

# GUÍA DE BUENAS PRÁCTICAS PARA LA PREVENCIÓN Y PROTECCIÓN CONTRA EL RAYO EN “PARQUES EÓLICOS”



Guía desarrollada por la Fundación para la Formación en Energías Renovables y TESICNOR.



Los autores agradecen a la empresa aseguradora AXA por los datos facilitado sobre siniestros por rayo en aerogeneradores.

Esta guía ha sido elaborada gracias al apoyo del Gobierno de Navarra y la financiación del Instituto Navarro de Salud Laboral.

El Gobierno de Navarra no se identifica necesariamente con el contenido de la misma.



## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>5</b>
<b>2. NORMATIVA</b>	<b>7</b>
2.1. NORMATIVA DE PREVENCIÓN DE RIESGOS LABORALES	7
2.2. NORMATIVA TÉCNICA	7
2.3. NORMATIVA INTERNACIONAL	8
2.4. PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES	8
2.5. NORMATIVA SOBRE AVISOS DE TORMENTA	8
2.6. ESPECÍFICA DE PROTECCIÓN FRENTE AL RAYO EN AEROGENERADORES:	8
<b>3. DAÑOS POR RAYO</b>	<b>9</b>
3.1. MUERTES POR RAYO	9
3.2. DAÑOS EN AEROGENERADORES	9
3.3. NATURALEZA DE LOS DAÑOS	10
3.4. SINIESTROS POR RAYO EN EL SECTOR EÓLICO	11
3.5. EL SECTOR EÓLICO Y EL SEGURO	12
<b>4. ORIGEN Y COMPORTAMIENTO DE LOS RAYOS.</b>	<b>14</b>
4.1. EL PODER DE PUNTAS.	17
4.2. CONTROL DE LOS RAYOS.	18
4.3. CARACTERÍSTICAS Y EFECTOS DEL RAYO.	19
4.4. MAPA CERÁUNICO	20
<b>5. EVALUACIÓN DEL RIESGO DE IMPACTO DE RAYOS</b>	<b>22</b>
<b>6. REDES GLOBALES INFORMACIÓN DESCARGAS ELÉCTRICAS</b>	<b>23</b>
6.1. WORLD WIDE LIGHTNING LOCATION NETWORK	23
6.2. SISTEMA LIS DE LA NASA	23
6.2.1. METODOLOGÍA Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	24
6.3. METEOALARM	25
<b>7. DETECTORES DE TORMENTAS</b>	<b>27</b>
7.1. FASES DE LAS TORMENTAS	28
7.2. CLASIFICACIÓN Y PROPIEDADES DE LOS DISPOSITIVOS DETECTORES DE TORMENTAS.	29
7.3. DETECTORES DE CLASE I	30
7.4. DETECTOR CLASE II	31
7.5. DETECTOR CLASE III	32
7.6. DETECTOR CLASE IV	32

<b>7.7. TÉCNICAS DE LOCALIZACIÓN</b>	<b>32</b>
7.7.1. TÉCNICAS DE LOCALIZACIÓN CON VARIOS SENSORES	32
7.7.2. TÉCNICAS CON UN SOLO SENSOR	33
<b>7.8. APLICACIONES DE LAS DIFERENTES TÉCNICAS DE DETECCIÓN.</b>	<b>34</b>
<b><u>8. PROTECCIÓN CONTRA EL RAYO EN AEROGERADORES</u></b>	<b><u>36</u></b>
8.1. PALAS	36
8.2. SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA IMPACTOS DIRECTOS DE RAYOS	36
8.3. PROTECCIÓN DE LA NACELLE	39
8.4. BUJE	39
8.5. CAPOTA	40
8.6. TORRES TUBULARES DE ACERO	40
8.7. TORRES DE CELOSÍA	41
8.8. TORRES DE HORMIGÓN	41
8.9. SISTEMA DENTRO DE LA TORRE	42
8.10. RODAMIENTOS	42
8.11. SISTEMAS HIDRÁULICOS	43
8.12. DESCARGADORES Y ESCOBILLAS	43
8.13. CONEXIÓN EQUIPOTENCIAL	44
8.14. TRAZADO DE CABLES Y APANTALLAMIENTO	44
<b><u>9. SISTEMAS DE PUESTAS A TIERRA EN AEROGENERADORES</u></b>	<b><u>45</u></b>
9.1. CRITERIOS PRÁCTICOS SEGUIDOS POR VARIAS EMPRESAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LOS SISTEMAS DE PUESTAS A TIERRA DE LOS PARQUES EÓLICOS	48
<b><u>10. SEGURIDAD PERSONAL DURANTE TORMENTAS ELÉCTRICAS</u></b>	<b><u>52</u></b>
<b><u>11. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA</u></b>	<b><u>55</u></b>

## 1. INTRODUCCIÓN

Según datos de la Organización Mundial de la Salud, México es el país con el mayor número de [muertes por rayos](#) en el mundo, seguido de Tailandia y el Sur de África. La investigadora Beata Kucienska, del Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) de la UNAM, confirma en sus estudios, que en los últimos 30 años han muerto cerca de 7000 personas por este fenómeno, un promedio de 233 muertes por año.

Los parques eólicos tienen todos los elementos para ser considerados una estructura de riesgo por sus altas posibilidades de recibir un impacto de rayo.

En la fase de construcción de un parque eólico no se dispone todavía de las instalaciones de protección frente al rayo, lo que obliga a tener una vigilancia sobre la presencia de una tormenta, con objeto de poder paralizar los trabajos con la antelación suficiente para detener las maniobras o montajes en condiciones de seguridad y dar tiempo a los operarios para que se resguarden en lugares seguros.

En la fase de explotación y mantenimiento de los parques eólicos, si bien las instalaciones disponen de sistemas para la protección frente al rayo, las incertidumbres ante este fenómeno natural aconsejan igualmente la paralización de los trabajos y el refugio de los operarios hasta que pasa la tormenta.

En los últimos años se han producido importantes avances tecnológicos y normativos en torno a la protección frente al rayo de las instalaciones. La **protección preventiva** consistente en **disponer de información anticipada** (procedente de un detector de tormentas) que permite al usuario **iniciar medidas preventivas temporales** antes del comienzo de la actividad tormentosa, ha sido uno de los avances más significativos.

A pesar de todo, a fecha de hoy sigue existiendo una cierta incertidumbre en torno a la protección frente al rayo, ya que la reciente normativa requiere de una adecuada interpretación. Igualmente la aplicación de sistemas de detección sigue siendo muy escasa. Si bien son varias las empresas que han realizado aplicaciones concretas, los resultados por lo general son diferentes en cuanto a la fiabilidad de los avisos.

Parece pues interesante abordar la elaboración de una Guía de buenas prácticas frente a la prevención y protección frente al riesgo de descargas atmosféricas, ya que el sector eólico acomete instalaciones en zonas de riesgos y las medidas frente al riesgo de rayo que figuran en los estudios de seguridad y salud, siguen siendo muy básicas y prácticamente dirigidas a la

observación visual de las tormentas y en consecuencia a la paralización de los trabajos, situación que no es siempre evidente y clara.

Los objetivos de la presente guía son el dar a conocer con mayor profundidad el fenómeno del rayo, las normativas aplicables, los avances para su detección y los sistemas de protección, con el fin de que el riesgo por rayo pueda ser evaluado con mayor precisión en los Estudios y Planes de Seguridad y Salud y establecidas las medidas de prevención y protección para que el riesgo por rayo quede controlado tanto en fase de construcción como en la explotación y mantenimiento de parques eólicos.

## 2. NORMATIVA

Principales normas que han sido analizadas para la elaboración de guía:

### **2.1. NORMATIVA DE PREVENCIÓN DE RIESGOS LABORALES**

- REAL DECRETO 1627/1997, de 24 de octubre, por el que se establecen disposiciones mínimas de seguridad y salud en las obras de construcción.

ANEXO IV. Disposiciones mínimas de seguridad y de salud que deberán aplicarse en las obras

Parte C: disposiciones mínimas específicas relativas a puestos de trabajo en las obras en el exterior de los locales.

4. Factores atmosféricos.

Deberá protegerse a los trabajadores contra las inclemencias atmosféricas que puedan comprometer su seguridad y su salud.

- REAL DECRETO 1215/1997, de 18 de julio por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización por los trabajadores de los equipos de trabajo.

Anexo II: Disposiciones relativas a la utilización de los equipos de trabajo  
12. Los equipos de trabajo que puedan ser alcanzados por los rayos durante su utilización deberán estar protegidos contra sus efectos por dispositivos o medidas adecuadas.

### **2.2. NORMATIVA TÉCNICA**

- Código Técnico de la Edificación: establece la necesidad u obligación de instalar un SPCR. Tiene un cálculo del índice de riesgo.
- UNE 21186: estándar para la protección de estructuras, edificaciones y zonas abiertas mediante pararrayos con dispositivo de cebado.
- UNE 21186: estándar para la protección de estructuras, edificaciones y zonas abiertas mediante pararrayos con dispositivo de cebado.
- UNE EN IEC 62305: de ámbito nacional, europeo e internacional, establece la necesidad de instalar un SPCR. Contempla cálculo de índice de riesgo e incluye coordinación de protectores contra sobretensiones.
- UNE EN IEC 62561: de ámbito nacional, europeo e internacional, se centra en los componentes de protección contra el rayo

### **2.3. *NORMATIVA INTERNACIONAL***

- NF C 17-102- Francia: protección contra el rayo a través de PDC.
- NFPA 780-EEUU: instalación de sistemas de protección contra el rayo
- J-549-ANCE-2005: Sistema de protección contra tormentas eléctricas (MX)
- IRAM 2426 (Argentina); JUS N.B4.810 (Rf Yugoslavia); NP 4426 (Portugal); I-20 (Rumanía); STN 34 1391 (Eslovaquia);...
- UL1449 - EEUU: Transient Voltage Surge Suppressors (US)
- DIN VDE 0675 - Alemania: Überspannungsableiter (DE)
- UTE C 15-443 - : Protection des installations electriques basse tension contre les surtensions d'origine atmospherique. Choix et installation des parafoudres
- NF C 61-740: parafoudres pour installations basse tension (FR)

### **2.4. *PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES***

- Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión (REBT) – ITC BT23: marca la necesidad u obligación de instalar protectores contra sobretensiones.
- UNE EN IEC 61643: de ámbito nacional, europeo e internacional, versa sobre la instalación y requisitos de los protectores contra sobretensiones (incluyendo ensayos).
- UNE EN 50550: de ámbito nacional, europeo e internacional, establece los requisitos de calidad, seguridad y compatibilidad electromagnética que deben cumplir las protecciones contra sobretensiones permanentes.

### **2.5. *NORMATIVA SOBRE AVISOS DE TORMENTA***

- EN 50536: norma europea de sistemas de aviso de tormentas eléctricas que determina la necesidad de instalar detectores de tormentas, así como las características principales de los mismos.

### **2.6. *ESPECÍFICA DE PROTECCIÓN FRENTE AL RAYO EN AEROGENERADORES:***

- Norma IEC 61400-24, Protección contra el rayo en aerogeneradores.
- 'Directriz Europea para la Protección contra Incendios de Aerogeneradores'



### 3. DAÑOS POR RAYO

#### 3.1. **MUERTES POR RAYO**

La caída de rayos causa un número importante de muertes en los países en desarrollo. Una economía principalmente agrícola, mano de obra e infraestructuras deficientes y un clima tropical juegan un papel importante en las tasas más altas de lesiones y muertes relacionadas con el relámpago en países como Sudáfrica, Malasia, India y Bangladesh. El trabajo al aire libre, las fábricas y los edificios con estructuras deficientes, el transporte en vehículos abiertos y la falta de lugares seguros para resguardarse durante las tormentas, explican el elevado número de accidentes por rayo en estos países.

En la India [un rayo mató a 32 personas](#) durante una tormenta solo en octubre de 2013. No existen estadísticas sólidas sobre el número de personas muertas por un rayo en la India en general, ya los incidentes a menudo no se denuncian, pero los científicos estiman que el número es más de 3.000 por año. En Nepal, se registraron más de 130 muertos por un rayo en 2012, y el promedio para África del Sur es de aproximadamente 260 muertes por año.

Incluso en los EE.UU., el seguimiento de incidentes de rayos es complicado debido a que no se requiere que sean reportados a ninguna agencia, por lo que no hay ninguna base de datos universal. Como en otros países, los expertos a menudo se quedan con poco más que informes de prensa para seguir adelante. Aún así, los números tienden a ser más bajos en los EE.UU. que en los países en desarrollo, según expertos. En el año 2013 hasta el mes de septiembre, 23 personas habían muerto en los EE.UU., por motivo de caída de rayos, [según informes](#) recogidos por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica.

