contra el rayo (SPCR) que incluya pararrayos (con sus correspondientes conductores y electrodos de tierra), se considera que, desde el punto de vista práctico, tanto la conducción de la corriente del rayo como su disipación en la tierra, son cuestiones relacionadas con el dimensionamiento de las secciones de los conductores y con la obtención de una impedancia de tierra dentro de unos valores considerados como adecuados. No obstante, el tema de la interceptación, es decir, dónde ubicar los terminales, cuántos ubicar y de qué altura,... son aspectos que se resuelven aplicando los modelos de protección, algunos de los cuales se basan en el concepto de “área protegida” por un pararrayos y en los valores de corriente mínima del rayo considerados, lo cual determina los niveles de protección (LPL).

El primer planteamiento de “área protegida” consideraba que el pararrayos generaba una zona de protección de forma cónica, en la actualidad el método del ángulo de protección (PAM) tiene un planteamiento similar. En la figura 2.25, se puede ver un ejemplo práctico de aplicación de un diseño de protección contra el rayo basado en el método del ángulo de protección.

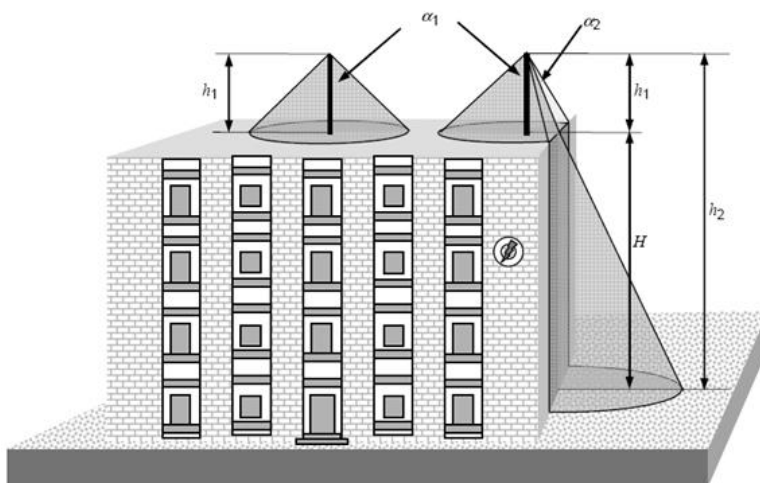


Figura 2.25. Aplicación práctica del método del ángulo de protección [33].

A día de hoy, el método del ángulo de protección deriva del método de la esfera rodante, ya que el ángulo de protección se define como el que proporciona la misma área que el modelo electro-geométrico para el mismo terminal y con el mismo nivel de protección.

Otro método empleado es el método de mallas (MM) que desarrolló, J.C. Maxwell en 1876 al sugerir que, aunque un pararrayos protegía una estructura, también atraía un

mayor número de rayos que si el pararrayos no estuviese instalado. Partiendo del concepto de jaula de Faraday, sugirió que un recubrimiento metálico en la estructura protegería, tanto la estructura, como sus interiores drenando la corriente hacia tierra de forma segura [13], ya que el campo eléctrico en su interior es totalmente independiente del campo eléctrico externo, sin atraer un mayor número de rayos.

Este planteamiento fue el que dio lugar al método de mallas, también conocido como método de la Jaula de Faraday y que, en su aplicación, consiste en implementar una malla con una separación entre conductores prefijada por el nivel de protección, tal como se muestra en la figura 2.26.

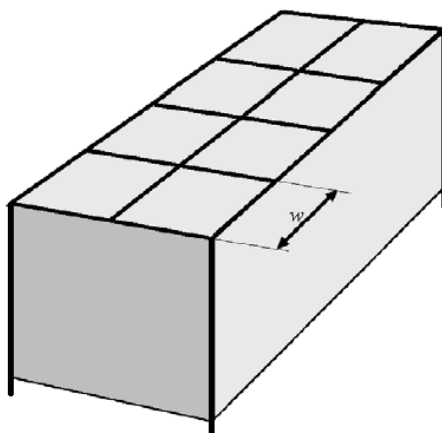


Figura 2.26. Aplicación práctica del método de mallas [34].

En los siguientes años, la investigación asociada a los modelos de protección se centró en la adecuación del ángulo del cono de protección por diferentes autores tras la observación de algunos incidentes en las líneas de distribución de energía eléctrica, aunque también hubieron algunas aportaciones en la fundamentación de la protección aplicada o al desarrollo de ensayos de laboratorio. Como ejemplo representativo, se mencionan las investigaciones de Larmor&Larmor [36] en 1914, que propusieron un análisis basado en las líneas de campo eléctrico y en las ecuaciones de la teoría electromagnética de Maxwell. En este trabajo, se tomaban en cuenta rayos oblicuos o inclinados y de hecho, es considerado como el primer documento en correlacionar el mecanismo de ionización de los gases con la propagación del rayo.

Más tarde, en la década de 1920, Peek evaluó el concepto de “zona de protección” mediante pruebas de laboratorio para determinar el ángulo del cono de protección, obteniendo resultados desde 64 hasta 76 grados.

En el periodo comprendido entre 1950 y 1970, se estableció un fuerte compromiso para proteger las líneas de transmisión de energía eléctrica contra el efecto de los impactos directos de rayos en Estados Unidos. Como consecuencia, se generó una extensa investigación, donde investigadores como Whitehead, Hileman y Wagner realizaron importantes contribuciones [37][38][39], que constituyeron, posteriormente, la base del actual método de la esfera rodante o *Rolling Sphere Method* (RSM).

El RSM, tal como se conoce actualmente, fue desarrollado por R.H.Lee en 1978 [40] basándose en los trabajos previos de Whitehead, Hileman y Wagner, que confirmaron que, para alcanzar un nivel de protección predeterminado, se requerían ángulos de protección más pequeños en hilos conductores ubicados a mayor altura. R.H. Lee, empleó una aproximación paso a paso para construir el perfil del “área de protección” y posteriormente aproximó el resultado obtenido a una esfera, de forma que al hacer rodar dicha esfera por el escenario a proteger, los puntos que fuesen tocados son los que podrían ser alcanzados por un rayo y por lo tanto, los que requieren protección (ver figura 2.27).

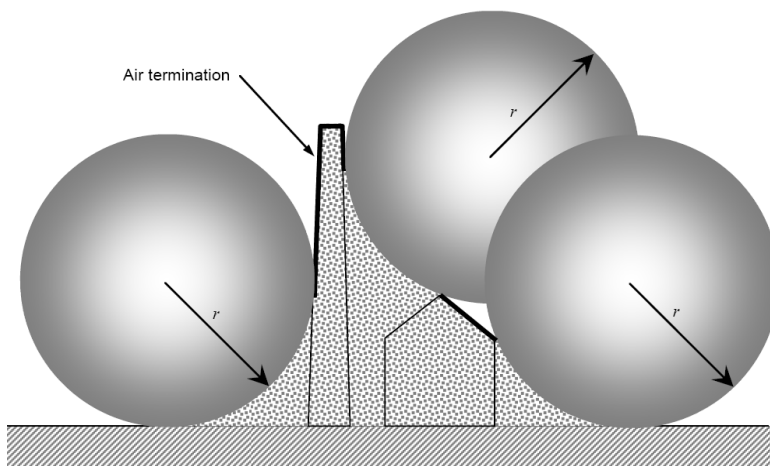


Figura 2.27. Aplicación del método de la esfera rodante [33].

Los 3 modelos de protección comentados anteriormente son los más empleados en la actualidad, ya que están reconocidos por las normativas y cuentan con un gran índice de efectividad comprobado en instalaciones reales, no obstante, la alta efectividad de estos métodos ha sido, la que por otro lado, ha frenado el avance de la implantación de modelos de protección más fundamentados físicamente.

Una carencia común a los métodos normalizados es que no consideran muchos de los procesos asociados a la física de las descargas. Por ejemplo, en la naturaleza se ha

identificado claramente que los puntos preferentes de impacto de rayo son aquellos que presentan cierta altura y prominencia, como esquinas y cornisas, no obstante los modelos de protección normalizados no tienen en cuenta el concepto de “punto preferente”, ya que asignan la misma probabilidad de impacto a cualquier punto identificado como “impactable”, bien sea una esquina o un suelo plano en una terraza.

Otra variable no contemplada por estos modelos es el material que constituye la estructura, ya que se consideran a todas las estructuras como conductores perfectos.

En esta línea, en el **Artículo 3** se presenta la aportación del autor, en la que se introduce un planteamiento complementario a los modelos de protección actuales. Esta aportación trata la evaluación electrostática de un escenario con una o más estructuras, para posteriormente determinar la probabilidad de impacto de un rayo en diferentes puntos del escenario. Este planteamiento permite realizar la protección contra el rayo acorde a los modelos normalizados, pero ofrece información adicional sobre los puntos que mayor y menor probabilidad de impacto tienen, lo cual puede ayudar a la optimización de la protección, emplazando los pararrayos en los lugares que mayor nivel de seguridad requieran.

2.4 Conclusiones parciales

En este primer capítulo introductorio se ha realizado una revisión general de algunos conceptos importantes propios de la protección contra el rayo, estos conceptos toman especial relevancia en la parte de intercepción del rayo.

En el primer apartado, se han presentado las descargas electrostáticas y se han visto las diferentes fases, magnitudes y transiciones implicadas en la formación de una descarga disruptiva. Se han repasado algunas de las características más importantes que caracterizan a cada fase, así como las condiciones necesarias para que se produzca una transición a un estado de magnitud superior. Con ello, se ha visto la evolución de la descarga eléctrica hasta alcanzar la magnitud de interés en esta Tesis, el rayo.

En el segundo apartado, se ha visto el rayo en la naturaleza, contemplando los procesos de formación de nubes de tormenta y mecanismos de electrificación. Se han presentado diferentes tipos de rayo y una clasificación para los rayos que mayor relevancia tienen desde el punto de vista de la protección contra el rayo: los rayos de nube a tierra. También se han enumerado varios parámetros que pueden ser medidos en los rayos en la naturaleza, así como algunas estrategias de medida empleadas actualmente.

Por último, se ha realizado una breve introducción a los modelos de protección, que constituyen la parte aplicada de la protección contra el rayo. Se ha visto el análisis de riesgo para determinar objetivamente la necesidad de protección y se han presentado los modelos de protección más utilizados actualmente. Dos de los tres modelos se basan en la intercepción del rayo mediante terminales, mientras que el otro se basa en la recolección de corriente del rayo que impacta sobre una estructura.

La protección contra el rayo es un campo de investigación muy abierto que implica la comprensión y evaluación de muchos procesos físicos en varios órdenes de magnitud, es por ello, por lo que resulta importante tener una visión global de conjunto y comprender tanto las transiciones que se producen en una descarga eléctrica, como las medidas y estadísticas de los parámetros de rayo, sin descuidar la aplicación práctica a través de los modelos de protección que nos permitirán diseñar un sistema de intercepción eficaz.

Referencias del capítulo 2

- [1] E. Kuffel et. Al., "High Voltage Engineering Fundamentals" 2nd Ed. 2000.
- [2] Roth, J. R., "Industrial Plasma Engineering," V.1: Principles, IOP Publishing Ltd, Bristol and Philadelphia (1995).
- [3] Gas Discharge Physics, Y. P. Raizer, Springer-Verlag/Berlin, 1991.
- [4] E M van Veldhuizen and W R Rutgers." Pulsed positive corona streamer propagation and branching". J. Phys. D: Appl. Phys. 35 (2002) 2169–2179.
- [5] I.Gallimberti et. al. "Fundamental processes in long air gap discharges". C. R. Physique 3 (2002) 1335–1359.
- [6] J. R. Roth, Industrial Plasma Engineering, Volume 2. Applications to Non-thermal Plasma Processing, (IOP Institute of Physics Publishing, Bristol) 2001.
- [7] J.J. Lowke, "On the Physics of lightning". IEEE Trans. Plasma Science, Vol.32, Nº.1, Feb 2004. Invited Paper.
- [8] G.Carrara, L.Thione. "Switching surge strength of large air gaps: a physical approach". IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. Pas-95, Nº 2, Mar-1976.
- [9] Comité Técnico AEN/CTN 207. "UNE EN 60060-1: Técnicas de ensayo de alta tensión. Parte 1: Definiciones Generales y requisitos de ensayo". Sept. 2012.
- [10] Lemke, Eberhardt "Breakdown mechanism and characteristics of non uniform field electrode configurations in air for switching surges" Dissertation, TU Dresden (1967) (in German).
- [11] K.Berger, R.B. Anderson and H. Kroninger, "Parameters of Lightning Flashes", Electra, No. 41, pp. 23-37, July 1975.
- [12] R.B. Anderson and A.J. Eriksson, "Lightning Parameters for Engineering Applications", Electra, No. 69, pp. 65-102, March 1980.
- [13] R. H. Golde, "The lightning conductor", J. Franklin Inst. Vol. 283, No. 6, 1967, pp. 451–477.
- [14] F. González Molina "Evaluación estadística de las líneas de distribución frente a sobretensiones de origen externo", Tesis Doctoral. Oct. 2001.
- [15] T. Narita, et. al "Observation of current wave shapes of lightning strokes on transmission towers". IEEE Trans. on power delivery, Vol. 15, Nº. 1, Jan. 2000.
- [16] J. Montaña "Estudio de la carga eléctrica asociada al rayo: caracterización de las tormentas en Cataluña", Tesis Doctoral. Abr. 2004.
- [17] W.Dong, Y.Zhang *et al.* "A new total lightning detection and location system and preliminary observation results: I. VLF/LF System 29 ICLP. 2008.
- [18] G. Diendorfer et. Al. "Lightning current measurement in Austria – Experimental setup and first results, 25th ICLP, Rhodos, Sept. 2000.
- [19] G. Diendorfer, "Lightning Location System (LLS)", IX International Symposium on Lightning Protection. 26th – 30th Nov. 2007. Foz do Iguazu, Brazil.

-
- [20] L.Z.S. Campos, *et al.* "High-speed video and electric field observations of type beta-2 leaders in negative lightning: a manifestation of recoil leaders initiated inside the cloud?" 22nd International Lightning Detection Conference, Colorado USA. Apr. 2012.
- [21] R. H. Golde, "The Lightning Conductor," *Lightning*, Vol. 2, Book, 1977, Academic Press, Edited by R.H. Golde, Chapter 17, pp. 545-576.
- [22] A. Braunstein. "Lightning Strokes to Power Transmission Lines and the Shielding Effect of Ground Wires", *IEEE Trans.*, 1970, Vol. PAS-89, pp. 1900-1910.
- [23] F. A. M. Rizk, "Switching Impulse Strength of Air Insulation: Leader Inception Criterion," *IEEE Trans.* paper no. 89 WM 116-5 PWRD, presented at the Winter Power Meeting, New York, Feb, 1989.
- [24] A.Borghetti, *et. al.*"Numerical solution of the leader progression model by means of the finite element method". 30th ICLP, Cagliari, Italy Sept. 2010.
- [25] L.Arevalo, V. Cooray. "Influence of multiple upward connecting leaders initiated from the same structure on the lightning attachment process". X SIPDA, Curitiba, Brazil. Nov. 2009.
- [26] F. A.M. Rizk, "Modeling of transmission line exposure to direct lightning strokes". *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol 5, N° 4 Nov.1990 .pp 1983-1997.
- [27] L. Niemeyer *et al.* "Fractal dimension of dielectric breakdown". *Phys. Review Letters*. Vol 52, N° 12. Mar 1984.
- [28] K.Kudo "Fractal analysis of electrical trees". *IEEE Trans. Dielectrics and electrical insulation*. Vol 5, N° 5 Oct. 1998.
- [29] C.I. Richman, "Fractal geometry of lightning strokes". *IEEE Military communications conference*. Monterey California, Oct 1990, Vol 3 pp.1085-1090.
- [30] A.Ikhlef, M. Skowronek, "Spatial and temporal characteristics of the X-Ray emitted by a 1J 50ns vacuum discharge". *IEEE Trans. On plasma science*. Vol 21, N° 6 Dec. 1993.
- [31] J. H. Rakotonandrasana "Modélisation de la décharge négative dans les grands intervalles d'air –application a la foudre", Tesis Doctoral. Dec 2008.
- [32] W.Schulz, G.Diendorfer, "Evaluation of a lightning location algorithm using an elevation model". 25th ICLP Rhodes-Greece. Sep. 2000. Vol.2, Iss.3, pp 151-154.
- [33] Technical committee AEN/CTN 20-21. "IEC 62305-1:2006. Protection against lightning. Part 1: General Principles".
- [34] International Electrotechnical Committee, "IEC 62305-3 Ed. 1.0: Protection against lightning – Part 3: Physical damage to structures and life hazard", CEI, Geneva, Switzerland, 2006.
- [35] International Electrotechnical Committee, "IEC 62561-2 Ed. 1.0: Lightning Protection System Components (LPSC) - Part 2: Requirements for conductors and earth electrodes", CEI, Italy, 2011.

-
- [36] Larmor, Sir J.L. and Larmor, J.S.B., *Proceeding of the Royal Society*, Vol. 90, pp. 312-317, 1914.
- [37] C.F.Wagner, "Lightning and transmission lines", *J. Franklin Inst.* Vol. 283, No. 6, 1967.
- [38] E.R.Whitehead "Mechanism of lightning flashover" *EEI Res. Proj. RP 50*, Pub. 72900. Chicago, IL:Ill. Inst. Tech. Feb. 16, 1971.
- [39] F. S. Young, J. M. Clayton, and A. R. Hileman, "Shielding of transmission lines," *IEEE Trans.*, vol. S, no. 82, pp. 132–154, 1963.
- [40] R.H. Lee, "Protection zone for buildings against lightning strokes using transmission line protection practice" *IEEE. Trans. On Ind. App.* Vol. IA-14 N°6 Nov/Dec 1978 pp. 465-470.

3. ENSAYOS DE LABORATORIO

Los ensayos de laboratorio constituyen una parte fundamental de la protección contra el rayo, ya que permiten evaluar muchos aspectos de la física de la descarga sin necesidad de recurrir a los tiempos de espera asociados a la recolección de datos en los estudios de campo. Además, mediante ensayos normalizados de laboratorio, también se pueden evaluar características y propiedades de muchos productos. Como ejemplos de ensayos normativos, podemos mencionar las normas referenciadas en [41][42][43], donde se describen requerimientos generales en ensayos de alta tensión o procedimientos particulares con los que evaluar diferentes propiedades y características de los productos o materiales bajo ensayo.

En este capítulo vamos a evaluar la descarga eléctrica disruptiva en el aire a presión atmosférica. La similitud que los arcos eléctricos en laboratorio presentan con los rayos naturales ha sido estudiada en [44], evaluando varios aspectos de la descarga y concluyendo que, si bien una descarga eléctrica en laboratorio no reproduce muchos de los procesos asociados a un rayo, sí que se puede utilizar para simular los procesos iniciales, y los derivados de la formación de la descarga eléctrica en sus primeras fases, lo cual incide en el proceso de intercepción, en el que se pretende centrar esta Tesis. Concretamente, las variaciones con el tiempo de algunos parámetros térmicos (temperatura del canal, densidad de electrones) o eléctricos (pendiente de subida de la corriente), son susceptibles de ser reproducidos mediante descargas eléctricas de gran longitud.

Por otro lado, en [45] se indica que se puede realizar la evaluación de una parte importante de la física del rayo, pero que la extrapolación directa escalando la magnitud no es posible, debido a que los principios físicos que rigen la formación y propagación de las descargas precursoras son diferentes, lo que hace que la magnitud de dichas coronas sea menor en el caso de la descarga de laboratorio.

En lo que respecta a la intercepción del rayo, los fenómenos que mayor interés presentan, son aquellos asociados con la transición *streamer-leader* y con el *final jump* [45][46][47]. Estos fenómenos fueron ampliamente estudiados en los años 70, y durante esta década, se realizaron multitud de investigaciones entre las que cabe destacar las llevadas a cabo por el grupo de *Les Renardières*, que fue constituido a partir del comité de estudios nº 33 de CIGRÉ “Sobretensiones y coordinación del aislamiento” y fue llamado grupo de “física de las descargas” [46].

Su importancia radica, no sólo en las investigaciones realizadas, sino en el hecho que implica que todo un grupo de organizaciones y expertos de diversas nacionalidades, aunaran esfuerzos con la única finalidad de ampliar el conocimiento que entonces se

tenía de la física de las descargas. Esta agrupación de científicos sentó un precedente en el estudio de la descarga eléctrica, y dio como fruto (entre otros) los artículos [46][47][48][49], que a su vez han constituido la base de líneas de investigación posteriores, así como su aplicación a estándares internacionales.

Cabe remarcar que lamentablemente, este tipo de iniciativas internacionales han desaparecido progresivamente, a pesar de que los resultados obtenidos y avances realizados ponen de manifiesto la necesidad de este tipo de colaboraciones en campos de investigación abiertos, como lo es la física del rayo.

Por otro lado, en la actualidad, la evolución de los ensayos de laboratorio ha ido en la línea de llegar a poder validar incluso parte de los modelos de protección contra el rayo, para lo que ha sido necesario un aumento de escala en los arcos eléctricos generados, llegando hasta descargas del orden de 30m de longitud, con picos de corriente de unos 10kA. Un claro ejemplo lo podemos ver en [52][53]. Este planteamiento se centra en los aspectos de la descarga disruptiva con magnitudes lo más próximas posible a las de los rayos naturales, mediante una serie de experimentos con los que se pretenden evaluar aspectos como: medidas del *leader* ascendente, tests de competición con terminales de diferente geometría y tests de radio de protección de un terminal.

Estos experimentos ponen de manifiesto muchos aspectos que hasta ahora sólo se podían comprobar con rayos medidos en la naturaleza, como por ejemplo el concepto de “área protegida”, o la longitud del *leader* ascendente en el momento del *final jump*.

3.1. Tratamiento probabilístico de la descarga disruptiva en laboratorio

Los ensayos de laboratorio donde se evalúan procesos relacionados con la física de la creación de la descarga eléctrica y de su intercepción, implican descargas disruptivas donde el medio de propagación es el aire, y donde la configuración más habitual es la de campo eléctrico divergente, con un electrodo plano y otro con un radio conocido [54]. El electrodo plano es el terminal de alta tensión y la punta es el terminal de tierra. En [41] se puede ver un ejemplo de montaje habitual.

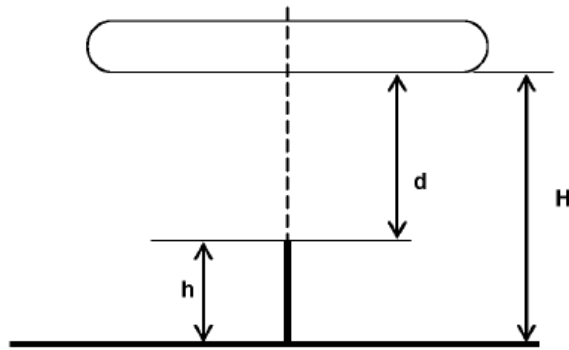


Figura 3.1. Configuración habitual para ensayos de laboratorio relacionados con la física de la descarga [41].

Como ya se ha comentado, el proceso de descarga disruptiva en laboratorio no reproduce las mismas condiciones en las que se producen los rayos de forma natural, de hecho, en muchas ocasiones, y en función de la magnitud del laboratorio, pueden no reproducirse algunos de los procesos básicos en el rayo, como la transición de *streamer* a *leader* o la termalización del canal [55]. Aunque por otro lado, como se ve en [44] y [54], muchos de los procesos de formación, e incluso en los primeros microsegundos de la descarga eléctrica sí que reproducen los mismos principios físicos.

En los ensayos de laboratorio, es habitual recurrir a la evaluación estadística de los resultados experimentales, para ello se suele asumir que la probabilidad de obtener una descarga disruptiva en una configuración determinada depende únicamente del nivel de tensión aplicado, teniendo así una función $p(U)$ llamada función de probabilidad de descarga disruptiva. De hecho, en [42] se dedica el anexo A al tratamiento estadístico de los resultados.

Para caracterizar dicha función de probabilidad se suelen emplear diferentes funciones de probabilidad, siendo las recomendadas: la distribución Gaussiana, la de Weibull o la de Gumbel, y aunque entre $0,16 < p(U) < 0,84$, pueden considerarse equivalentes, la más empleada es la función Gaussiana (o Normal) que se caracteriza por estar definida mediante 2 parámetros, el valor promedio μ y la desviación s .

En la práctica, el valor promedio es asignado al parámetro U_{50} , que se define como el valor de tensión en el que la probabilidad de obtener una descarga disruptiva es del 50%. Este parámetro puede obtenerse mediante una estimación [57], pero lo más habitual es emplear métodos experimentales, como los procedimientos *Up&Down*, en los que, tras la aplicación de una serie de impulsos, el parámetro U_{50} es calculado. La desviación también se calcula experimentalmente a partir del conjunto de datos.

En los ensayos *Up&Down* con niveles múltiples este parámetro se define como la diferencia entre niveles, mientras que en ensayos sucesivos de descarga disruptiva, esta dispersión se define mediante la siguiente fórmula:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (U_i - U_a)^2} \quad (3.1)$$

Siendo: **n** el número de observaciones.

U_i la i-ésima tensión medida

U_a la media aritmética de las tensiones medidas

Con estos dos parámetros, se puede obtener la función de densidad de probabilidad que ofrece información sobre la distribución de los resultados, realizando la integración de esta función, se obtiene la función de distribución de probabilidad que permite asociar un nivel de tensión a con una probabilidad de descarga disruptiva. En la figura 3.2 a) y b) se pueden ver ejemplos de ambas funciones:

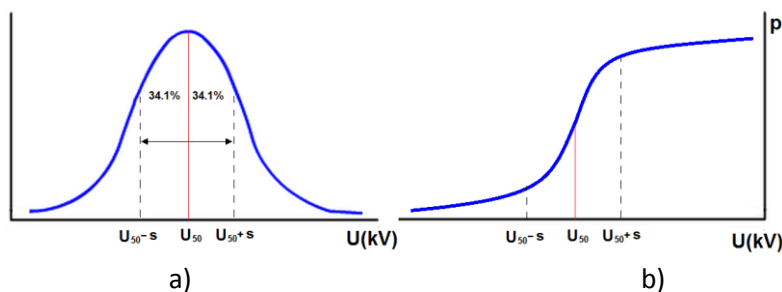


Figura 3.2. a) Función densidad de probabilidad de una función Gaussiana. b) Función distribución de probabilidad de una función Gaussiana.

Las funciones de probabilidad para una configuración determinada, el parámetro U_{50} y las variables de influencia que determinan la relación entre estos parámetros han sido ampliamente estudiadas [46][50][56][57] pero aún a día de hoy, siguen habiendo aspectos que no han sido clarificados.

Existen varios estudios sobre los parámetros que influyen en el valor de la tensión U_{50} [43][50], así como en la morfología de la distribución de probabilidad y otros parámetros estadísticos [51], lo cual es útil para poder determinar cuáles son los factores que determinan el resultado cuando se aplica individualmente un pulso de tensión.

En [44], se estudia la probabilidad de *breakdown* y se asocia el “*final jump*” con el momento en el que se dan las condiciones para producir el *breakdown* en una

estructura entre electrodos con campo eléctrico divergente, lo cual se corresponde con el instante en el que la capacidad aparente del gap (obtenida a partir de la medida de la carga y de la tensión), excede el valor máximo atribuible a una nube de coronas esférica (función dependiente del tiempo para una configuración geométrica y forma de onda determinadas).

En [56] se evalúa el parámetro U_{50} como la suma de 3 factores: U_1 (*Leader Inception Voltage*), ΔU_1 (Incremento de tensión por la propagación del *leader*) y ΔU_0 (Incremento de tensión desde U_1 hasta U_{50}) definiendo además para dos configuraciones, el peso de cada uno de ellos. No obstante, el parámetro ΔU_0 es tratado como un término no determinista, con un peso de 0,15 en el cálculo del parámetro, pero no se evalúan las variables de influencia en ese valor.

Autores como Menemenlis y Harbec [57], asocian el "*Leader inception voltage*" con la probabilidad de impacto, ya que ambos parámetros se ven modificados por el radio de la punta interceptora. Además, también se asocia el parámetro U_1 con el "*Leader inception voltage*" para algunos radios de curvatura próximos al radio crítico. En cuanto al parámetro U_{50} , se indica que apenas varía para radios de curvatura inferiores al radio crítico, que por definición es el radio mínimo de un electrodo a partir del cual la tensión de *breakdown* se mantiene constante.

En [58] se estudia el efecto de parámetros ambientales, como la humedad, sobre los valores de U_1 y de U_{99} , ofreciendo valores de probabilidad de propagación en función del campo eléctrico para diferentes configuraciones y condiciones. En [59] se realiza un estudio similar y se identifica que el proceso de *breakdown* está sujeto a la aleatoriedad intrínseca a la generación de las primeras descargas corona, lo cual depende de las condiciones locales. Otro ejemplo similar se puede encontrar en [60].

A pesar de la cantidad de estudios desarrollados y, aunque para el tratamiento estadístico de los datos en laboratorio, se asumen ciertos perfiles de distribución de probabilidad, e incluso el valor de algunos parámetros estadísticos, como la desviación, lo cierto es que son parámetros que cambian con multitud de variables. Parámetros como la simetría y la curtosis de la densidad de probabilidad son funciones multivariable (condiciones atmosféricas, composición del medio,...), aunque en realidad, esta dependencia no se suele considerar ya que no está bien determinada.

Es por ello, por lo que en el siguiente punto se aborda un planteamiento alternativo para analizar la descarga eléctrica de gran longitud en laboratorio, evaluando diferentes radios de curvatura en la punta, con un nivel de tensión aplicada de U_{50} .

La finalidad de este planteamiento es la evaluación de las variables de influencia en el fenómeno de la descarga disruptiva. Este punto de vista se basa en un enfoque heurístico del problema mediante el empleo de redes neuronales, y evaluando la capacidad de predicción como un indicativo del peso que una o varias variables pueden tener en el resultado del proceso de formación del arco eléctrico.

3.2. Tratamiento heurístico de la descarga disruptiva en laboratorio

Como se ha comentado en el apartado anterior, en los ensayos que implican o pueden implicar una descarga disruptiva, es habitual tratar probabilísticamente la relación entre el nivel de tensión aplicado y el resultado al aplicar un impulso (descarga disruptiva o no disruptiva).

El parámetro U_{50} es un valor de referencia en muchos ensayos de laboratorio y se han realizado numerosos estudios sobre qué factores intervienen en el valor del parámetro U_{50} para una determinada configuración [49], pero existe muy poca información sobre qué factor o factores intervienen en el resultado de un único impulso. De hecho, este punto se considera como un proceso completamente aleatorio y, por lo tanto, impredecible.

Por otro lado, en el **Artículo 1** se plantea la evaluación heurística de un conjunto de impulsos aplicados sobre una configuración de campo eléctrico divergente (plato-punta) con impulsos de tensión tipo maniobra con perfil 600-2500 μ s y diferentes radios de curvatura en la punta (1, 24 y 40mm), con la finalidad de identificar los parámetros influyentes en la transición *streamer-leader* que pudieran ser de utilidad en el desarrollo de sistemas de protección contra el rayo.

El planteamiento del experimento consiste en evaluar la capacidad de predicción de una herramienta heurística, como una red neuronal, para determinar la influencia de diferentes variables medidas durante el experimento. De esta manera, se puede determinar si la variable tiene influencia en el resultado final (lo que implicaría un aumento de la capacidad de predicción de la red) o si no la tiene.

Existen diversas herramientas con las que se podría haber realizado el tratamiento de los datos, e incluso *a priori*, este tipo de aplicación podría evocar más a un sistema de *clustering*, como los mapas auto-organizativos, ya que estos sistemas presentan una topología optimizada para la clasificación de muestras, sin necesidad de un aprendizaje supervisado. No obstante, los primeros resultados con esta topología pusieron de manifiesto que este tipo de algoritmos no funcionan demasiado bien en sistemas de resultado binario con cierto nivel de ruido o falta de homogeneidad.

Otra posibilidad hubiera sido la utilización de algoritmos de optimización como los de Montecarlo, o de evolución como los algoritmos genéticos, sin embargo, tras un estudio inicial comparativo, la red neuronal en configuración de perceptrón multicapa (*Multi-Layer Perceptron*, MLP) fue la que mostró mejores resultados.

Las redes neuronales artificiales son herramientas heurísticas consideradas como “cajas negras”, ya que no aportan información sobre el modelo físico que determina el comportamiento del sistema, no obstante, sí que son útiles para evaluar el peso de variables de influencia en un modelo. Con este planteamiento se ha preparado la configuración que se muestra en la figura 3.3.

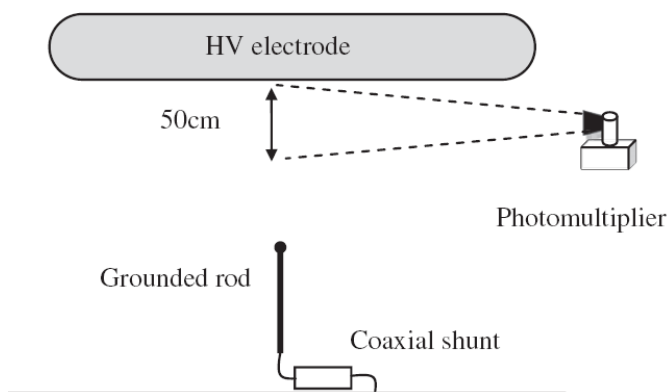


Figura 3.3. Configuración adoptada para la recolección de datos.



Figura 3.4. Fotografía del montaje realizado.

Partiendo de este montaje, con una altura del terminal (punta) de 1,25m y un gap de aire de 1,75m, se aplicó una tanda de 100 pulsos de onda tipo maniobra 600/2500 μ s, polaridad negativa y nivel de tensión igual a U_{50} para cada una de las geometrías. Los niveles de U_{50} fueron obtenidos mediante un procedimiento *Up&Down*, en el que se determinó el valor del parámetro U_{50} para cada radio de punta:

Radio de la Punta	Presión	Hum.Rel.	Temperatura	Tensión U_{50}
1mm	1021,6hPa	60%	21,7°C	806kV
24mm	1015,9hPa	43,6%	22,3°C	780kV
40mm	1021,8hPa	64,8%	19,7°C	795kV

En cada impulso, se capturó la forma de onda de corriente, medida con un shunt coaxial de 5 Ω , y la luminosidad medida con un sistema fotomultiplicador Hamamatsu R928 con una respuesta espectral en el rango de 185-900nm y enfocado a la parte más alta del gap, con la finalidad de capturar los *streamers* que alcanzan esta región espacial que cubre un círculo de unos 50cm de diámetro.

De esta manera la medida de corriente ofrece información sobre todos los *streamers*, mientras que la medida de fotoemisión, ofrece información de los *streamers* de mayor longitud. Ambas señales fueron digitalizadas a 12,5Ms/s y pueden verse ejemplos de estas medidas en la figura 3.5 a) y 3.5 b).

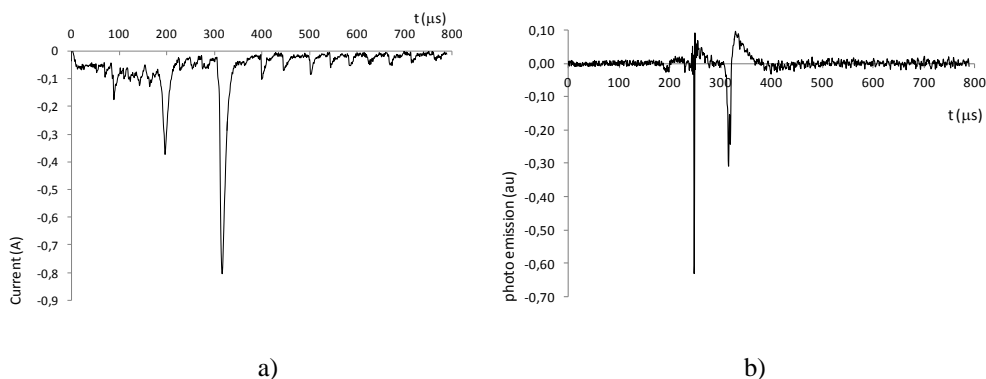


Figura 3.5. Ejemplo de medida de corriente (a) y fotoemisión (b) para una punta de 40mm aplicando un impulso de 795kV y produciendo una descarga no disruptiva.

Tras la obtención del conjunto de datos, se realizó un tratamiento y procesado de la información. El primer tratamiento consistió en recortar las señales, eliminando la parte de la información que no contribuye al aprendizaje de la red, por ejemplo, en los momentos posteriores al *breakdown* las señales son muy diferentes, y el resultado ya está implícito, como se puede ver en la figura 3.6, por lo que esta parte de la señal no aporta capacidad de predicción. Sin embargo una descarga disruptiva y

otra que no lo es, son aparentemente iguales antes de la ruptura dieléctrica desde el punto de vista de las variables que medimos.



Figura 3.6. Se puede identificar muy fácilmente el resultado del impulso identificando si existe colapso de la corriente o la fotoemisión.

Es por ello, por lo que todas las formas de onda son recortadas hasta el punto en el que tiene lugar la primera descarga disruptiva quedando las ventanas totales definidas de 0 a $280\mu\text{s}$ para la punta de 1mm y de 0 a $320\mu\text{s}$ para las puntas de 24 y 40mm.

Para determinar en qué instante temporal se produce el evento o eventos capaz de influir en el resultado final, se realizó, mediante un procedimiento iterativo, un nuevo recorte de señal, en el que se fue variando el punto central de la ventana (T_j) y la anchura de dicha ventana (ΔT_i), tal como se muestra en la figura 3.7.

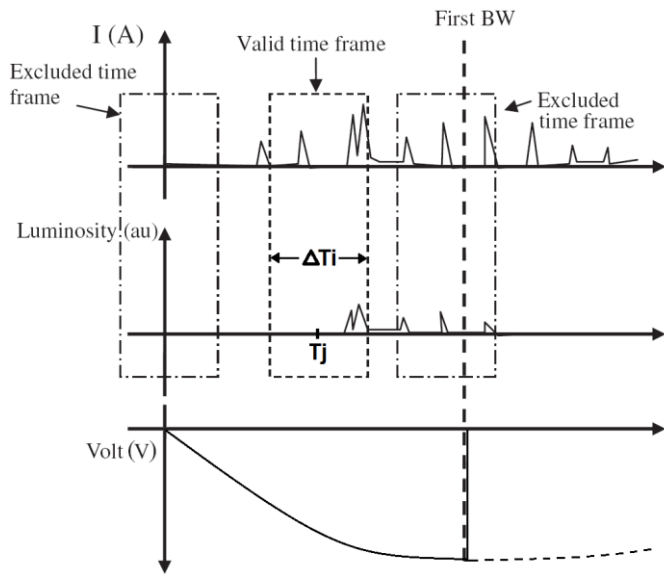
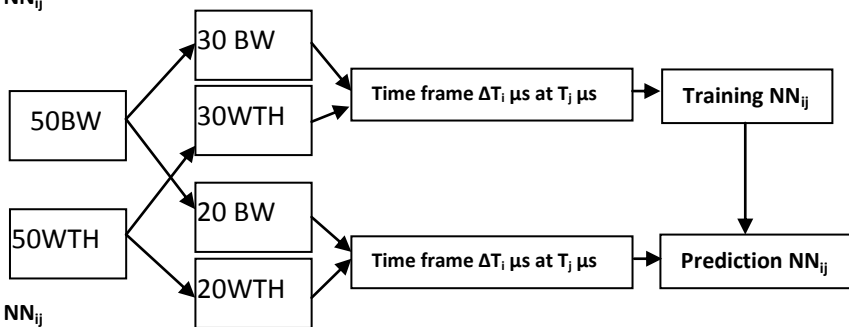


Figura 3.7. Ventanas temporales empleadas en la fase de entrenamiento y en la de predicción de la red.

Cada conjunto de datos fue preparado, variando T_j en saltos de $10\mu s$ y ΔT_i en saltos de $20\mu s$, y, empleando de forma aleatoria el 60% de los datos para el entrenamiento y el 40% para la validación de la red (de un conjunto de 50 descargas disruptivas y 50 descargas no disruptivas). Este proceso se repitió 40 veces con cada conjunto de datos para determinar el resultado promedio como representativo de la capacidad de predicción de la red, y evitar así los posibles sesgos derivados de la inicialización de los coeficientes de la red y de la selección de los datos (Ver figura 3.8).

Iteration 1 NN_{ij}



Iteration 2 NN_{ij}

⋮

Iteration 40 NN_{ij}

BW → Impulso de tensión con resultado de descarga disruptiva
WTH → Impulso de tensión con resultado de descarga no disruptiva

Figura 3.8. Proceso de entrenamiento y validación.

La configuración de red escogida, tras una primera evaluación de diferentes topologías, fue un Perceptrón Multicapa (MLP) con 2 neuronas en la capa oculta y con función de activación tipo tangente hiperbólica desplazada en el origen por un coeficiente de *bias*, tal como se puede ver en la figura 3.9.

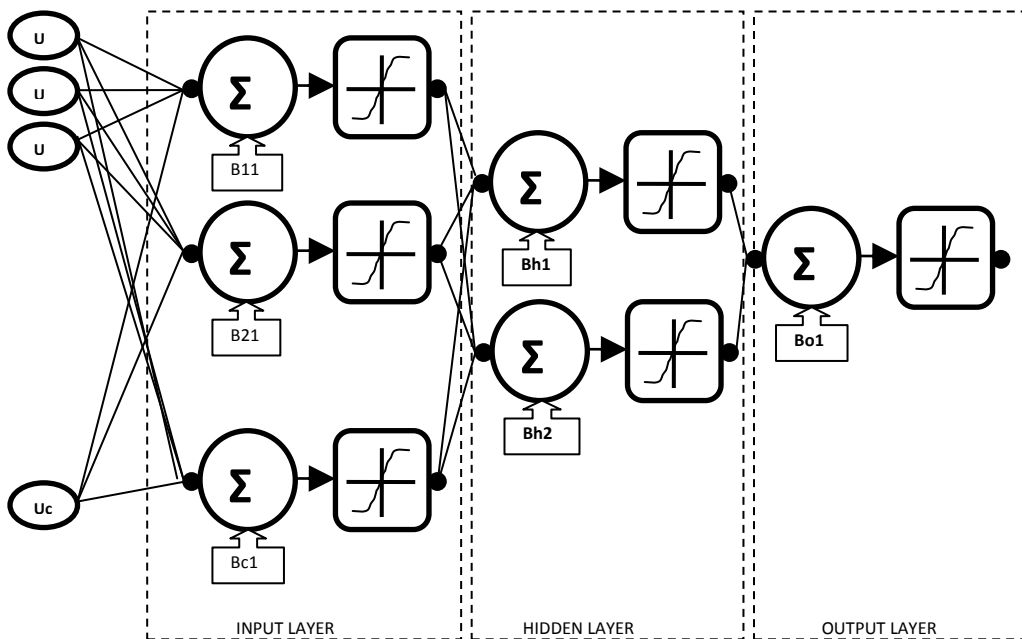


Figura 3.9. Estructura de la red neuronal en configuración de MLP.

Esta red emplea como algoritmo de aprendizaje el *back-propagation* que consiste en un aprendizaje de tipo supervisado, en el que los pesos sinápticos de las neuronas se ajustan iterativamente en dos fases, primero hacia adelante para calcular la salida de la red y luego hacia atrás para comparar la salida con el resultado deseado, generando así una señal de error con la que modificar dichos pesos sinápticos.

En este caso, se evaluó la capacidad de predicción de la red cuando los datos considerados son: la evolución temporal de la corriente, la evolución temporal de la fotoemisión, y ambas magnitudes simultáneamente. En el caso de la luminosidad, debido a que la magnitud de la señal no se relaciona fácilmente con las características de la descarga, se aplicó un procesamiento adicional que consistió en una discretización del valor de la señal asignando un "0" en caso de que la descarga no alcance la parte alta del gap y un "1" en caso de que sí que lo haga. Este procesamiento ofrece información tanto de la longitud del *streamer*, como de su duración temporal.

Tras el cálculo de la capacidad de predicción, obtenida como el promedio del resultado de las 40 iteraciones que, a su vez es calculado como el número de aciertos

en la predicción dividido entre el número total de datos, se obtuvieron los resultados mostrados en las figuras 3.10, 3.11 y 3.12, donde se consideraron las formas de onda de corriente y fotoemisión. En estas figuras, se puede ver que la red tiene una mayor capacidad de predicción del resultado con las puntas con radios de curvatura más amplios, ya que su comportamiento es más estable.

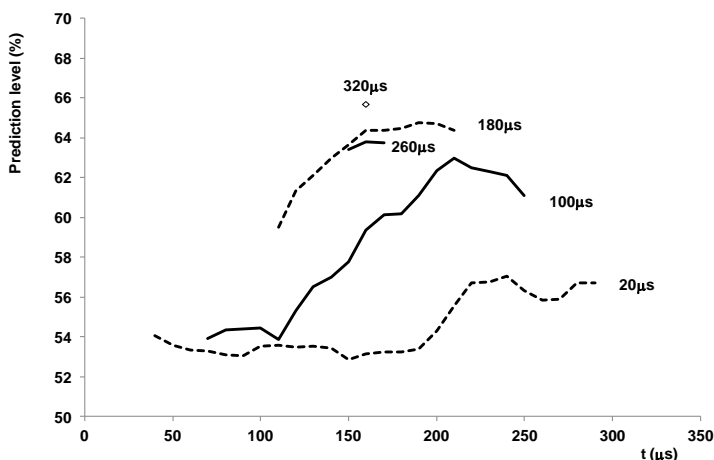


Figura 3.10. Nivel de predicción en función de T_j , para diferentes ventanas temporales ΔT_i con la punta de 40mm

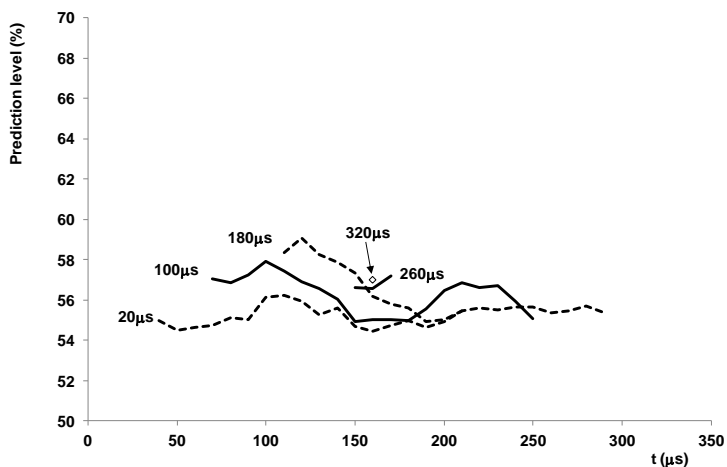


Figura 3.11. Nivel de predicción en función de T_j , para diferentes ventanas temporales ΔT_i con la punta de 24mm

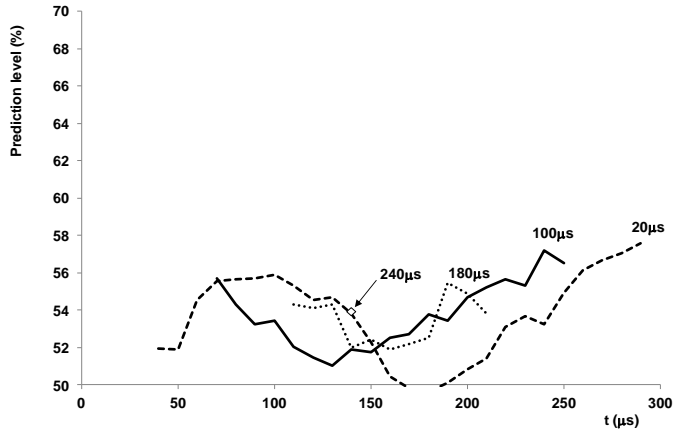


Figura 3.12. Nivel de predicción en función de T_j , para diferentes ventanas temporales ΔT_i con la punta de 1mm

Para el caso de la punta de 40mm, se identifica una clara dependencia de la capacidad de predicción con el tamaño de la ventana temporal, llegando al máximo de predicción (66%) para la ventana completa de 320μs. No obstante, una ventana de 180μs centrada en 190μs, ofrece un nivel de predicción del 65%, por lo que puede ser considerada como la ventana más corta y el instante más temprano en el que se puede tener cierta capacidad de predicción del resultado.

A modo comparativo, en las figuras 3.13 y 3.14 se muestra la capacidad de predicción de la red para las ventanas temporales de 100 y 180μs con cada una de las puntas empleadas.

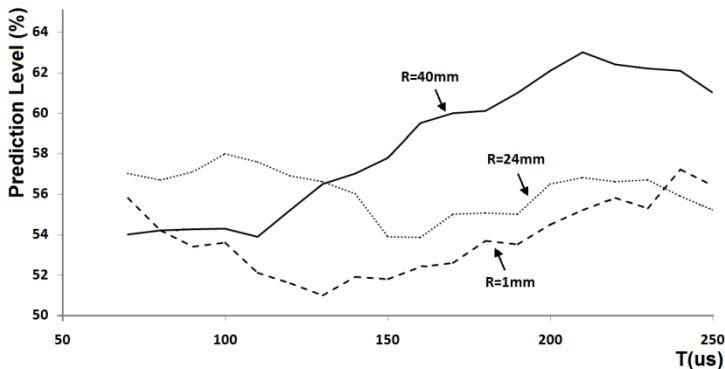


Figura 3.13. Nivel de predicción en función de T_j , para una ventana temporal de $\Delta T_i=100us$ con puntas de 1, 24 y 40mm.

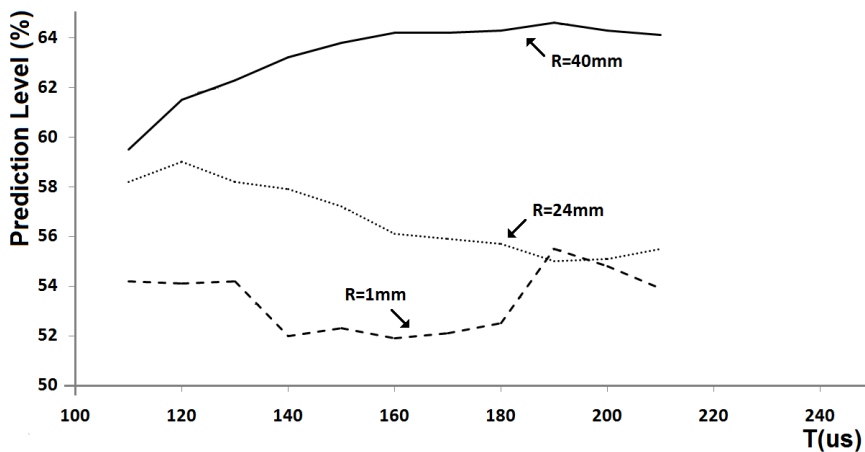


Figura 3.14. Nivel de predicción en función de T_j , para una ventana temporal de $\Delta T_i=180\mu s$ con puntas de 1, 24 y 40mm.

Además de la mayor capacidad de predicción asociada a la punta de 40mm, se aprecia una tendencia más definida. La tendencia creciente o decreciente de este parámetro, para un determinado radio de curvatura, podría ser un indicativo de la influencia de la variable evaluada en el resultado del impulso conforme se aproxima el instante del *breakdown*.

En el caso de una ventana de $180\mu s$, la punta de 24mm, presenta una clara tendencia decreciente, conforme aumenta en centro de la ventana, esto puede indicar que al aproximarse al instante del *breakdown*, el comportamiento se vuelve más errático, probablemente por la mayor cantidad de descargas corona emitidas.

En el caso de la punta de 1mm, la escasa capacidad de predicción, junto a la ausencia de una tendencia definida, ponen de manifiesto un comportamiento mucho más aleatorio que en las otras puntas. Esto puede indicar que la nube de carga creada por la emisión de descargas en instantes previos a la descarga, genera un comportamiento más aleatorio debido a que nuevas variables no contempladas (como el tiempo de reabsorción de cargas, etc...), tienen una mayor influencia en el resultado.

En el caso de la punta de 24mm, la tendencia no se ve tan clara, el nivel de predicción decrece hasta el 59% considerando el mejor de los casos, con una ventana centrada en $120\mu s$ y una anchura de $180\mu s$. No obstante, si la predicción se realiza únicamente con las curvas de corriente, como se puede ver en la figura 3.15, se observa de nuevo una tendencia en la capacidad de predicción con el aumento de la ventana temporal. En este caso, se puede considerar que la ventana de $180\mu s$ centrada en $160\mu s$ es la opción óptima llegando a un nivel promedio de predicción del 60%. Este hecho

puede ser debido a una ausencia de relación entre ambas variables, es decir, que una mayor deposición de carga de un *streamer*, no tiene por qué suponer un *streamer* de mayor longitud, lo cual puede implicar una combinación de información de ambas señales de menor calidad que la información aportada únicamente por la señal de corriente, lo cual puede ser un indicativo de la importancia de cada una de las variables en el proceso.

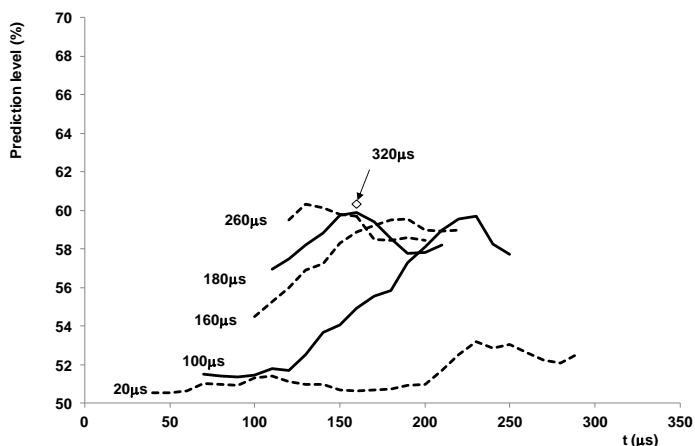


Figura 3.15. Nivel de predicción en función de T_j , para diferentes ventanas temporales ΔT_i con la punta de 24mm considerando únicamente la forma de onda de la corriente.

En el caso de la punta de 1mm, la capacidad de predicción no muestra ninguna tendencia clara en la predicción. Considerando sólo la corriente o la fotoemisión, los resultados no mejoran. Se puede ver que el máximo nivel de predicción es del 57% para una ventana de 100μs centrada en 240μs, pero para ventanas mayores, no se mantiene la tendencia en la capacidad de predicción.

Como se puede ver, para el caso de la punta de 40mm, es posible mejorar sustancialmente la capacidad de predicción, lo cual indica que hay información relevante en las ventanas temporales que permiten anticipar el resultado, también es un indicativo de que esta configuración presenta cierta estabilidad en su comportamiento.

Otro punto interesante es la escasa capacidad de predicción considerando únicamente la fotoemisión, mientras que al considerar la corriente también, esta capacidad aumenta sustancialmente. Esto indica que la longitud de los *streamers* es importante pero, la carga espacial depositada por los *streamers* y medida con la corriente tiene una mayor importancia. Esto es consistente con el criterio de transición de *streamer* a *leader* presentado en [61].

El hecho de obtener una capacidad de predicción del orden del 70% indica que, aunque existe información relevante en las variables consideradas, siguen existiendo otras variables de influencia no contempladas y, cuya adición podría formar parte de un trabajo futuro que ayude a comprender cuáles son las variables de influencia en el proceso de ruptura dieléctrica, así como cuantificar el peso de dichas variables, empleando la misma herramienta y procedimiento descritos en el **Artículo 1**.

Para el caso de la punta de 24mm, los mejores resultados se han obtenido considerando únicamente las curvas de corriente, aunque la capacidad de predicción de la red decrece con el aumento del tamaño de la ventana temporal. En este caso, una menor capacidad de predicción puede ser debida a un comportamiento más aleatorio o como se ha comentado, a una falta de relación entre carga y longitud de *streamer*.

Los datos de la punta de 1mm ofrecen niveles de predicción aún más bajos, sin ninguna tendencia definida en ninguno de los casos. Esto puede ser debido a que el patrón de emisión de descargas corona se vuelve mucho más irregular. Como observación general, los resultados indican que conforme el radio de curvatura de la punta decrece, la emisión de descargas corona se hace más aleatoria, lo cual empeora la capacidad de predicción de la red. Otra observación es que en periodos tempranos, las primeras descargas corona seguidas de periodos oscuros no tienen ninguna consecuencia en el resultado, lo cual es consistente con lo observado en [44].

Parece ser que en la punta afilada son más determinantes los instantes muy próximos al *breakdown*. Es muy posible que la nube de carga de espacio generada sea más homogénea y parecida entre disparos en el caso de la punta afilada al haber más descargas previas, mientras que en los radios mayores, las descargas previas son menos y su longitud y cantidad podría ser más determinante en el resultado del impulso.

3.3. Conclusiones parciales

Los resultados obtenidos en el **Artículo 1** muestran una diferencia objetiva entre una descarga disruptiva y una no disruptiva, aunque no hay un criterio evidente con el que predecir el resultado. Al aplicar una red neuronal, se puede mejorar el nivel de predicción, considerando la información contenida en una determinada ventana temporal, lo cual puede ser un indicativo, no sólo de qué variable tiene influencia en el resultado, sino de en qué momento se puede anticipar el resultado, lo cual puede asociarse a la fase en la que se encuentre el arco eléctrico.

Con las magnitudes consideradas, se puede determinar que la estabilidad en la emisión de descargas corona previas es un punto importante para mejorar la capacidad de predicción, lo cual es consistente con el hecho de que conforme decrece el radio de la punta y su emisión de descargas corona se vuelve más aleatoria, la capacidad de predicción de la red se ve mermada.

La metodología que se ha aplicado, puede ser empleada añadiendo una mayor cantidad de variables directas (más niveles en fotoemisión, imágenes, gradiente espacial de campo eléctrico) o derivadas (distribución espacial de carga,...) para determinar cuáles pueden aportar una mejora en la capacidad de predicción de la red, lo cual sería un indicador objetivo de la influencia de dicha variable en el resultado final y por lo tanto en la transición de *streamer* a *leader*.

Además, la posibilidad de ejercer control sobre el valor de ciertos parámetros ambientales (humedad, temperatura,...) permitiría evaluar el efecto de dichas magnitudes, cuantificando su peso en la capacidad de predicción de la red, lo cual también podría ofrecer una valoración cuantitativa de su influencia en el resultado.

Otro punto importante es la asociación a los instantes temporales en los que existe cierta capacidad de predicción para poder asociarlos a las diferentes fases de la descarga o al nivel de campo eléctrico.

Referencias del capítulo 3

Artículo 1→D. Ruiz, P. Llovera, V.Pomar, A. Quijano. “Analysis of breakdown process at U_{50} voltage for plane rod discharges by means of Neural Networks”.12th International Conference on Electrostatics. Journal of Electrostatics.Vol.71 Iss.3. Jun 2013.pp.336-340.

- [41]Comité Técnico AEN/CTN 207. “UNE 21186/2011: Protección contra el rayo: Pararrayos con dispositivo de cebado”. Diciembre 2011.
- [42]Comité Técnico AEN/CTN 207. “UNE EN 60060-1: Técnicas de ensayo de alta tensión. Parte 1: Definiciones Generales y requisitos de ensayo”. Septiembre 2012.
- [43]Comité Técnico AEN/CTN 207. “UNE EN 61180-1: Técnicas de ensayo en alta tensión para equipos de baja tensión. Parte 1: Definiciones, requisitos y modalidades de ensayo”. Febrero 1996.
- [44]M.A. Uman. “Comparison of natural lightning and the long laboratory spark with application to lightning testing”. Final Report. Aug. 1970.
- [45]J. H. Rakotonandrasana. “Modelisation de la décharge négative dans les grands intervalles d’air –application a la foudre”, Tesis Doctoral. Dec 2008.
- [46]Les Renardières Group. “Positive discharges in long air gap at Les Renardières - 1975 Results and conclusions-“. Electra Nº53, pp. 31-153, 1975.
- [47]Les Renardières Group, “Negative discharge in long air gaps at Les Renardières” Electra Nº74 pp. 67-216, 1981.
- [48]Les Renardières Group, “Research on long air gap discharges at Les Renardières”, Electra Nº23 pp. 53-157, 1972.
- [49]Les Renardières Group, “Research on long air gap discharges at Les Renardières - 1973 results”, Electra Nº35 pp.49-156, 1973.
- [50]C. Gary, G. Le Roy, B. Hutzler, J. Lalot, C. Dubanton, “Les propriétés diélectriques de l’air et les très hautes tensions”, Eyrolles, Paris, 1984.
- [51]W.Hauschild, W. Mosch “Statistical techniques for high voltage engineering”. 1992.
- [52]D’Alessandro *et al.* “Experimental Study of Lightning Rods Using Long Sparks in Air”. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 11, Nº. 4; Aug. 2004.
- [53]D’Alessandro *et al.* “Two unprecedented experiments to evaluate the effectiveness of lightning protection systems” ICLP 2012. pp. 1-5, Sept 2012.
- [54]P. Lalande. “Etude des conditions de foudroiement d’une structure au sol”, Tesis Doctoral. Sept 1996.
- [55]Bazelyan, E. M., and Y. P. Raizer, “Lightning Physics and Lightning protection”, Inst. of Phys., London. 2000.

-
- [56] G. Carrara, L. Thione. "Switching surge strength of large air gaps: a physical approach". IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. Pas-95, N° 2, Mar-1976.
- [57] C. Menemenlis, G. Harbec, J.F. Grenon, "Switching-impulse corona inception and breakdown of large high-voltage electrodes in air" IEEE. Trans. On Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-97, N°6, pp.2367-2373 Nov. 1978.
- [58] L. Arevalo, D. Wu, and B. Jacobson. "A consistent approach to estimate the breakdown voltage of high voltage electrodes under positive switching impulses". J. Appl. Phys. 114. 2013.
- [59] P. Ortega *et al.* "Atmospheric correction factor for impulse breakdown voltage". 28 ICPIG, Prague, Czech Republic. Jul. 15-20, 2007.
- [60] N.L. Allen, M. Boutlendj. "Study of the electric fields required for streamer propagation in humid air". IEE Proc.-A, Vol. 138, N° 1, Jan. 1991.
- [61] M. Becerra, V. Cooray, "A self-consistent upward leader propagation model", Journal of Physics D: Applied Physics 39. 2006, pp.3708-3715.

4. ESTUDIOS DE CAMPO

En el apartado anterior se ha visto que los ensayos de laboratorio constituyen una herramienta imprescindible en el análisis y comprobación de muchos aspectos relacionados con la física de la descarga, pero también se ha mencionado que el fenómeno del rayo no es completamente reproducible en este tipo de instalaciones, debido a que el estado actual de la técnica no permite la generación de arcos eléctricos en laboratorio con exactamente las mismas propiedades que los rayos naturales [63]. Es por ello, por lo que actualmente existe una parte de la física del rayo que no se puede evaluar mediante generadores de tensión impulsional, por lo cual es necesario observar el fenómeno del rayo en la naturaleza. Este apartado se enfoca en los estudios de campo realizados en la naturaleza contemplando rayos reales.

Los primeros estudios de campo parten de la observación de los sistemas de protección contra el rayo y de la identificación de los elementos que estaban protegidos por un pararrayos, y aquellos que no lo estaban; la finalidad de esta observación directa, era la de poder determinar la relación entre los parámetros que definían la instalación de protección contra el rayo (normalmente la altura), y la zona protegida por dicha instalación [62]. Los estudios de campo son uno de los pilares imprescindibles en la protección contra el rayo, tanto para la obtención de datos utilizados en la aplicación de los modelos de protección, como para la comprensión de la física del rayo a una escala completa.

En la actualidad existen multitud de equipos de medida de altas prestaciones instalados en diferentes estructuras, con los que se miden varios parámetros asociados a las descargas (corriente, campo eléctrico, carga transferida, polaridad,...), además, en los últimos años se han puesto de manifiesto más parámetros a tener en cuenta por su implicación en la física del rayo, como por ejemplo las emisiones de rayos X asociados a la transición *streamer-leader* [64]. Por otro lado, la medida de parámetros del rayo, puede dar lugar a conjuntos de datos con los que elaborar estadísticas, como los pioneros trabajos de K. Berger que todavía son utilizados como referencia en estudios y aplicaciones actuales [65][66]. Estas estadísticas pueden ser empleadas en el dimensionamiento de los elementos que constituyen un sistema de protección contra el rayo y, actualmente son la base sobre la que se fundamentan los niveles de protección definidos en las normativas, así como muchos otros aspectos aplicables en ingeniería (sección de los conductores, dimensionamiento de SPD's,...).

Para obtener una cantidad suficiente de datos, con los que elaborar estadísticas fiables y representativas, es necesario recolectar la mayor cantidad de datos posible y, por motivos de viabilidad, deben realizarse en un tiempo razonable, motivo por el cual, se recurren a ciertas estrategias que permiten disminuir el tiempo de

recolección. No obstante, las estrategias de medida empleadas actualmente presentan un problema común: el sesgo de los datos obtenidos. En el caso de los puntos fijos de elevado índice de impactos, normalmente torres elevadas, presentan el sesgo asociado a las particularidades del entorno (estructura elevada, emplazamientos de gran altitud, orografía,...).

Otro tipo de ensayos de campo, son aquellos que pretenden evaluar la eficiencia de los sistemas de protección, bien sea por medio de la comparación entre diferentes instalaciones [67], o bien mediante la evaluación continua. No obstante, a día de hoy las normativas aplicables [68][69][70] son normativas prescriptivas, cuyo seguimiento no implica la evaluación continua, sino que se establecen unos protocolos periódicos de revisión y mantenimiento, los cuales no pueden asegurar el funcionamiento continuo de los elementos, ni el cumplimiento de dichos elementos con las especificaciones iniciales durante toda su vida útil, ni si existe algún tipo de problema derivado del modelo de protección aplicado, del terminal interceptor, del estado de la instalación, etc.

4.1. Estrategias de medida de parámetros del rayo

Actualmente, existen multitud de ejemplos de medida de parámetros del rayo en torres de comunicaciones y estructuras elevadas, un conocido ejemplo lo tenemos en la torre de radio de Gaisberg en Austria, que se encuentra monitorizada con un sistema de altas prestaciones y que, además, se emplea como patrón de medida para la red de detección y localización de impactos ALDIS, la cual realiza una estimación de la amplitud de los rayos medidos basándose en la medida del campo electromagnético radiado [71][72].