#### 3.2. **DAÑOS EN AEROGENERADORES**

La protección frente a las descargas atmosféricas en turbinas eólicas es algo que preocupa enormemente al sector asegurador por varios motivos:

Los aerogeneradores constituyen un blanco natural para el rayo.

- La cobertura de daños por impacto del rayo constituye una cobertura básica dentro de las pólizas del seguro de incendio.
- Tanto las reparaciones como las pérdidas de producción por paralización, generalmente, son muy elevadas.
- Los sistemas actuales de protección contra el rayo no proporcionan una eficacia de protección al 100%.

### **3.3. NATURALEZA DE LOS DAÑOS**

Los sistemas actuales no garantizan una protección segura a las descargas, ya que hay dos factores determinantes que no pueden controlar:

- La polaridad del rayo
- La intensidad de energía que se generará en la descarga.

En función de la polaridad del rayo, se producen diferentes efectos de carácter electrodinámico, térmico, eléctrico, magnético y electromagnético:

- En el caso de un rayo de polaridad positiva (el rayo sale desde la pala de la turbina con dirección a la nube) este fenómeno provoca la destrucción física de materiales y no tanta destrucción de equipamiento eléctrico. En este caso, la pala puede salir despedida debido a los efectos del impacto, provocando la desestabilización del rotor y plegando o tumbando lateralmente el aerogenerador.
- En caso de rayo de polaridad negativa, su trayectoria será descendente desde la nube al punto de contacto (pala) y se producirán efectos (directos e indirectos), empezando en la punta de la pala y finalizando en la toma de tierra (donde llegará a evaporarse el agua que ésta pueda contener y los minerales podrán cristalizar por ionización).

En este segundo caso, en el punto de impacto del rayo, se produce una fusión instantánea y una pérdida directa de material, con riesgo de incendio. Seguidamente la corriente del rayo, de alta tensión, genera a su paso la modificación molecular de los materiales con que está construida la pala. Estos efectos provocan a corto plazo la fatiga de los materiales, y algunos llegan a perder su comportamiento de flexibilidad y resistencia mecánica para lo que fueron diseñados pudiendo salir también las palas disparadas.

Además, la corriente del rayo, en su recorrido por los conductores de menor resistencia eléctrica, genera alta temperatura y arcos eléctricos y pasa a la góndola por medio de los propios conductores o vía de chispa (al eje del rotor y al propio generador).

Por su parte, los efectos electromagnéticos del impacto del rayo y de la corriente a su paso crean acoplamientos e inducciones a la electrónica sensible de navegación y orientación al viento del aerogenerador. Los efectos del rayo generan la avería directa en parte de la electrónica de la regulación de frenado y el rotor aumenta peligrosamente su velocidad, ya que cuando aparece este fenómeno del rayo es porque hay tormenta y vientos fuertes, coincidiendo en un aumento de las revoluciones al límite de recalentamiento de cojinetes. Esto

puede llegar incluso a transformarse en un incendio del aceite que se usa en la lubricación. Una vez iniciado el incendio del grupo generador, éste se puede extender a la góndola y finalmente acabarse incendiando también las palas. Éstas se desprenden, saltan en trozos y la turbina queda destruida en su posición vertical en el mejor de los casos o en el suelo (lo más habitual).

### **3.4. SINIESTROS POR RAYO EN EL SECTOR EÓLICO**

Algunos siniestros publicados en prensa escrita:

- *Un rayo le dobló por completo una de las tres palas a un aerogenerador del parque eólico de Cabo Vilán, en Camariñas - A Coruña (2011)...;*
- *Pierde media pala uno de los aerogeneradores del parque eólico del monte Faro, en Chantada - Lugo. La causa más probable del accidente es la caída de un rayo (2010)...;*
- *Rotura de pala por impacto de rayo en un aerogenerador del parque eólico Rubió I, en Rubió - Barcelona (2007)...;*
- *Impacto del rayo en aerogenerador del parque eólico de Vimianzo – A Coruña (2002)...;*
- *Una fuerte tormenta ha destruido partes de un aerogenerador situado entre Brieske y Schwarzheide, en Alemania. Pedazos volaron 150 metros y aterrizaron unos 50 metros de la carretera federal Nº 169. No hubo víctimas. La pala, de unos 40 metros de largo, rompió varios árboles al abrirse camino en el bosque. En la pala se podían ver daños los causados por un rayo (2009)...*

En algunos parques eólicos, los aerogeneradores registran múltiples impactos de rayos por año (hasta 10 impactos de rayos en cada pala por año), eventos que en algunos casos no generan daños importantes debido a los sistemas de protección y toma de tierra que incorporan, pero que en otros pueden llegar a provocar el colapso de la estructura.

Como los rayos tienden a caer en los puntos más altos, por esta razón los aerogeneradores constituyen un blanco natural: a causa tanto de su altura como su elevado emplazamiento.

El problema de las descargas atmosféricas en los aerogeneradores es un problema creciente, debido fundamentalmente, por una parte, al aumento en el número de unidades instaladas y, en segundo lugar, y quizás más importante, debido al constante incremento de la altura de las mismas.

Por otro lado, con los medios actuales, la posibilidad de combatir los incendios en altura (góndola o rotor) es muy remota, motivo por el cual los incendios, normalmente, concluyen con la destrucción total del aerogenerador.



Caída de rayo en aerogenerador

Un estudio realizado en Dinamarca (IMIA: *International Association of Engineering Insurers*) refleja que el origen los daños más habituales en aerogeneradores se distribuyen como sigue:

Origen	% N ° Siniestros	% Coste Siniestros
Mecánico	40	40
Impacto rayo	20	25
Incendio	7	9
Tormenta (viento, etc.)	4	2
Disponibilidad	1	0
Otros (cortocircuitos, etc.)	28	24

### 3.5. EL SECTOR EÓLICO Y EL SEGURO

Actualmente la energía eólica constituye, para el sector del seguro, un negocio arriesgado:

- Las causas de los principales siniestros son tanto de origen interno (averías mecánicas, eléctricas, electrónicas o hidráulicas), como de origen externo y por fenómenos de la naturaleza (impacto del rayo, viento, etc.).
- Las coberturas de avería de maquinaria y la de pérdida de beneficios son las coberturas más delicadas.
- Cuanto más potentes son las instalaciones, también resultan más vulnerables.
- No existen condiciones de seguro estándar.
- El precio del seguro depende de múltiples factores: coberturas, emplazamiento, número de aerogeneradores, potencia y antigüedad, tipo de mantenimiento, protecciones, franquicias, etc.
- Los riesgos y las consecuencias económicas de los daños se incrementan en el caso de instalaciones offshore.

#### 4. ORIGEN Y COMPORTAMIENTO DE LOS RAYOS.

Los rayos se originan por la transferencia (súbita) de la carga eléctrica acumulada en la nube a otra nube o a tierra. En el primer caso se tiene la llamada descarga entre nubes y en el segundo la descarga atmosférica o rayo a tierra. En el presente análisis se referirá únicamente a este último caso.

La acumulación de la carga en las nubes se origina por la fricción de estas contra corrientes de aire, generalmente de variadas temperaturas así como por la recolección de cargas existentes en la atmósfera. La distribución más probable de las cargas dentro de la nube consiste en una acumulación de cargas positivas en la parte superior y negativas en la parte inferior. A manera de un condensador en el cual el dieléctrico está constituido por la parte central de la nube. Este denominado “efecto del condensador” se presenta entre la parte inferior de la nube y la tierra, en la cual hay una acumulación de las cargas positivas conforme se indican en la fig 1.1

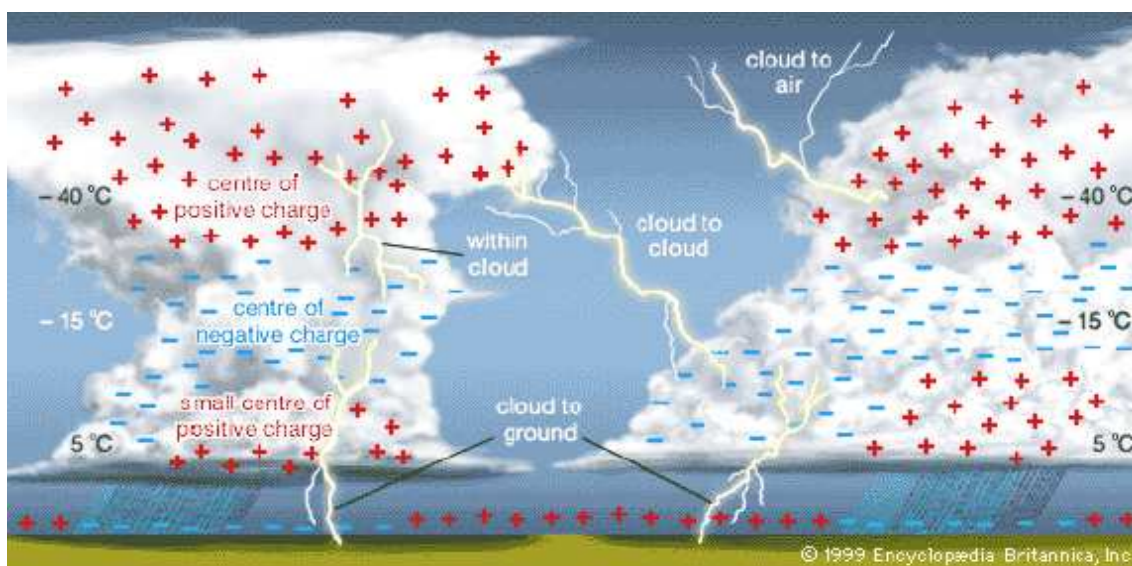


Fig. 1.1. Distribución típica de cargas en las nubes y en la tierra.

Cuando la acumulación de cargas negativas en la nube alcanza valores altos (electro estáticamente críticos), la repulsión entre cargas de igual signo originan un desplazamiento de estas hacia las de signo contrario a través de canales de carga en el aire. En estos canales, al tiempo que crecen, se despliegan lateralmente en forma aleatoria, debido a efectos electroestáticos y el viento, prolongándose unas veces y encontrándose otras.

El relámpago de nube-a-tierra es el más perjudicial y peligroso de los relámpagos, aunque no el tipo más común. La mayoría de las descargas originan cerca del centro de la carga bajo-negativo y entrega carga negativa a Tierra. Sin embargo, una minoría apreciable de las descargas lleva carga

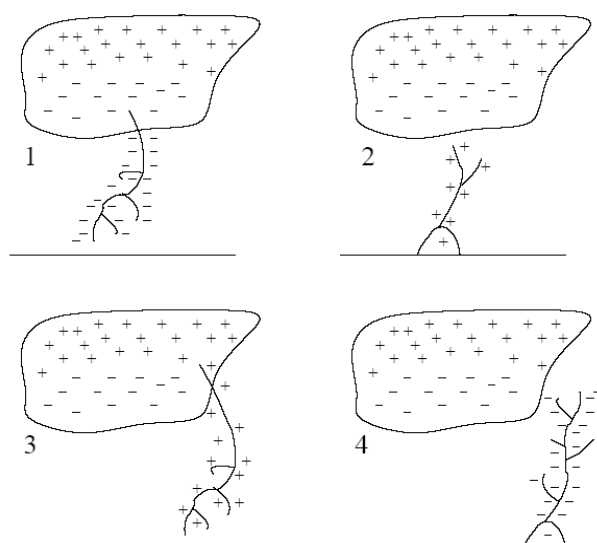
positiva a Tierra. Estas descargas positivas a menudo ocurren durante la finalización de la tormenta. Las descargas positivas también son más comunes en un porcentaje de caídas de rayos a tierra del total durante los meses del invierno.



*Tormenta eléctrica en un parque eólico*

Nos encontramos con cuatro topologías (Fig. 1.2) de descarga nube-tierra:

- 1) descarga nube-tierra (descendente) negativa, que es la más habitual
- 2) descarga tierra- nube (ascendente) positiva
- 3) descarga nube-tierra (descendente) positiva
- 4) descarga tierra- nube (ascendente) negativa



*Fig.1.2. Tipologías descargas nube-tierra*

El rayo entre nube tierra es el tipo más común de descarga. Éste ocurre entre cargas opuestas dentro de la misma nube. Normalmente el proceso se produce dentro de la nube y parece del exterior de la nube. Sin embargo, la descarga terminaría en el límite de la nube y con un cauce luminoso, similar a un nube-a-tierra.

Los canales desde la nube a tierra se los conoce como canales descendentes, entre ellos, hay una que prevalece sobre los demás acercándose cada vez más a la tierra, a este se lo conoce como líder que a su máximo crecimiento llega hasta unos cientos de metros desde la tierra. No es visible. Pero puede detectarse en el rango del ultravioleta.

Como contraparte a los canales descendentes, desde tierra y es de bastante posterioridad a su aparición, se forman varios canales ascendentes que se originan en objetos o estructuras altas situados sobre el suelo, tales como árboles, torres, edificios, colinas, etc. Como puede apreciarse en la Fig. 1.3.

La razón para que estos canales ascendentes se originen en estructuras altas se debe a la elevada magnitud del gradiente de potencial por el “efecto de puntas” que explicaremos más adelante, de las mencionadas estructuras.



Fig. 1.3. Canales descendentes (líder) y ascendente En la nube y a la tierra, respectivamente.

El líder en su descenso actúa básicamente solo impulsado por la repulsión de cargas, hasta que cerca de los 1000 metros sobre el suelo ocurre una fuerte interacción (atracción) con los canales ascendentes. La distancia entre las cargas opuestas continua acortándose hasta que alcanza la denominada “distancia crítica de arqueo entre el líder y algunos de los varios canales ascendentes, distancia que está en orden de los 200 metros.

En esta última parte del proceso, el contacto entre el líder y uno de los canales ascendentes (canal ascendente de contacto) ocurre en forma probabilística, porque cualquier canal ascendente puede llegar a la distancia crítica, la cual una vez alcanzada y debido a la diferencia de potencial entre las cargas de



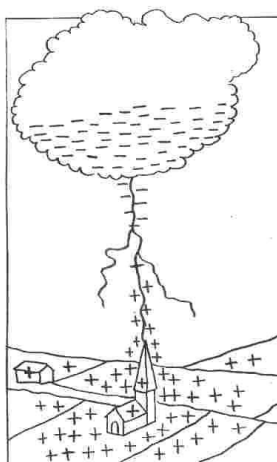
signo opuesto, da origen al primer contacto entre ellas constituyendo la descarga. El camino seguido por el líder puede sufrir bruscos desvíos hasta contactar con el canal ascendente para luego seguir la trayectoria de éste. La unión de las trayectorias del líder y del canal ascendente de contacto constituye la primera descarga que usualmente es visible, pero ha abierto un camino eléctricamente conductor, cuya explicación se indica a continuación.

El proceso de la primera descarga permite que las cargas de una polaridad, en forma violenta, se introduzcan en los canales formados por las cargas del signo opuesto. En estas circunstancias se produce una recombinación parcial de cargas, pero el número de las que permanecen aisladas es mayoritariamente elevado. La coexistencia de cargas de ambos signos en el canal formado por la primera descarga de ambos signos en el canal formado por la primera descarga es un plasma eléctrico y por lo tanto conductor.

La presencia de este conductor entre nube y tierra, que persiste durante varios segundos, y el desequilibrio electroestático generado en todo el proceso descrito, hace que las cargas de las otras nubes viajen a tierra a través del canal formado, dando origen a múltiples descargas.

#### **4.1. EL PODER DE PUNTAS.**

Un objeto conductor electrificado que tenga una forma puntiaguda tiende a concentrar todas sus cargas sean positivas o negativas en las regiones puntiagudas. En la figura 1.4. se ilustra este hecho mostrando un bloque metálico con carga eléctrica, la cual como sabemos, se distribuye en su superficie. Pero esta distribución no es uniforme: en P, donde hay una saliente acentuada, hay una gran acumulación de cargas eléctricas que en otras regiones que son casi planas.



Figuras 1.4: El poder de las puntas

Así pues, si aumentamos continuamente la carga eléctrica en el cuerpo la intensidad del campo eléctrico a su alrededor también aumentará gradualmente (al aproximarse una tormenta incrementa el campo eléctrico). Es fácil comprender entonces que en la porción más aguzada (P, figura 1.5), el valor de la rigidez dieléctrica del aire será sobrepasado antes de que esto ocurra en las demás regiones. Por lo tanto, será en las proximidades de la zona puntiaguda donde el aire se volverá conductor (descarga de un rayo), y por consiguiente, será en tal punta donde se escapará la carga del bloque metálico.

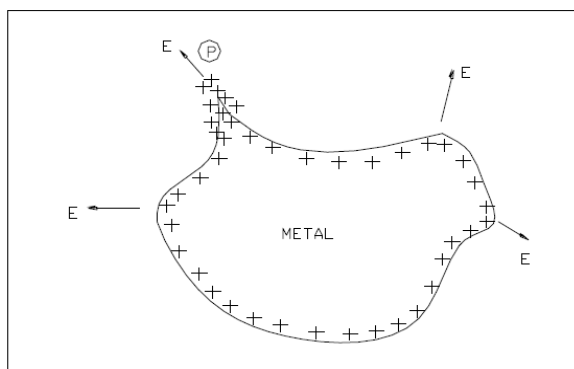


Fig. 1.5. Campo eléctrico en las puntas de un conductor electrificado

Cuando una nube de tormenta con carga negativa pasa por un edificio, se induce en el techo de éste cargas positivas. Existe entonces el peligro de que se produzca una descarga entre la nube y el edificio, pero cuando hay una barra metálica encima de éste, las cargas positivas se concentran en él y con ello el campo eléctrico se vuelve muy intenso en las proximidades de la punta; este fenómeno es conocido como fenómeno de **“poder de puntas”**.

Es fácil comprender entonces que en la porción puntiaguda, el valor de la rigidez dieléctrica del aire que es ( $3 \times 10^6$  N/C), del aire será sobrepasado antes de que esto ocurra en las demás regiones. De modo que el aire que está a su alrededor se ioniza, volviéndose conductor, y haciendo que la descarga eléctrica sea captada y pase a tierra a través de dicha punta.

La corriente de descarga positivas que se forma sobre la punta afilada constituye una carga espacial o corona, este puede subir hasta la nube por acción del campo eléctrico y del viento, neutralizando así sus cargas negativas, reduciendo la tensión eléctrica formada entre el suelo y la nube a niveles inferiores de potencial para la formación del rayo; de ahí; que el poder de puntas encuentra su aplicación en la construcción de los pararrayos.

## 4.2. CONTROL DE LOS RAYOS.

Como se indicó el líder descendente se une con algunos de los canales ascendentes de una manera probabilística, la mayor probabilidad de unión se

da con el canal que parte de la estructura u objeto más elevado sobre la tierra a fin de controlar a los rayos se aprovechan este comportamiento de la descarga, colocando un objeto conductor (protector) conectado a tierra, en una posición más alta que los elementos protegidos.

### **4.3. CARACTERÍSTICAS Y EFECTOS DEL RAYO.**

El rayo toma el camino de menor resistencia, que normalmente es la distancia más corta entre la nube y el suelo, tal como un edificio, un árbol, un animal o una persona que permanezca de pie al descubierto o sobre una barca en una laguna, río o en el mar, pueden atraer el rayo. Al impactar el rayo en cualquier estructura, éste viaja a través de ella con corrientes muy altas  $>10\text{kA}$  hacia la tierra. En su trayecto hacia ella, la corriente del rayo genera peligrosas sobre tensiones (Altos Voltajes) que pueden ocasionar lesiones en seres humanos o animales y daños en equipos eléctricos y electrónicos.

El mayor riesgo recae en la vida de las personas y semovientes. Existen dos tipos de sobretensión que pueden afectar a una persona: Tensión de Paso y Tensión de Contacto.

El rayo se caracteriza por parámetros relacionados con el arco eléctrico entre la nube y la tierra.

El rayo tiene la capacidad de generar transitorios de corriente y de voltaje elevados de hasta 600 millones de voltios y de 10.200 amperios. Además es posible tener una secuencia de varios impactos bajo el mismo canal, esto ocurre cuando canales secundarios inmediatos al principal siguen la ruta trazada por éste, pudiendo darse hasta 20 descargas provenientes del desarrollo de un solo rayo.

La energía promedio liberada en una descarga es de 55 Kwh. El peligro de la descarga se sitúa en el factor tiempo, ya que toda la energía se disipa entre 100 y 300 microsegundos y la corriente pico de descarga se alcanza en solo 1 a 2  $\mu\text{s}$ .

Todos los parámetros dificultan el control de los rayos, para ello únicamente se dispone de elementos de atracción y de medios de transporte para conducirlos hacia colectores de tierra a fin de asegurar su disipación en el suelo.

Un impacto del rayo sobre la instalación causaría destrozos grandes, seguidos muchas veces de incendios. Para estimar los potenciales desarrollados durante una descarga podemos analizar la siguiente situación. Un equipo con una envolvente metálica, sujeto a una descarga directa de un rayo con una corriente ( $I_d$ ) de 10KA, si la resistencia ( $R$ ) presentado por la envolvente es de

0.5  $\Omega$  y que se encuentra con conexión a tierra, por un conductor de resistencia despreciable; de esta forma la tensión en la envolvente del equipo está dada por  $\Delta V = I_d \times R = 10000 \times 0.5 = 5 \text{ Kv}$ . Esta tensión es suficiente para provocar una destrucción de la instalación, tratándose de personas que eventualmente estuviesen en contacto con la carcasa del equipo, el efecto de la descarga es la muerte instantánea.

Otro efecto causado sobre las instalaciones es la caída del rayo cerca de las líneas de alta tensión o de telecomunicaciones: el campo magnético radiado por las corrientes del rayo se acopla en los conductores e induce en ellos voltajes transitorios altos. Por ejemplo, en una línea de transmisión a 3 kilómetros del lugar del impacto se puede inducir sobretensiones de 20KV, resultando capaz de dañar equipos electrónicos.

#### **4.4. MAPA CERÁUNICO**

Se denomina **mapa cerámico** a un [mapa](#) geográfico que representa una zona o [país](#) para determinar el nivel de riesgo de [rayos](#).

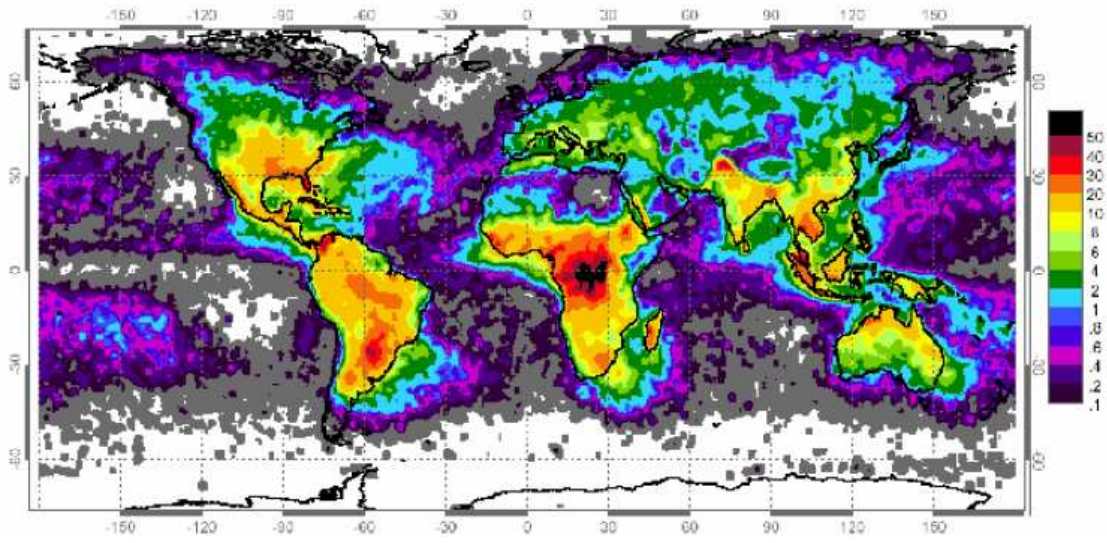
El nivel de riesgo de rayos está representado en el mapa cerámico por unas líneas de diferentes valores (líneas isocerámicas). Estas líneas determinan geográficamente las zonas de más o menos riesgo de actividad de rayos.

Cada línea isocerámica tiene un valor, y este valor es el resultado de la aparición de días de [tormentas](#) por kilómetro cuadrado y por año, donde al menos aparece un solo rayo.

Un mapa cerámico representa los días de tormenta que aparecen al año por kilómetro cuadrado y como mínimo la aparición de un solo rayo. No se tiene que confundir el nivel de riesgo de rayos de un mapa cerámico, con la densidad de rayos real (cantidad de rayos por kilómetro cuadrado).