En [74] y [75] se aborda el diseño e instalación de un sistema de medida de parámetros del rayo, en el que se plantea el diseño de una serie de sensores y su implantación en un equipo de medida. En [76] se plantea la monitorización de una torre de distribución de energía con la estructura que se muestra en la figura 4.1.

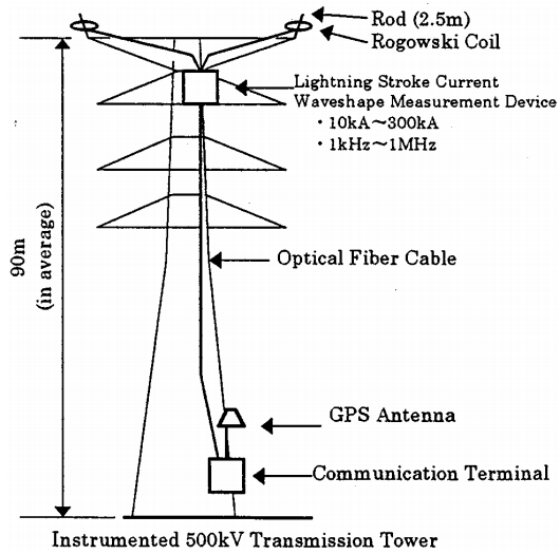


Figura 4.1. Equipo de medida de corriente en una torre de distribución de energía eléctrica [76].

Como se puede comprobar, existen casos en los que se desarrollan e instalan equipos de medida de parámetros del rayo en ubicaciones donde existe un elevado índice de impactos, o donde las pérdidas ocasionadas por un fallo pueden ser cuantiosas, e interesa caracterizar el fenómeno lo máximo posible para poder dimensionar la protección contra el rayo de forma óptima [76].

Por otro lado, debido a la escasez de impactos en un lugar concreto y controlado, se suele recurrir a otras técnicas y métodos de medida que permiten la obtención de estadísticas más amplias, como el cebado artificial de rayos mediante un cohete (*triggered lightning*).

Uno de los emplazamientos más conocidos en el empleo de esta técnica es Camp Blanding (Florida), donde se estudian de manera específica muchos de los parámetros asociados a la descarga de un rayo [77][78] empleando esta técnica. Las instalaciones del campo de pruebas para obtener y medir rayos cebados artificialmente en Camp Blanding tienen una superficie aproximada de 315.000 m².

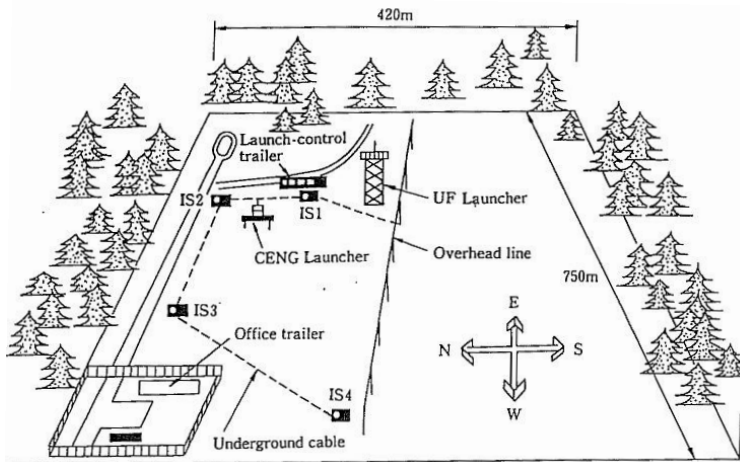


Figura 4.2. El campo de pruebas de rayos cebados de Camp Blanding (Florida) tiene unas dimensiones de unos 420m x 750m [77].

En este campo de pruebas se realizan multitud de medidas y experimentos de gran utilidad en ingeniería, para lo que recurren al cebado artificial de rayos. Se suelen emplear principalmente 2 métodos diferentes para conseguir el cebado de rayos. Uno de los métodos consiste en lanzar un cohete que transporta un conductor metálico conectado a tierra (cebado clásico). El otro método consiste en un cohete que transporta un hilo conductor durante los primeros metros, seguido de un tramo aislante (cebado de altura) lo cual genera rayos con unas características más similares a los rayos reales que en el caso de los cebados con el método clásico.

No obstante, se plantean una serie de problemas para obtener datos con las estrategias de medida descritas anteriormente. En primer lugar, el cebado artificial de rayos, provoca rayos de menor energía y características diferentes a los rayos naturales, además, la monitorización de un solo emplazamiento no puede generar estadísticas representativas de todos los emplazamientos, ya que es sabido que las características estadísticas de los rayos no son las mismas en todos los lugares.

Como alternativa a la monitorización exhaustiva de un lugar con elevado índice de impactos, existe la monitorización de áreas extensas mediante redes de localización, las cuales basan su funcionamiento en la distribución, a lo largo de un área, de antenas omnidireccionales orientadas hacia los 4 puntos cardinales, que son capaces de medir los pulsos de VLF emitidos por un rayo en el momento del impacto. Atendiendo a las señales ofrecidas por cada una de las antenas, se puede determinar la dirección del pulso electromagnético medido, así como su amplitud y polaridad [79].

Estas redes de detección emplean el método de la triangulación y del tiempo de llegada (TTA) para posicionar el lugar de impacto del rayo. Por el contrario, su resolución espacial está limitada, es decir no se sabe el punto exacto en el que el rayo ha impactado. Además tampoco se ofrece información de la forma de onda de la corriente, y es por ello, por lo que la amplitud de corriente del rayo tiene que ser estimada en base a algunos modelos, siendo el más habitual el modelo de la línea de transmisión (TL) introducido por Uman *et al.* en 1975 [80]. Tampoco se ofrece información local, como las condiciones ambientales, campo eléctrico local, etc... Como ejemplos de este tipo de redes podemos encontrar, entre otras, la red ALDIS en Austria [81] con una configuración de 8 puntos de medida distribuidos tal como se puede ver en la figura 4.3.



Figura 4.3. Distribución de sensores de la red ALDIS en Austria [81].

Esta red, ha sido empleada para rebatir las estadísticas empleadas en las normativas actuales, indicando que la amplitud de los rayos tiende a ser más baja de lo estimado por K. Berger en [70], tal como se puede ver en la figura 4.4. Esto tiene consecuencias importantes sobre los niveles de protección propuestos por las normas y sobre los métodos de protección que se basan en el modelo electro-geométrico, y en una relación empírica entre el valor del pico de la corriente del rayo y la distancia del *final jump*, que se corresponde con el radio de la esfera rodante.

Como se verá en el siguiente capítulo, para un determinado nivel de protección, rayos de menor amplitud conducen a radios de esfera menores, lo que se traduce en que los rayos de menor amplitud son los más difíciles de “capturar”, aunque los desperfectos ocasionados puedan ser muy cuantiosos.

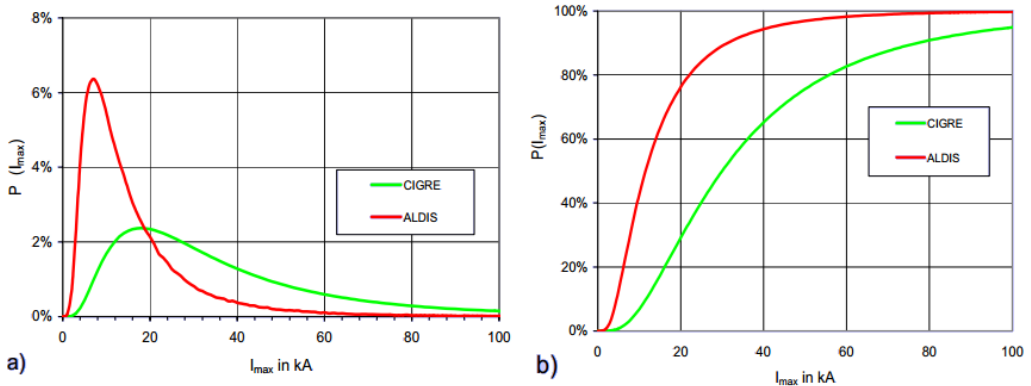


Figura 4.4. Comparativa de la amplitud de los rayos medidos por CIGRE y por la red ALDIS. En a) se puede ver la función densidad de probabilidad y en b) la función de probabilidad [82].

En general, la cantidad de artículos y estudios realizados sobre la medida de parámetros del rayo y extracción de una estadística asociada, confirman que se trata de un tema que, aún hoy, sigue siendo de interés colectivo y resulta evidente que los datos recolectados para la obtención posterior de conclusiones se refieren, la mayoría de los casos, a un único emplazamiento, lo cual impide la obtención de conclusiones particulares para cada tipo de estructura y emplazamiento geográfico, otro tipo de planteamientos, emplean sistemas de medida indirecta, que no permiten ubicar exactamente el lugar del impacto, por lo que no se pueden determinar las particularidades del entorno in información local relevante.

Resumiendo, existen diversos equipos para determinar qué es lo que ocurre cuando impacta un rayo en emplazamientos muy concretos, como por ejemplo, las torres de distribución de alta tensión o torres de comunicaciones, donde existen fallos por causa de los impactos y un evidente interés económico, ya que un buen diseño del sistema de protección comienza por tener información acerca de ciertos parámetros del rayo, sobre todo amplitud y velocidad. Sin embargo, no existen estudios serios realizados sobre instalaciones de pararrayos en ámbito doméstico o industrial, por lo que se recurre a un estudio donde se dimensiona un sistema de protección, basándose para ello en modelos globales.

4.2. Un nuevo planteamiento aplicado a la medida de parámetros del rayo

La recogida de datos de parámetros del rayo sigue siendo de interés colectivo debido a que la cantidad de variables de influencia es elevada, lo cual implica que para una estadística fiable se requiere una gran cantidad de datos donde dichas variables puedan cuantificarse. En [83] se indica que, efectivamente, la cantidad de datos existente es insuficiente como para hacer un análisis realmente sólido, ya que los sistemas de protección están basados en los datos globales existentes o en estudios teóricos, no en los datos reales específicos de una zona. Por ello, resulta de especial interés la recolección de datos en instalaciones de diversos tipos atendiendo muy bien a las particularidades entre unas instalaciones y otras, como por ejemplo: geometría, altura, materiales, ubicación, presencia de objetos elevados, etc. y todo ello asociarlo a unos índices de efectividad o de fallo asociado a las instalaciones de protección.

En el **Artículo 2** se indica que, los modelos de protección empleados actualmente ofrecen, en general, buenos resultados, pero no han sido modelados de forma completamente satisfactoria, ya que la mayoría de instalaciones de protección contra el rayo no tienen las mismas condiciones que las instalaciones de las que parten los datos empleados en las normas de diseño de sistemas de protección. Por ello, surge la necesidad de generar estadísticas fiables que también consideren las características particulares de cada emplazamiento, para aplicarlas en el diseño de los sistemas de protección contra el rayo.

Para esto sería necesaria la obtención de multitud en diversos entornos, con la finalidad de poder agrupar los datos bajo diferentes criterios de clasificación. Esto se podría conseguir mediante la creación de una red distribuida de equipos que multiplique por un factor elevado el número de puntos de medida.

En la figura 4.5 se puede ver una tabla donde se muestran, a modo comparativo, ventajas e inconvenientes de la obtención de datos mediante diferentes estrategias de medida: monitorización de estructuras elevadas, campos de pruebas, redes de localización y una red distribuida de medida.

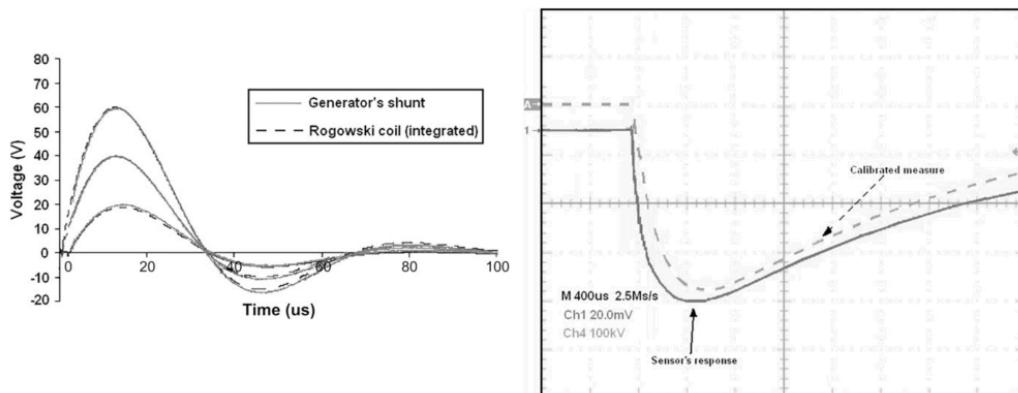
	VENTAJAS	INCONVENIENTES
MONITORIZACIÓN DE ESTRUCTURAS ELEVADAS	<ul style="list-style-type: none"> -Medidas de rayos reales -Equipos de precisión en una sola ubicación -Posibilidad de multitud de parámetros de observación, imágenes,... 	<ul style="list-style-type: none"> -Baja actividad de rayos. Tiempo elevado para recolección de datos -Representa un único entorno de rayos. - Los rayos tienden a tener mayor amplitud del pico de corriente
CAMPO DE PRUEBAS (Triggered Lightning)	<ul style="list-style-type: none"> -Entorno controlado -Medidas de rayos reales con algunas características muy similares a los rayos naturales -Equipos de precisión en una sola ubicación -Posibilidad de multitud de parámetros de observación, imágenes,... - Útil para evaluar multitud de situaciones, instalaciones y equipos 	<ul style="list-style-type: none"> -Baja actividad de rayos representa un coste elevado de personal y equipos -Necesidad de cebar rayos para obtener estadísticas fiables -Representa un único entorno de rayos. -Los componentes de corriente difieren de las de los rayos naturales -Los elementos de protección no se ensayan en su entorno real de funcionamiento.
REDES DE LOCALIZACIÓN	<ul style="list-style-type: none"> -Multitud de datos al cubrir una zona amplia - Muchos entornos considerados - Se requiere una cantidad relativamente baja de equipos 	<ul style="list-style-type: none"> - No se miden los parámetros de forma directa. - Resolución espacial limitada - Sin información local - La cantidad de parámetros a considerar es reducida
RED DISTRIBUIDA DE MEDIDA	<ul style="list-style-type: none"> -Medidas de rayos reales -Multitud de entornos de medida (urbano, costa,...) -Posibilidad de obtención de datos repartidos geográficamente en varios países y entornos. -Obtención de estadísticas fiables (elevado número de puntos) -Comprobación del funcionamiento de los pararrayos in-situ. - No requiere medidas de seguridad especiales para el personal. 	<ul style="list-style-type: none"> - Menor precisión en las medidas. - Dificultad para medir todos los parámetros en todos los puestos de observación. - Grandes distancias entre puntos de observación significa desplazamiento de personal (se debe sincronizar con el mantenimiento de las instalaciones) - Dificultad para comprobar el funcionamiento de los equipos. - Dificultad para disponer rápidamente de los datos

Figura 4.5. Ventajas e inconvenientes de las estrategias de medida de parámetros del rayo.

Con este planteamiento, se describe el desarrollo de un sistema de diseño específico, capaz de cumplir con los requerimientos necesarios para formar una red distribuida de medida. En el **Artículo 2**, se estudian los parámetros de interés, así como los requerimientos del sistema de adquisición que se precisa para realizar la medida de forma adecuada [65][66][72].

Se concluye que, alcanzando un compromiso entre la utilidad de los datos y la sencillez del sistema, los parámetros que mayor interés presentan son: la medida de la corriente del rayo y la corriente previa a la descarga, el campo eléctrico durante la tormenta, el campo eléctrico impulsional asociado a la aproximación del *leader* descendente a tierra, y las condiciones ambientales en el momento del impacto.

La medida de corriente se realiza mediante dos bobinas Rogowski con diferentes sensibilidades, lo que otorga versatilidad en la instalación del equipo, ya que no es necesario poner ningún elemento en serie con la bajante del pararrayos. La bobina Rogowski se emplea en configuración derivativa, por lo que posteriormente se realiza la integración numérica para recuperar la señal original, como se puede ver en el ejemplo de medida de la figura 4.6a. La medida de campo eléctrico impulsional se implementa mediante un filtro integrador pasivo [73]. Su respuesta ante un impulso de tensión con onda tipo maniobra puede verse en la figura 4.6b.



a) *Figura 4.6. Respuesta de los sensores de corriente(a) y campo impulsional (b).*

La medida de campo eléctrico de tormenta se realiza mediante un sensor de campo electrostático de tecnología propia, como el descrito en [84] y las condiciones ambientales son medidas con sensores comerciales.

La estrategia de adquisición se basa en el estudio de la secuencia de eventos durante una tormenta y durante la caída de un rayo, así como en la optimización del consumo de energía. Esta estrategia permite la obtención y almacenamiento de los datos de interés siguiendo la secuencia descrita en la figura 4.7.

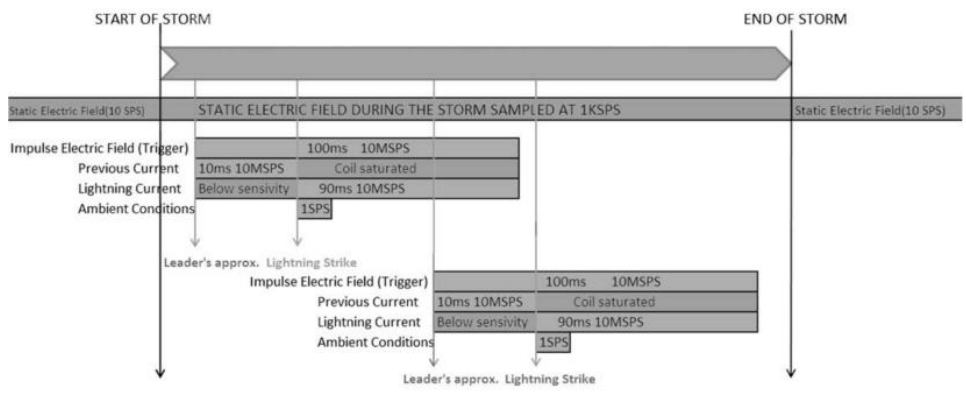


Figura 4.7. Estrategia de adquisición empleada en el equipo de medida.

Una vez determinados los aspectos teóricos, se dimensionaron los elementos que constituyeron el equipo de medida. Esta primera versión se implementó con un osciloscopio para PC y una tarjeta de adquisición de datos convenientemente sincronizados. Las señales que requieren baja frecuencia de muestreo (campo electrostático, condiciones ambientales) se conectaron a la tarjeta de adquisición de datos, y las que requieren alta frecuencia de muestreo se conectaron al osciloscopio (campo eléctrico impulsional y corriente).

El sistema se alimentó mediante un panel solar y una batería, y la comunicación se implementó mediante un enlace de fibra óptica. En la figura 4.8 se puede ver un diagrama de los elementos que constituyen el equipo.

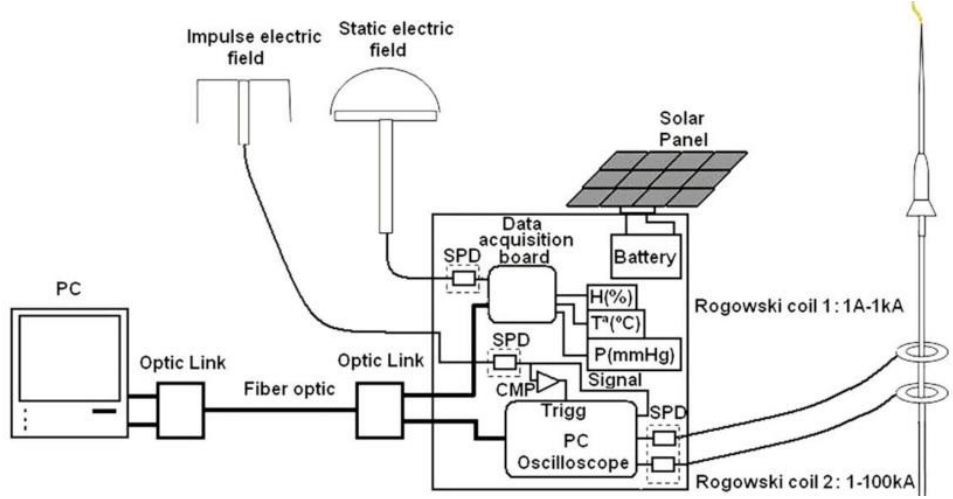


Figura 4.8. Diagrama de bloques del equipo de medida desarrollado.



Figura 4.9. Primer prototipo del equipo de medida desarrollado.

Inicialmente, la protección de los elementos (SPD's, apantallamiento,...) y la medida de parámetros de forma individual, se validaron en el Laboratorio de Alta Tensión del Instituto Tecnológico de la Energía, donde los resultados fueron satisfactorios, habiendo realizado medidas de corriente hasta 100kA, campos impulsionales de hasta 500kV/m y campo eléctrico estático de hasta 20kV/m. Tras la calibración de los sensores, se acotó el error en la medida en valores inferiores al 8% en todos los casos, lo que se consideró suficiente para la aplicación. En las figuras 4.10 y 4.11 se pueden ver ejemplos de medida de campo eléctrico impulsional y corriente impulsional con perfil 10/350 μ s.

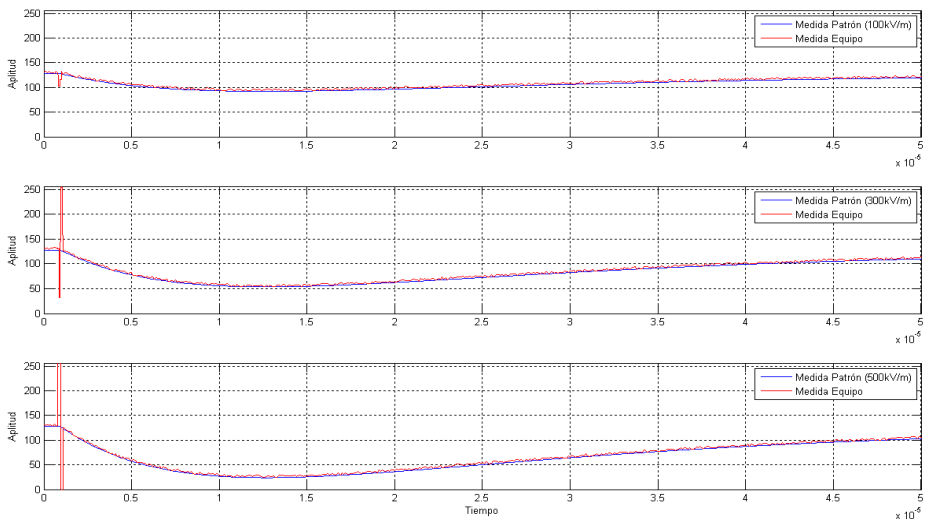


Figura 4.10. Calibración de la medida de campo eléctrico impulsional.

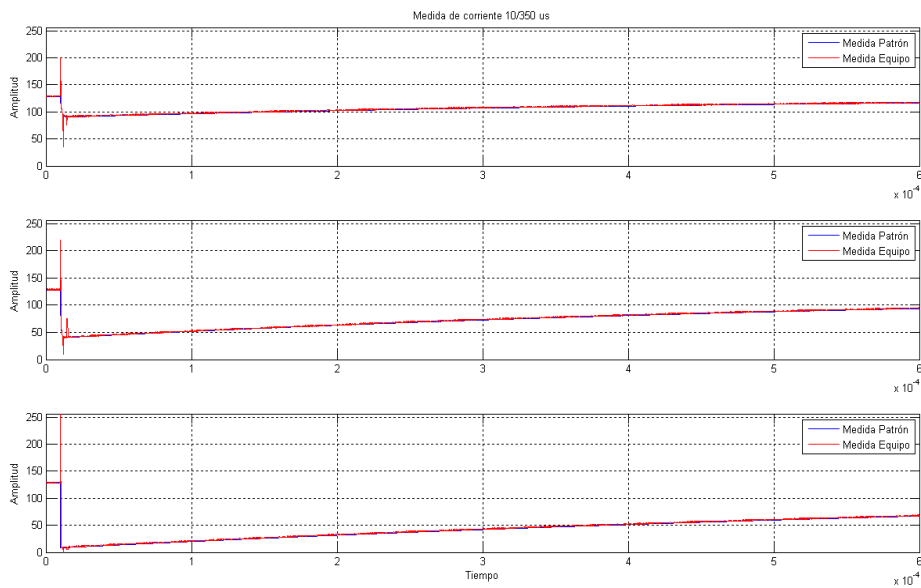


Figura 4.11. Calibración de la medida de corriente impulsional.

Una vez realizada la validación de los sensores y de la medida en laboratorio, se instaló el equipo, monitorizando el sistema de protección contra el rayo en la sede de la empresa Aplicaciones Tecnológicas S.A. en el Parque Tecnológico de Paterna, Valencia (Ver figura 4.12).



Figura 4.12. Primer prototipo instalado en entorno real (Aplicaciones Tecnológicas S.A.)

Con el primer prototipo en una instalación real, se avanzó en la industrialización del equipo, reduciendo el tamaño y consumo mediante un circuito de diseño propio. Con esta versión más avanzada del equipo, se intentó reproducir la secuencia de eventos que tienen lugar en una tormenta para validar la estrategia de adquisición. Para ello se implementó el siguiente montaje:

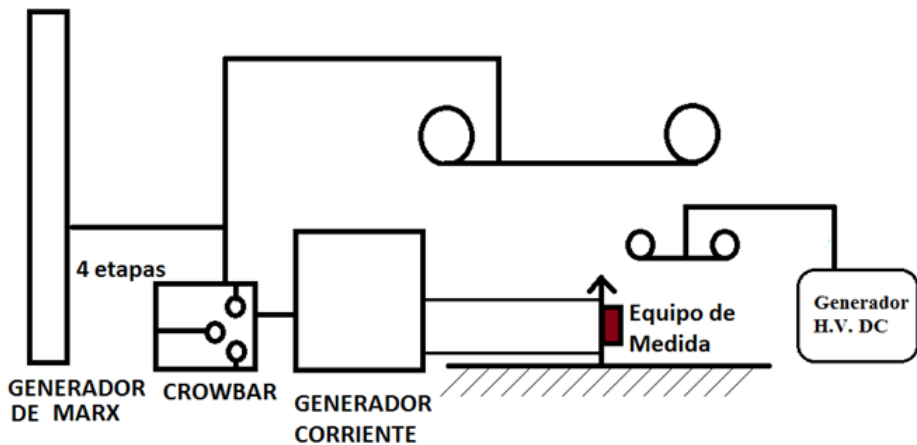


Figura 4.13. Montaje para la evaluación de la estrategia de adquisición.



Figura 4.14. Prototipo empleado para la validación de la estrategia de adquisición.

El campo electrostático se generó con un electrodo plano conectado a un generador de alta tensión DC ajustable. Posteriormente, para simular la aproximación de un *leader* y el posterior impacto de un rayo se utilizó una señal de tensión impulsional de unos 200kV (100kV/m), que se empleó como *trigger* del propio generador de corriente, esta señal se aplicó sobre un electrodo más grande simulando el campo eléctrico del *leader* descendente que precede al paso de corriente, generado en este caso, por el generador de corriente.

En la figura 4.15 se pueden ver ejemplos de señales de corriente y de campo eléctrico impulsional adquiridas por el equipo desarrollado, y comparadas con las señales ofrecidas por equipos calibrados del laboratorio.

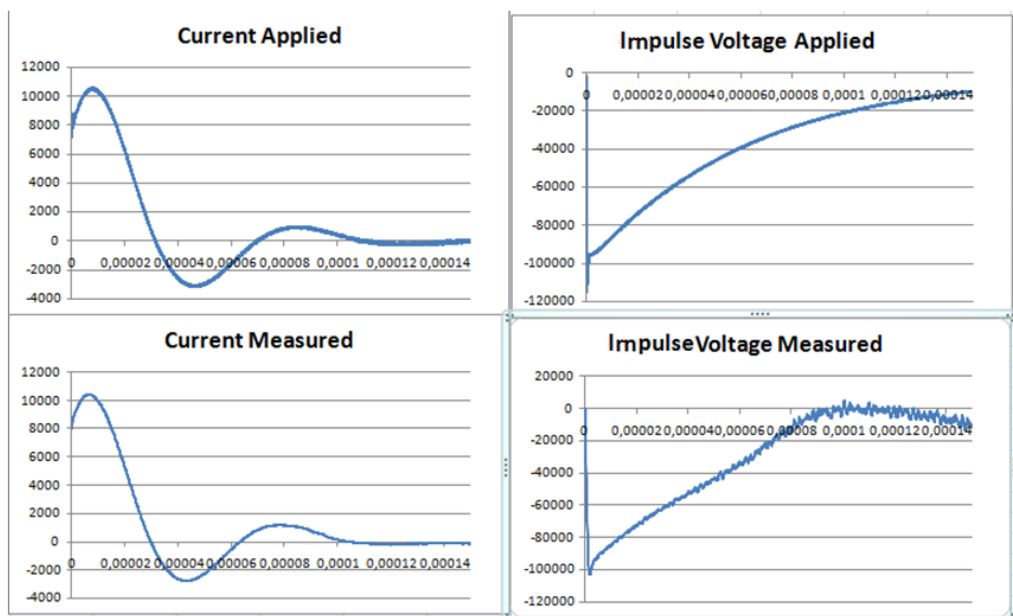


Figura 4.15. Resultado de medida de campo eléctrico impulsional e impulso de corriente 8/20 μ s.

En el **Artículo 2**, además de describir el desarrollo de un equipo individual, también se plantea la creación de una red distribuida de medida basada en un conjunto de nodos identificados individualmente, que envían información a un único servidor donde los datos son almacenados (figura 4.16).

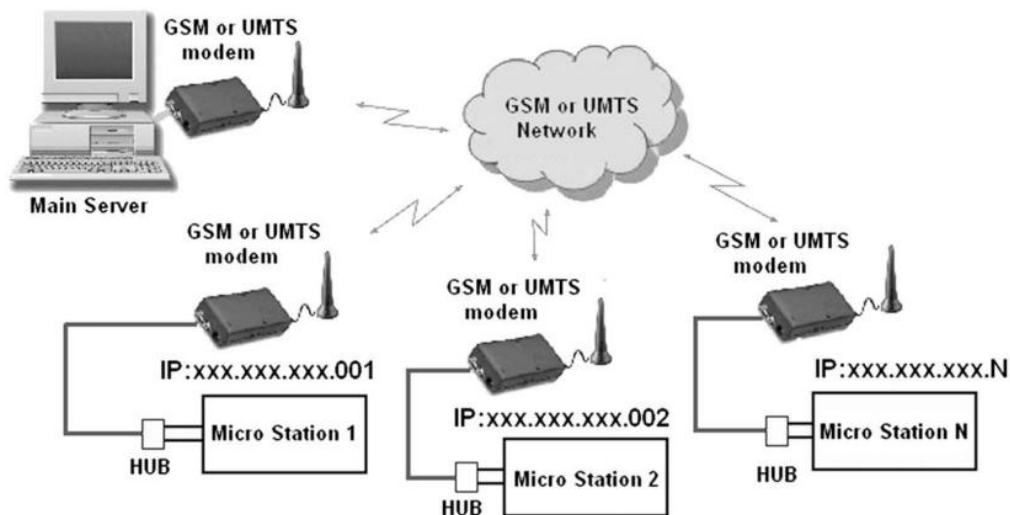


Figura 4.16. Planteamiento de la red distribuida de estaciones de medida.

La comunicación puede basarse en una red GSM o UMTS, debido a que el equipo puede emplazarse en ubicaciones donde no esté disponible el acceso a una red cableada. Por otro lado, aunque hubiese acceso a red, por cuestiones de aislamiento, resulta más seguro para la red trabajar en un entorno inalámbrico.

Aunque el primer prototipo ha sido instalado en campo real, no ha podido medir el impacto directo de ningún rayo, no obstante, sí que se han realizado medidas de descargas corona y campo eléctrico impulsional en condiciones de tormenta, lo cual nos ha permitido realizar algunos ajustes y consideraciones adicionales. Por ejemplo, en las primeras adquisiciones se pudo comprobar que el nivel de *trigger* estaba demasiado bajo, lo que generaba un número de activaciones innecesarias.

También se pudo determinar que el conductor empleado para conectar el sensor con el equipo de adquisición, era demasiado largo, provocando que la señal adquirida tuviese demasiado ruido acoplado y oscilaciones no atribuibles a la señal de interés. Tras realizar una serie de ajustes, se redujo el número de falsas detecciones así como la relación ruido/ señal en la medida. En la figura 4.17 se puede ver una señal que se corresponde con la medida de una descarga corona y del campo eléctrico impulsional.