La información necesaria para construir o diseñar un mapa cerámico, procede de los datos estadísticos de los sistemas de teledetección de rayos que utilizan los Institutos Nacionales de Meteorología (INM), como medio de predicción seguimiento y control de la actividad y densidad de rayos del país. Los datos acumulados cada año por los INM, son procesados y dan como resultado un valor estadístico que ofrecen públicamente.

Los datos de los mapas cerámicos cambian tan rápido su valor según cambia el comportamiento de las tormentas y su trayectoria. Por este motivo, no se puede tomar como referencia para un estudio de protección contra los rayos.



Mapa Cerámico mundial

## 5. EVALUACIÓN DEL RIESGO DE IMPACTO DE RAYOS

Todo diseño que se haga de un sistema de protección contra el rayo debe estar basado en la evaluación del riesgo. Esta:

- Permite evaluar si es necesario protegerse.
- Si hay que protegerse, permite entonces conocer cuáles son las medidas de protección más adecuadas a la instalación o al servicio en cuestión.
- Permite evaluar los beneficios económicos de las medidas de protección seleccionadas, por comparación de los costos de las pérdidas económicas con o sin las medidas de protección adoptadas.

El riesgo de daños producido por los rayos en una instalación eólica y las pérdidas subsiguientes pueden considerarse como la suma de muchos componentes del riesgo. Cada componente del riesgo puede expresarse por la siguiente ecuación general.

$$R_x = N_x \cdot P_x \cdot I_x$$

$N_x$ . (año<sup>-1</sup>): número anual de eventos peligrosos.

$P_x$ . : probabilidad de que se produzcan daños en la estructura (función de distintas medidas de protección).

$I_x$ . : pérdida correspondiente

En caso de que el valor del riesgo sea demasiado alto, deben aplicarse las medidas de protección necesarias para reducir el riesgo por debajo del riesgo tolerable  $R_T$   $R_x \leq R_T$

La norma IEC 61400-24, sobre protección contra el rayo en aerogeneradores, dispone en su Anexo B de un sistema para la "valoración de la exposición a los rayos."

## 6. REDES GLOBALES INFORMACIÓN DESCARGAS ELÉCTRICAS

### **6.1. WORLD WIDE LIGHTNING LOCATION NETWORK**

Una de las redes globales basadas en sensores en tierra es la WWLLN (World Wide Lightning Location Network). <http://webflash.ess.washington.edu/>

La WWLLN dispone de información global de descargas eléctricas terrestres generadas en nubes convectivas. Es un elemento importante en la vigilancia atmosférica para ciertos usuarios específicos como son los de tipo aeronáutico, marítimo, deportivo etc.

### **6.2. SISTEMA LIS DE LA NASA**

El sistema LIS de la NASA proporciona información confiable en ciertas zonas del planeta. El equipo ha sido instalado dentro de una plataforma satelital de la NASA (Figura 1.6.) que tiene como objetivo primordial el estudio de las propiedades eléctricas, microfísicas y cinemáticas de tormentas en el trópico a través del proyecto “(Tropical Rainfall Measuring Mission” (TRMM)).



Figura 1.6. Detalle del equipo de observación satelital.

El sistema se basa en la medición obtenida mediante un satélite que posee sensores ópticos, junto con otro equipamiento especializado, para obtención de otros parámetros de interés.

Las descargas atmosféricas producen pulsos ópticos que son especialmente visibles desde el espacio y el equipo óptico los detecta a pesar de los niveles de iluminación de fondo producidos por el brillo de las nubes a la luz solar. La

trayectoria del satélite se muestra en la Figura 1.7. y así los puntos del planeta que son considerados en el proyecto.

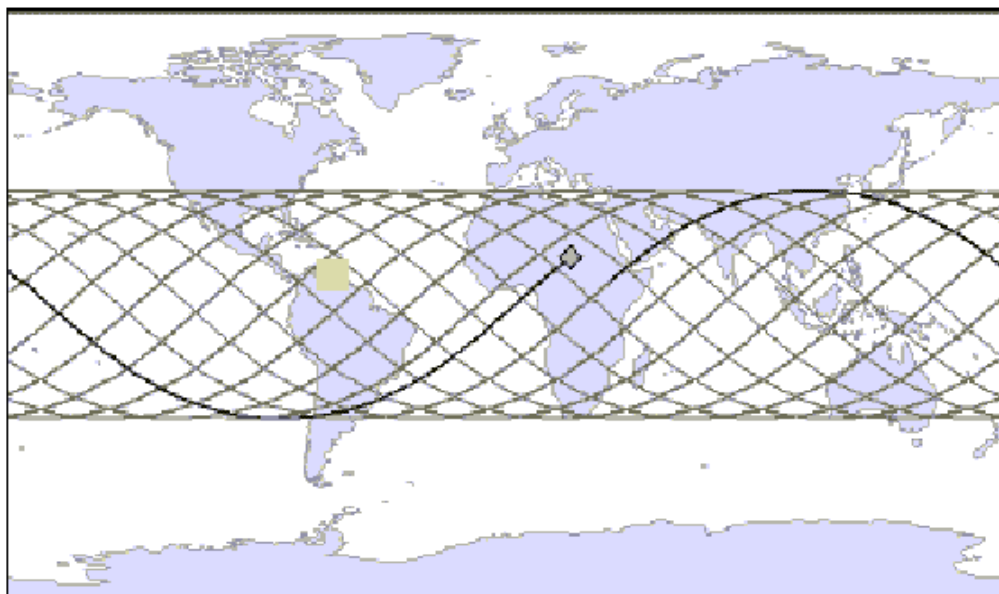


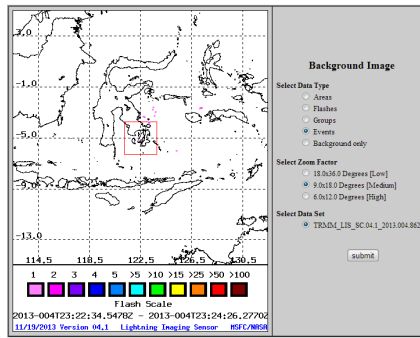
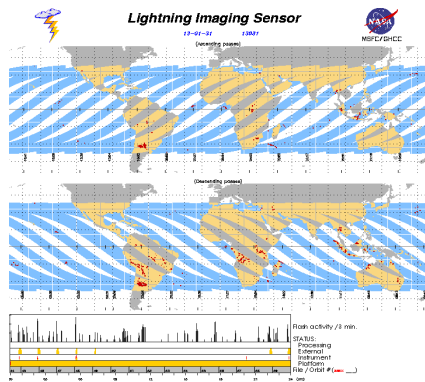
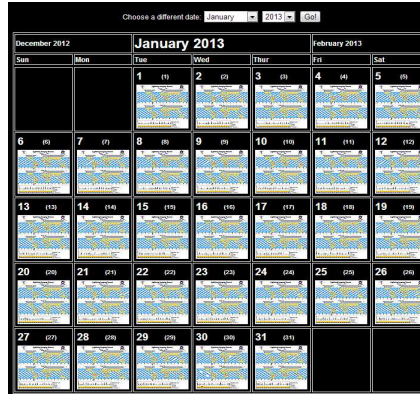
Figura 1.7. Barrido del satélite

Cabe resaltar que los instrumentos detectan absolutamente todos los eventos que produzcan señales ópticas, tales como las descargas nube-nube (en la propia nube o entre nubes cercanas) y nube – tierra, sin posibilidad de que sean diferenciadas. Esto representa una limitación importante para la aplicación de la data en estudios de protección contra rayos en líneas eléctricas de transporte ya que no se puede obtener la información de densidad de descargas a tierra (GFD) de forma directa. Por otra parte, el sistema de medición ha sido probado y comparado con otros métodos de medición terrestres, encontrándose una precisión aceptable.

### **6.2.1. METODOLOGÍA Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN**

En la página de inicio <http://thunder.msfc.nasa.gov/data/lisbrowse.html> aparece una base de datos catalogada por año y meses, desde el año 1998. Al pinchar en cualquier mes del año aparece otra página con un calendario de días del mes seleccionado.





Information below pertains to the area inside the red 2.5 x 2.5 degree square centered (-5.0, 122.5).

= TRNDV\_LIS\_SC041\_2013.004.86238 Has lightning in the area of interest. Download as [uncompressed](#) or [zip](#).

Flash time (UTC)	Lat	Lon	Relativism	milliseconds	Group	Event
2013-004123:22:04.149102	20m 041	-5.184, 122.501	010040	470	4	62
2013-004123:22:07.12052	20m 041	-5.184, 122.501	0104050	210	8	75
2013-004123:24:05.28432	20m 041	-5.185, 122.503	110574	53	6	35

Total flash count inside red square: 3

Thunder.msc.nasa.gov/cgi-bin/mcfocus.pl?file=629.447/http/lightning.esstc.nasa.gov/data/query/2013/2013.004.86238

The above image created from descending passes only.

### 6.3. METEOALARM

Meteoalarm nos proporciona la información más relevante para estar preparados ante una situación de tiempo extremo (excepcional) que se espere pueda ocurrir en cualquier lugar de Europa.

Nos alertará sobre la posible ocurrencia de un fenómeno de tiempo severo, como por ejemplo precipitaciones muy fuertes, tormentas muy fuertes, temporales de viento, olas de calor, incendios, nieblas, nevadas (incluyendo ventiscas) o frío intenso, además nos alerta sobre fenómenos causados o influidos por un tiempo atmosférico adverso, tales como aludes, incendios forestales o fenómenos costeros extremos.

De una ojeada se podrá identificar el lugar de Europa en el que el tiempo pueda resultar peligroso. Los colores utilizados en los mapas de esta página Web nos indican la excepcionalidad del peligro y sus posibles consecuencias. En el mapa de Europa, cada país participante en este proyecto aparecerá resaltado con el color de mayor nivel de alerta de los asignados a los avisos en vigor. Si se selecciona un país en concreto, se podrán visualizar sus avisos nacionales y regionales.

Para los colores asociados a los niveles de alerta mayor (naranja y rojo) se añaden pictogramas a la información regional, lo que da una idea del tipo de tiempo que se espera cause peligro potencial. Seleccionando con el ratón cualquier región dentro de un país concreto, se hallará información más detallada. Se incluye el periodo de tiempo en el que se espera se produzca el fenómeno previsto u otros aspectos adicionales como su intensidad (ej.: cantidades de nieve acumulada, etc.). Las imágenes que se pueden ver como fondo en este nivel regional, estarán en consonancia con el fenómeno y su riesgo potencial asociado.

## 7. DETECTORES DE TORMENTAS

Durante las últimas décadas, los sistemas técnicos y los sistemas que monitorizan en tiempo real la actividad eléctrica atmosférica y los rayos han experimentado un desarrollo extraordinario. Estos sistemas pueden proporcionar, en tiempo real, una información valiosa y de alta calidad sobre la incidencia de las tormentas, haciendo posible obtener una información que puede ser extremadamente valiosa si se coordina con un detallado plan de acción.

Aunque esta información permite al usuario adoptar por anticipado y temporalmente medidas preventivas debería indicarse, sin embargo, que todas las medidas a tomar en base a la información monitorizada son responsabilidad del usuario del sistema y de acuerdo con las regulaciones pertinentes. La efectividad dependerá fundamentalmente de la situación del riesgo considerado y de las decisiones planificadas. Debemos considerar también las situaciones específicas del Sector Eólico, como son las propias maniobras de montaje o el tiempo necesario para que los operarios abandonen el aerogenerador y se refugien en un lugar seguro.

Se debe considerar que los rayos y las tormentas como fenómenos naturales que son, están sometidos a una incertidumbre de naturaleza estadística. Esto significa que no es posible obtener una información precisa al 100%, por lo que resulta difícil saber cuándo va a impactar un rayo. Ya existen normas que tratan sobre los métodos de protección contra el rayo con objeto de limitar los daños. Estas normas no cubren otras situaciones potencialmente peligrosas debidas a las tormentas y a los rayos, situaciones que pueden prevenirse dinámicamente o reducirse mediante medidas temporales cuyo origen es una alerta preventiva proporcionada por un sistema detector.

Los sistemas que monitorizan en tiempo real para la detección del rayo son de gran interés para el sector eólico y de aplicación tanto en la construcción de parques eólicos como en la explotación y mantenimiento. Para el mejor conocimiento de estos sistemas, el estudio se va a basar en la norma europea UNE-EN 50536, que proporciona información sobre las características de los sistemas de aviso de tormentas y sobre la evaluación de la necesidad de los datos de los rayos en tiempo real y/o de los datos sobre la electrificación de las tormentas, con el fin de implementar medidas preventivas contra el riesgo de los rayos.

Esta norma europea proporciona los requisitos básicos de los sensores y de las redes que recogen información precisa de los parámetros relevantes que informan en tiempo real, la evolución de los rayos y sus rangos. Describe en forma de avisos y de datos históricos, la aplicación de los datos recogidos por estos sensores y redes.

Los sistemas detectores de tormentas, son equipos que suministran información en tiempo real sobre la actividad eléctrica atmosférica, con el fin de

monitorizar medidas preventivas. En el presente apartado, se pretende proporcionar:

- Una descripción general de los sistemas de aviso de riesgo por posibles rayos y electrificación de las tormentas.
- Una clasificación de los sistemas de detección de las tormentas y de sus propiedades.
- Una guía sobre los métodos de alarmas.
- Un procedimiento para determinar la necesidad de la información sobre las tormentas.

### **7.1. FASES DE LAS TORMENTAS**

Durante el ciclo de vida de una tormenta, y en función de fenómenos detectables, pueden identificarse cuatro etapas:

- Fase inicial.
- Fase de crecimiento.
- Fase de madurez.
- Fase de disipación.

#### **Fase 1 – Fase inicial (etapa Cumulonimbo)**

Fase de electrificación de la nube mediante la separación de carga eléctrica en el interior de la nube. Las cargas se distribuyen en regiones de la nube y producen un campo electrostático medible a nivel del terreno. Se considera el primer fenómeno detectable precursor de una tormenta.

En la fase inicial los campos electrostáticos pueden producir daños potenciales, tales como descargas electrostáticas (ESD) incluso cuando no hay actividad de rayos.

#### **Fase 2 – Fase de crecimiento**

Esta fase, a veces también llamada fase de desarrollo, se caracteriza porque se produce la primera actividad de rayos en el interior de la nube o entre nube y tierra. La primera descarga en el interior de la nube aparece después de un cierto desarrollo de las regiones de carga en la nube. Sin embargo, en algunas situaciones no está claro el tiempo de desfase entre la primera descarga en el interior de la nube y la primera descarga entre nube y tierra.

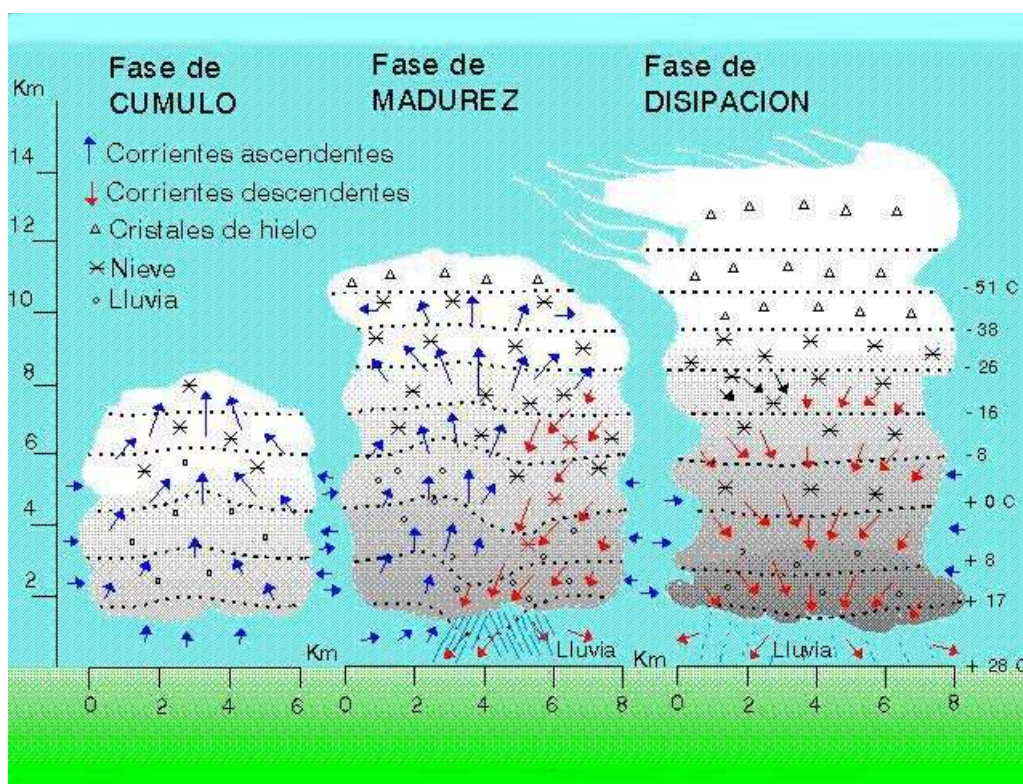
Las descargas en el interior de la nube representan, normalmente, la mayor parte de la actividad de los rayos producida por una tormenta. En tormentas individuales se han observado variaciones significativas en la relación entre los diferentes tipos de descargas.

#### **Fase 3 – Fase de madurez**

Esta etapa se caracteriza por la presencia tanto de descargas de nube a tierra como de descargas entre nubes.

#### Fase 4 – Fase de disipación

Esta fase se caracteriza por la caída de la tasa tanto de las descargas entre nubes como de descargas entre nube y tierra, así como por la reducción de los valores de los campos electrostáticos a valores correspondientes al buen tiempo.



Fases de la tormenta

### 7.2. CLASIFICACIÓN Y PROPIEDADES DE LOS DISPOSITIVOS DETECTORES DE TORMENTAS.

Los detectores de tormentas, dependiendo del fenómeno detectable, se clasifican en función de las fases detectables de las tormentas. Sin embargo, un detector de tormentas puede detectar uno o varios fenómenos.

Hay diferentes caminos para ver la manera de detectar las tormentas en general y los impactos de rayos en particular.

Un camino es analizar la fase de la tormenta para la que el detector está expresamente pensado. Otro camino es analizar, mediante un sensor, el rango de frecuencia de la señal emitida por el impacto de un rayo. Un tercer camino

es analizar las técnicas que emplean los sensores para detectar el impacto de un rayo y calcular su posición.

Como se indica en el punto anterior, se reconocen en una tormenta las siguientes cuatro fases:

- Fase 1: fase inicial;
- Fase 2: fase de crecimiento;
- Fase 3: fase de madurez;
- Fase 4: fase de disipación.

Para la clasificación de los detectores de tormentas o de los impactos de rayos se definen las siguientes clases:

- Clase I: los detectores clase I detectan una tormenta durante todo su ciclo de vida (fase 1 a 4);
- Clase II: los detectores clase II detectan las descargas entre nubes y descargas entre nube y tierra (fases 2 a 4);
- Clase III: los detectores clase III detectan solamente las descargas entre nubes (fases 3 y 4);
- Clase IV: los detectores clase IV detectan las descargas entre nube y tierra (fase 3) y otras fuentes electromagnéticas con un rendimiento muy limitado.

Los rangos de frecuencia que se emplean en la detección de los rayos son:

- DC: campos eléctricos estático o quasi estáticos;
- VLF: muy bajas frecuencias (3 kHz – 30 kHz);
- LF: baja frecuencia (30 kHz – 300 kHz);
- VHF: muy alta frecuencia (30 MHz – 300 MHz).

Todos estos fenómenos medibles dan lugar a diferentes sensores y técnicas de localización. Estas técnicas pueden distinguirse de la siguiente manera:

- MDF: buscador de dirección magnética;
- TOA: tiempo de llegada;
- RFI: interferometría;
- FSM: medidas de campo eléctrico;
- RF: medidas de señales de radio frecuencia.

### **7.3. DETECTORES DE CLASE I**

El objeto de los detectores CLASE I es detectar el primer signo de una tormenta (fase 1), utilizado para un aviso temprano y poder tomar acciones de prevención antes de que se produzca un rayo entre nubes o entre nube-tierra y durante todo el tiempo que exista el riesgo de rayos. La detección se lleva a cabo por la medida del campo electrostático producido por la tormenta.

La electrificación de una tormenta o su sola presencia produce una alteración en el campo eléctrico que corresponde al buen tiempo. El campo electrostático atmosférico, a nivel del terreno, durante el buen tiempo tiene un valor positivo de 100 V/m a 150 V/m (convención sobre el signo de la electricidad atmosférica) en una superficie plana, ya que la atmósfera sobre la Tierra está cargada positivamente. Bajo la nube electrificada de una tormenta, el campo eléctrico a nivel del terreno puede alcanzar varios kilovoltios por metro. Normalmente el campo eléctrico a nivel del terreno está apantallado del campo producido por la nube por la presencia de capas apantalladoras, por lo que el campo eléctrico normalmente está por debajo de 10 kV/m.

A los efectos de la detección, un sensor de campo eléctrico debería tener una resolución mínima de 200 V/m y debería ser capaz de medir un campo eléctrico de, al menos,  $\pm 20$  kV/m. Los cambios del campo electrostático durante la fase inicial son relativamente lentos por lo que es suficiente tomar muestras cada pocos segundos. Si para la aplicación del sensor se necesita información sobre los cambios del campo, se recomienda una tasa mínima de muestreo de una muestra por segundo.

El dispositivo detector debería proporcionar información sobre el nivel del campo eléctrico. Algunos dispositivos también deberían proporcionar información sobre la evolución temporal del campo.

Los detectores de la Clase I son válidos para la presencia, o no, de una nube electrificada. Sin embargo, no está claro el umbral del campo eléctrico que define el nivel del campo eléctrico y en el que se inicia la primera descarga del rayo. El área monitorizada está fuertemente restringida por el rápido decrecimiento del campo eléctrico con la distancia. Por lo tanto, el rango de la medida del campo electrostático debería ser como máximo de 20 km desde el límite de cada región. Debido a que depende de la topología del medio ambiente, se emplea como detector local.

En cualquier caso, el fabricante o el proveedor del servicio deberían dar información sobre los niveles y métodos de avisos, ya que esos niveles, cuando la medida está afectada por el incremento del campo local, dependen de las condiciones del lugar de la instalación.

#### **7.4. DETECTOR CLASE II**

Los detectores de la CLASE II detectan descargas entre nubes y nube-tierra (fases 2 a 4). Las descargas entre nubes producen un gran número de fuentes de radio frecuencia en el rango de muy alta frecuencia (VHF). Normalmente, las descargas entre nubes se detectan y se localizan mediante medidas en este rango de frecuencia (alrededor de 100 MHz).

Un detector de descargas entre nubes debería tener un rendimiento de detección de acuerdo con las necesidades de aplicación deseada por el usuario. Ya que la localización de la actividad de descargas entre nubes es

importante para las acciones preventivas, el fabricante o el proveedor del servicio deberían facilitar el rango de la detección y la incertidumbre de la localización. La incertidumbre de la localización de las descargas nube tierra debería estar de acuerdo con las necesidades de aplicación deseadas por el usuario.

El fabricante o el proveedor deberían facilitar información sobre los métodos de detección y avisos.

### **7.5. DETECTOR CLASE III**

Los detectores de la CLASE III detectan solamente descargas nube-tierra (fase 3). Ya que las descargas nube-tierra producen radiación importante en el rango de la baja frecuencia (LF) (10 kHz a 500 kHz), normalmente estos tipos de detectores se emplean para detectar las descargas nube-tierra. Sin embargo, existen otros tipos de detectores de rayos nube-tierra.

Un detector de descargas nube-tierra debería tener, en la zona monitorizada, un rendimiento de detección superior al 90%. Ya que la localización de la actividad nube-tierra es importante para las acciones preventivas, el fabricante o el proveedor del servicio deberían facilitar el rango de la detección y la incertidumbre de la localización. El 50% de la precisión en la localización debería ser inferior 1km en la zona monitorizada.

El fabricante o el proveedor deberían facilitar información sobre los métodos de detección y avisos empleados.

### **7.6. DETECTOR CLASE IV**

Los detectores de la CLASE IV detectan las descargas nube tierra (fase 3) pero también otros impulsos electromagnéticos con pobre capacidad de identificación entre sucesos de rayos y otras fuentes de señales (EMI).

### **7.7. TÉCNICAS DE LOCALIZACIÓN**

Los detectores de tormentas pueden dividirse de acuerdo con sus aplicaciones en dos clases de técnicas de localización. Para determinar donde impactó un rayo se necesita un sistema de localización con varios sensores. Cuando solamente se quiere información sobre la actividad general de rayo y/o sobre la distancia o el comportamiento de una tormenta, puede ser apropiado el empleo de un solo sensor de rayos.