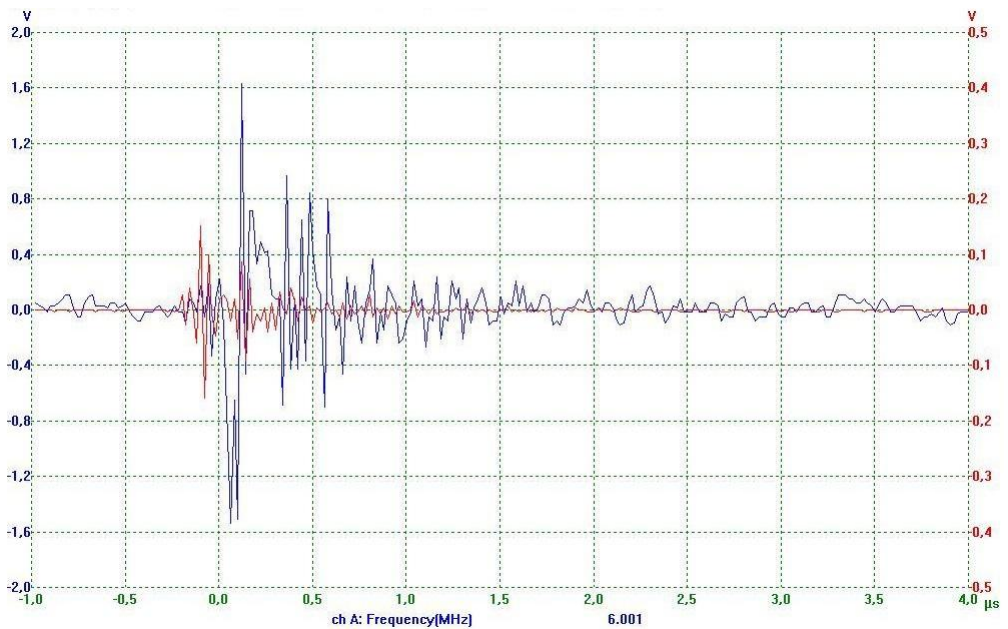


Figura 4.17. Ejemplo de medida de descarga corona (azul) y campo eléctrico (roja) del prototipo instalado.

Actualmente, se está trabajando en el desarrollo de una versión más industrializada del producto que incide en la reducción de tamaño, coste y consumo con respecto a la primera versión, para lo que se ha recurrido a una circuitería de diseño propio.



Figura 4.18. Circuitería de diseño propio para industrialización.

4.3. Evaluación de materiales y métodos mediante estudios de campo

Además de la medida de parámetros del rayo, por medio de estudios de campo también se pueden evaluar los materiales que constituyen una instalación, así como los métodos empleados para su correcta instalación y mantenimiento.

Actualmente, los elementos empleados en las instalaciones de protección contra el rayo, están sujetos al cumplimiento de normativas prescriptivas que determinan una serie de parámetros, condiciones o ensayos que se deben de cumplir. No obstante, una vez realizada la instalación, no existe ningún método establecido para determinar el nivel de eficacia que los elementos deben de mantener durante su vida útil, en algunos casos, se establecen protocolos de revisión periódica con los que detectar anomalías, pero estos protocolos no ofrecen información sobre las prestaciones de la instalación, ni sobre si existe un índice de fallos por encima de lo determinado por el modelo de protección empleado. Este punto es especialmente crítico en los sistemas de intercepción, ya que aún a día de hoy, el concepto de “área protegida” o “nivel de protección”, en los que se basa el diseño de la instalación, siguen siendo puntos sujetos a debate y que dependen del modelo de protección empleado.

A día de hoy, desde CENELEC se ha lanzado un nuevo proyecto de normativa europea con la referencia prEN50622 [85] cuya finalidad es la evaluación de los sistemas de protección contra el rayo desde un punto de vista de su eficacia, una vez han sido instalados en entornos reales, independientemente del modelo de protección empleado o del tipo de terminal interceptor. Evidentemente este planteamiento requiere de un estudio fundamentado antes de su aplicación.

En el **Artículo 3C**, se plantean una serie de aspectos a considerar para llevar a cabo la tarea, como pudieran ser: la cantidad de instalaciones necesarias para la monitorización, el método de evaluación, los diferentes parámetros de interés (figura 4.19), tratamiento de los datos y tipos de herramientas con las que implementar el sistema de monitorización.

PARAMETER	Sensor	Advantages	Disadvantages
Number of Intercepted strikes	Current transformer	Passive system	Not able to measure current
	Antenna	Cost-effective	Requires power supply
	Rogowsky coil	Passive system	Needs posterior signal conditioning
	Hall effect sensor	Accuracy	Requires power supply, Low bandwidth
Number of flashovers	Impulse electric field	Easy delimit monitored area	Discarding interferences
	RF antenna	Easy design	Not easy delimit monitored area
	Cameras	Identify the point of impact	High cost
Peak current of Intercepted strikes	Antenna	Cost-effective	Requires power supply
	Rogowsky coil	Passive system	Low level and differentiated signal
	Hall effect sensor	Accuracy	Requires power supply, Low bandwidth
Peak current of flashovers	Antenna	Cost-effective	Requires power supply, Accuracy
	Impulse electric field	Easy delimit monitored area	Discarding interferences, Accuracy

Figura 4.19. Parámetros útiles y sensores para la evaluación de un sistema de protección [Artículo 3C].

Realizando un estudio intensivo sobre diversas instalaciones, se podría determinar la eficacia tanto de los modelos de protección en diferentes entornos y situaciones, como de los elementos que constituyen el sistema de protección contra el rayo. Al evaluar la eficiencia desde un punto de vista empírico, se puede fundamentar gran parte del debate que existe hoy en día en torno a diversos puntos sobre la eficiencia real de los sistemas de protección contra el rayo.

4.4. Conclusiones parciales

Los estudios de campo son una parte fundamental de la protección contra el rayo, permiten la evaluación de los sistemas de protección en condiciones reales, así como la comparación o evaluación de la eficiencia entre sistemas, una mejor comprensión de la física del rayo o la obtención de estadísticas sobre los parámetros, lo cual es una de las bases de los modelos de protección.

A día de hoy, aún a pesar de contar con modelos de protección de probada efectividad, resulta de evidente interés la ampliación de estadísticas correlacionadas con las particularidades de un entorno, la obtención de datos que permitan una mejor comprensión de la física del rayo o la evaluación continua de los sistemas de protección contra el rayo.

En este capítulo, se ha descrito un nuevo concepto en la medida de parámetros del rayo mediante la creación de redes que permitan la multiplicación de puntos de medida, lo que permitiría la obtención de estadísticas fiables en un tiempo asumible, con la ventaja de poder contemplar las particularidades de multitud de entornos. Esto podría ser de utilidad en la validación o complementación de los modelos de protección actuales.

Se ha implementado una primera versión de la herramienta basada en la dinámica de la tormenta con la que validar el diseño, los sensores y la estrategia de adquisición. Esta primera versión ha sido ensayada satisfactoriamente en laboratorio y se ha instalado en un emplazamiento real.

En lo que respecta a la evaluación de la eficiencia de los sistemas de protección contra el rayo, se menciona el proyecto de normativa prEN50622 presentado por CENELEC, y actualmente en proceso de valoración. En esta parte, el autor menciona el **Artículo 3C**, una aportación complementaria en la que se detallan una serie de métodos y herramientas que podrían emplearse para la realización de la monitorización propuesta.

Referencias del capítulo 4

Artículo 2→D. Ruiz *et al.* "A new concept in lightning parameters measurement". Journal of Electrostatics. Vol 67, Issues 2+3 May 2009, pp. 496-500.

Artículo 3C→V.Pomar, S.Polo, D. Ruiz "Instruments and methods for field monitoring of lightning protection systems" 2nd International Lightning Protection Symposium. Mar 2014. Chamonix, France.

- [62] B. Franklin, "How to secure houses, from lightning," in Poor Richard's Almanac; reproduced in Benjamin Franklin's Experiments, I. B. Cohen, Ed. Cambridge, MA: Harvard Univ. Press, 1941.
- [63] M.A. Uman. "Comparison of natural lightning and the long laboratory spark with application to lightning testing". Final Report. Aug. 1970.
- [64] J.R Dwyer *et al.* "X-ray bursts associated with leader steps in cloud-to-ground lightning. Geophys.Res.Lett.32,L01803,doi:10.1029/2004GL021782. 2005.
- [65] K.Berger, R.B. Anderson and H. Kroninger, "Parameters of Lightning Flashes", Electra, No. 41, pp. 23-37, July 1975.
- [66] R.B. Anderson and A.J. Eriksson, "Lightning Parameters for Engineering Applications", Electra, No. 69, pp. 65-102, Mar 1980.
- [67] C.B. Moore *et al.* "The case for using blunt-tipped lightning rods as strike receptors" Journal of applied meteorology. Vol.42. Feb. 2003.
- [68] Comité Técnico AEN/CTN 207. "UNE-EN 61643-11: 2005. Pararrayos de baja tensión. Parte 11: Pararrayos conectados a sistemas eléctricos de baja tensión. Requisitos y ensayos".
- [69] Technical committee AEN/CTN 20-21. "CEI 1024-1:1990. Protection of structures against lightning. Part 1: General Principles". 1990
- [70] Technical committee AEN/CTN 20-21. "IEC 62305-1:2006. Protection against lightning. Part 1: General Principles".
- [71] G. Diendorfer, "Lightning Location System (LLS)", IX International Symposium on Lightning Protection. 26th – 30th Nov. 2007. Foz do Iguaçu, Brazil.
- [72] G. Diendorfer *et al.* "Lightning current measurement in Austria – Experimental setup and first results, 25th ICLP, Rhodes, Sept. 2000.
- [73] R. S. Sigmond, "Simple passive electrical filter for discharge diagnostics", 11th Symp. on Elementary Processes and Chem. Reactions in Low Temp. Plasma, Bratislava, pp. 256-259, 1998.
- [74] H.Torres *et al.* "Design, construction and calibration of three devices to measure directly lightning parameters", Proceedings IEE, 10th ISH, London, UK, Sep. 1999.
- [75] H. H.Torres *et al.* "Experimental station to measure directly lightning parameters in tropical zone", 11th International Symposium on High Voltage Engineering, 1999. (Conf. Publ. No. 467), Vol.2.

-
- [76] J. Takami, S. Okabe. "Observational Results of Lightning Current on Transmission Towers". IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 22, n^o. 1, Jan 2007. pp.547-556.
- [77] M.A. Uman, et. al. "Triggered-Lightning Experiments at Camp Blanding, Florida (1993-1995)", T.IEE Japan Vol. 117-B N^o 4, 1997.
- [78] V.A. Rakov, et. al. "Review of Triggered-Lightning Experiments at the ICLRT at Camp Blanding, Florida". IEEE Bologna Power Tech Conference, June 23-26 2003, Bologna, Italy.
- [79] R. Romero, "*Radio Nature.* ", Potters Bar, Radio Society of Great Britain, 2008.
- [80] Uman, M.A., D.K. McLain and E.P. Krider (1975), "The electromagnetic radiation from a finite antenna". Am. J. Phys. 43.
- [81] G. Diendorfer, W. Schulz and V.A. Rakov. "Lightning characteristics based on data from the Austrian Lightning Locating System". IEEE Trans. on electromagnetic compatibility, Vol. 40, N^o. 4, Nov. 1998.
- [82] G. Diendorfer. "Blitzstrommessung am Sender Gaisberg". Schriftenreihe der Forschungim Verbund, Band 89. Jun 2005.
- [83] P. Chowdhuri. "Parameters of Lightning Strokes and Their Effects on Power Systems". IEEE 2001.
- [84] C. Torralba, et. al, "Storm detection by static electric field measurements without mobile elements" 11th International Conference of Electrostatics, Valencia, Spain, 2009.
- [85] DRAFT prEN50622 "Lightning protection systems pure performance standard".

5. MODELOS DE PROTECCIÓN

En el anterior capítulo se ha realizado una revisión de la medida de parámetros del rayo en la naturaleza, se ha visto que las medidas son recogidas en estadísticas que arrojan información sobre los valores esperados de dichos parámetros en la naturaleza, al considerar ciertos porcentajes de ocurrencia, lo cual define los niveles de protección (LPL) en las normativas de protección contra el rayo. En este capítulo de la Tesis se abordan los modelos de protección contra el rayo, analizando sus fundamentos físicos, hipótesis y evaluando posibles puntos susceptibles de revisión o complementación.

Por definición, un modelo es una abstracción de la realidad, y como tal, implica una serie de simplificaciones físicas o numéricas. En el caso específico de los modelos de protección contra el rayo, los procesos físicos que los fundamentan parten de la formación del rayo y su evolución hacia tierra y, en algunos casos, dichos modelos se sustentan en el concepto de *final jump*, que determina la distancia a la que el *leader* descendente del rayo puede ser interceptado por el *leader* ascendente. Todos estos aspectos han sido muy estudiados, pero todavía existen muchas incógnitas ya que es un proceso muy complejo con multitud de variables de influencia distribuidas en el espacio de una forma no homogénea.

La carencia de fundamentación física unida a la complejidad práctica de conocer la función que gobierna la evolución espacial y temporal de cada variable, hace necesaria la simplificación del modelo a muchos niveles. Diferentes simplificaciones y presunciones han dado lugar a diferentes modelos de protección.

En la actualidad, los modelos de protección son empleados para realizar el diseño de las instalaciones de protección contra el rayo, cuyo principal propósito es el de ofrecer un punto preferente de impacto del rayo, de forma que la corriente circule por un conductor convenientemente dimensionado hasta el sistema de puesta a tierra, ofreciendo un camino controlado para el drenaje de la corriente.

Durante el diseño de un sistema de protección contra el rayo, el modelo de protección puede indicarnos varios aspectos importantes referentes a la instalación tales como:

- Número de terminales necesario para proteger la estructura.
- Localización de dichos terminales.
- Evaluación de las características de los terminales, por ejemplo, la altura.
- Optimización del diseño evaluando diferentes posibilidades.

5.1. Los modelos de protección contra el rayo en la actualidad

Actualmente, existen multitud de modelos de protección contra el rayo, los más clásicos apenas consideran aspectos físicos de la descarga, aunque su utilización práctica ha demostrado ser altamente eficaz durante más de un siglo de utilización. Otros modelos, como los electro-geométricos, consideran algunos aspectos eléctricos básicos del rayo, como la corriente y traducen ese parámetro en una distancia de interceptación, lo que permite visualizar su aplicación de una forma geométrica. Los modelos físicos contemplan en mayor medida la física de la descarga y evalúan parámetros adicionales, como el campo eléctrico, la densidad de carga en los *leaders*, aspectos dinámicos, etc. Por último, los modelos estocásticos simplifican gran parte de la física de la descarga, dándole más importancia al análisis probabilístico del fenómeno.

En la figura 5.1 se muestra una clasificación de algunos de los modelos de protección más conocidos.

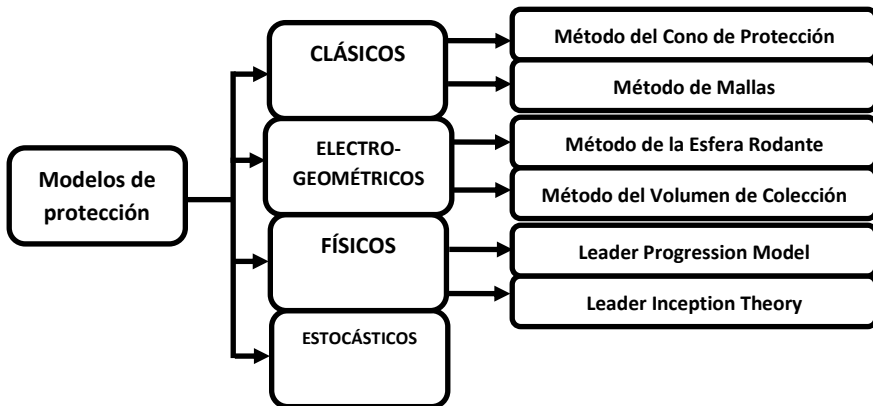


Figura 5.1. Clasificación de los modelos de protección contra el rayo más conocidos.

Actualmente son 3 los modelos de protección contra el rayo más empleados, debido a que existen normativas internacionales que regulan su utilización. Estos modelos presentan su aplicación práctica en los siguientes métodos: el método del ángulo de protección (PAM), el método de la esfera rodante (RSM) y el método de mallas (MM), cuya aplicación y prescripciones pueden encontrarse en [90][91][92][106]. La característica común de estos métodos es que son métodos estáticos, mientras que los modelos dinámicos (modelos físicos) no son considerados por las normativas, por lo que a pesar de contar con una mayor fundamentación, no cuentan con una validación empírica en instalaciones reales.

Este hecho se menciona en [110], donde se indica que los nuevos modelos desarrollados con mayor base física que sus predecesores, no han sido adoptados por las normativas internacionales, y que una gran parte de la protección contra el rayo se basa en técnicas empleadas tradicionalmente.

Para más información, en las referencias **Artículo 2C** y **Artículo 4C**, se presenta una revisión crítica de los diferentes modelos normalizados de protección contra el rayo.

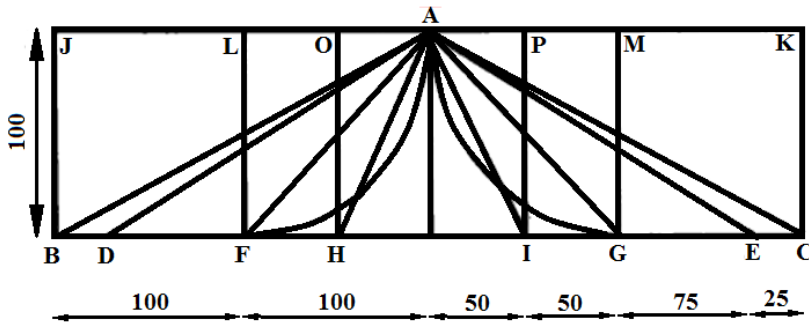
5.1.1. El método del ángulo de protección (P.A.M.)

Inicialmente, se consideró que un pararrayos protegía un área en forma cónica con el centro en la punta del terminal [107] y este modelo fue aplicado con éxito durante años. El auge de los pararrayos por América y Europa fue respaldado por su eficacia en la protección de estructuras [86][87], hasta el conocido incidente de Purfleet en 1777 [88] donde un rayo impactó en una fábrica de pólvora y, aunque no hubieron incidentes graves, se desató la controversia sobre la eficacia de las recomendaciones de B. Franklin.

Gay-Lussac sugirió, 46 años después, que la zona protegida por un pararrayos era un espacio cilíndrico circular cuyo radio era 2 veces la altura del pararrayos [89]. Este planteamiento fue el primero que presentó el concepto de “zona protegida” vinculándolo además a uno de los parámetros de la instalación, la altura del terminal.

Este modelo ha sufrido una gran cantidad de revisiones a lo largo de la historia. En 1840, basándose en observaciones, Sir William Snow Harris propuso la utilización del cono de protección aplicado a las embarcaciones. En 1880 Preece, tras una serie de experimentos para medir el campo eléctrico cerca de un terminal vertical aéreo, concluyó que dicho terminal aéreo ofrecía una zona de protección cónica cuya altura es la longitud del terminal y cuya base es un círculo de radio igual a la altura del mismo terminal. Este modelo con relación 1:1 fue adoptado durante varios años hasta que en 1892, Sir Oliver Lodge publicó una revisión de los conceptos de las zonas de protección propuestas hasta la fecha, en la que se encontró una variación muy amplia: desde los 90º hasta los 30º.

Como resultado de las observaciones realizadas en ese tiempo, el cono de protección fue modificado con ángulos desde 45 hasta 64 grados. En la figura 5.2 se puede ver la evolución de los ángulos del cono de protección [108].



JBCK, cylinder, Gay Lussac 1823; BAC, cone, DeFonville 1874; DAE, cone, Paris Commision 1875; LFGM, cylinder, Chapman 1875; FAG, cone, Adams 1881; OHIP, cylinder, hypothesis; FAG, special cone, Preece 1881; HAI, cone, Melsens.

Figura 5.2. Evolución de las zonas de protección a lo largo de la historia [108].

En la actualidad, el método del ángulo de protección (PAM) recuerda a este método, que atribuía un área protegida por el pararrayos en forma de cono, aunque el ángulo aplicado, lo determina una equivalencia entre áreas de zonas protegidas por este método y por el método de la esfera rodante, como se muestra en la figura 5.3. Esta aproximación carece de cualquier sentido físico, no obstante, es una práctica extendida, de la misma manera que también es habitual emplear, por simplicidad, un ángulo de 45°.

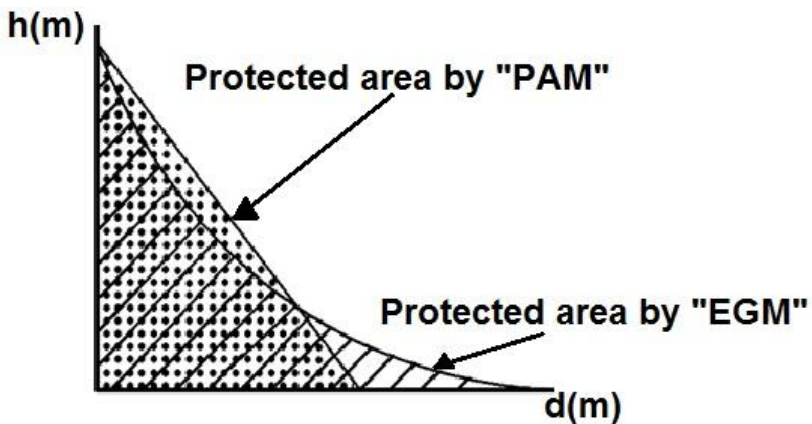


Figura 5.3. Equivalencia de áreas aplicada en el método del ángulo de protección [109].

La norma de referencia en España es la UNE EN 62305 [90][91][92] donde se indica que diferentes niveles de protección implican diferentes ángulos del cono, aunque no todas las normativas emplean el mismo criterio.

En base a esta simplificación, en la norma de referencia [90], se definen los ángulos en función de la altura del terminal y del nivel de protección (que hace referencia a la probabilidad de captar rayos en función de la amplitud del primer pico de corriente), como se puede ver en la figura 5.4.

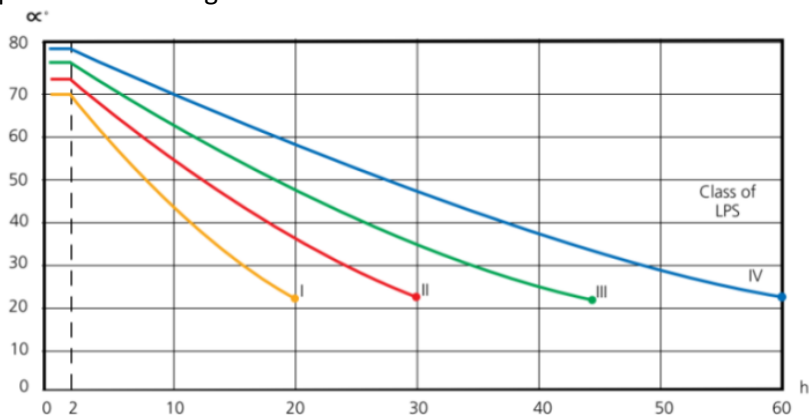


Figura 5.4. Ángulo de protección en función de la altura para diferentes niveles de protección [91].

Desde su inicio, este método ha sido ampliamente criticado por su falta de fundamentación física [110][114][115][116], no obstante sigue siendo un método muy utilizado debido a la simplicidad de su aplicación, aunque por otro lado, sus limitaciones imponen que sea habitual emplearlo junto con algún otro método de protección.

Una de las limitaciones del método es que no se tiene en cuenta el volumen de captura de la propia estructura, ni tampoco otros aspectos físicos de relevancia, como la geometría o materiales de los elementos en la zona a proteger.

El principal de los problemas asociado a este método, es que se para objetos cercanos al pararrayos se incurren en ángulos de protección muy optimistas, mientras que para los objetos más lejanos, los ángulos quedan muchos más restringidos [114].

Además, el modelo presenta problemas en su aplicación sobre superficies planas, como se indica en [110], lo que hace que en estos casos, se suela complementar el diseño empleando el método de mallas.

5.1.2. El método de la esfera rodante (R.S.M.)

Este método se basa en el modelo electro-geométrico que parte de los trabajos previos de Whitehead, Hileman y Wagner en los que se fundamentó R.H. Lee para

proteger las líneas de distribución de energía eléctrica. Lee observó que los ángulos de protección se incrementaban de manera inversamente proporcional a la altura y, mediante un método iterativo observó que un arco de radio de 45.7m definía adecuadamente el límite del área de protección. En base a esto, R.H. Lee visualizó la aplicación del método haciendo rodar una esfera de 45,7m de diámetro por la zona a proteger, de forma que los objetos tocados por la esfera eran susceptibles de ser impactados por un rayo, mientras que los que la esfera no tocaba, quedaban protegidos [94].

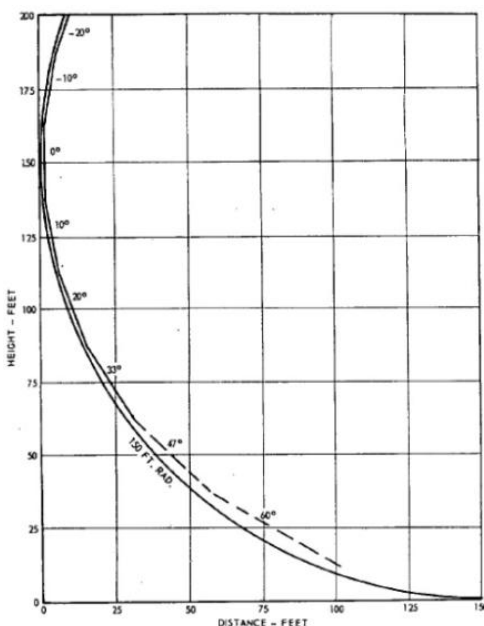


Figura 5.5. Extrapolación de los ángulos obtenidos por Lee a una esfera [95].

A principios de los 60 Hovarth [110] propuso el uso de una esfera ficticia para el emplazamiento de pararrayos, considerando que un rayo podría ser interceptado por cualquier punto de la estructura que fuese tocado por una esfera ficticia que rueda sobre ella. En ese momento no se tenía constancia del radio adecuado de la esfera, aunque se consideró que radios menores daban lugar a un mayor nivel de protección.

Desde el punto de vista de la evolución del rayo desde la nube hacia tierra, el método de la esfera rodante asume que el *leader* descendente avanza a “saltos” o “pasos” en lo que se denomina “*stepped leader*”. Estos saltos tienen una longitud promedio de unos 100m y un tiempo entre saltos de unos 30-50 μ s. El último salto, antes de conectar con el *leader* ascendente, se conoce como *final jump* y puede ocurrir en cualquier dirección.

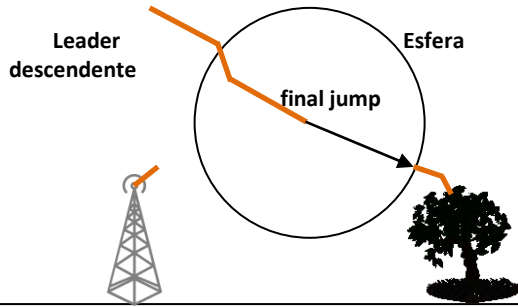


Figura 5.6. Concepto de Final Jump ilustrado.

Este planteamiento parte del hecho de que, cuando en un objeto se alcanza un campo eléctrico suficiente, puede dar comienzo un *leader* ascendente que conecte con el *leader* descendente. El campo eléctrico en la superficie de cualquier objeto, en el momento de la caída de un rayo, depende de la distribución de la carga en el canal del *leader* descendente, y la carga está relacionada con la corriente según la expresión 5.1.

$$I_{pf} = K \cdot Q^\alpha \quad (5.1)$$

Siendo K y α constantes.

A partir de la expresión 5.1 se puede establecer otra ecuación que relacione la distancia del *final jump* con el pico de corriente [112].

$$d(m) = A \cdot I(kA)^b \quad (5.2)$$

Siendo A y b constantes.

En la figura 5.7 se pueden ver los valores de A y b propuestos por varios autores, diferenciando si el punto de intercepción es tierra o un cable, no obstante, la expresión más utilizada para cálculos prácticos es la propuesta por Love [113]:

$$d(m) = 10 \cdot I(kA)^{0.65} \quad (5.3)$$

Expresiones	Distancia a tierra		Distancia a un cable	
	A	b	A	b
Wagner	14.2	0.32	14.2	0.32
Young	27	0.32	β^b	0.32
Armstrong	6	0.8	6.7	0.8
Brown	6.4	0.75	7.1	0.75
Anderson	6.4, 8 ó 10	0.65	8	0.65
IEEE 1243-1997	β^a	0.65	10	0.65
IEEE Std 998-1996				
Love	10.0	0.65	10.0	0.65
IEEE Working Group 1993	8.0	0.65	8.0	0.65
Whitehead	9.4	0.66	9.4	0.66
Suzuki	3.3	0.78	3.3	0.78
Darveniza	$2I + 30(1 - e^{-I/6.5})$			
a	$\beta = 3.6 + 1.7 \ln(43 - h) \quad h < 40$			
	$\beta = 5.5 \quad h \geq 40$			
b	$\beta = 12000 / (462 - h) \quad \text{para } \beta > 27.0$			

Figura 5.7. Parámetros A y b propuestos por diferentes autores [113].

En la práctica, para determinar el radio de la esfera ficticia (distancia del *final jump*), se emplea la fórmula (5.3). En la normativa UNE EN 62305-1 [91], se definen 4 niveles de protección en función de la amplitud de corriente mínima considerada, y basados en la probabilidad de ocurrencia de un rayo con una amplitud mayor o igual a un umbral, según los valores obtenidos por K.Berger [112]. Así, cada uno de los niveles define un radio de esfera ficticia, los niveles I, II, III y IV, tienen asociados esferas de 20, 30, 45 y 60m respectivamente.

Criterios de intercepción			Niveles de protección			
	Símbolo	Unidad	I	II	III	IV
Valor de cresta mínimo de la corriente	I	kA	3	5	10	16
Radio de la esfera rodante	r	m	20	30	45	60
Superiores a los valores mínimos definidos en la tabla 4			0,99	0,97	0,91	0,84

Figura 5.8. Parámetros definidos en UNE-EN 62305-1 para niveles de protección [91].

Como se ha visto en el segundo capítulo, la normativa de referencia también contempla la valoración objetiva de la necesidad de protección mediante un procedimiento de evaluación de riesgo para una determinada estructura en función de un conjunto de diferentes variables a considerar [92]. Seguidamente, este nivel de riesgo se compara con el riesgo tolerable y, si procede, hay que incluir la protección adecuada para volver a evaluar el nivel de riesgo, hasta que se encuentre por debajo del riesgo tolerable para la estructura, considerando si es necesario emplazar más pararrayos, reubicar los que ya se han incluido o modificar la altura de los mismos. En la figura 5.9 se puede ver el diseño de protección contra el rayo de una estructura realizado mediante una herramienta informática descrita en el **Artículo 5C**.

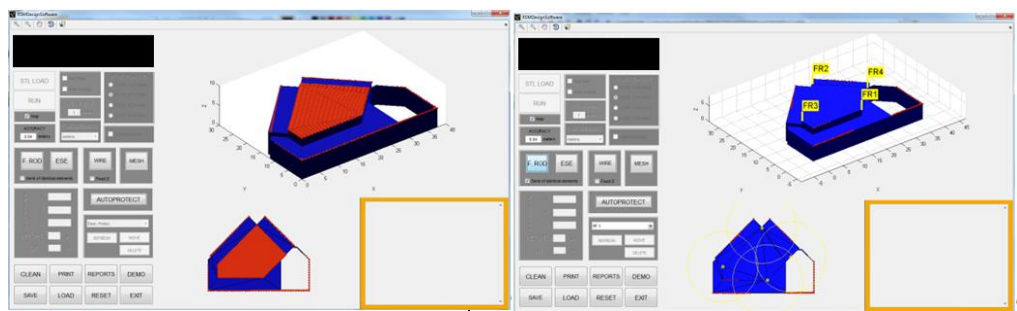


Figura 5.9. Herramienta informática para la realización automática de diseños de protección contra el rayo aplicando el RSM [Artículo 5C].

La principal limitación del método de la esfera rodante es que asigna la misma probabilidad de impacto a cualquier punto “tocado” por la esfera ficticia, ya que no se contempla la influencia del campo eléctrico en la iniciación del *leader* ascendente. Esto implica que para un determinado nivel de corriente, la distancia de interceptación es constante [111]. No obstante, la experiencia de campo indica que los puntos preferentes de impacto son las esquinas y cornisas [117]. Como ejemplo se expone, en la figura 5.10, el caso de una estructura protegida mediante el método de la esfera rodante aplicando un nivel de protección I ($r=20\text{m}$).

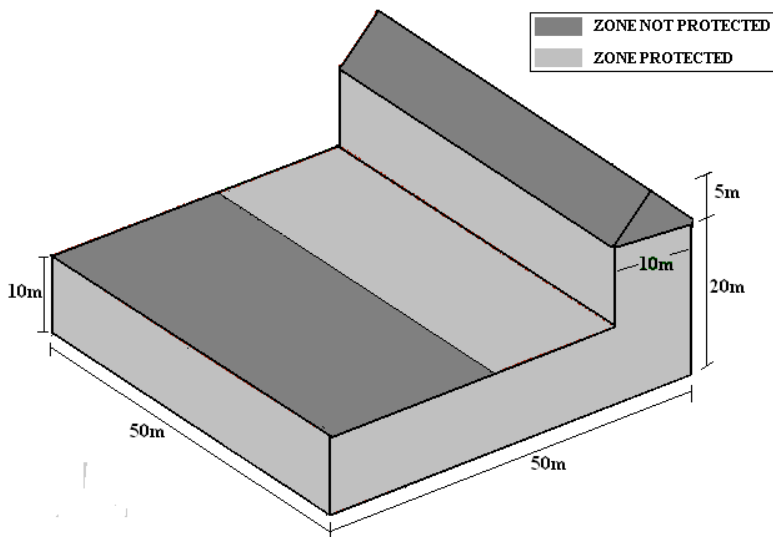


Figura 5.10. Protección de una estructura simple mediante el RSM [Artículo 2C].

Si se evalúa el campo eléctrico del escenario cuando se aplica un campo eléctrico ambiental de 500kV/m (campo eléctrico umbral para que la emisión de descargas corona de lugar a un *leader* ascendente auto-sostenido), se puede determinar en qué puntos se excede el campo eléctrico local de 3MV/m (Campo eléctrico necesario para

la aparición de las primeras descargas corona). Es decir, se pueden identificar los puntos en los cuales puede darse la aparición de descargas corona que degenerarían en un *leader* ascendente capaz de interceptar un rayo.

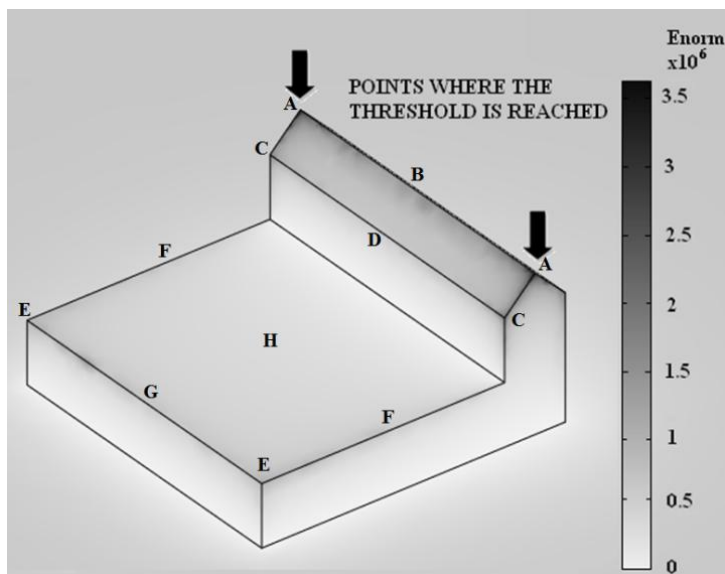


Figura 5.11. Puntos donde se alcanza mayor probabilidad de impacto [Artículo 2C].

Otro punto cuestionable en la aplicación práctica del RSM es la relación empírica que asocia el pico de corriente del rayo con la distancia de interceptación. Además, el pico de corriente empleado por las normativas, y que es un parámetro estadístico, se obtiene de los datos publicados por CIGRE en 1975 [112], los cuales parten de los experimentos realizados por K.Berger.

Estas medidas fueron realizadas monitorizando dos estructuras ubicadas en una montaña y, aunque se sabe que la corriente promedio de los rayos ocurridos en ese tipo de emplazamientos es más elevada que en las planicies, en la actualidad estas estadísticas no han sido corregidas con los nuevos datos existentes adquiridos en diferentes estudios de campo.

No obstante, hoy día existen muchos más datos, entre los cuales se encuentran los obtenidos por las redes de detección, y estos nuevos datos indican que el número de rayos que no alcanzan cierto valor de amplitud es mayor que lo considerado inicialmente. Este punto es común a los diferentes modelos de protección normalizados, ya que son la distribución de los valores de los datos los que definen la eficiencia esperada de los niveles de protección.

En la figura 5.12, se puede ver la comparación entre la distribución de probabilidad empleada actualmente en las normativas (CIGRE) y la ofrecida por los datos de la red de localización austriaca (ALDIS). Esto implica que los datos empleados actualmente no consideran en una medida adecuada los rayos de baja magnitud.

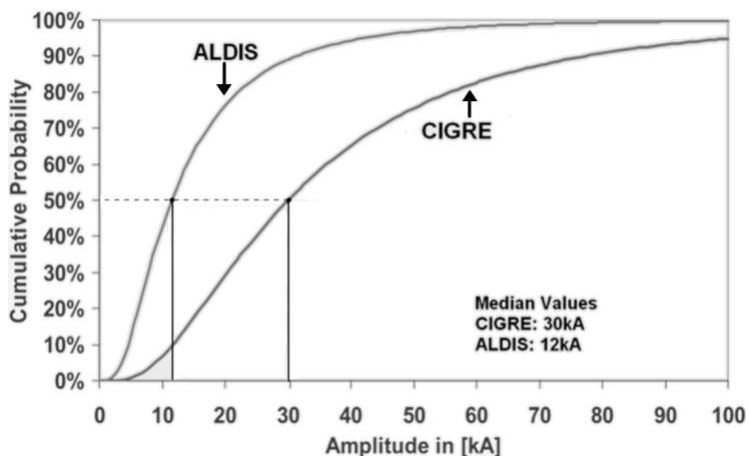


Figura 5.12. Comparación entre los datos de CIGRE y los de ALDIS [118].

5.1.3. El método de mallas (M.M.)

Este método fue desarrollado por J.C. Maxwell y consiste en ubicar conductores directamente sobre la estructura a proteger formando una malla de dimensiones preestablecidas. Es sabido que este método cuenta con escasa fundamentación teórica, pero multitud de instalaciones y más de 100 años en su aplicación avalan su efectividad [110].

El método de Mallas se basa en el concepto de Jaula de Faraday, el cual indica que el campo eléctrico en el interior de un conductor es siempre nulo (figura 5.13).

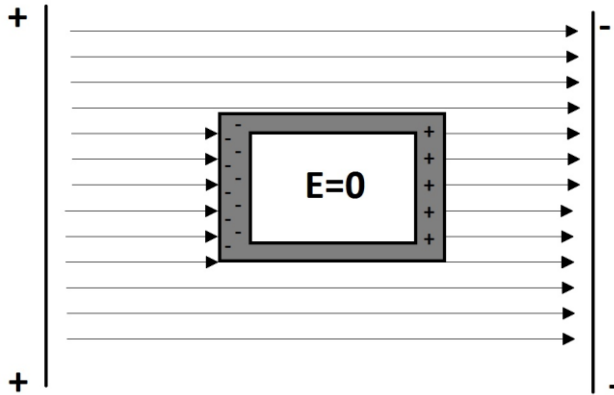


Figura 5.13. Ilustración simplificada de una Jaula de Faraday.

No obstante, su extrapolación directa a la protección contra el rayo resulta imposible ya que no se podría implementar el recubrimiento completo de una estructura, por lo que, en su aplicación, se recurre al emplazamiento de conductores unidos entre sí, formando una malla con una separación determinada, quedando convenientemente equipotencializados y puestos a tierra sobre la superficie expuesta, como se muestra en la figura 5.14. La normativa de referencia en España es la UNE EN 62305 [90][91][92].

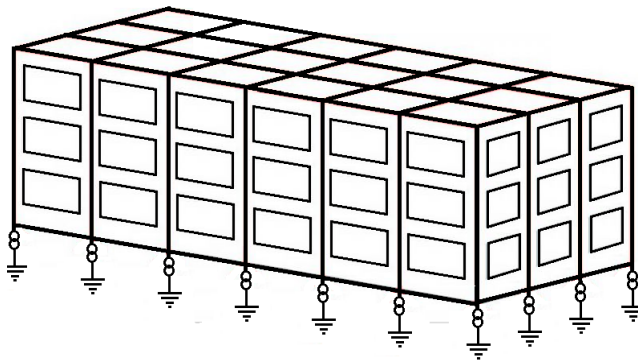


Figura 5.14. Aplicación del método de mallas [90].

En [92] se indican los requerimientos necesarios para una instalación adecuada, algunos son los siguientes:

- Hay que proveer a la instalación de varios caminos paralelos para que la corriente se distribuya adecuadamente.
- El camino hasta el sistema de puesta a tierra debe ser lo más corto y directo posible.

- Hay que conectar la malla a las partes de la estructura puestas a tierra si la distancia entre ellas es menor que la distancia de separación definida en la normativa.
- Los conductores deben fijarse cada metro, y se recomiendan juntas de expansión cada 20 metros.
- La impedancia del sistema de tierra debe ser inferior a 10Ω y los electrodos de tierra deben enterrarse al menos 0,5m.
- La separación de los conductores en función del nivel de protección, según se muestra en la siguiente tabla:

Nivel de Protección	Separación entre Conductores
I	10m
II	10m
III	15m
IV	20m

En la práctica, este tipo de protección se encuentra con multitud de impedimentos técnicos, estéticos y económicos frente a otras opciones de protección contra el rayo, no obstante, es un método muy empleado para proteger superficies planas.

Este método también ha sido objeto de diversas críticas, algunas de las cuales se indican en [108], donde se observa que la malla no suele actuar como terminal de intercepción, sino como un colector de corriente.

Otra crítica se basa en la necesidad de elevar la malla para evitar la intrusión del rayo en el área protegida. Esta crítica se respalda mediante la aplicación del método de la esfera rodante a un edificio protegido mediante mallas, tal como se puede ver en la figura 5.15, existen zonas protegidas según el método de mallas que resultan expuestas según el método de la esfera rodante.

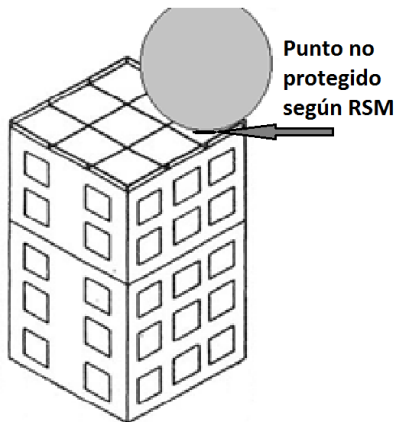


Figura 5.15. Incompatibilidad entre el método de mallas y el RSM.

En [110] se indica que la efectividad de este método puede deberse a una diferencia en las conductividades de los elementos metálicos que forman la malla y los materiales aislantes o malos conductores propios de la estructura, lo cual supone serios límites en la aplicación de este método en estructuras metálicas, además hay ciertas estructuras donde su aplicación es prácticamente imposible, como por ejemplo, las torres de comunicaciones.

En la práctica, se confía en los componentes naturales del edificio para efectuar la distribución de corriente, como por ejemplo la estructura metálica del hormigón armado, por lo que la protección contra el rayo depende de elementos que están fuera del control del diseñador.

En algunos países (como España) no está permitido el uso del hormigón armado como parte del sistema de protección contra el rayo, además, la normativa sobre hormigón armado no incluye la necesidad que exista continuidad eléctrica.

5.1.4. Otros modelos de protección

Como se ha comentado anteriormente, además de los modelos estáticos, contemplados por las normativas, existen otros modelos que vamos a describir brevemente a continuación:

5.1.4.1. El método del volumen de colección

Este modelo fue propuesto por Ericksson [96] y se fundamenta en la hipótesis de que la distancia de ruptura (*striking distance*) depende de:

- La corriente máxima de pico, o la carga del *leader* descendente.
- La Intensificación del campo eléctrico

Aunque este modelo fue postulado por Ericksson, Golde [93] fue el primero en demostrar que la altura de la estructura influía en el radio de protección del terminal, según la relación $R=2H$.

Este método introduce la variable temporal, la cual se tiene en cuenta a través del ratio de velocidad del *leader* ascendente y descendente expresado como $K_v=V_1/V_2$, lo que conduce a un volumen de colección parabólico, como se puede ver en el ejemplo de la figura 5.16.

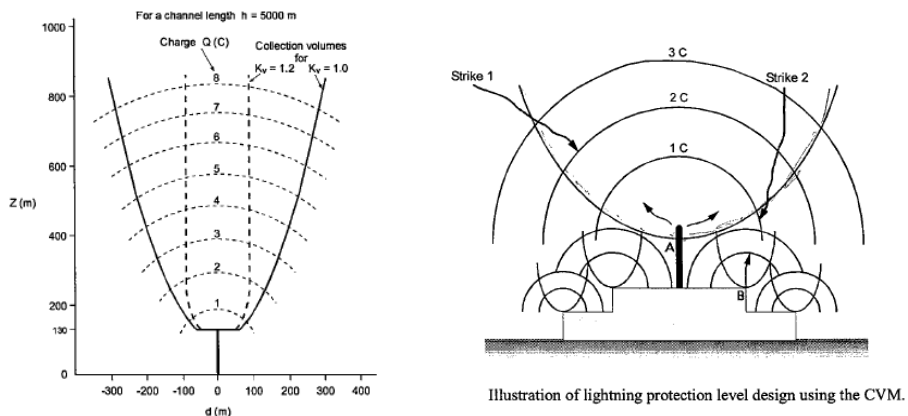


Figura 5.16. Método del volumen de colección [96].

5.1.4.2. Leader progression model:

Este modelo desarrollado por L.Dellera y E.Garbagnati simula la dinámica del *leader* descendente y ascendente en función de los cambios de la configuración del campo eléctrico durante la propagación del *leader* [97][98][99]. El modelo permite simular estructuras situadas en condiciones orográficas diferentes (llanos, valles, montañas, proximidad de otras estructuras, etc...).

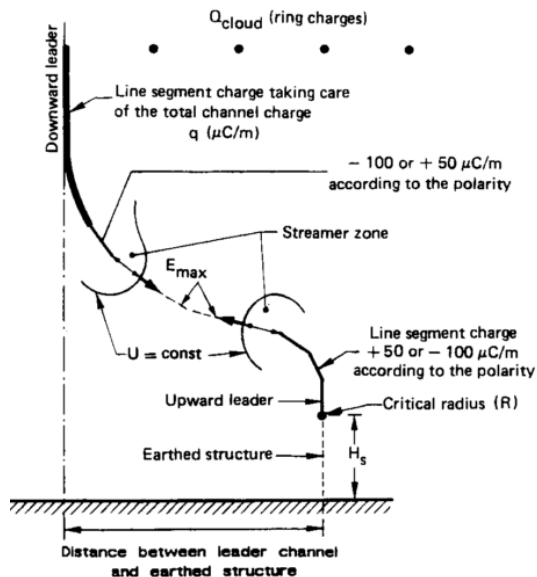


Figura 5.17. Ilustración del Leader Progression Model [97].

5.1.4.3. Leader inception model:

El *Leader Inception Model* fue propuesto por F.Rizk [100][101][102][103] y se basa en el principio básico de que, un *leader* positivo continuo comienza desde una zona ionizada por el tallo de un *streamer* (*stem-streamer*), en las proximidades de un electrodo, cuando el campo aplicado supera al campo opuesto debido a la carga espacial Q_0 del valor crítico de campo. De esta forma, se evalúa el voltaje en diferentes puntos para determinar si existe suficiente campo eléctrico como generar la aparición de descargas corona, y mantener la propagación de un *streamer*. Se puede encontrar más información sobre el proceso de descarga en el capítulo 2 de la presente Tesis.

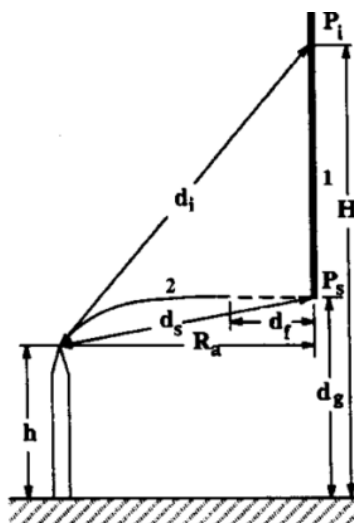


Figura 5.18. Ilustración del Leader Inception Model [101].

5.1.4.4. Modelos estocásticos:

Existen otros modelos llamados estocásticos, que se basan en el fenómeno del *pre-breakdown* dieléctrico [104][105]. La característica común de los modelos estocásticos es que la propagación del canal está gobernada por el campo eléctrico local, que es calculado resolviendo ecuaciones de Laplace-Poisson.

En estos modelos, la dirección de propagación del *leader* de un punto P a otro P' se toma en base a una función de probabilidad que depende del campo eléctrico umbral. Seguidamente, mediante una simulación iterativa, se puede determinar el área protegida por un terminal.

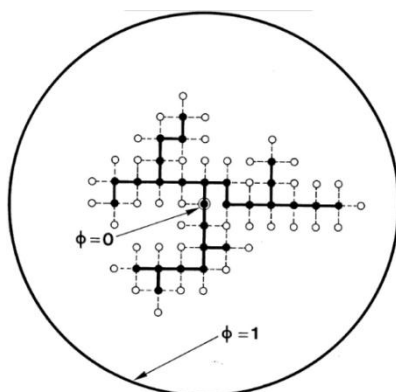


Figura 5.19. Ilustración de la progresión de un arco eléctrico 2D según un modelo estocástico [105].

5.2. Consideraciones electrostáticas aplicables a los modelos de protección basados en la intercepción del rayo

Como ya se ha comentado anteriormente, los métodos empleados en las normativas parten de simplificaciones e hipótesis impuestas, en parte, por la ausencia de fundamentación en muchos puntos de la física del rayo y, aunque existen modelos más actuales con una base física mayor que los empleados en las normativas, estos no han sido incluidos en ellas [110].

Es por ello, por lo que las aportaciones físicas que más fácilmente pueden ser aplicadas a las instalaciones de protección contra el rayo, son las que van encaminadas a la complementación de los modelos normalizados mediante métodos compatibles, que aporten información adicional enfocada a la optimización de la protección. De esta forma, su aplicación no requiere de la evaluación por parte de un comité normalizador, ya que el diseño resultante seguirá siendo conforme al modelo normalizado.

En esta línea, se podría plantear la evaluación de parámetros que pudieran ser relevantes en el proceso de formación y propagación del arco eléctrico, y que no estuviesen contemplados inicialmente por el modelo normalizado (p.ej. la influencia de los materiales de la estructura a proteger, composición del aire y condiciones atmosféricas, aspectos dinámicos, orografía del terreno, etc...).

Un parámetro que puede presentar especial interés, es el factor de intensificación del campo eléctrico, ya que tiene influencia en que un punto determinado emita descargas corona, precursoras del *leader* ascendente, o no lo haga (ver ejemplo de la figura 5.11).

En el **Artículo 3**, el autor evalúa la influencia de los elementos de un escenario bidimensional en el cálculo del factor de intensificación del campo eléctrico y, mediante un algoritmo, se estima la probabilidad de impacto de un rayo como una función del nivel de protección y del valor de intensificación de campo eléctrico en el resto de puntos considerados.

Existen trabajos previos que contemplan la aplicación del factor de intensificación del campo eléctrico aplicada a la protección contra el rayo [119], no obstante, el enfoque presentado en el **Artículo 3** contempla, en primer lugar, la separación del efecto del entorno en el valor del factor de intensificación del campo eléctrico, ya que se incluye un nuevo factor que es calculado mediante un procedimiento de *fitting* por regresión lineal a partir de un conjunto de datos y, en segundo lugar, se realiza una estimación de cómo este factor afecta a la probabilidad de impacto en los diferentes puntos de la estructura.

En la figura 5.20 se puede ver una simulación por elementos finitos, donde se puede apreciar la distorsión de las líneas equipotenciales debido a la presencia de un objeto cercano a la estructura. Esta distorsión implica una modificación del valor del campo eléctrico en varios puntos de la estructura principal.

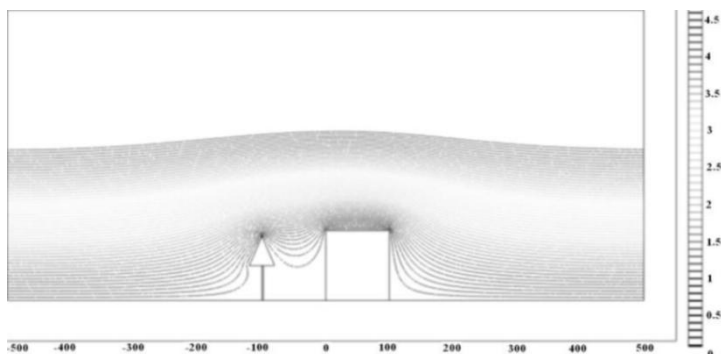


Figura 5.20. Un objeto en la cercanía de una estructura, modifica el patrón de líneas equipotenciales, así como el valor del campo eléctrico en los puntos considerados [Artículo 3].

Evidentemente, esta aproximación es electrostática y no considera ningún proceso dinámico relacionado con el rayo, no obstante, muestra un resultado consistente con las observaciones de campo: las esquinas y cornisas presentan un mayor “factor de intensificación del campo eléctrico”, hecho que coincide con una mayor probabilidad de impacto en estos puntos, lo cual no es tenido en cuenta cuando se aplica el método de la esfera rodante o del ángulo de protección. Algunos otros métodos no estandarizados, como el CVM, sí que consideran este parámetro [96].

El procedimiento descrito en el **Artículo 3** parte de un conjunto de simulaciones, realizadas mediante una herramienta para el análisis por elementos finitos (F.E.M.), con la que se calculó el campo eléctrico local en los lugares de interés de un escenario 2D (esquinas y zonas planas). Posteriormente, el factor de intensificación del campo eléctrico fue calculado como:

$$K_i = \frac{E_i}{E_s} \quad (5.4)$$

Donde: K_i : Factor de intensificación calculado
 E_i : Campo eléctrico calculado en la superficie del punto evaluado
 E_s : Campo eléctrico aplicado en el escenario

Se considera que el resultado de la simulación es un parámetro que tiene en cuenta la influencia de cualquier objeto adyacente, por lo que el resultado es, en realidad, un parámetro diferente al K_i clásico, el cual considera una única estructura aislada. Este nuevo parámetro K_t queda definido como:

$$K_t = K_i \cdot K_e \quad (5.5)$$

Donde: K_t : Factor de intensificación calculado
 K_i : Factor de intensificación clásico, debido a la estructura
 K_e : Factor de influencia del entorno

Debido a que cualquier nuevo elemento en el escenario, reduce el campo eléctrico en la estructura bajo estudio, el factor de influencia del entorno está acotado, evidentemente, entre 0 y 1.

En primer lugar, se procedió a obtener, mediante simulación, el valor del factor de intensificación del campo eléctrico clásico, es decir, considerando únicamente una estructura aislada, evaluando las esquinas y el centro de la estructura, como se puede ver en la figura 5.21.

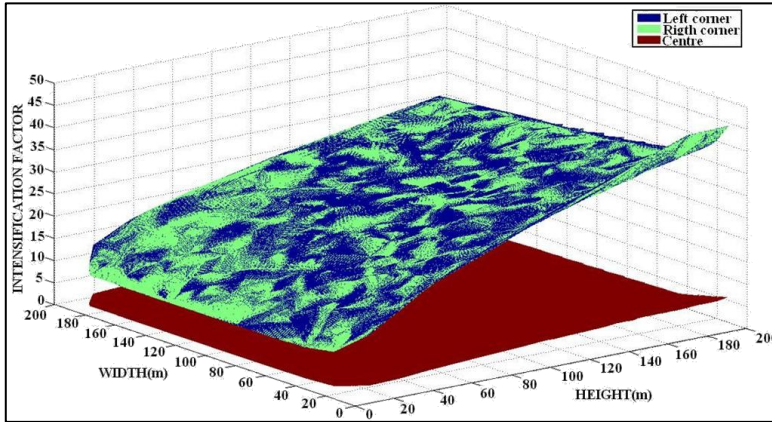


Figura 5.21. Factores de intensificación en una estructura aislada.

Al aplicar un procedimiento de *fitting sobre el conjunto de datos*, se obtuvieron las siguientes relaciones:

- En las esquinas:

$$K_i = C_1 \left(1 + C_2 + \left(1 + \frac{H}{W} \right) + C_3(W^2 + H^2) + C_4 \ln(H + W) \right) \quad (5.6)$$

- En el centro:

$$K_i = C_5 \left(1 + C_6 \left(\frac{H}{W} \right) + C_7(H - W) \right) \quad (5.7)$$

Donde: C_n son constantes.

H es la altura

W es la anchura

Para comprobar la validez del modelos, además de realizar las comprobaciones de independencia entre vectores de entrada y vectores de entrada-salida, se procedió a realizar una valoración de los residuos del modelo, para determinar si se podrían ajustar a un patrón de ruido blanco, lo cual supone que el modelo no puede generar un ajuste más fiable que el que presenta.

Para realizar este paso, primero se comprobó la relación entre los datos observados y los calculados por el modelo, lo que idealmente sería una línea recta. Los resultados obtenidos para las esquinas y el centro del edificio se muestran en las figuras 5.22 y 5.23.

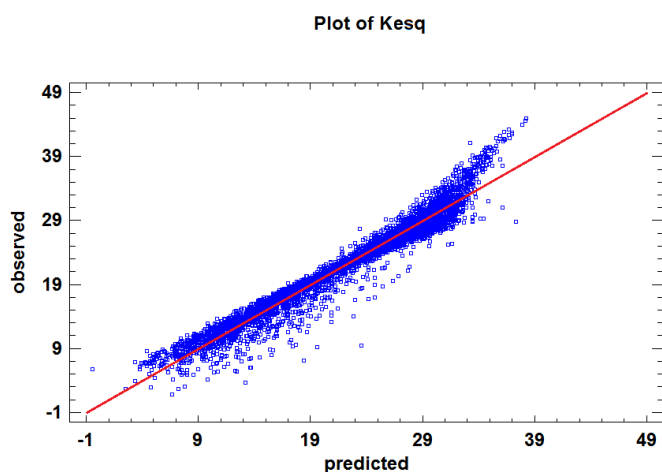


Figura 5.22. Error asociado al modelo en el caso de las esquinas del edificio.

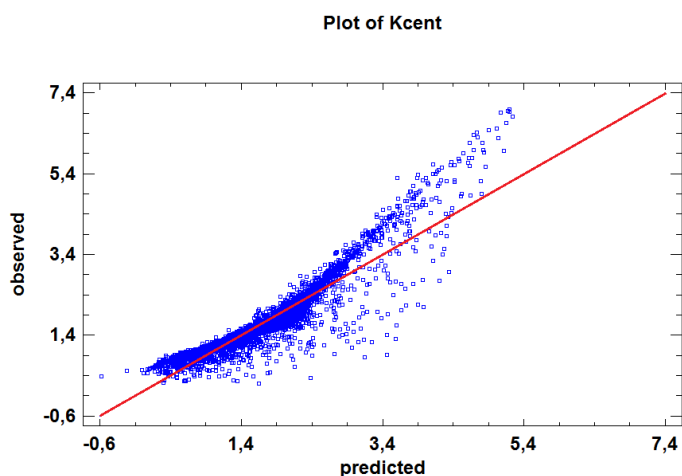


Figura 5.23. Error asociado al modelo en el caso del centro del edificio.

Por último, se comprobó si los residuos se corresponden con un patrón de ruido blanco, para lo cual se realizaron 3 tests, el primero (*above and below median*) evalúa los residuos, comprobando las veces que los datos se encuentran por encima y por debajo de la media. El resultado de este test fue de 0.9887. El segundo test (*runs up and down*) cuenta el número de veces que los datos suben y bajan. El resultado de este test fue 0.8448. El último test (*Box-Pierce Test*) evalúa la suma de los cuadrados en los primeros 24 coeficientes de auto-correlación para evaluar si existe un patrón de repetición definido. El resultado de este test fue 0.8002.

En base a los resultados anteriores, se puede asumir que la señal de residuos se corresponde con una secuencia aleatoria de ruido blanco, con un 95% de grado de fiabilidad.

Una vez validada la metodología, se procedió a repetir el proceso con una estructura adicional, para lo que se fijaron las dimensiones de la estructura principal en 90x50m, ubicando a 50m otra estructura, cuyas dimensiones fueron variando mediante un procedimiento iterativo.

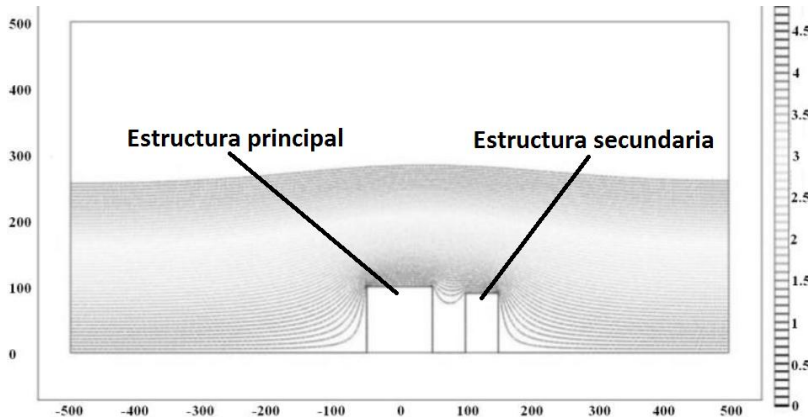


Figura 5.24. Escenario para la evaluación del parámetro K_t en función de las dimensiones de los elementos.

Modificando aleatoriamente las dimensiones de altura y anchura de la estructura, se obtuvo el nuevo conjunto de datos, con el que calcular de nuevo los resultados, como se muestra en la figura 5.25.

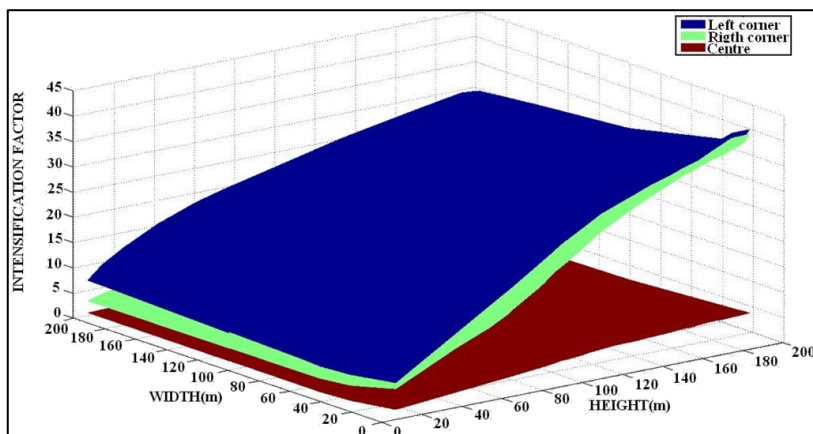


Figura 5.25. Factores de intensificación en la estructura principal en función de las dimensiones de la estructura secundaria.

Aplicando el mismo procedimiento que en el caso anterior, los resultados en este caso fueron los siguientes:

- En las esquinas:

$$K_t \sim C_8 \cdot \left((1 - \tanh(H_s - H)) \cdot \ln(d) \cdot C_9 \cdot e^{1-(w_s-w)} \right) \cdot \left(\frac{1 + C_{10}(1 + H/W) + C_{11}(W^2 - H^2)}{+ C_{12} \ln(H+W)} \right) \quad (5.8)$$

- En el centro:

$$K_t \sim C_{13} \cdot \left((1 - \tanh(H_s - H)) \cdot \ln(d) \right) \cdot \left(1 + C_{14} \cdot (H/W) + C_{15} \cdot (H \cdot W) \right) \quad (5.9)$$

Donde: C_n son constantes.

H es la altura de la estructura bajo estudio

H_s es la altura de la estructura adicional

W es la anchura de la estructura bajo estudio

W_s es la anchura de la estructura adicional

d es la distancia entre ambas estructuras

Empleando la fórmula 5.5, y por comparación con las ecuaciones 5.6 y 5.7, se pudo deducir de las ecuaciones 5.8 y 5.9, el parámetro K_e en cada uno de los casos, siendo:

- En las esquinas:

$$K_e = C_8 \cdot \left((1 - \tanh(H_s - H)) \cdot \ln(d) \cdot C_9 \cdot e^{1-(w_s-w)} \right) \quad (5.10)$$

- En el centro:

$$K_e = C_{13} \cdot \left((1 - \tanh(H_s - H)) \cdot \ln(d) \right) \quad (5.11)$$

En la figura 5.26, se muestran gráficas de los resultados cuando se incluye en el escenario una segunda estructura con diferentes distancias, anchura y altura.