#### **7.7.1. TÉCNICAS DE LOCALIZACIÓN CON VARIOS SENSORES**



Hay diferentes técnicas de localización con varios sensores

### **1. Descubridor de la dirección magnética (MDF):**

El principio del descubridor de la dirección magnética es el empleo de bucles magnéticos ortogonales que miden las componentes  $H_x$  y  $H_y$  del campo magnético. Siendo el flujo magnético en el interior del bucle proporcional al ángulo de incidencia, uno de los bucles estará relacionado con el coseno del azimut de la fuente, mientras que el otro estará relacionado con el seno, proporcionando la relación de ambos la tangente del azimut.

Con dos o más descubridores de dirección magnética, la localización del punto de impacto del rayo puede determinarse calculando el cruce de los azimuts de las direcciones de los descubridores.

### **2. Tiempo de llegada (TOA):**

El principio del tiempo de llegada es emplear el retraso necesario de un pulso para viajar desde la fuente de la radiación a los sensores. Los sensores más cercanos verán la señal antes que los otros. El método del tiempo de llegada puede emplearse en el rango de la VLF y LF así como en el de la VHF.

### **3. Interferimetría (RFI):**

La interferimetría consiste en medir una diferencia de fase entre antenas cercanas. La principal diferencia con el método de tiempo de llegada es que pueden trabajar con ondas continuas por lo que no se necesita identificar los pulsos.

### **4. Imagen óptica (OI):**

Los sensores basados en satélites espaciales son capaces de detectar y trazar los cambios rápidos de los efectos ópticos producidos por el rayo. Esta técnica no es muy precisa pero da la posibilidad de buscar rayos en zonas en las que no es posible hacerlo con un sistema de detección situado en tierra, como ocurre en los océanos.

## **7.7.2. TÉCNICAS CON UN SOLO SENSOR**

Las técnicas con un solo sensor son las siguientes:

### **1. Medida del campo eléctrico (FSM):**

La elevación del campo eléctrico durante la formación de una tormenta puede emplearse para dar un aviso en un crecimiento de la actividad de los rayos. El cambio más rápido en el campo eléctrico, que ocurre cuando un rayo impacta, se emplea para determinar los impactos de rayos actuales.

### **2. Descubridor de la dirección magnética (MDF):**

La técnica del descubridor de la dirección magnético, empleadas en las redes de detección de rayos, también puede emplearse en un sistema con un solo sensor que suministra el azimut de donde ocurre el impacto del rayo, ya que tiene una técnica para determinar la distancia, de manera aproximada, mediante la medida del valor de la señal y/ la forma de onda de las señales.

### **3. Medida del valor de la señal RF (RFM):**

La medida de la señal de un rayo en una antena en sí no es un método válido debido a la gran variedad de las características de la corriente del rayo. Es posible mejorar, de manera significativa, la posibilidad de determinar la distancia a la que impacta un rayo elaborando el procesamiento de la señal en combinación con detección óptica. Sin embargo, este método es, en esencia, poco preciso.

## **7.8. APLICACIONES DE LAS DIFERENTES TÉCNICAS DE DETECCIÓN.**

Los métodos de localización del descubridor de la dirección magnética (MDF) y del tiempo de llegada (TOA), encuentran su empleo en las redes de detección de rayos tanto para fines prácticos como científicos. Frecuentemente se explotan como redes comerciales haciendo que los datos estén disponibles para el gran público.

El método de localización de imagen óptica (OI), es el que se instala con más frecuencia con fines científicos, tanto por universidades como por organizaciones gubernamentales.

Las técnicas de un solo sensor tienen también distintas propiedades con diferentes aplicaciones.

Los sensores de medida del campo eléctrico (FSM) son útiles para el aviso temprano a nivel local, antes de que se produzca el rayo y durante todo el ciclo de la vida de la tormenta.

Los sensores basados en el descubridor de la dirección magnética (MDF) dan información sobre la situación y la distancia de los impactos de rayos actuales. Encuentran su empleo en las compañías que necesitan previsiones precisas con fines de seguridad y que no quieren depender de redes de detección comerciales para la obtención de sus datos. Sin embargo, los usuarios deben tener en cuenta que la información de estos sensores no es muy precisa, en comparación con la de las redes de detección multisensores.

Los detectores de rayos de la medida del valor de la señal (RFM) pueden dividirse en dos niveles de calidad. Los sensores más sofisticados tienen incorporado un procesado de señal elaborado que determina la distancia del rayo con bastante precisión. Algunos tipos también emplean sensores ópticos

para confirmar que la señal detectada está relacionada realmente con la descarga del rayo.

Los sensores menos sofisticados emplean una medida simple del valor de la señal por medio de una pequeña antena, o están equipados con un pequeño procesador de la señal, que solamente da una estimación basta de la actividad del rayo en la zona local. Se emplean solo para fines de interés general sobre la actividad de los rayos pero no a efectos de aviso de rayos.

## 8. PROTECCIÓN CONTRA EL RAYO EN AEROGERADORES

### 8.1. *PALAS*

Es importante, durante el montaje de las palas, asegurar que todas las juntas sean herméticas y fuertes, y que además la calidad de la pala esté garantizada en todos sus componentes.

En la mayoría de los casos se realizaba solamente una inspección visual durante la producción de las palas. Actualmente la mayoría de las empresas fabricantes de alabes realizan sistemáticamente mediciones de [resistencia](#) de 4 puntos en todas las palas que salen de las fábricas. Este [método](#) es muy preciso, ya que permite localizar fallos en las juntas de los conductores de rayos y rectificarlos en el lugar correcto del [proceso](#) de fabricación.

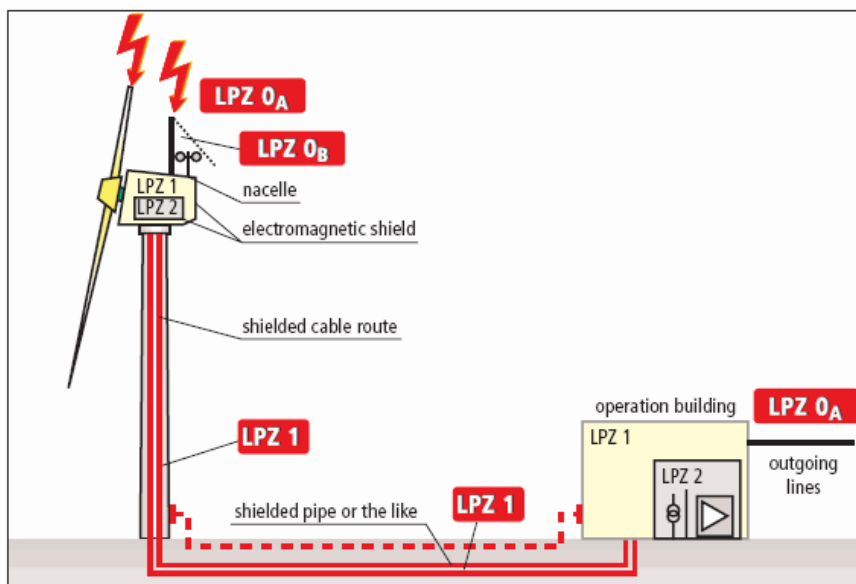
Este método de [medición](#) consiste en la medición de la resistencia óhmica en el rango de los  $m\Omega$ , lo cual requiere el [empleo](#) de 4 conductores de medición en lugar de los 2 que normalmente se utilizan en la medición de resistencia. Al emplear 4 conductores, el instrumento mismo puede compensar la resistencia de los conductores de medición, lo cual naturalmente, no debe medirse. Los conductores de medición son normalmente mucho más delgados que un cable de pararrayos. De ese modo, la resistencia en los conductores de medición será mucho mayor que en la de un cable de pararrayos.

### 8.2. *SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA IMPACTOS DIRECTOS DE RAYOS*

El [concepto](#) de zonas de protección en una [estructura](#) o instalación garantiza la protección de todo el equipamiento sensible en un [ambiente](#) libre de perturbaciones electromagnéticas. Es por esto que para definir qué medidas tomar para proteger una turbina eólica contra el impacto de rayos, primeramente se deberá subdividir la misma en zonas de protección:

- LPZ OA: Impacto directo de las descargas, plena corriente, campos electromagnéticos no atenuados.
- LPZ OB: No impacto directo de las descargas, plena corriente, campos electromagnéticos no atenuados.
- LPZ 1: No impacto directo de las descargas, corriente reducida, campos electromagnéticos atenuados.
- LPZ 2: Mayor reducción de la corriente, mayor atenuación de los campos electromagnéticos.

Es muy importante que los parámetros de las corrientes de rayos que afectan la zona OA desde el exterior deban ser reducidos mediante medidas de apantallamiento y mediante la instalación de dispositivos de protección contra sobretensiones (DPS), lo cual asegure que los equipos eléctricos y electrónicos que se encuentran situados dentro del aerogenerador trabajen sin interferencias.



Zonas de protección contra rayos para una turbina eólica

El riesgo de que un aerogenerador reciba un impacto de rayo se incrementa cuadráticamente en función de su altura [6]. Es por esto que se deben tomar un conjunto de medidas para proteger los aerogeneradores contra el impacto directo de rayos y contra los efectos secundarios de los mismos.

Si el sistema de derivación de descargas atmosféricas de la pala no está en condiciones de recibir y derivar a [tierra](#) la carga eléctrica del rayo, la descarga no se podrá realizar de manera controlada, por lo que en caso de producirse un impacto de rayo sobre una pala, se crean enormes fuerzas.

Para el dimensionamiento de los sistemas de protección contra rayos de aerogeneradores, debe ser considerado el caso de turbinas que posean una altura mayor de 60 metros, y que se encuentren en zonas de elevado nivel ceraunico. En las mismas pueden originarse rayos tierra-nube, además de los rayos nube-tierra. Es importante señalar que según las [estadísticas internacionales](#) el 15 % de los rayos que ocurren en el mundo son del tipo tierra-nube, llamados también rayos positivos. Estos rayos tierra-nube, que comienzan de [estructuras](#) y objetos de gran altura, llevan picos máximos de corrientes con [valores](#) bajos (aproximadamente 15 kA) y la carga transferida puede ser muy alta, trayendo la aparición de potenciales significativos los cuales pueden causar daños [8]. Estos tipos de rayos son los más peligrosos y por lo tanto deben tenerse en cuenta al seleccionar las medidas a tomar para

proteger las palas de los generadores y para la [selección](#) de los dispositivos de protección contra sobretensiones (DPS).

El sistema de protección externo de las turbinas eólicas combina el sistema de puntas captadoras, los bajantes y el sistema de puesta a tierra. Estos sistemas protegen a los aerogeneradores contra los efectos mecánicos destructivos y contra el fuego.

La figura 1.7. [muestra](#) las [técnicas](#) normalmente usadas para proteger las palas de la turbina contra los efectos de los rayos. La principal distinción es si un limitado número de terminales o receptores son usados para interceptar el rayo (tipos A y B) o si el [diseño](#) es hecho para proteger la totalidad de la pala (tipo C y D). La configuración Tipo A muestra como usando uno o dos terminales en la punta de la pala, el conductor de [acero](#) para el [control](#) del aerofreno puede ser usado como bajante. En un aerogenerador con sistema de paso variable (sin aerofreno) (tipo B) entonces un conductor adicional es instalado. La configuración C tiene las bajantes localizadas en las orillas o bordes de la pala. El tipo D muestra el uso de una malla conductora en cada cara de la pala. El principal mecanismo de [daño](#) es cuando la corriente del rayo forma un arco en el aire existente dentro de la pala. La onda de [presión](#) de choque causada por el arco puede hacer explotar la pala o romper la estructura constructiva de la misma. Experiencias de campo han demostrado que el uso de receptores o terminales en la punta de la pala trabajan efectivamente en presencia de palas con tamaños de hasta 20 m de longitud [8].