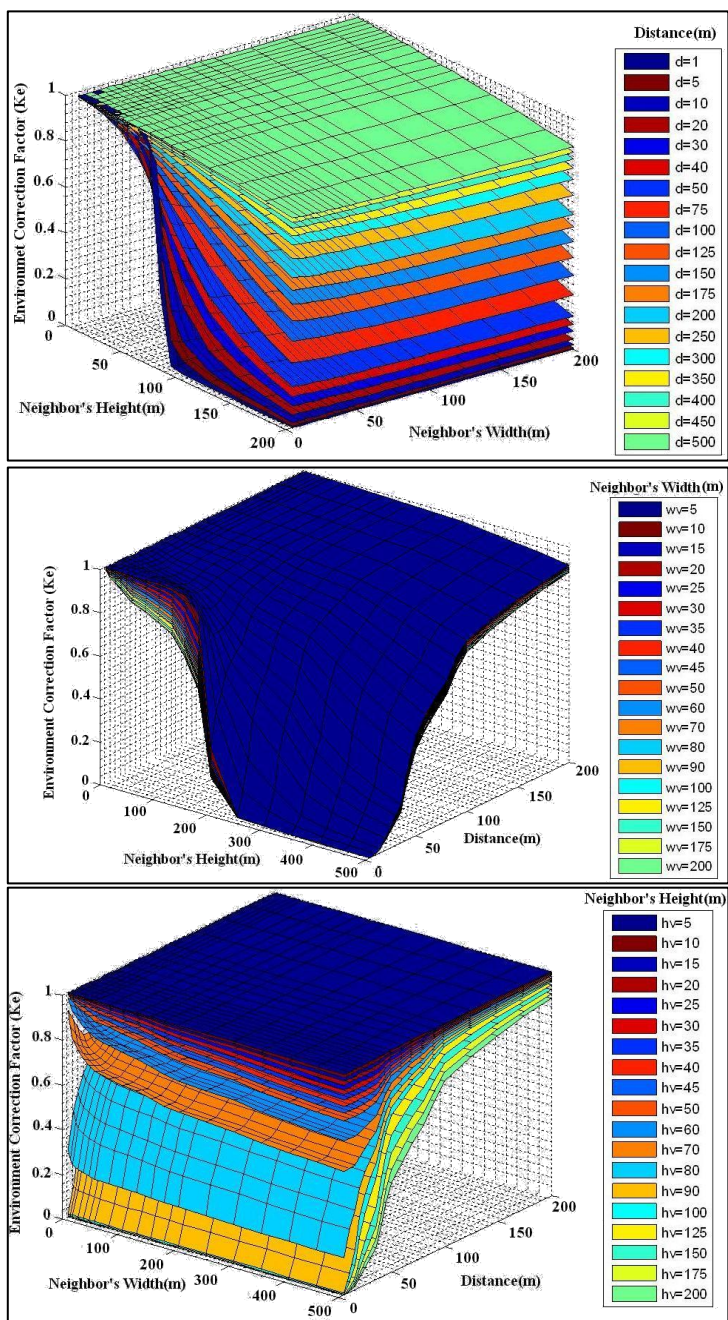


Figura 5.26. Factores de influencia del entorno en diferentes situaciones.

El cálculo de la probabilidad de impacto parte de la ley de Peek, que determina el valor de campo eléctrico de inicio de descargas corona en un cable [120]:

$$E_c = E_0 \delta \left[1 + \left(\frac{2 \ln 1/\gamma}{A E_0 \delta r} \right)^{0.5} \right] \quad (5.12)$$

Donde: $E_0=3 \cdot 10^6$ V/m

δ : Es la densidad relativa del gas

r: Es el radio

Y y A son constantes conocidas

La fórmula 5.12, presenta la limitación de ser aplicable únicamente a cables [120], no obstante, Hartmann [121] presentó una generalización aplicable a puntas, que en condiciones normales de presión, humedad y temperatura, queda simplificada como:

$$E_c = 2 \cdot 10^6 \left[1 + \frac{0.127}{r^{0.435}} \right] \quad (5.13)$$

Donde r es el radio

Para el cálculo de la probabilidad de impacto, se empleó el campo eléctrico de inicio de descarga corona E_c definido en [121], el nivel de protección contra el rayo, la distribución de probabilidad descrita en [90], y el conjunto de factores de intensificación del campo eléctrico obtenido mediante la simulación.

La fórmula 5.13, considera un único elemento y, en caso de contar con otro elemento adicional, la modificación de la intensificación del campo eléctrico ocasiona que sea necesario un nuevo valor campo eléctrico, superior al calculado mediante dicha fórmula para que comiencen a emitirse las primeras descargas corona. La reducción del campo eléctrico viene de determinada precisamente por el parámetro K_e .

En la figura 5.27, se puede ver el resultado del cálculo de probabilidad para una estructura aislada en función de sus dimensiones.

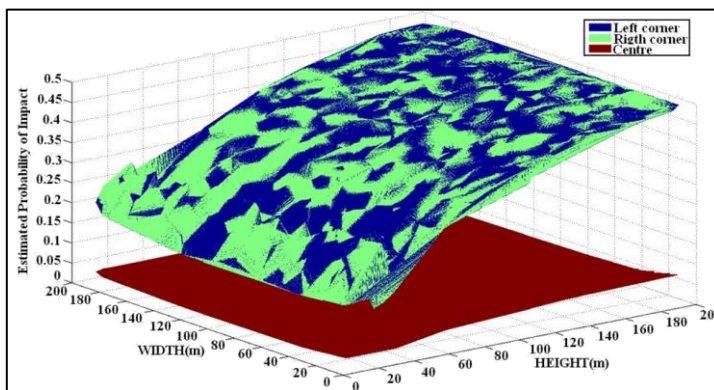


Figura 5.27. Probabilidad de impacto en diferentes puntos para la estructura aislada.

También se aplicó el algoritmo considerando la influencia de la estructura. En la figura 5.28 se muestra el resultado en caso de incluir una estructura de 90x50m.

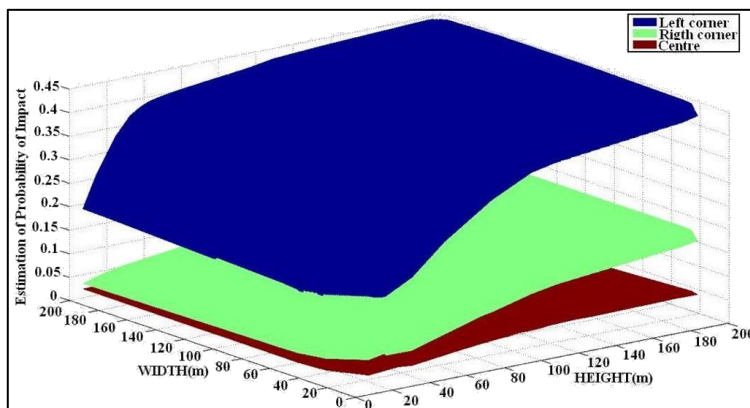


Figura 5.28. Probabilidad de impacto en diferentes puntos cuando se incluye una estructura adicional de 90x50m.

Para más información, en el **Artículo 1C**, se presenta la aplicación computacional de la extensión a escenarios 3D del método desarrollado, y se muestran algunos casos prácticos en los que se compatibiliza el RSM con la indicación de la probabilidad de impacto de cada punto considerado, aplicando el algoritmo previamente descrito. De esta forma, el diseñador podría contar con un criterio objetivo con el que evaluar diferentes soluciones.

5.3. Conclusiones parciales

De los diversos modelos de protección existentes, las normativas internacionales contemplan únicamente tres, los cuales han sido validados por medio de la experiencia de campo acumulada o por medio de la “tradición”. Varios autores han puesto de manifiesto que todos ellos presentan una serie de limitaciones y falta de fundamentación física.

Aunque existen otros modelos de protección más fundamentados que los que se emplean en las normativas actuales, como el *Leader Inception Model*, *Collection Volume Model*, etc, dichas normativas no los reconocen (IEC 62305 [91], IEC 62561 [92]), por lo que su aplicación no está regulada.

Una forma de complementar los modelos normativos, consiste en el desarrollo de métodos compatibles con dichos modelos, de forma que la información adicional permita la implementación de un diseño conforme a la normativa vigente, pero

optimizado por un criterio objetivo, como es el de la probabilidad de impacto en cada punto de la estructura a proteger.

La aleatoriedad intrínseca al fenómeno del rayo, hace pensar que cada punto de una estructura tiene asociado una probabilidad de impacto y por otro lado, la experiencia indica que los puntos preferentes, son aquellos que también presentan un mayor factor de intensificación del campo eléctrico, por lo que este parámetro puede ser el punto de partida para el cálculo de la probabilidad de impacto de un punto en una estructura.

No obstante este parámetro tiene diferentes variables de influencia: materiales, elementos adyacentes, geometría, etc... que no pueden ser obviados. En este capítulo se presenta el **Artículo 3** donde, mediante un conjunto de simulaciones por el método de los elementos finitos, se ha cuantificado la influencia de estructuras adyacentes en el cálculo de este parámetro en un escenario en 2D. Como extensión, en el **Artículo 1C**, se muestra la aplicación práctica en la protección contra el rayo de este método en estructuras complejas dentro de un escenario 3D junto con el RSM (Ver figura 5.29).

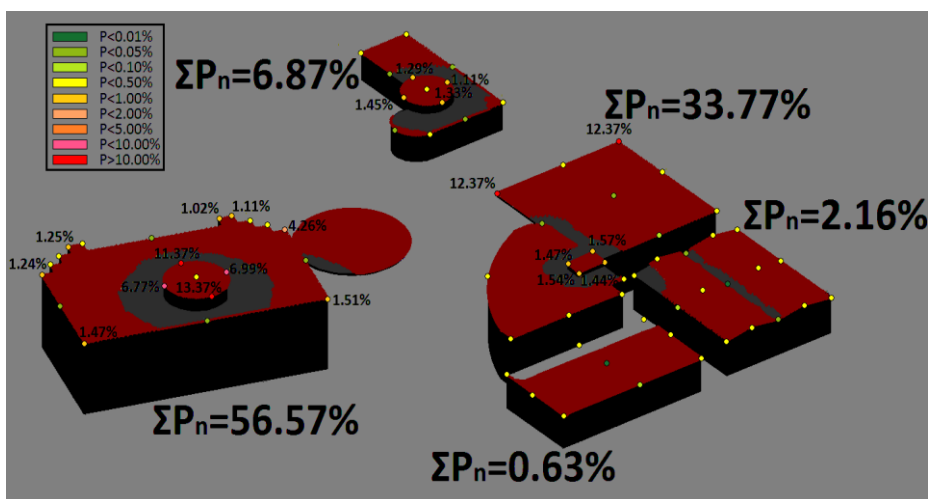


Figura 5.29. Aplicación práctica del método en estructuras complejas.[Artículo 1C]

Por el contrario este planteamiento presenta sus propias limitaciones derivadas del hecho de que es un modelo estático, y que la asignación de probabilidad de impacto implica algunas suposiciones no fundamentadas.

Referencias del capítulo 5

Artículo 1: D.Ruiz, R.Serna, V.Pomar, S.Polo. "Influence of the Scenario in the Calculation of Electric Field Intensification Factor. Part I: 2D Approximation". IEEE Trans. on dielectrics and electrical insulation. Vol;20, Issue:4 Aug 2013, pp.1356-1360.

Artículo 1C: D.Ruiz, R.Serna "Improvements of EGM based on Electrostatic field calculation". International Lightning Protection Association Symposium. Mar. 2014. Chamonix, France.

Artículo 2C: D. Ruiz, P. Llovera, V.Pomar, V. Fuster. "A critical review of the lightning protection principles and practices". Actualmente en proceso de revisión en IEEE Proc. Of Industry Applications.

Artículo 4C: D.Ruiz, S.Polo, V.Pomar, C.Pomar "Lightning protection: Basis & Praxis". International Lightning Protection Association Symposium. Nov. 2011. Valencia, Spain.

[86] B. Diebner, Benjamin Franklin, in *Lightning*, Volume 1, Edited by R.H. Golde, Academic Press Inc. London, 1977.

[87] B. F. J. Schonland, The work of Benjamin Franklin on thunderstorms and the development of the lightning rod, *J. Franklin Inst.* Vol. 253, 1952, pp. 375.

[88] E. Nickson, XV Sundry papers relative to an accident from lightning at Purfleet, May 15, 1777, report to the Secretary of the Royal Society, *Philos. Trans. R. Soc. Lond, A*, Vol. 68, 1778, pp. 232–235.

[89] R. H. Golde, "The lightning conductor", *J. Franklin Inst.* Vol. 283, No. 6, 1967, pp. 451–477.

[90] International Electrotechnical Committee, "IEC 62305-3 Ed. 1.0: Protection against lightning – Part 3: Physical damage to structures and life hazard", CEI, Geneva, Switzerland, 2006.

[91] International Electrotechnical Committee, "IEC 62305-1 Ed. 1.0: Protection against lightning – Part 1: General Principles", CEI, Geneva, Switzerland, 2006.

[92] International Electrotechnical Committee, "IEC 62561-2 Ed. 1.0: Lightning Protection System Components (LPSC) - Part 2: Requirements for conductors and earth electrodes", CEI, Italy, 2011.

[93] R. H. Golde, The lightning conductor, *J. Franklin Inst.* Vol. 283, No. 6, 1967, pp. 451–477.

[94] F. S. Young, J. M. Clayton, and A. R. Hileman, "Shielding of transmission lines," *IEEE Trans.*, vol. S, no. 82, pp. 132–154, 1963.

[95] R.H. Lee, "Protection zone for buildings against lightning strokes using transmission line protection practice" *IEEE. Trans. On Ind. App.* Vol. IA-14 N°6 Nov/Dec 1978 pp. 465-470.

[96] A. J. Eriksson, "An improved electrogeometric model for transmission line shielding analysis", *IEEE Trans.* Vol. PWDR-2, 1987, pp. 871-886.

-
- [97] L. Deller, E. Garbagnati. "Lightning stroke simulation by means of the leader progression model. Part I: Description of the model and evaluation of exposures of free-standing structures" IEEE. Trans. on Power Del. Vol.5 Iss.4. Oct 1990. pp 2009-2022.
- [98] L. Deller, E. Garbagnati. "Lightning stroke simulation by means of the leader progression model. Part I: Exposure and shielding failure evaluation of overhead lines with assessment of application graphs" IEEE. Trans. on Power Del. Vol.5 Iss.4. Oct 1990. Pp. 2023-2029.
- [99] A. Borghettiet. Al. "Numerical solution of the leader progression model by means of the finite element method" 30th ICLP 2010. Cagliari, Italy Sept 2010 ref. 1498.
- [100] F.A. Rizk, "Switching impulse strength of air insulation: leader inception criterion". IEEE Trans. On Power Del. Vol: 4. N°4 Nov. 1989. pp: 2187-2194.
- [101] F.A. Rizk, "Modeling of transmission line exposure to direct lightning strokes". IEEE Trans. On Power Del. Vol: 5. N°4 Nov. 1990. pp:1983-1990.
- [102] F.A. Rizk, "A Model for switching impulse leader inception and breakdown of long air-gaps". IEEE Trans. On Power Del. Vol: 4. N°1 Jan. 1989. pp:596-603.
- [103] F.A. Rizk, "Modeling of proximity effect on positive leader inception and breakdown of long air gaps". IEEE Trans. On Power Del. Vol: 24. N°4 Oct. 2009. pp: 2311-2318.
- [104] X. Zhang, *et. al.* "Study of the effectiveness of single lightning rods by a fractal approach". Journal of lightning research. Vol. 1. 2009. Pp.1-8.
- [105] L. Niemeyer *et. al.* "Fractal dimension of dielectric breakdown". Phis. Rev. Letters. Vol 52. N° 12. Mar. 1984.
- [106] International Electrotechnical Committee, "IEC 1024-1:1990, Protection of structures against lightning, Part 1: General principles". 1990.
- [107] B. Franklin, "How to secure houses, &c from lightning," in Poor Richard's Almanac; reproduced in Benjamin Franklin's Experiments, I. B. Cohen, Ed. Cambridge, MA: Harvard Univ. Press, 1941.
- [108] Golde, R.H. (ed.), "Lightning. Vol II: Lightning Protection", Academic Press, N.Y, 1977.
- [109] Bryan, J.L., Biermann, R.G. & Erickson, G.A., "Report of the Third-Party Independent Evaluation Panel on the Early Streamer Emission Lightning Protection Technology", National Fire Protection Association, Quincy, MA, 1999.
- [110] Horváth, T., "Standardization on lightning protection. Based on the physics or on the tradition?", Proc. 26th ICLP, Crakow, Poland, pp. 791-796, 2002.
- [111] N. Szedenik, Rolling sphere –method or theory?, Journal of Electrostatics, 51–52, 2001, pp. 345–350.
- [112] K.Berger, R.B. Anderson and H. Kroninger, "Parameters of Lightning Flashes", Electra, No. 41, pp. 23-37, Jul 1975.

-
- [113] CIGRE Working Group 01 (Lightning) of Study Committee 33 (Overvoltages and Insulation Coordination), "Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines," CIGRE Brochure 63, 1991.
- [114] Darveniza, M., "The placement of air terminals to intercept lightning in accordance with standards – Revisited", Proc. 26th ICLP, Cracow, Poland, pp. 803-808, 2002.
- [115] Moore, C.B., Brook, M. & Krider, E.P., "A Study of Lightning Protection Systems", Office of Naval Research, Arlington, VA, AD-A158258, 1981.
- [116] Mazur, V. & Ruhnke, L., "Lightning magnitude and protection properties of air terminals", Proc. 25th ICLP, Rhodos, Greece, pp. 318-322, 2000.
- [117] Darveniza, M., "A modification to the Rolling Sphere Method for Positioning Air Terminals for Lightning Protection of Buildings", Proc. 25th ICLP, pp. 904-908, 2000.
- [118] G.Diendorfer. "Blitzstrommessung am Sender Gaisberg". Schriftenreihe der Forschungim Verbund, Band 89. Jun 2005.
- [119] F. D'Alessandro, "The use of 'Field Intensification Factors' in calculations for lightning protection structures", J. Electrostatics, Vol. 58, pp. 17-43, 2003.
- [120] F. W. Peek, Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering. New York: McGraw-Hill, 1929.
- [121] G. Hartmann, Theoretical evaluation of Peek's Law, IEEE Trans. IAS 20 (1984) pp. 1647-1651.

6. CONCLUSIONES Y PROYECCIÓN FUTURA

Aunque cada uno de los capítulos anteriores incluye un apartado de conclusiones particulares, en este capítulo se recogen las conclusiones generales extraídas de la Tesis Doctoral presentada, así como posibles desarrollos futuros con los que poder continuar la línea de investigación abierta. También se menciona parte de la transferencia tecnológica en la empresa, derivada del desarrollo de las investigaciones presentadas en esta Tesis.

6.1. Conclusiones

En la Tesis se han revisado diferentes puntos que constituyen el campo de la técnica de la protección contra el rayo, centrandó el interés en el proceso de intercepción del rayo. En base a esto, se han visto los ensayos realizados en laboratorio de alta tensión, los experimentos realizados en campo con rayos naturales y los modelos de protección del rayo.

En lo referente a los ensayos de laboratorio, mediante una red neuronal se ha realizado un estudio, evaluando si existe alguna diferencia objetiva en los primeros instantes, entre pulsos de tensión con una posibilidad de generar una descarga disruptiva del 50%, cuando el resultado es una descarga disruptiva o cuando no lo es. Para ello, se ha determinado una ventana temporal temprana en la que las magnitudes de corriente y fotoemisión han sido evaluadas por una red neuronal.

Un incremento en la capacidad promedio de predicción del resultado de la red, ha indicado que existe un criterio objetivo que diferencia un pulso de tensión con un resultado de otro con diferente resultado. Esto pone de manifiesto que la variable en cuestión, en esa ventana temporal, tiene una influencia concreta.

Desde el punto de vista de la física de la descarga, el parámetro U_{50} resulta de especial interés ya que los fenómenos que determinan el resultado de un impulso individual tienen la misma probabilidad de producirse que de no producirse, lo cual permite el estudio de la transición *streamer-leader* desde un punto de vista probabilístico.

En lo que respecta a los ensayos de campo aplicados a la protección contra el rayo, también se ha realizado una revisión, poniendo de manifiesto que las estrategias de medida actuales (monitorización de estructuras, cebado artificial de rayos o redes de localización de rayos) tienen ciertas limitaciones.

Se ha propuesto una nueva metodología de medida, que consiste en la monitorización masiva de instalaciones mediante equipos compactos y de fácil

instalación con los que crear una red de medida para la recolección de datos en multitud de puntos de forma que, con una cantidad suficiente de datos, se pueda determinar la influencia del entorno en los parámetros del rayo.

El principal objetivo de este planteamiento es la obtención de una cantidad suficiente de datos en un tiempo aceptable, de forma que se puedan obtener estadísticas fiables de los parámetros del rayo en instalaciones reales, atendiendo a sus particularidades (altura, orografía, materiales, etc...). De esta forma, las estadísticas asociadas al rayo, empleadas en los modelos de protección, podrían incluir un factor de corrección del entorno basado en datos reales de instalaciones con las mismas particularidades.

El equipo desarrollado ha permitido la validación de los sensores, parámetros de adquisición, sincronización y la estrategia de adquisición, este equipo ha sido testeado en laboratorio con resultados satisfactorios. Actualmente, el equipo ha evolucionado en la miniaturización e industrialización para la creación de una red de medida.

Por último, en lo referente a modelos de protección, tras una revisión de los modelos normalizados existentes, se ha concluido que la manera de poder aplicar, en una instalación real, un modelo con mayor base científica es complementando los modelos ya existentes, de forma que cualquier diseño de protección contra el rayo, sea compatible con alguno de los métodos reconocidos por las normas.

En base a la anterior premisa, se ha contemplado el factor de intensificación del campo eléctrico, como una variable a considerar a la hora de determinar la probabilidad de impacto de un rayo en un punto concreto de la estructura. Por otro lado, se ha evaluado cómo el entorno puede influir en el valor de dicho factor de intensificación, definiendo un nuevo parámetro asociado al entorno. Este nuevo parámetro queda acotado entre 0 y 1 y, se ha comprobado que el máximo valor de factor de intensificación de campo eléctrico tiene lugar cuando la estructura está aislada (factor de entorno igual a 1).

El factor de corrección del entorno (K_e) en un escenario 2D, está relacionado con la diferencia de alturas, la diferencia de anchuras y la separación entre ambas estructuras. Con este valor, se ha desarrollado un algoritmo para evaluar la probabilidad de impacto, y se ha estudiado cómo esta probabilidad se ve afectada cuando se consideran elementos adyacentes en el escenario a proteger.

Para concluir, existen muchas incógnitas en el campo de la protección contra el rayo, igual que en muchos otros campos de la electrotecnia. En esta Tesis se han tratado algunos puntos concernientes a la intercepción del rayo, pero hay muchos más

puntos que forman parte de la protección contra el rayo, y que son también susceptibles de revisión y complementación, por ejemplo:

- Sistemas conductores.
- Sistemas de puesta a tierra
- Protectores contra sobretensiones
- Apantallamientos
- Aislamiento
- Detección

6.2. Proyección futura

La evaluación de los diferentes puntos concernientes a la protección contra el rayo realizada en esta Tesis, pone de manifiesto que es un campo muy susceptible de abrir nuevas líneas de investigación que fundamenten el conocimiento del que se dispone actualmente. Las áreas de trabajo que se proponen como continuación de la línea de investigación presentada en la Tesis son las siguientes:

- En cuanto a los ensayos de laboratorio, la herramienta presentada permite la evaluación de una variable en el resultado de un único impulso de tensión cuando la probabilidad de cualquier resultado es la misma, lo cual puede ayudar a la comprensión de la física de la descarga en la transición *streamer-leader*. Esta línea de investigación puede ampliarse de diferentes maneras:
 - Se puede ampliar el número de variables y configuraciones con las que generar diferentes conjuntos de datos. Aplicando el mismo procedimiento, se puede determinar la influencia de diferentes variables para evaluar algunos aspectos sobre la física del rayo.
 - Una optimización de la red podría basarse en la modificación de la estructura del algoritmo de predicción, mediante diferentes configuraciones, topologías o funciones matemáticas, con las que poder determinar qué configuración es la que puede alcanzar mayor nivel de predicción, en casos en los que la información que se presenta en la fase de entrenamiento no es óptima, por ejemplo en casos de ruido en la señal, número insuficiente de datos, etc... Esto permitiría identificar qué estructura es la más adecuada en diferentes casos.
 - Habría que estudiar la posibilidad de evaluar, mediante la herramienta desarrollada, otros aspectos estocásticos de la descarga eléctrica en laboratorio, sobre todo en una configuración de campo eléctrico divergente, es decir, además del resultado del impulso,

también se podrían evaluar otros aspectos de la descarga, por ejemplo, diferentes transiciones o fases del arco, trabajando con diferentes niveles de tensión, por ejemplo U_{10} o U_{90} .

- Referente a la parte de ensayos de campo, el trabajo futuro puede ir encaminado a la creación de la red de medida, como se describe en su apartado correspondiente, no obstante, se puede evolucionar además en diferentes direcciones:
 - La industrialización del prototipo desarrollado para su explotación en la creación de una red de gran tamaño.
 - La elaboración de una base de datos y obtención de estadísticas correlacionadas con las particularidades del entorno podría constituir otra de las líneas evolutivas.
 - La extrapolación en la aplicación del equipo a la caracterización de otros eventos eléctricos asociados a la protección contra el rayo, por ejemplo para la caracterización de fallos en aisladores, pararrayos auto-valvulares, monitorización de sobretensiones para subestaciones eléctricas, etc...
 - Otra posible ampliación podría ir encaminada a la inclusión en el equipo de medida de otros elementos sensores que aporten información complementaria, como captura de imágenes en lugares concretos, medida de descargas parciales, etc...
- En lo que respecta a la complementación de los modelos de protección normalizados mediante un método compatible, esta optimización puede abordarse desde diferentes puntos:
 - La simulación de la que se parte, es una simulación estática que no contempla los efectos dinámicos de la física de la descarga, por lo que una posible línea de investigación podría estar marcada por la determinación de la influencia de los efectos dinámicos en el resultado de la simulación.
 - El algoritmo empleado para el cálculo de la probabilidad está basado en diferentes presunciones, como la distribución de probabilidad empleada en la normativa o la morfología de la distribución de probabilidad asociada al propio factor de intensificación. Estas presunciones tienen un punto de arbitrariedad basado en la bibliografía existente o en ensayos de laboratorio, lo cual puede ser cuestionado al realizar la extrapolación directa a una instalación real.
 - Otras variables que pudieran tener influencia no son contempladas en la simulación. Además, se asume que las condiciones de inicio de descarga corona son las mismas en todo el escenario, obviando aspectos como composición del aire, condiciones ambientales, etc...

Una línea posible de trabajo futuro, podría fundamentarse en la valoración de diferentes criterios de inicio y propagación del arco eléctrico en función de una distribución espacial no homogénea de los distintos parámetros de influencia.

- Se ha evaluado cómo influye el escenario en el cálculo del campo eléctrico, pero también es un punto que se podría complementar con ensayos de laboratorio, en los que se evaluase experimentalmente este parámetro y se correlacionase con una conjunto de arcos eléctricos en diferentes puntos del escenario escalado, con la finalidad de evaluar si las probabilidades de impacto son coherentes con los resultados de laboratorio y extrapolables a instalaciones reales.

6.3. Transferencia tecnológica

El desarrollo de las investigaciones presentadas en esta Tesis, han supuesto un avance tecnológico en varios puntos estratégicos de la empresa Aplicaciones Tecnológicas S.A. En primer lugar, el mero hecho de haber planteado una Tesis doctoral basada en compendio de publicaciones pone de manifiesto, no sólo el carácter tecnológico de la empresa, sino también, la capacidad investigadora aplicada al sector al que pertenece.

Además, cada una de las aportaciones presentadas se ha visto reflejada total o parcialmente en diversos productos, servicios o proyectos de la empresa. En el caso del **Artículo 1**, el planteamiento alternativo al estudio de la descarga disruptiva ha permitido el desarrollo de una herramienta que posibilita la evaluación del rendimiento de los terminales de intercepción más allá de los ensayos normativos, lo cual aporta una ventaja que se puede enfocar al desarrollo de productos más eficaces.

En el caso del planteamiento presentado en el **Artículo 2**, la herramienta desarrollada ha evolucionado hacia una versión industrializada, convirtiéndose en un producto de alto valor añadido que ha supuesto un punto claramente diferenciador en diversos proyectos de la empresa.

Por último, el desarrollo presentado en el **Artículo 3** ha sido enfocado a la creación de un servicio optimizado de diseño de proyectos de protección contra el rayo, aportando información adicional con la que asegurar una mayor fiabilidad en el diseño de cualquier sistema de protección contra el rayo.

7. RESUMEN DE LOS ARTÍCULOS

7.1. Artículo 1

“Analysis of breakdown process at U_{50} voltage for plane rod discharges by means of Neural Networks”

El parámetro U_{50} se corresponde con la amplitud de un pulso de tensión que genera una probabilidad de descarga disruptiva del 50% en una configuración determinada y es un parámetro de referencia en muchos ensayos en laboratorio de alta tensión. El resultado de un impulso de tensión con una amplitud de U_{50} se considera aleatorio.

En este artículo se utiliza una herramienta heurística para determinar los parámetros de influencia en el resultado al aplicar un impulso con este nivel de tensión en una configuración de electrodo plano en alta tensión y punta a tierra. Con este planteamiento, se ha empleado una red neuronal, entrenada con señales temporales y diferentes radios de curvatura del electrodo de tierra y se ha analizado la capacidad de predicción de la red con diferentes ventanas temporales como un indicativo de la influencia de cada variable en el resultado del impulso.

De esta manera, se pueden obtener conclusiones relacionadas con la física de la descarga en los momentos previos a la esta, pudiendo determinar además, el instante temporal donde se maximiza la capacidad de predicción, lo que es un indicativo de en qué instante, una variable puede determinar el resultado del impulso.

7.2. Artículo 2

“A new concept in lightning parameters measurement”

Actualmente, las medidas de parámetros del rayo en la naturaleza se rigen por diferentes estrategias. Bien sea la monitorización de torres elevadas, la utilización del cebado artificial de rayos o el empleo de redes de detección, estas estrategias presentan una serie de inconvenientes derivados del hecho de que para obtener estadísticas fiables, es necesario mucho tiempo.

Para minimizar ese tiempo se recurre a monitorizar puntos de alto índice de impactos o cebar artificialmente los rayos. Estos planteamientos presenta la desventaja de que no se consideran las particularidades de varios entornos, generando estadísticas sesgadas. Además, el cebado artificial genera rayos con características y componentes diferentes a los de los rayos naturales.

La monitorización mediante redes, permite monitorizar grandes áreas, pero se pierde resolución espacial, no se miden las condiciones locales en el momento del rayo y la estimación de la amplitud se basa en un modelo teórico.

En este artículo, se describe una estrategia de medida de parámetros del rayo diferente y que consiste en la monitorización de multitud de instalaciones mediante equipos compactos, de forma que se genere un conjunto de datos en un tiempo razonable y considerando las particularidades del entorno.

Para esto, se muestra el desarrollo de un equipo de medida, que ha sido validado en laboratorio y cuyo diseño se ha basado en la dinámica de la tormenta y en el estudio del rayo. Se indican los resultados obtenidos y la metodología a seguir para la ceración de una red distribuida.

7.3. Artículo 3

“Influence of the Scenario in the Calculation of Electric Field Intensification Factor”. Part I: 2D Approximation”

Actualmente, el factor de intensificación del campo eléctrico, se concibe como un concepto aislado del entorno, ya que se suelen emplear las fórmulas descritas en la bibliografía que son válidas para elementos aislados. No obstante, tanto en las aplicaciones de descargas a pequeña escala, como a gran escala, lo habitual es que existan elementos adyacentes al punto o puntos evaluados, con diferentes morfologías y materiales cuya influencia es, normalmente despreciada.

En este artículo se describe la influencia de elementos adyacentes al elemento estudiado en el cálculo del factor de intensificación del campo eléctrico, partiendo de la simulación de diferentes escenarios 2D mediante una herramienta de análisis por elementos finitos (F.E.M.). Con ello, se ha elaborado un conjunto de datos analizados mediante regresión para obtener un “Factor de corrección ambiental” que modifica al valor clásico del factor de intensificación del campo eléctrico.

Para el caso de la protección contra el rayo se presenta un algoritmo que evalúa la probabilidad de impacto de un punto en función del factor de intensificación del campo eléctrico. Dicho algoritmo es compatible con cualquier modelo de protección, ya que, inicialmente el método estandarizado determina los puntos “impactables” y los puntos “protegidos”, seguidamente el algoritmo permite determinar qué puntos necesitan “más protección” o en qué puntos se reduce la probabilidad de impacto.



Parte II
Artículos



ARTICULO 1

Analysis of breakdown process at U50 voltage for plane rod discharges by means of neural networks

David Ruiz ^{*1}, Pedro Llovera², Verónica Pomar ¹, Alfredo Quijano²

* Corresponding author:

Aplicaciones Tecnológicas S.A.

C\ Nicolás Copérnico 4

46980 Paterna, Spain

Telephone: +34 96 131 82 50

Telefax: +34 96 131 82 06

E-mail: druz@at3w.es

1 Aplicaciones Tecnológicas S.A. – Spain.

2 Institute of Electric Technology (ITE) Spain

1. Introduction.

U50 voltage corresponds to the applied voltages which gives a 50% probability of producing a breakdown in a gap between electrodes. It is now a well known magnitude [1, 2] in the field of electrical discharges. It is used as a voltage reference in many standards and research works. The factors that influence U50 value have been extensively analyzed [2]. This 50% probability of breakdown (BW) or withstanding (WTH) under the same experimental conditions is considered a random process in which, for a single impulse test, the final result is not predictable. Although, of course a random process is to be supposed at the basis of this phenomenon, this should not be taken as a limit for further research. A better control on the variables statistically affecting voltage withstanding of high voltage elements could be useful to increase breakdown voltage in insulators, air gaps, etc. The opposite could also be useful: breakdown of gas or air gaps could be better controlled and stabilized if the critical parameters are identified.

Our aim is to analyze the process with new instruments in order to focus on the basic microscopic and/or macroscopic conditions leading to different results in similar situations. A step in this direction will be carried out by means of Neural Networks analysis. Obviously, it has to be taken into account that the difference between BW and WTH is a matter of reaching the conditions for a particular configuration (gap length, voltage curve, ambient conditions, generator energy, etc.). Under these specific conditions the gap is crossed by the discharge and breakdown happens if the conductivity is high enough. When the available energy for BW is limited, as it happens at U50 voltage, small differences will lead to different final results.

Our work will focus on upward positive discharges in a plane-rod gap of 1,75m length under negative switching impulse test. We analyze two different physical magnitudes: electrode current and photo emission by means of neural networks (NN). This analysis indicates that measurements do contain some relevant information about the final result (BW or WTH) of the impulse test at early stages. We will also provide the time window in which the minimum data gives the maximum information, i.e., when a discharge becomes a BW or a WTH. It has to be noted that for such gap

length, BW happens always when there is a streamer to leader transition. Extinguished leaders have not been observed in our laboratory.

BW process in long air gaps is now a well known phenomenon from a qualitative or quantitative point of view. Early work of Les Renardières Group [3, 4, 5, 6] provided an accurate description of the process and a good quantification of the involved magnitudes. Their contribution remains a reference even for very recent publications. However, there are not many observations concerning the question of what makes an impulse test at U50 a BW or not. The most important criteria given are the leader length and the angle of the leader trajectory. Moreover, for a gap length of 10m it is observed that the “decision of breakdown” is taken at 4,5m leader length [5]. This criterion could be in turn pushed further (why some impulses start with higher angles than others under similar conditions?) but, anyway, for a short gap length as ours, this criterion was found not relevant [5]. It is also mentioned that a plausible hypothesis to determine BW or WTH could be that a sufficient number of streamer filament touch the opposite plane electrode for BW. Additionally, it was established that BW does not depend on the characteristics of the first corona. Thus, there is no evident qualitative difference between BW or WTH impulse test. A single measurement for this gap length seems to give no strong criteria to differentiate between WTH or BW before breakdown happens. There have been many progresses in theoretical modelling of discharges [7-9] introducing criteria for streamers development, streamer to leader transition and leader propagation. However these criteria (e.g. charge per unit length, leader temperature) are difficult to measure experimentally and of course, the question remains, why some impulse test under similar condition fulfil this criteria leading to BW and others do not. Our approach starts from experimental observation. It will be shown that the use of Neural Networks (NN) gives an improved prediction level to discriminate between BW and WTH in early times. This is an indication that the information about the characteristics of BW or WTH is contained in the measurements but it is not easily extractable.

2. Methodology and experimental setup.

The experimental setup (figure 1) was composed of a plane HV electrode with 4m of diameter and a grounded rod of 1,25m. Three different electrodes were used for the grounded rod: 40mm diameter sphere, 24mm diameter sphere and a 1mm radius tip electrode. U50 is determined for each configuration with the up and down method (795kV for the 40mm sphere, 780kV for the 24mm sphere and 806kV for the 1mm radius tip). A series of 100 impulse test is applied at U50 for each rod (checking at the same time that the number of BW and WTH is close to 50%). Applied voltage are 600/2500 μ s switching impulses. Current in the rod is measured by means of a coaxial shunt of 5 Ω . A photomultiplier Hamamatsu R928 with a spectral response within 185nm to 900nm is pointed to the top of the gap length in order to detect streamers reaching this part of the gap, namely the vision field is a circle of 50cm diameter at the vertical plane containing the rod. It has been verified that a photomultiplier receiving light emitted from the tip of the rod gives a curve very similar to the current. Thus, current measurement was used to detect any produced streamer and the photomultiplier detects the longest streamers. Streamers shorter than 1,25m were only recorded by means of the current measurement. Current and photoemission curves have been sampled at 12,5Ms/s. Typical curves are shown in figure 2.

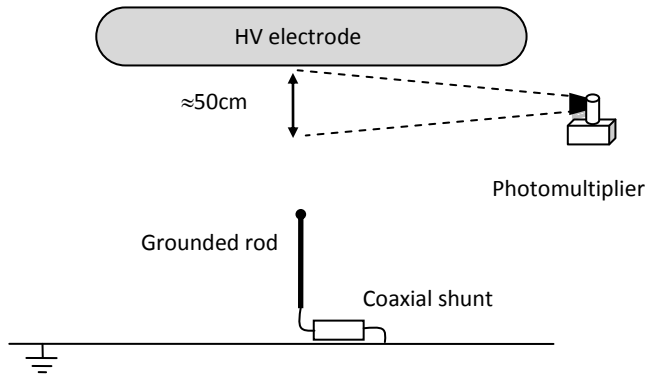


Figure 1. Experimental setup

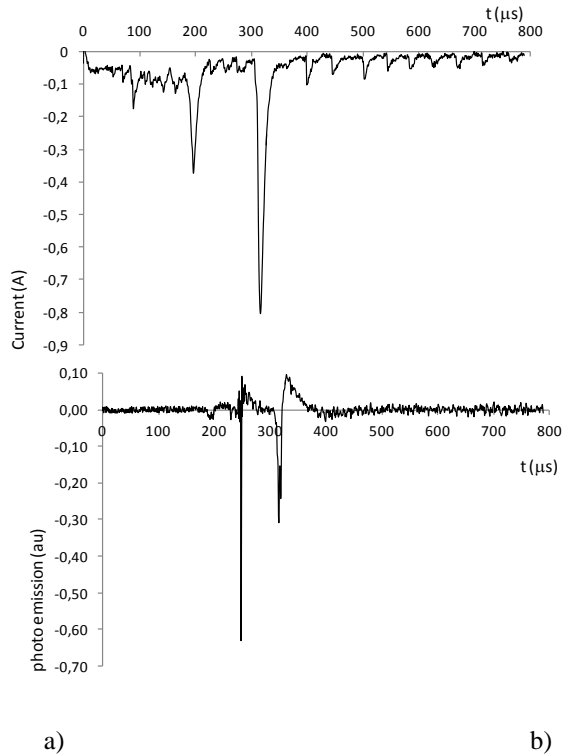


Figure 2. Example of a) current and b) photoemission curves for a sphere of 40mm in diameter and 795kV of peak applied impulse voltage producing WTH.

Taking into account that the intensity of the measured luminosity is not easily related to discharge characteristics, the luminosity curve is converted into a two-state series data by means of a threshold value. For each time value, 0 means

no long discharge and 1 means a discharge reaching the top of the gap. This also helps the interpretation converting the luminosity information into discharge length and duration information.

For each set of 50BW and 50WTH impulse test, several NN are trained. For each time frame ΔT_i (μs) centered at T_j (μs), a random set of 60 impulses (30 BW and 30 WTH) is selected for the NN training. The 40 impulses left are used for prediction and verification of the NN. The length of the time frames ranges from $20\mu\text{s}$ and the upper limit. The position of the centre of the time frame ranges from $10\mu\text{s}$ to the upper limit. Both upper limit values are the time of the first breakdown which was $320\mu\text{s}$ for both sphere electrodes and $280\mu\text{s}$ for the tip electrode. The lower limit was the time origin. No window is extended to negative times or times longer than first BW is used for neither training nor prediction. Of course, after BW, WTH curves and BW curves become very different and prediction is easy but gives no physical relevant information in terms of prediction. The same time frame length and position are used for prediction.

The training and prediction process is repeated 40 times for each of ΔT_i and T_j and selecting on every new process a new random set of 60 impulses for training and the 40 left for prediction. Thus 40 different NN with their prediction levels are obtained for a pair $(\Delta T_i, T_j)$. Finally the mean value of the prediction level is retained. This average value reduces the effect of the random initialization of the NN coefficients and the closeness of the first output of the net to a local minimum which can lead to low prediction levels. The prediction curve for each T_j is represented after a mobile window averaging to better show its trend.

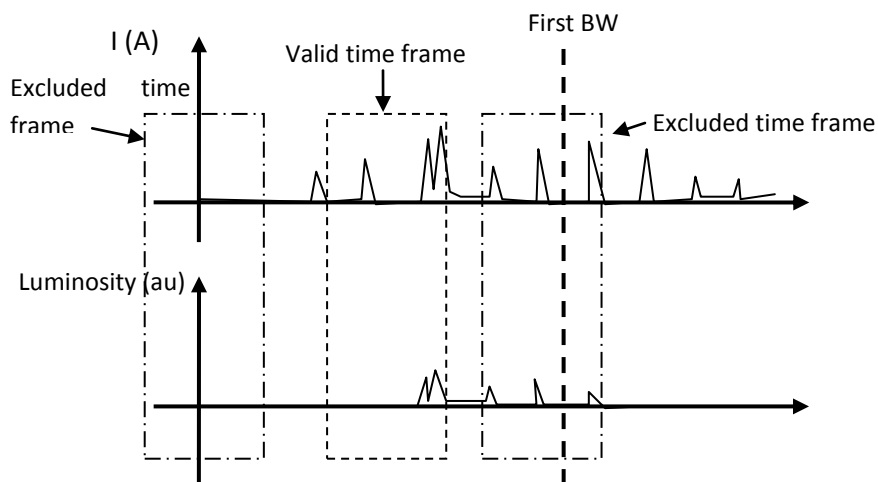


Figure 3. Time frames used for training and prediction.

This procedure can objectively determine a trend to point out the minimum time frame with the best prediction levels of the “decision” of BW or WTH. If a trained NN provides improved prediction (the worst case is, of course, close to 50% success) within a time frame it can be considered that it contains more relevant information concerning the difference between BW and WTH. Or at least, there is a detectable phenomena related to the process of BW within this time frame.

The selected Neural Network was a Multi-Layer Perceptron (MLP) with 2 neurons in the hidden layer (figure 5). Each neuron consisted in an adder followed by an activation function (the hyperbolic tangent) displaced in the origin by a bias value. The training of the NN was based in the backpropagation algorithm with 6 epochs presenting in the input layer of the NN the discretized signal of interest and the result (BW or WTH) for each case. After the training process, the performance of the NN was determined in the validation process introduction in the NN the data not used during the training process. The response of the NN for those data gives its prediction performance. The performance of the NN was defined as: Number of correctly classified samples / Total number of samples.

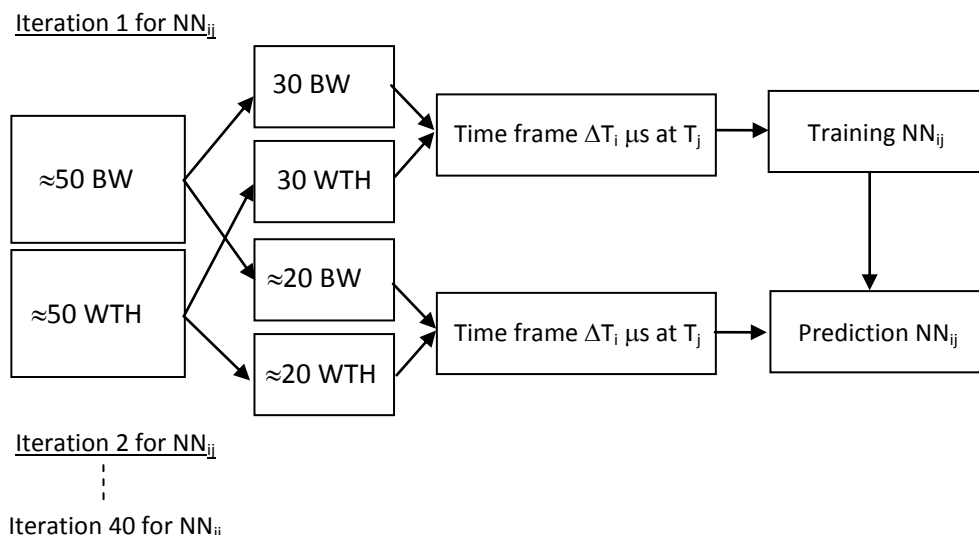


Figure 4. Data diagram for one NN generation from a set of 50BW and 50WTH impulse tests. NN_{ij} corresponds to a NN trained using a time frame ΔT_i centered at T_j .

This process is repeated 40 times with random sets of 30BW and 30WTH for the same ΔT_i and T_j . The mean value of the prediction level of the 40 NN_{ij} is taken as the prediction level for this time frame and time position.

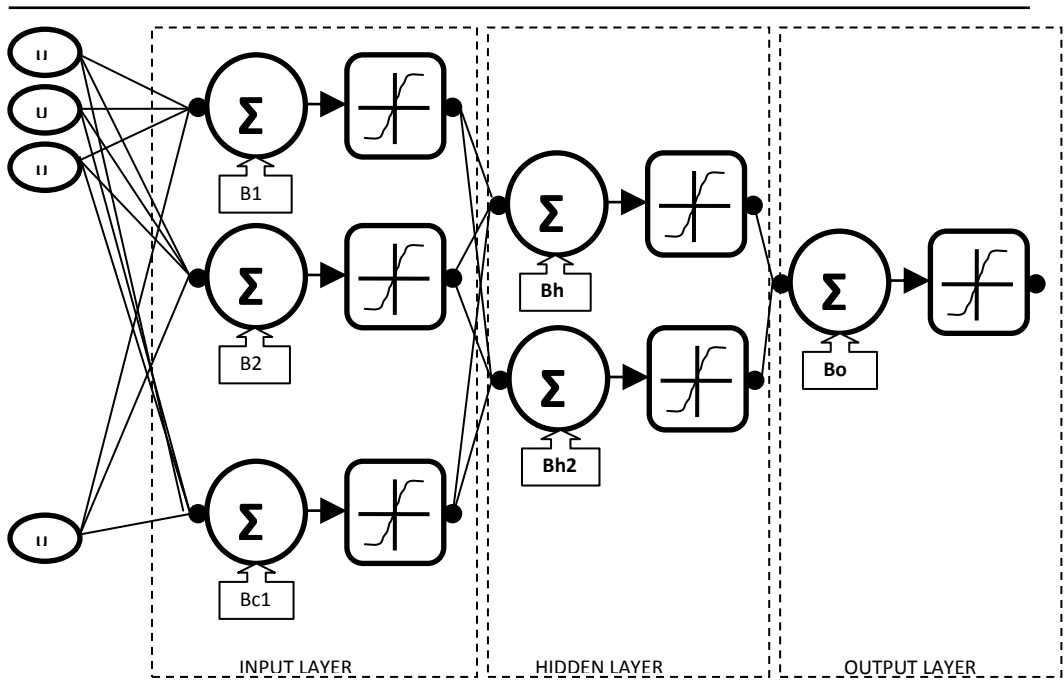


Figure 5. Neural Network structure.

3. Results.

Figure 6, 7 and 8 show the prediction results for the three electrodes for some selected time frames lengths which represent the global trend for each electrode.

It can be observed a clear evolution of the prediction level as a function of the time frame length for the 40mm electrode. The smallest time frame (20 μ s) produces a low prediction level which is only improved for longer times close to breakdown: it starts at 54% and reaches a maximum value of 57%. This is consistent with the fact that a 20 μ s time frame contains very little information. But, as the time frame length increases, the prediction level is also improved. The limit value is the 320 μ s time frame which contains the maximum information and delivers a prediction level of 66%. However, a time frame of 180 μ s centred at 190 μ s gives also nearly the maximum prediction level and gives a value of 65%. This can be qualitatively considered the shortest and earliest time frame with the highest prediction, i.e. the critical time frame where BW and WTH can be discriminated before BW happens. If this 180 μ s time frame is moved to later times there is no clear improvement (180 μ s time frame centred at 210 μ s give a 64% prediction level). Larger time frames give similar prediction levels: a saturation of the prediction level is observed at 65%.

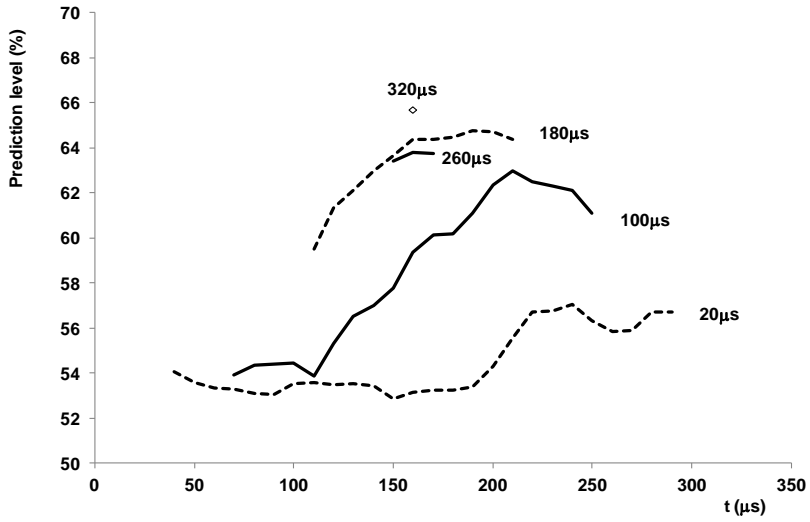


Figure 6. Trend of the prediction level for different time frames ΔT_i (indicated close to the curve) at different time T_j (horizontal axis) for the 40mm diameter electrode.

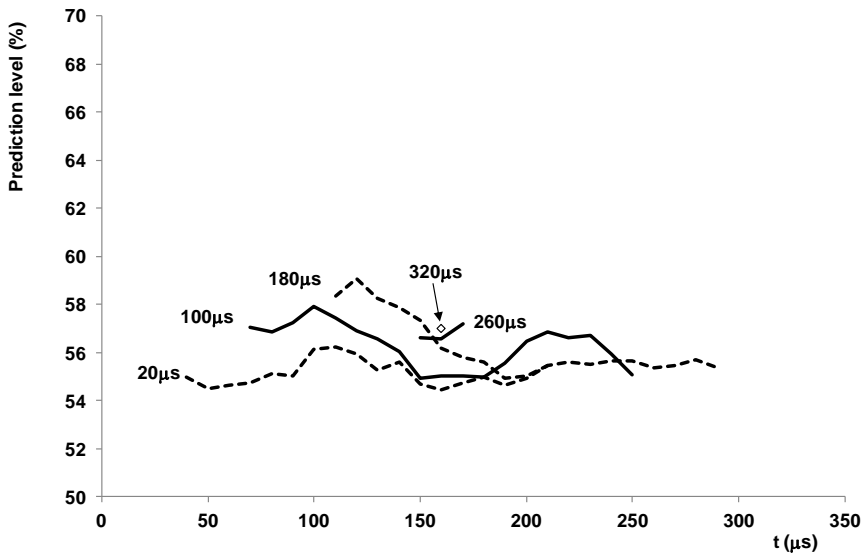


Figure 7. Trend of the prediction level for different time frames ΔT_i (indicated close to the curve) at different time T_j (horizontal axis) for the 24mm diameter electrode.

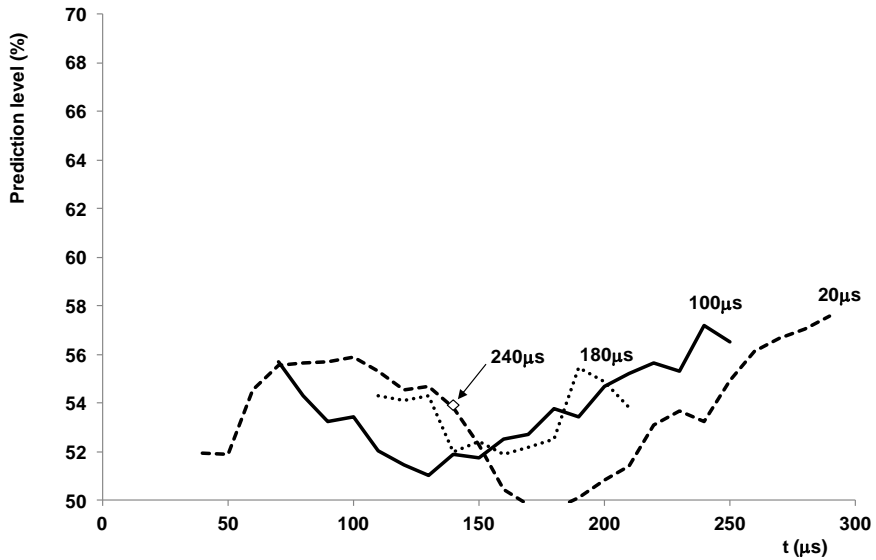


Figure 8. Trend of the prediction level for different time frames ΔT_i (indicated close to the curve) at different time T_j (horizontal axis) for the 1mm radius tip electrode.

The case of the 24mm diameter electrode is different since no clear trend can be observed. Moreover, the prediction level corresponding to the maximum time frame of $320\mu\text{s}$ is not the best prediction level and even remains low (57%). There is an apparent local maximum at $120\mu\text{s}$ for the time frame of $180\mu\text{s}$ but with a prediction level relatively low (59%) which gives no strong indication of a representative trend.

However, if the prediction levels are obtained only with the current (figure 9), it can be found a general trend of prediction improvement. Again, the curve corresponding to the $180\mu\text{s}$ time frame at $160\mu\text{s}$ gives a better prediction result (60%) with the smallest and earliest time frame. A time frame of $160\mu\text{s}$ at $170\mu\text{s}$ also gives similar results (58%). Nevertheless, the prediction level remains low (60%). Although not represented, the same figure for the photo emission measurement alone gives no general trend. A nearly constant mean value of 55% is obtained.

Finally, results for the 1mm radius tip electrode also do not show a clear trend. In this case, results combining current and photo emission or results obtained only with current or photo emission measurements show no trend. An increase of the prediction level can be observed for the $100\mu\text{s}$ time frame at $240\mu\text{s}$ but this trend is not confirmed for larger time frames. Anyway, prediction levels remain low for this electrode (<57%).

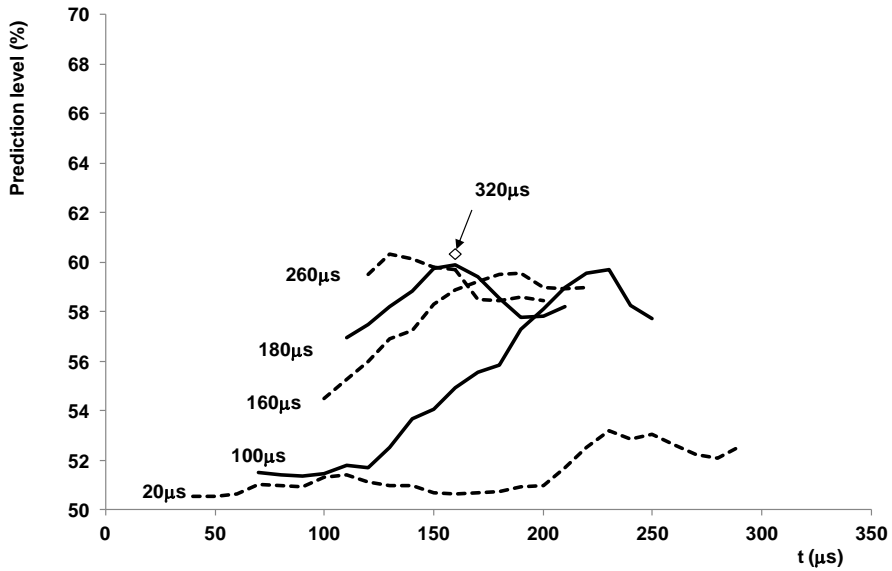


Figure 8. Trend of the prediction level for different time frames ΔT_i (indicated close to the curve) at different time T_j (horizontal axis) for the 24mm diameter electrode using only the current information.

4. Discussion.

For the 40mm electrode rod, the general result is that the mean value of the prediction level is clearly over 50% but remains below 70%. This indicates that with the information contained in a limited time frame it is possible to improve prediction of BW or WTH. Thus there are objective characteristics of the discharge magnitudes which are different for BW and WTH. If the prediction level was kept around 50% that would have meant that no objective difference between BW and WTH at early stages was found with the available information. It also indicates a relatively stable behaviour of the 40mm electrode.

The combination of photoemission and current measurements gives the best prediction level results but the use only of photoemission gives relatively poor results. This indicates that the length of the streamers is a relevant magnitude for BW but, probably, the space charge generated by the streamers (measured with the current) is more important. This is consistent with known streamer to leader transition criteria [7].

On the other hand, a prediction level below 70% also indicates that there is a lack of information and more measurements should be added to improve prediction and the capability of distinguishing between BW and WTH at early stages.

The 24mm electrode gives different results. The prediction level remains below 60% and shows no trend according to the time frame length and position. This shows that no objective stable difference between BW and WTH can be detected. However, if only the current curve is used, a similar trend appears for this electrode but with low prediction levels. If the photo emission information is added, the prediction level is slightly decreased and the general trend is

lost. Thus, in this case, photo emission is not providing useful information; probably due to a more random behaviour. In fact, it makes more difficult the discrimination between BW and WTH.

The case of the 1mm radius tip electrode gives even lower prediction level with no clear trend observed in any case. From a general point of view, it can be stated that, as the electrode radius decreases, the information contained in current and photo emission measurements is more difficult to treat in order to extract a clear trend. BW and WTH cannot be easily identified before breakdown. Probably, the corona emission from the electrode becomes less regular as the electrode radius decreases.

Another general result which is a confirmation of already known experimental observations is that the short early times containing the first corona and the following dark period do not have any relevant consequence on BW. This was already observed in earlier works [5]. In our case, the prediction level using short and early time frames ($<80\mu\text{s}$) is close to 50%.

5. Conclusions.

Our results show that there is an objective difference between BW and WTH, although no evident criterion can be given to predict before BW the result of an impulse test. A NN is able to improve prediction before BW with the information contained in a reduced time frame. The performed analysis can give an insight on when the critical point has been reached leading to BW or WTH. Two magnitudes have been used: current is a measurement of discharges amplitude and photoemission is converted into a measurement of discharges length. It is shown that for small radius electrode the combination of both magnitudes does not improve the prediction: Of course, if other direct magnitudes (more photoemission spatial levels, fast images, electric field in different points or others) or derived magnitudes (e.g. space charge distribution) were added, best prediction levels would be reached. Furthermore, if some magnitudes pointed out by the analysis could be modified, it should be possible to quantify their effect on the U50.

References

- [1] CIGRE, Study Committee 33. "Guidelines for the evaluation of the dielectric strength of external insulation", 1992.
- [2] C. Gary, G. Le Roy, B. Hutzler, J. Lalot, C. Dubanton, « Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions ». Ed. Eyrolles, Paris, 1984.
- [3] Les Renardières Group. Research on long air gap discharges at Les Renardières. Electra n°23, pp. 53-157, 1972.
- [4] Les Renardières Group. Research on long air gap discharges at Les Renardières -1973 Results-. Electra n°35, pp. 49-156, 1973.
- [5] Les Renardières Group. Positive discharges in long air gap at Les Renardières -1975 Results and conclusions-. Electra n°53, pp. 31-153, 1975.
- [6] Les Renardières Group. Negative Discharge in Long Air Gaps at Les Renardières. Electra n° 74, pp. 67-216, 1981.

[7] M. Becerra, V. Cooray. A self-consistent upward leader propagation model. *J. Phys. D: Appl. Phys.* Vol. 39, pp-3708–3715, 2006.

[8] A. Borghetti, F. Napolitano, C.A. Nucci, M. Paolone, M. Bernardi. Numerical solution of the leader progression model by means of the finite element method. 30th International Conference on Lightning Protection (ICLP), pp. 1498-1 to 1498-8, 2010.

[9] A. Beroual, J-H. Rakotonandrasana, I. Fofana. Predictive Dynamic Model of the Negative Lightning Discharge Based on Similarity with Long Laboratory Sparks - Part 1: Physical Process and Modeling. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* Vol. 17, No. 5; pp. 1551-1561, 2010.

ARTICULO 2

A NEW CONCEPT IN LIGHTNING PARAMETERS MEASUREMENT

David Ruiz ^{*1}, Carlos Torraba ¹, Jesús Puchades ¹, Iván Olivé ¹, Verónica Pomar ¹, Susana Polo¹, Pedro Llovera², Vicente Fuster², Francisco Magraner²

* Corresponding author:

Aplicaciones Tecnológicas S.A.

C/ Nicolás Copérnico 4

46980 Paterna, Spain

Telephone: +34 96 131 82 50

Telefax: +34 96 131 82 06

E-mail: druiiz@at3w.es

1 Aplicaciones Tecnológicas S.A. – Spain.

2 Institute of Electric Technology (ITE) Spain

Abstract

Nowadays some measuring system has been developed in order to measure directly electrical activity in tall objects likes power distribution lines, in this case, the obtained results are employed in the design of the protection systems. In the case of lightning rod installation in buildings, there are not so many collected data since there is very poor monitoring of the real time behaviour of lightning. Besides, the protection model applied for lightning rod installation is still mainly based on theoretical models data which are been revised nowadays. Moreover, the statistical data about lightning characteristics have been registered in some few points where equipment has been installed (mostly in tall structures, mountains, etc..) which may not be representative of the wide variety of different types of installations and emplacements. This paper describes the design and acquisition strategy followed to obtain an autonomous measurement micro station developed to measure some lightning parameters in a wide mesh of real lightning rods installations. Micro stations are small acquisition systems allowing measurement of electric activity in the lightning rod and electric field recording in the previous moments of the lightning stroke and some milliseconds after. The main utility of this system is the possibility to create a distributed network of sensors in several installations around a large area. Instead of triggering lightning or choosing points with high number of lightning impacts, the use of several measurement points should provide an acceptable amount of data in real installations correlated to the nature of emplacement.

Keywords

Measurement of lightning parameters, real lightning rods installations, sensor network, acquisition strategy

1 Introduction

Nowadays, the design of lightning protection systems is based in standards which provide the protection radius of lightning rods applying theoretical models based on statistical parameters of lightning currents (obtained in lightning parameters measurement stations or detection networks) and the so called “rolling sphere” method for air terminal placement 0. The placement method does not take into account many real parameters (electric field enhancement, atmospheric space charge, etc.) which may have an influence on the effectiveness of the lightning rod. Besides, there are very few, if none, experimental data published checking the validity of models in real installations **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** This shows that design methods, which give in general good results in the field from a protection point of view, have not really been modelled in a satisfactory way. One of the key points to obtain

better theoretical representation of lightning protection systems is to obtain lightning data from a variety of actual systems. We present here a new concept in lightning parameters measurement based in micro stations located in many points of a large area with different rates of strokes and measuring directly in different types of installations, taken into account the differences in the environment (emplacement, altitude, materials in the nearby, geographical situation, etc...) of each lightning rod installation. The advantage of this new method is the possibility to create a distributed network of micro stations connected to a main server to collect a high quantity of data related whit non-triggered lightning in different structures, emplacements, geographical situations, etc... which allows to create a database. Each micro station will be stroked very few times per year, but the whole set of measurements points will compensate the few amount of strokes per measuring instrument. That will give a wider range of data equivalent, to some extent, to the collected data in power lines where the experience is longer 0. Data about lightning strokes and behaviour of lightning protection system will be collected in order to improve theoretical models and lightning protection systems design. Other possibility of the measurement points might be to identify potential competitors of the lightning rod depending on the electrical activity in other critical points (corners, towers, etc.) close to the lightning rod.

2. Lightning parameter measurement stations.

In the last decades, some measurement systems for lightning parameters have been developed and installed, almost always in tall structures with a high level of strokes per year or triggering lightning 0. The information obtained using from those measurements has been very useful to obtain conclusions related with some aspects of previous moments to the leader's stroke and the lightning current. Those works provided because a big amount of data in order to obtain reliable statistics 0. However, using this method we only can obtain information about a specific structure with a defined shape in a special emplacement, so the conclusions obtained may not be extrapolated to all type of structures.

These lightning measuring systems have been installed in a fixed site what allows the use of expensive measuring equipment with lots of sensors and with high-performance systems 0. Using these equipments it is possible to measure lots of parameters related with lightning strike (brightness, sound, radiated magnetic field, etc...), but all these measuring are attached at only one event, so the process of obtaining reliable statistics is slow. Triggered lightning have shown some differences with natural lightning 0 although a higher frequency of lightning strokes is obtained. Triggered lightning is also very useful from an engineering point of view for material testing 0.

Another approach used in lightning characterization are the detection networks 0, where sensors are based in antennas. Detection networks are based on the measurement of the electromagnetic radiated field due to the lightning discharge. The algorithms give the location of the stroke and some parameters (polarity, amplitude, nature) of lightning. However, those measurements are indirect and difficult to manage to characterize a precise site.

As an extension of these three points of view (measuring in the points with high striking rate, triggering lightning or detection networks) the idea of creating a distributed network of direct measuring points to obtain lightning parameters is a new approach. Of course, the main limitation has been up to now the cost of the equipment and the need of human survey of the installation. Today, equipment systems for lightning parameters measurements are a mature technology, which allows the cost reduction and automation. The micro stations described below are based on low cost sensors, acquisition and storage system and autonomous function thus overcoming the present limitations.

3. Description of the system

The micro station have been designed according to the parameters to be measured and these parameters have been selected taking into account past experiences and experiments developed by various authors (K.Berger 0, Anderson and Eriksson 0, V.A.Rakov et al.0, Fusch et al.0, and G.Diendorfer et al.0). These experiences help us to determine the characteristics of the parameters to be measured and consequently, the specifications of the acquisition system to properly digitize signals from the sensors. However, it should be borne in mind that both the cost and ease in the installation of measuring equipment are essential, so it was decided that the parameters to measure are: lightning current and previous current with two Rogowski coils, electrostatic field and impulse electric field, with sensors based on atmospheric capacitors as sensors, and environmental conditions (temperature, humidity and atmospheric pressure).