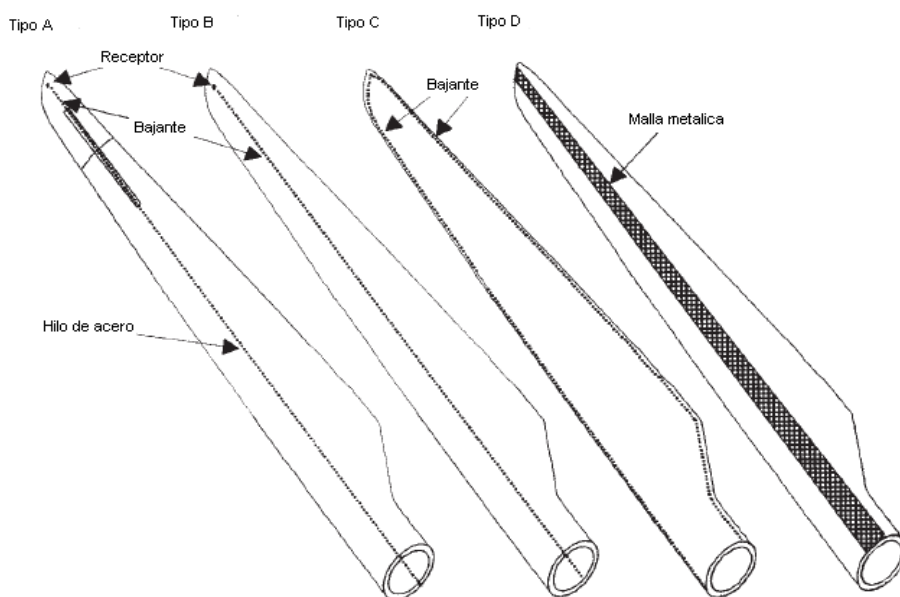


Figura 1.7. Métodos de protección de las palas contra impactos de rayos

### **8.3. PROTECCIÓN DE LA NACELLE**

En la mayoría de los fabricantes de turbinas eólicas el nacelle se fabrica con una placa de acero y el mismo funciona con el principio de jaula de Faraday. Por lo tanto, el [volumen](#) interior que posee el mismo al encontrarse herméticamente cerrado, garantiza una considerable atenuación del campo electromagnético en comparación con el exterior del nacelle. Se recomienda que el sistema de control sea también metálico.

Los instrumentos meteorológicos en la parte posterior de la nacelle se protegen por un pararrayo separado.

### **8.4. BUJE**

En los grandes aerogeneradores el buje es una pieza esférica hueca de fundición de 2 a 3 metros de diámetro. De ahí que solo el espesor de material asegure que la estructura del buje es inmune a los rayos.



Buje

Debe considerarse como una caja de Faraday que proporciona apantallamiento de los campos eléctricos en sus aberturas hacia las palas, el frente y la nacelle.

La protección del buje, por lo tanto, se reduce a la conexión equipotencial y a la protección contra los impulsos transitorios de los elementos colocados en el exterior de buje, tales como el sistema de control de palas, los sistemas de control eléctricos y mecánicos situados en el buje y conectados a los circuitos que se encuentran exteriores al buje.

### **8.5. CAPOTA**

En algunos aerogeneradores existen circuitos de control y controladores colocados fuera del buje y cubiertos por la capota. Estos sistemas deben apantallarse contra la conexión del rayo mediante sistema de captación.



capota nacelle

### **8.6. TORRES TUBULARES DE ACERO**

Las torres tubulares de acero son jaulas de Faraday casi perfectas al estar prácticamente cerradas en las interfases nacelle-torre, como en la torre, puesta a tierra.

Sin embargo, sería razonable, en la mayoría de los casos definir el interior como ZPR1 y ZPR2.

Las protecciones se reducen a las conexiones equipotenciales y a la protección contra los impulsos transitorios de los circuitos eléctricos y de control que pasan a otras ZPR.



Tubos de acero en campa de almacenamiento



## **8.7. TORRES DE CELOSÍA**

No son jaulas de Faraday efectivas, aunque algo atenúan el campo eléctrico y la corriente por su interior.

Sería razonable, definir el interior como ZPR 0B

La conducción del rayo debería hacerse por la estructura metálica de la torre.



Torre de celosía

## **8.8. TORRES DE HORMIGÓN**

Pueden emplearse la armadura como conductor de bajada, si se aseguran, con la sección suficiente, las conexiones de 2 a 4 caminos paralelos verticales, conectados horizontalmente en la parte superior, inferior y cada 20 metros.

Pueden considerarse SPCR externos, pero siempre conectados a la armadura de hormigón.

La resistencia máxima entre las partes extremas será de 0,2 ohmios, medida con un medidor de cuatro cables y una corriente mínima de orden de 10 A, según la norma (IEC 62305-3, E 4.3.1)



Torre de hormigón

### **8.9. SISTEMA DENTRO DE LA TORRE**

Dentro de la torres las escaleras deben conectarse equipotencialmente en cada extremo, cada 20 metros y en cada plataforma.

Los raíles, guías del elevador, tuberías hidráulicas, líneas de vida de carril o cable para la protección frente al riesgo de caída, así como otros componentes que atraviesen la torre, deben conectarse equipotencialmente en cada extremo.

En las torres de celosía, además, las conexiones equipotenciales deben hacerse, si es posible cada 20 metros.

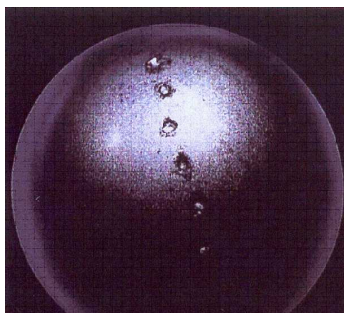
El sistema de puesta a tierra del transformador de alta tensión, debería conectarse al del aerogenerador. No se recomienda el empleo de sistemas de puesta a tierra separadas para los sistemas de potencia y para la protección del rayo.

### **8.10. RODAMIENTOS**

Los rodamientos son difíciles de monitorizar, no siendo aceptable que el rodamiento tenga que ser inspeccionado después de que el rayo haya impactado con el aerogenerador. Por tanto, los sistemas para los rodamientos deben probarse y documentarse.

La protección puede formar parte de la estructura del rodamiento o puede ser un sistema externo instalado fuera del rodamiento de manera que dé lugar a un paso paralelo para la corriente.

Si los rodamientos funcionan sin protección, debe demostrarse que después de haber estado expuesto a la circulación a través de ellos de las corrientes esperadas de rayo, los rodamientos pueden funcionar a lo largo de la vida de trabajo. Si el rodamiento no es capaz de funcionar a lo largo de su vida útil, debe aplicarse la protección.



Rodamiento afectado por el rayo

### **8.11. SISTEMAS HIDRÁULICOS**

Hay que evitar que se produzcan fugas por los daños en los accesorios e incendios en el aceite.

Pueden emplearse escobillas o conexiones trenzadas para crear un paso paralelo a la corriente del rayo.

Los tubos metálicos expuestos a la corriente del rayo deben protegerse para impedir la penetración de la corriente de rayo. Si los tubos son acero deben conectarse a la estructura de acero de la maquinaria en los extremos del tubo.

### **8.12. DESCARGADORES Y ESCOBILLAS**

Este sistema de puenteo debe tener una impedancia de paso inferior a la del elemento a proteger.

Deben ser capaces de soportar la corriente del rayo y estar colocados en un lugar accesible del aerogenerador.

Deben inspeccionarse regularmente, de acuerdo con los manuales de mantenimiento y de servicio.

### **8.13. CONEXIÓN EQUIPOTENCIAL**

Las conexiones equipotenciales deben emplearse en el interior de un aerogenerador para que no se produzcan chispas entre las partes conductoras del aerogenerador.

Cuando se produce el impacto del rayo estas conexiones equipotenciales proporcionan protección contra las tensiones de paso y de contacto, ya que juegan un papel muy importante al reducir la probabilidad de daños en los sistemas eléctricos y de control.

La impedancia en las conexiones equipotenciales deber ser baja para impedir que aparezcan diferencias de tensión peligrosas entres los equipos situados en el interior de los aerogeneradores.

### **8.14. TRAZADO DE CABLES Y APANTALLAMIENTO**

La corriente del rayo produce grandes campos magnéticos, que si atraviesan un bucle formado por cables y las propias estructuras del aerogenerador, inducirán en los bucles impulsos transitorios de tensiones e intensidades.

La magnitud de estos impulsos transitorios está relacionada con la tasa de variación del campo magnético y de la superficie del bucle en cuestión. Se debe considerar la magnitud de las tensiones inducidas y estar seguro de que tales impulsos no sobrepasan el nivel que pueden soportar el cableado y los equipos conectados.

El apantallamiento es la manera con la que se consigue atenuar los campos electromagnéticos. La reducción de los campos electromagnéticos pueden reducir sustancialmente los niveles de tensiones inducidas en los circuitos.

## 9. SISTEMAS DE PUESTAS A TIERRA EN AEROGENERADORES

Todos los parques eólicos requieren estar conectadas a tierra con el [objetivo](#) de:

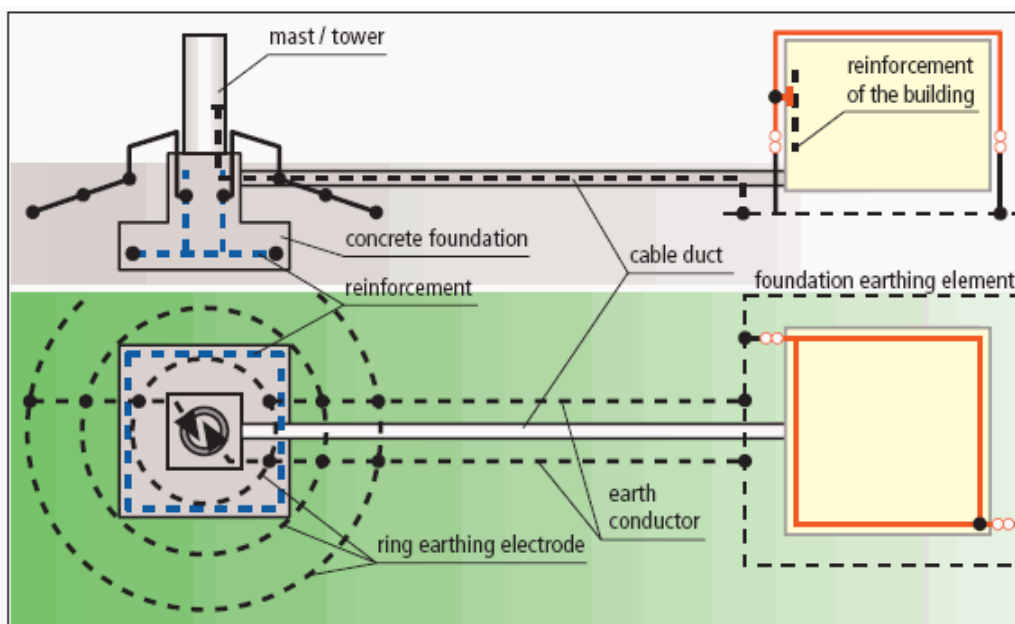
- Minimizar los peligros de [muerte](#) de personas y [animales](#),
- Establecer un camino de baja impedancia para las corrientes derivadas a tierra y por lo tanto una eficiente operación de las protecciones,
- Mejoramiento del sistema de protección contra rayos y conservar las tensiones de paso y contacto dentro de los límites normados,
- Prevenir la aparición de elevadas diferencias de potencial, peligrosas para las personas y los equipos.

Las turbinas eólicas al igual que el resto de los equipos eléctricos necesitan ser conectados a tierra con la menor impedancia posible. Generalmente los parques eólicos abarcan grandes áreas geográficas, en ocasiones varios kilómetros.

En la mayoría de los casos estos parques eólicos se encuentran ubicados sobre terrenos montañosos o colinas con [suelos](#) de elevada resistividad, donde es muy difícil obtener valores bajos de impedancia con el sistema de puesta a tierra. Además, se encuentran ubicados en zonas de alto nivel cerámico.

Las estadísticas muestran que la mayoría de los daños que ocurren sobre las turbinas eólicas y sus equipos electrónicos son debidos a impactos directos de rayos y menos a tensiones transferidas [producto](#) de fallas cercanas. Normalmente el mismo sistema de puesta a tierra es usado para la protección contra fallas (50/60 Hz) y contra impactos de rayos. Sin embargo, la función de cada una es notablemente diferente debido a las componentes de alta frecuencia que poseen las corrientes de los rayos.

En cada turbina eólica es construido un sistema de puesta a tierra colocando generalmente un anillo alrededor de la torre (Fig. 4 y 6) a una profundidad de 50 cm. a 1 metro y colocando electrodos verticales combinados con el anillo. Es muy común interconectar el sistema de puesta a tierra con los cimientos de la base de la torre de la turbina. El propósito de esta puesta a tierra local es proporcionar una unión equipotencial contra los efectos de los rayos y las fallas a frecuencia de [potencia](#) (50/60Hz) y además de constituir un elemento del sistema completo de puesta a tierra del parque eólico. [Los valores](#) de resistencia a lograr dependen de las regulaciones de cada país: por ejemplo en [España](#) es requerido 2 ohmios en instalaciones de baja tensión y en el Reino Unido se exige un [valor](#) de resistencia a tierra de 10 ohmios. Esta puesta a tierra local puede representarse esquemáticamente como una resistencia pura.



Elementos que componen el sistema de puesta a tierra de una turbina eólica.