3.1 The sensors

Impulse current is measured by means of two Rogowski coils designed and implemented using a very low cost procedure. It has been necessary to employ two Rogowski coils because the difference between the magnitudes of currents those are intended to measure (streamers (0-1kA) and lightning current (1-100kA)). They are based on air core coils designed with printed circuit boards or simple cable winding. The accuracy obtained is less than using commercial expensive sensors, but as it can be shown in the Fig 1, where it is compared the results obtained with the Rogowski coils and the internal calibrated shunt generator employed to calibrate our sensors, it's able to obtain a error smaller than 7% in the case of measuring current pulse with waveform 8/20 μ s and different amplitudes, this accuracy is enough to make acceptable measurements and the multiplication of measurement points will compensate the inaccuracy introduced by these low-cost sensors.

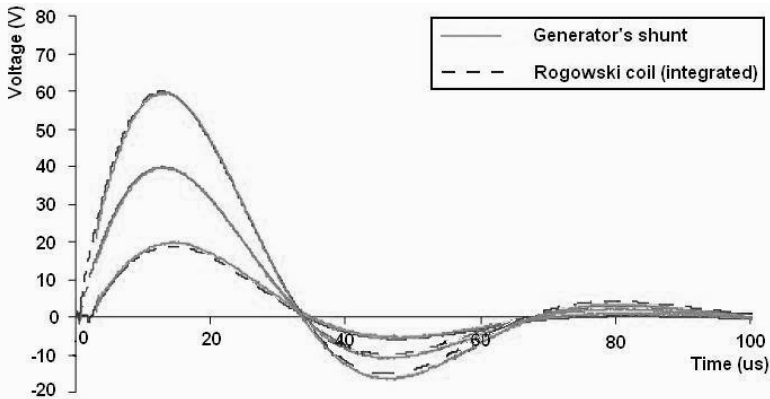


Fig. 1. Rogowski coil's response (integrated).

The electric field is measured with two different sensors, the first one based on technology FCES (Field-Controlled Electrometric Sensor) developed and patented by Aplicaciones Tecnológicas S.A. in Spain, this sensor offers a good response for low samples rate. In 0 The second of the sensors, designed to measure the impulse electric field, is based in an atmospheric capacitor too with a passive integration which makes it only suitable for higher frequencies. Fig 3 shows the sensor's response for a 500kV wave.

These signals and the ambient conditions (temperature, atmospheric pressure and humidity) are digitized too using a low speed sample frequency.

The use of the electric field as a trigger to digitalize the electrical activity is justified to capture the previous electrical activity associated with the leader, as if by selecting a trigger level of any of the Rogowski signals could be having false detections induced by external fields. Imaging of lightning strokes was not included in this first design.

By not using a coaxial shunt as current sensor, we didn't measure the very low frequency components of lightning (the Rogowski coils have an approx. wideband of 1kHz to 30MHz), which implies that the streamers may be measured correctly to be inherently high-frequency signals but the lightning current must to have low frequencies, so the inaccuracy in the measuring process depends of the frequency components of the waveform. This error should be taken into account and quantified to determine the maximum error in the measuring process. Some low cost shunt resistors were also developed but such sensors introduced the need of interrupting the downconductor thus modifying the lightning protection system of the customer or host of the micro station. This situation has been first discarded for safety reasons before further experience is acquired.

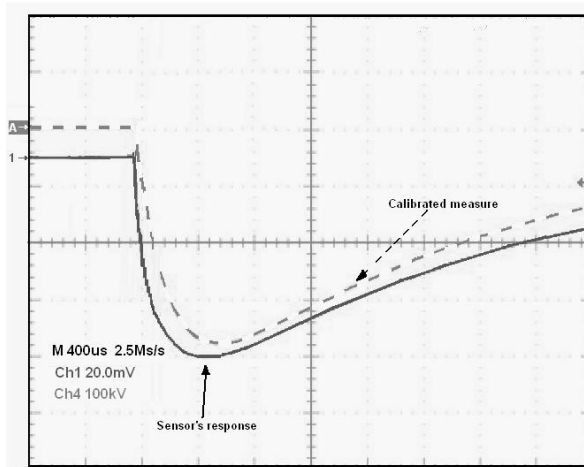


Fig. 2. Response of the sensor (continued) and calibrated measure (dashed)

3.2 The acquisition strategy

The acquisition strategy had defined to optimize both energy consumption as the capture of signals. Mainly, the measurement system consists in a continuous sampling of the signal from the electrostatic field sensor (FECS), previously conditioned, at a low sample rate of 10 samples/s (10SPS). If the electrostatic field level increases (or decreases) and cross the programmed threshold, the data acquisition board is programmed to increase its sample rate up to 1KSPS. This moment is considered by the system as the beginning of the storm. After this, the impulse electric field sensor is enabled and when a fast increase of the electric field occurs (due to the proximity of a leader) the sensor generates a trigger that wakes-up the storing of the data digitized of Rogowski coils and impulse electric field by the high speed sample system at a sample rate of 10MSPS. After this event, the stored temporal windows of 100ms (aprox.10ms before the stroke and 90ms after the strike) remains stored as an event waiting for the finish of the storm to send the data. The data of each signal have a size of 1MB and they can to be stored in the internal memory before to send it. When the storing process finishes, the low sample rate of the FECS signal at 1KSPS continues, finally when the electrical activity returns below the threshold, the sample rate returns at 10SPS and the events stored on the memory system are sent to the PC. In Fig 3 is shown the temporal diagram of the acquisition strategy.

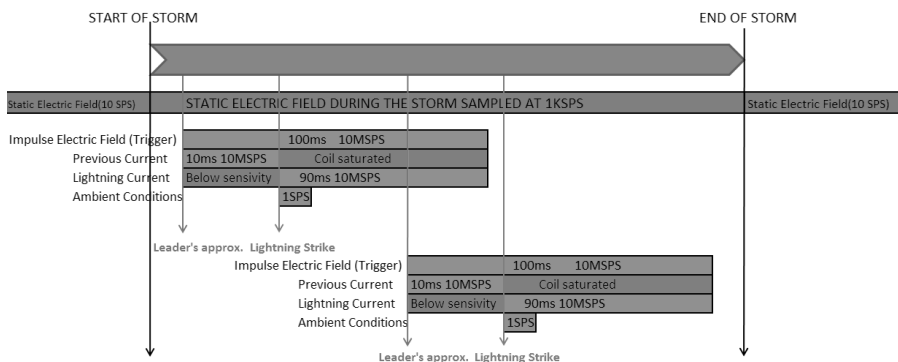


Fig. 3. Acquisition strategy to capture electrical activity

3.3 The acquisition system

The micro station is composed by a PC oscilloscope (4 channels, up to 50MSPS, 8 bits), a data acquisition board (8 channels, up to 48ksps, 8 bits), a power management system (solar panel, 12V 7Ah battery and battery charger) and a specially designed circuitry to sense the atmospheric conditions. The system is powered by a battery and a solar panel in order to make the micro station completely autonomous and also to protect the building electric network in the case of an isolation fault in the measuring system. The micro station is completely safe for the customers and its installations because all the measurements are done using electrical insulation measuring systems not disturbing lightning protection system behaviour. Every circuit included in the micro station has been shielded, grounded and protected against transient surges to avoid possible damages in the sensitive circuits. Fig.4. shows the diagram of the first design of the micro station and de Fig.5 shows this design developed.

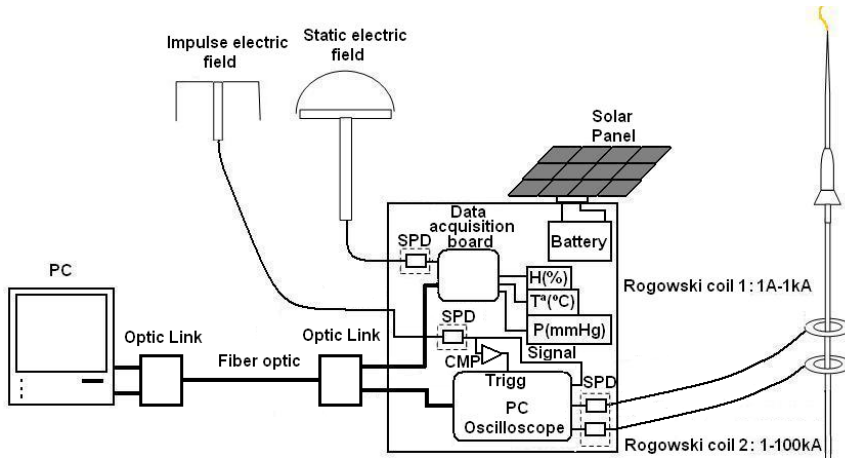


Fig. 4. Diagram of a micro station



Fig.5. Picture of the first design developed.

Specially developed software controls the micro station and the data acquisition system. It is composed of two independent programs allowing the displaying of the digitalized signals by the low speed system and the high speed system respectively.

The signal processing is done initially by the band pass filters included in the signal conditioning circuits that allows signals to be free of high frequency noise. Data processing is done digitally in the low speed software that integrates numerically (using a trapezoidal method) the two signals proceeding of the Rogowski coils and applies the corresponding formula for each sensor to indicate the correct physical magnitude.

Finally, to create the network, is necessary to connect each micro station via GSM-modem at a TCP-IP network identifying his IP number with the concrete emplacement and the characteristics of the environment and the lightning rod type. The server is evidently the master of the network and bases the communication in data socket, so is the server who asks at each node if new data has been stored and is not still sent, if the response is 'yes', the transmission process starts and the server store each file in the folder attached at the node that is sending packets with the data and time of each stored event. Using this simple method is very easy to identify the location and exact time where the lightning strike was happened.

The basic structure of the network is shown in the figure 7 and as it can see, the network is composed by different nodes and a main server using a point-to-multi-point configuration. In this way each micro station is not communicated with others micro stations and the sever receives data of one micro station each time because is the server who asks at each node if it has data not-transmitted.

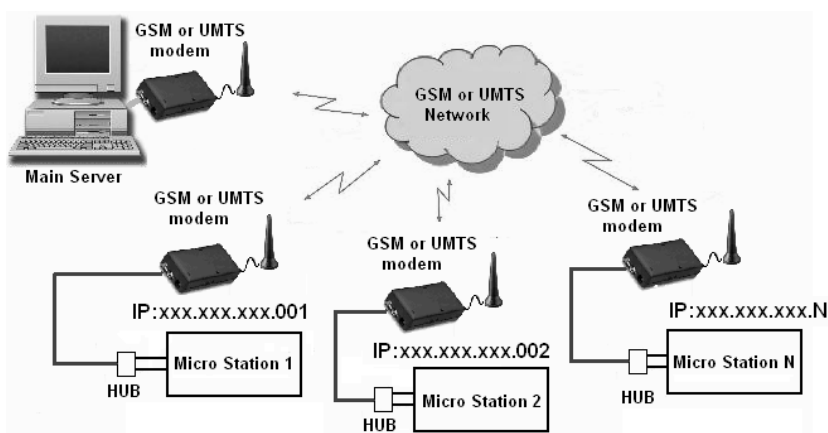


Fig. 6. Each node is connected with the server employing a point-to-multipoint connection.

4. Results

Tests were carried out at the high voltage laboratory. The main objective was to test the protection to electromagnetic disturbances. The micro-stations were placed under high impulse currents (up to 100kA) and high electric field (static field up to 20kV/m and impulse field up to 260 kV/m). It was not possible to apply both constraints at the same time due to the limitations of high voltage generators. However, micro stations were able to withstand such extreme conditions and register the signals.

The first system has been now installed in a real lightning protection system to check its behaviour before making the extension of the network. A selection of representative sites of different situations (urban, mountains, coast, tall structures, isolated objects, etc.) will be carried out according to the experience of the lightning protection systems

manufacturer. Finally, a reduction of the size and cost of the system will be carried out with a new own-designed circuit which will also allows a reduction in the energy consumption.

5. Conclusions.

After the validation of the designed low-cost sensors, it has been necessary to design and include the correct protection of the sensitive system against transient surges and radiated electromagnetic pulses, before the micro station was placed in a real lightning rod installation. The measurement equipment described in this work has been tested in non-natural lightning situations and the results obtained indicates that the system is able to made measures in a real lightning rod installation because the measurements done in the lightning test had enough accuracy. The first system has been now installed in a real lightning protection system to check the real behaviour before making the extension of the network. A selection of representative sites of different situations (urban, mountains, coast, tall structures, isolated objects, etc.) will be carried out according to the experience of the lightning protection systems manufacturer. Finally, a reduction of the size and cost of the system will be carried out with a new own-designed circuit which will also allows a reduction in the energy consumption.

Acknowledgements.

The work described in this paper belongs to the project funded by the IMPIVA with file number IMIDTA/2005/6 and developed in collaboration between Aplicaciones Tecnológicas S.A and ITE.

References

- International electrotechnical commission. International Standard IEC62305-3 "Protection against lightning- Physical damage to structures and life hazard". 2006.
- R.H.Lee, "Lightning protection of buildings". ". IEEE Transactions on industry applications, Vol1.A-15 No.3. May-June. 1979
- M.Bernardi, A. Borghetti, C.A. Nucci, F. Napolitano M. Paolone, F. Rachidi, R.Vitale, K. Yamabuki. "Lightning- Correlated faults in power distribution networks".Power Tech, IEEE Lausanne Vol. 1 Issue 5. July 2007
- V.A. Rakov, C.T. Mata, M.A. Uman, K.J. Rambo, A.G.Mata, "Review of Triggered-Lightning Experiments at the ICLRT at Camp Blanding, Florida". Power Tech Conference Proceedings. IEEE Bologna. Vol. 3 Issue 23-26. June 2003
- K.Berger, R.B.Anderson, H.Kroninger, "Parameters of lightning flashes". Electra No.41 pp.23-37, July 1975
- J.Takami, S.Okabe.."Observational results of lightning current on transmission towers". IEEE transactions on power delivery, Vol. 22, No. 1, Jan 2007.
- Y.Matsumoto, O.Sakuma, K.Shinjo, M.Saiki, T.Wakai, T.Sakai, H.Nagasaka, H.Motoyama, M.Ishii, "Measurement of lightning surges on test transmission line equipped with arresters struck by natural and triggered lightning". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No.2, April 1996.

M.Paolone, E.Petrache, F.Rachidi, C.A.Nucci, V.A.Rakov, M.A.Uman, D.Jordan, K.Rambo, J.Jerauld, M.Nyffeler.

“Lightning induced disturbances in buried cables- Part II: Experiment and model validation. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 47, No.3, August 2005

R.Orville, H.Songster, “The east coast lightning detection network”. . IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No.3, July 1987

G. Diendorfer, W. Schulz, and V. A. Rakov. “Lightning characteristics based on data from the Austrian Lightning Locating System”. IEEE transactions on electromagnetic compatibility Vol. 40, No. 4, November 1998.

R.B.Anderson, A.J.Eriksson, “Lightning parameters for engineering application”. Electra N°69, pp. 65-101, 1980.

V.A.Rakov, M.A.Uman, M.I.Fernandez, C.T.Mata, K.J.Rambo, M.V.Stapleton, R.R.Sutil. “Direct lightning strikes to the lightning protective system of a residential building: triggered-lightning experiments”. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 17, N°2, pp. 575-586, 2002.

Franz Fusch, E.U. Landers, R.Schmid, Johannes Wiessinger. “Lightning current and magnetic field parameters caused by lightning strikes on tall structures relating to interference of electronic devices”. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol 40, N°4, pp 444-451, Nov. 1998

G.Diendorfer, M.Mair, W.Schulz, W.Hadrian. “Lightning current measurements in Austria. Experimental setup and first results”. ICLP 2000, Rhodes-Greece, 18-22 Sept., pp. 44-47, 2000.

M.A.Uman, E.P.Krider.”A review of natural lightning: Experimental data and modelling”. IEEE Transactions on electromagnetic compatibility, Vol.EMC-24, N°2 May 1982.

C.Torralba, J.Puchades, I.Olivé, D.Ruiz, V.Pomar, P.Llovera. “Storm detection by static electric field measurements without mobile elements”. 11th International Conference of Electrostatics, 2009.

ARTICULO 3

Influence of the Scenario in the Calculation of Electric Field Intensification Factor

Part I: 2D Approximation

David Ruiz, Rubén Serna, Verónica Pomar and Susana Polo

Aplicaciones Tecnológicas S.A.
C/Nicolás Copérnico 4. 46980, Paterna, Valencia, Spain

ABSTRACT

Nowadays, the so called ‘Electric Field Intensification Factor’, usually noted as K_i , is evaluated with classical concepts or formulations employed in many applications related with partial and complete electric discharges. There are also engineering applications, such as lightning protection, where usually there is more than one object within the scenario and, evidently, those objects modify the electric field pattern and consequently this K_i , should be corrected considering this influence in order to evaluate properly the real conditions reproduced in the scenario under evaluation. In this

paper, some Finite Element Method (FEM) simulations have been done to get a dataset to make a regression thus obtaining an ‘environmental correction factor’, which will be a function of the dimensions of the main and secondary structures and the distance between them.

Index Terms - Electric field intensification factor (K_i), electric field pattern, F.E.M.

1. INTRODUCTION

The calculation of the ‘Electric Field Intensification Factor’ (shown in Figure 1), usually noted in the bibliography as K_i , has been widely characterized by employing approximations in many theoretical cases, where only one object is considered within the scenario under evaluation [1, 2]. There are some representative applications where this parameter is taken into account such as the design of electrical insulators, high voltage engineering, lightning protection systems, etc. In some of these applications it is common that other secondary objects are included inside the scenario under evaluation (for example a tree, an electrical distribution tower, structural elements in high voltage engineering, etc...). Obviously, any object placed within the scenario modifies the electric field pattern and consequently the ‘Electric field intensification factor’.

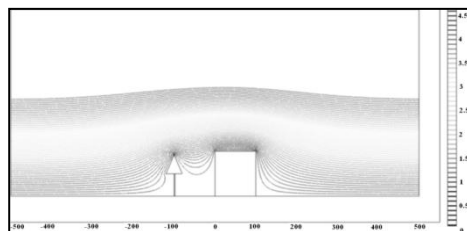


Figure 1. Distortion of equipotential lines caused by a tree. Structure and tree are considered as perfect conductors.

The aim of this paper is to present this problem and to evaluate it for lightning protection applications, in order to offer a procedure to evaluate this problem in other applications. Therefore, some scenarios have been evaluated with a single structure and with two adjacent geometries, modifying both the dimensions of the geometries and the distances between them in a 2D scenario, in order to obtain a dataset which will be employed afterwards to make a fitting of these data. In this way, K_i will be defined as a function of the geometry of the building, but a new ‘environmental correction factor’, called K_e , will be included in the ‘classical’ formulation of the K_i .

In this way, and taking as an example a typical scenario for lightning protection, Ke will be evaluated together with the modification of the strike probability obtained by a self-developed method which takes into account the ‘electric field onset’ [4, 5], the protection level and data accepted in international lightning protection standards [7].

2. CALCULATION METHOD

To evaluate scenarios, a F.E.M. tool was used to solve Laplace’s Equation $\nabla^2V = 0$ and to determine the voltage gradient $Ep = -\nabla V$. The F.E.M. simulation has been configured taking into account the relation between the computation load and the size of the mesh, but also the error due to the discretization of the plane. In this way, simulations have been done with a variable size triangular mesh where each triangle had a surface of approximately 0.36mm^2 near the evaluation points and 1m^2 at the less significant parts of the scenario. After the simulation, Ki was obtained as:

$$Ki = Ei / Es \quad (1)$$

Where Ei is the evaluated electric field at any point and Es is the electric field, both evaluated at any point for an isolated structure within the scenario. However, as mentioned above, classical formulation of the Ki factor does not take into account the influence of nearby objects so, in order to differentiate this concept, authors called this evaluated Ki as KT being:

$$K_T = Ki \cdot Ke \quad (2)$$

Where Kt is the ‘Total Intensification Factor’, Ki is the classical ‘Electric Field Intensification Factor’ and Ke is the ‘Environment Correction Factor’ which corrects the value of Ki as a function of the geometric parameters of the secondary structure. Evidently the presence of other structures will reduce the Ki factor compared to the isolated structure so, considering the relation described in (2), it follows that $Ke \in [0, 1]$.

The dataset was obtained from a scenario where a homogeneous electric field of 20kV/m was generated. Changing the dimensions and the distance between buildings by an iterative program, Ei was evaluated at the most representative points of this effect (both corners and the centre of the roof). After the normalization

of these KT , the different values of the Ke were obtained.

Each simulation was done firstly, employing a F.E.M. tool to obtain KT , and after with the self-developed algorithm which evaluates the probability of impact as a function of the electric field onset defined by Hartmann [6] as a generalization of the Peek’s law, and applying the function probability $P(r)$ described in [7] and shown in the Figure 2, which is based on lightning current peak value. For our simulation, we assumed an upward negative leader with protection level II ($I_{peak} \approx 10 \text{ kA}$).

$$E_{onset} \approx 2.6 \cdot 10^6 \cdot \left[1 + \frac{0.127}{r^{0.435}} \right] \quad (3)$$

r is the radius of the point considered in meters.

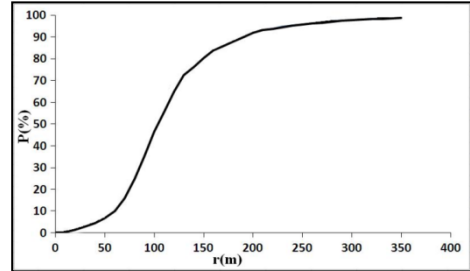


Figure 2. Cumulative frequency distribution function based on the lightning current peak value [7].

Hence, the probability of impact is defined as a function of E_{onset} , Kt , the protection level (LPL) and the rest of the points evaluated in the scenario which have a significant probability to be struck:

$$P_{impact} \sim f(E_{onset}, K_t, LPL, \Sigma K_t) \quad (4)$$

Where E_{onset} is calculated by equation (3), Kt is evaluated in each point, LPL is the protection level which imposes the minimum value of the lightning current considered and hence the generated electric field (here we have assumed a channel exponential charge distribution and a channel length of 5 km), ΣK_t considers the rest of points which have a representative possibility to be struck.

3. RESULTS

By using iterative simulations with a F.E.M. tool, and varying the height and width, K_i factors have been obtained at the corners and at the roof for an isolated structure, as shown in Figure 3.

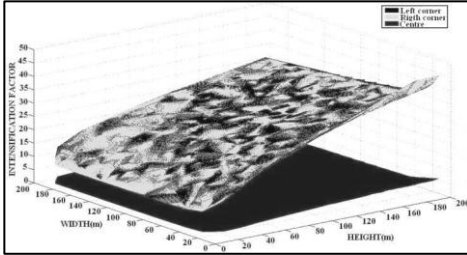


Figure 3. K_i factors at the corners and the centre of the roof for different widths and heights. In a symmetric scenario both corners have the same K_i factor.

Fitting the dataset obtained by simulation with a simple linear regression procedure, the relation for the K_i factor at the corners of the structure was found to be of the form:

$$K_i \sim C1 (1+C2+(1+H/W)+C3(W^2 + H^2) + C4\ln(H+W)) \quad (5)$$

And at the centre of the roof:

$$K_i \sim C5+(1+ C6 \cdot (H/W)+C7(L-W)) \quad (6)$$

C_n are constants.

In both cases equations (5) and (6), the error in the fitting has been found to be lower than 10% over the whole amount of data population (5000 points). In many applications, this error is assumable. Employing the self developed algorithm has made possible the estimation of the probability of impact in the points under evaluation as shown in Figure 4.

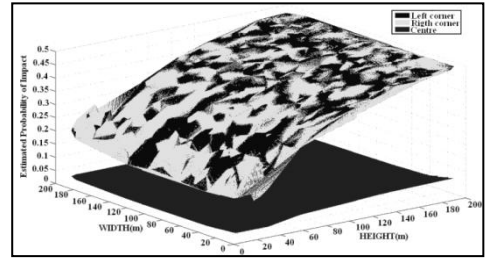


Figure 4. Estimation of the probability of impact in the different points under evaluation.

The relative similarity in the tendency between Figures 3 and 4 is representative of the fact that the K_i factor has a direct influence on the probability of impact.

If the scenario is changed as shown in Figure 5, that is, including a fixed size structure of 90 x 50 m at a distance of 50m, the electric field pattern is modified and consequently K_i factor changes as shown in Figure 6.

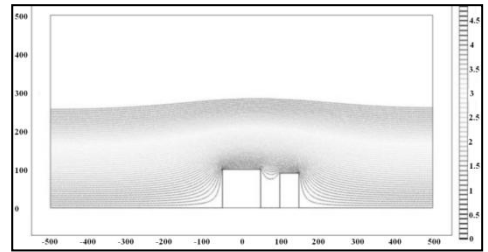


Figure 5. Scenario with a new structure near the main one.

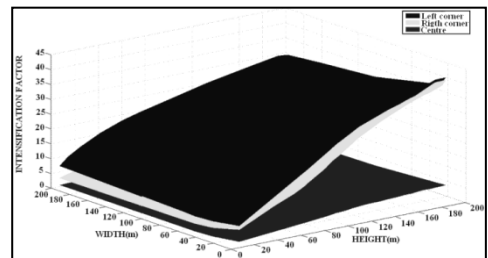


Figure 6. K_i factors at the corners and the centre of the roof for different widths and heights of the main structure and a fixed size of 90x50m for the secondary structure.

Figure 6 show that the K_i factor at the corner closer to the secondary structure is affected more than the farthest one which remains practically

unchanged. Evidently, if the scenario is modified, then the new K_i factor depends now on other variables, as shown in equation (7).

$$K_i \sim f(H_1, W_1, H_2, W_2, d) \quad (7)$$

where H_1, W_1 is the height and width of the main structure, H_2, W_2 , is the height and width of the ‘secondary’ structure and d is the distance between them.

Hence, the estimation of the impact probability changes significantly, as shown in Figure 7, decreasing significantly its value at the corner closer to the other structure.

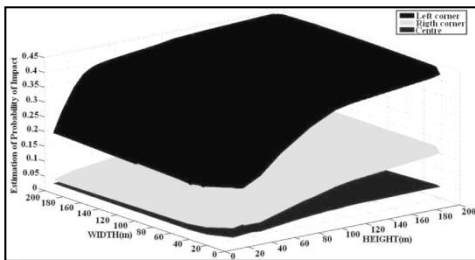


Figure 7. Estimation impact probability in different points when the new structure is placed in the scenario.

In order to make the fitting procedure, a wider evaluation of different scenarios has been done expanding the data population. Figure 8 shows a simulation of K_t factor at the right corner, fixing the dimensions of the main structure at 30 x 80m and varying the dimensions of the secondary structure and the distance between buildings.

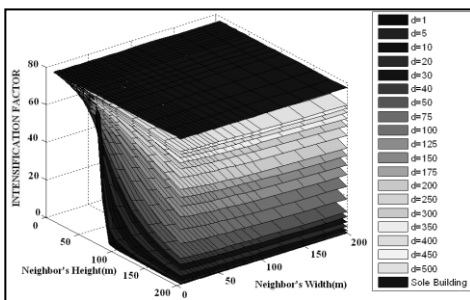


Figure 8. K_t factors at the right corner fixing main structure dimensions at 30 m x 80 m.

The five variables taken into account (height and width of the main and secondary structure and the separation between both structures) have an influence in the value of the K_t factor and

consequently in the ‘Environment Intensification Factor’ but it is also shown that for large separation distances and in the centre of the roof, the width of the structures is practically irrelevant.

In the case of the lightning protection techniques, these conclusions are consistent with the most relevant standardized models employed in the protection of facilities such as the ‘Electro Geometric Model’ (EGM), where the height of the buildings and the radius of the ‘rolling sphere’, which is related with the protection level, determines the protected zones, or the ‘Cone of Protection’ where only the dimensions of the structure are considered.

With a complete dataset it has been possible to obtain each value of K_t . Using equation (2) and the values of K_i obtained in previous simulations, the values of K_e in different conditions are shown below in the Figures 9a, 9b and 9c were obtained.

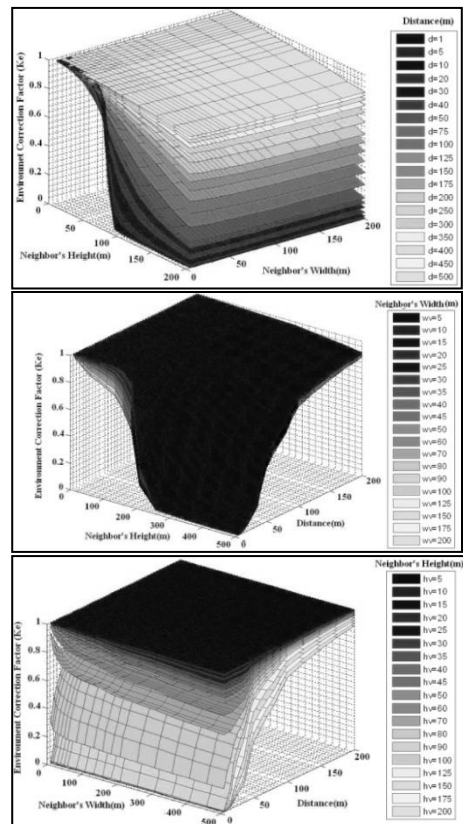


Figure 9. K_e factor evaluated under different situations.

With data presented in the previous graphs K_t has been determined by a fitting procedure and it has been possible to obtain that the relationship to determine K_t factor in the corners has the form of:

$$K_t \sim C_1 \cdot \left((1 - \tanh(H_s - H)) \cdot \ln(d) \right) \cdot C_2 \cdot e^{1-(W_s-W)} \cdot \left(\frac{1+C_3(1+H/W)+C_4(W^2-H^2)}{+C_5 \ln(H+W)} \right) \dots (8)$$

And in the centre of the roof:

$$K_t \sim C_6 \cdot \left((1 - \tanh(H_s - H)) \cdot \ln(d) \right) \cdot \left(1+C_7 \cdot (H/W) + C_8 \cdot (H-W) \right) \dots (9)$$

It is evident that equations (5) and (8) differ from the equations (6) and (9) just at two or one term, respectively, which includes the separation between structures, and the difference between widths and heights. So employing equation (2) it is possible to determine K_e factor as follows:

$$K_e \sim C_1 \cdot \left((1 - \tanh(H_s - H)) \cdot \ln(d) \right) \cdot C_2 \cdot e^{1-(W_s-W)} (10)$$

Where in the case of the centre of the roof $C_2 = (e^{1-(W_s-W)})^{-1}$ and C_1 is one order of magnitude lower than in the case of the corners. As shown in Figure 10, equation (10) is consistent with the observations made previously.

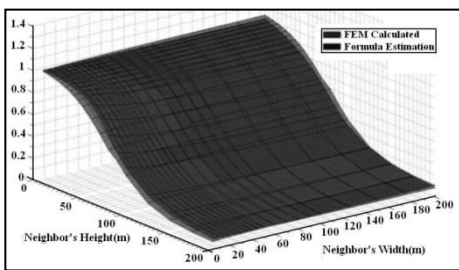


Figure 10. Measured and estimated K_e factors at the right corner fixing main structure dimensions at 30x80 m and distance at 25 m.

At this point, it has been demonstrated that any object placed into a scenario has an influence that should be evaluated properly. It is also possible to establish a mathematical dependence between the geometrical parameters of the new object in the

scenario and its influence on the points under evaluation.

4. CONCLUSIONS

The value of K_i factor produced in any point of a single building has been investigated by some authors. The commonly used formulas to calculate K_i don't take into account particularities of the scenario, so they are not able to calculate this parameter properly in applications where the objects under evaluation are not alone in the scenario. In this paper it is evidenced the influence of any new element within the scenario under evaluation in the calculation of the K_i factor. A tool to obtain these new values has been proposed, which may be of interest in some applications.

It has been demonstrated that the maximum value of K_i factor, produced by any geometry, is obtained when the structure is isolated or when the distance between structures is large enough. The K_e factor has been found to be related to the difference between heights, the difference between widths and the distance between both structures. With a fitting error lower than the 10%, this value may be considered acceptable for most of applications considered here.

REFERENCES

- [1] J. R. Gumley, G. Berger, "A review of the lightning attachment process and requirement to achieve improved modelling", 24th International Conference on Lightning Protection, pp. 442-446, 1998.
- [2] F. D'Alessandro, "The use of 'Field Intensification Factors' in calculations for lightning protection structures", J. Electrostatics, Vol. 58, pp. 17-43, 2003.
- [3] V. Cooray, V. Rakov and N. Theethayi, "The lightning striking distance - Revised", J. Electrostatics, Vol. 65, pp. 296-30, 2007.
- [4] H. C. Miller, "Change in field intensification factor β of an electrode projection (Whisker) at short gap lengths", Journal of Applied Physics, Vol. 38, No. 11, pp. 4501-4504, 1967.
- [5] K. Fesser, "Influence of corona discharges on the breakdown voltages of air gaps". Proc. IEE, Vol. 118, No. 9, pp. 1309-1313, 1971.

-
- [6] G. Hartmann, "Theoretical evaluation of Peek's Law", IEEE Trans. Indus., Appl. Soc., Vol. 20, pp. 1647–1651, 1984.
- [7] IEC 62305-1 Edition 2: 2010-12: Protection against lightning –Part 1: General principles.