En los parques eólicos se interconectan los sistemas de puestas a tierra individuales que posee cada turbina eólica. Esto trae consigo que la componente inductiva de la impedancia sea mayor que la componente resistiva. El conductor de puesta a tierra que interconecta el sistema de puesta a tierra de cada turbina tiene un [comportamiento](#) más complejo (similar a una línea de transmisión) y puede ser representado como el circuito equivalente  $\pi$ . Debido a la extensión de la [red](#) de tierra que interconecta todas las turbinas, la impedancia serie que aparece no puede ser ignorada.

Para el diseño de las puestas a tierra de las turbinas eólicas no es posible utilizar técnicas convencionales de [cálculo](#) que tienen en cuenta sistemas pequeños de puesta a tierra y además no tienen en cuenta las componentes reactivas de la impedancia creadas por los largos conductores o contrapesos que interconectan las puestas a tierra locales de cada turbina eólica.

Cuando un rayo impacta una turbina eólica, el potencial en [la tierra](#) alrededor de la misma se eleva. Este crecimiento puede producir un excesivo potencial el cual puede causar daños en el transformador de la turbina eólica. Las sobretensiones transferidas pueden inclusive dañar los [transformadores](#) de las turbinas eólicas vecinas, el equipamiento eléctrico, el transformador de la subestación y los cables eléctricos de [distribución](#).

Se ha realizado un [análisis](#) relacionado con el comportamiento frente a rayos de diferentes configuraciones de puestas a tierra que son aplicadas actualmente por diferentes empresas que construyen parques eólicos de generación. En este [trabajo](#) se ha demostrado que la impedancia del sistema

de puesta a tierra no cambia significativamente en función de su profundidad, sin embargo se demuestra que un incremento de la profundidad trae consigo una disminución de las tensiones de paso. También se demuestra que las descargas atmosféricas incrementan las tensiones de paso y la impedancia del sistema de puesta a tierra, en comparación a las fallas convencionales que ocurren a frecuencia de potencia (50/60 Hz). Además, llegan a la conclusión que con el aumento del diámetro del anillo del sistema de puesta a tierra se disminuyen las tensiones de paso, por lo que si el diámetro es suficientemente grande no es necesario adicionar electrodos verticales, lo cual incrementaría el [costo](#) del sistema a instalar. Otra conclusión importante a la cual se llega a través de los estudios es que incrementando la profundidad de ubicación del sistema de puesta a tierra de 0.5 m a 0.8 m las tensiones de paso disminuirán significativamente.

Para la conexión a tierra de la turbina eólica, el refuerzo metálico de los cimientos de la torre deberá ser integrado e interconectado con el sistema de puesta a tierra que se desee instalar. Es recomendable el uso de los cimientos de la estructura y del edificio de control como sistema de puesta a tierra debido a la protección que ofrece el concreto a la [corrosión](#) de los conductores. Además, se deberán interconectar la puesta a tierra de la base de la torre con la puesta a tierra del edificio de control con el objetivo de obtener un sistema de puesta a tierra equivalente con la mayor superficie posible.

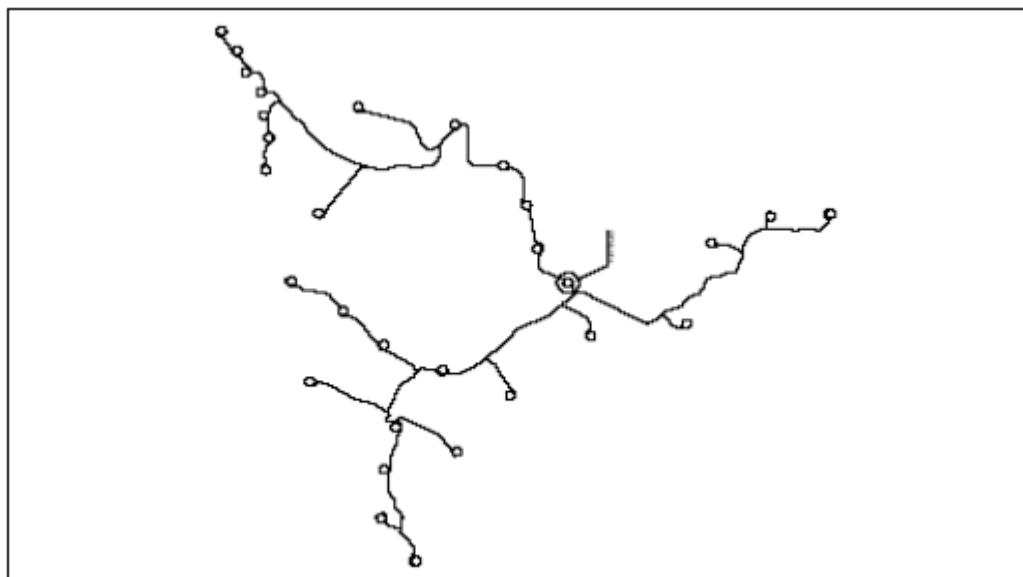
El único método efectivo para determinar la impedancia de tierra a frecuencia de potencia (50/60 Hz) de un parque eólico de gran tamaño es el método nombrado de inyección de corriente [8]. En esta prueba una corriente (típicamente entre 10-20 A) es inyectada dentro del sistema de puesta a tierra del parque eólico y es medida la caída de potencial con respecto a un punto de referencia. Sin embargo, el camino de regreso de la corriente inyectada debe estar bastante alejado del parque eólico (usualmente entre 5-10 Km.), para asegurar que la medición no se vea afectada por el área efectiva de la puesta a tierra del parque eólico. Es por esto que puede ser utilizado como camino para inyectar la corriente, las líneas eléctricas de distribución de energía, estando por supuesto las mismas desenergizadas.

La elevación del potencial en el sistema de puesta a tierra del parque eólico es medida en relación a una tierra remota que clásicamente puede transferirse a un sitio sobre el circuito de [telefonía](#). Idealmente la ruta del circuito de teléfonos debe ser perpendicular al circuito de potencia, para evitar los efectos de [inducción](#). Puede ser visto que la ejecución práctica de estas [pruebas](#) es extremadamente difícil y cara. También se hace bastante difícil el uso de los [circuitos](#) telefónicos para brindar la referencia de tierra remota, debido a que las compañías de telecomunicación incrementan cada día el uso de [medios de comunicación](#) inalámbricos. Sin embargo, es muy cuestionable si realizar pruebas más simples pueden dar resultados en [redes](#) de puestas a tierra extensas en presencia de significantes inductancias series.

### 9.1. CRITERIOS PRÁCTICOS SEGUIDOS POR VARIAS EMPRESAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LOS SISTEMAS DE PUESTAS A TIERRA DE LOS PARQUES EÓLICOS

En función del constructor de campos eólicos, la [geometría](#) del sistema de puesta a tierra es diferente. Cada constructor se basa en su propia experiencia, pero resulta imposible conocer exactamente cuáles son los motivos que les han llevado a adoptar dichas geometrías.

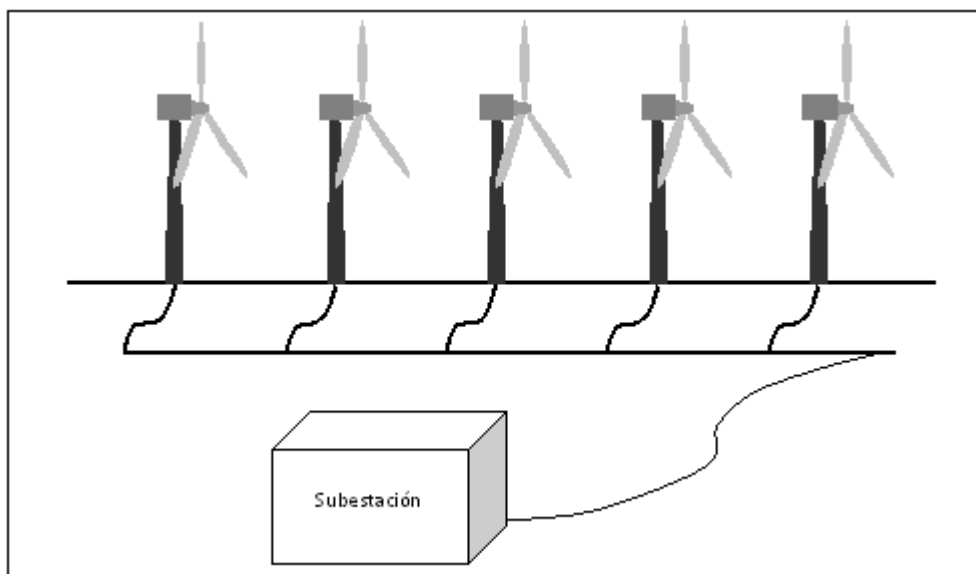
Un parque eólico "tipo" está compuesto por un número variable de turbinas eólicas que suele acercarse a las 30 unidades, separadas una de otra una distancia aproximada de 130 m, en función de los puntos de mayor incidencia del viento y menor impacto visual. En la siguiente figura, se puede observar la distribución de un parque "tipo".



Parque eólico "tipo"

En la práctica, la puesta a tierra de cada turbina eólica se suele unir en [grupos](#). Esta unión se realiza en grupos de cinco unidades mínimo y se conectan después al sistema de puesta a tierra de la subestación correspondiente. Así, desde la red de media tensión se deriva en forma de T a cada turbina eólica, mediante [soldadura](#) aluminotérmica, tal como muestra el esquema de la siguientes figura.



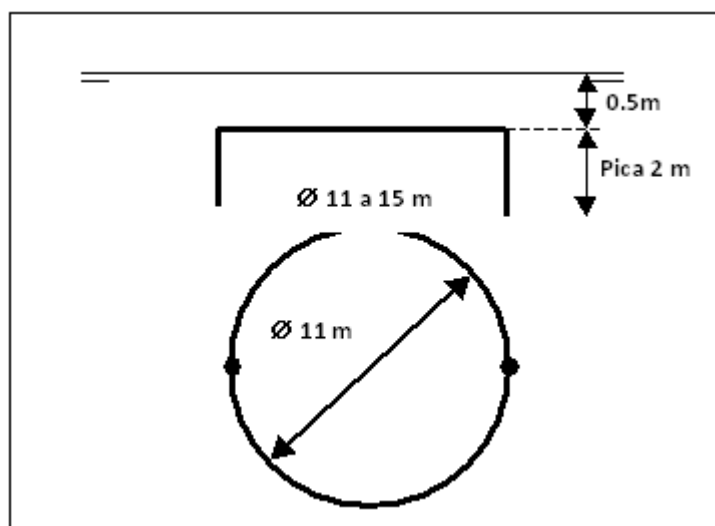


Conexión entre aerogeneradores

Las puestas a tierra empleadas por los principales constructores pueden resumirse en tres tipos:

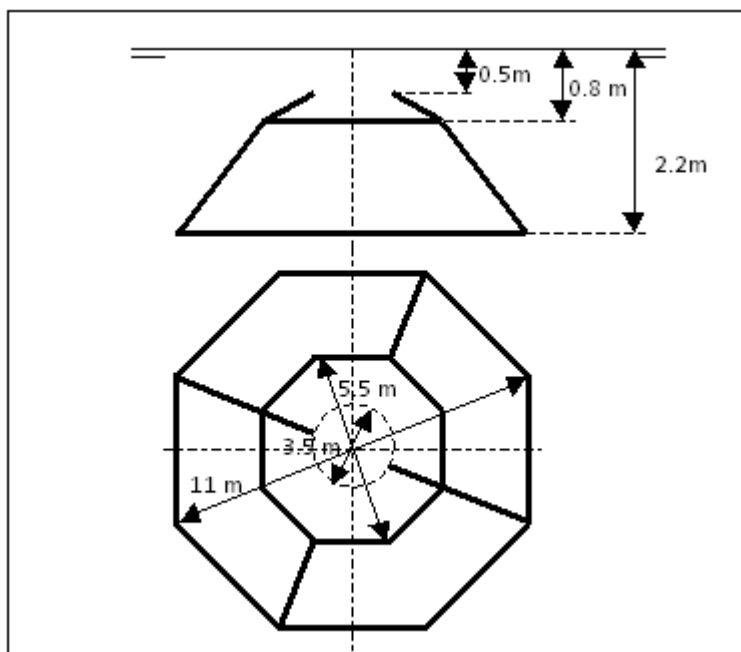
### Tipo 1

Se trata de un círculo alrededor de la base del aerogenerador, con un diámetro de 11 m aproximadamente, en el que en dos extremos opuestos se disponen dos picas de 2 m de longitud, como se observa en la siguiente figura.



Geometría de puesta a tierra, tipo 1

## Tipo 2



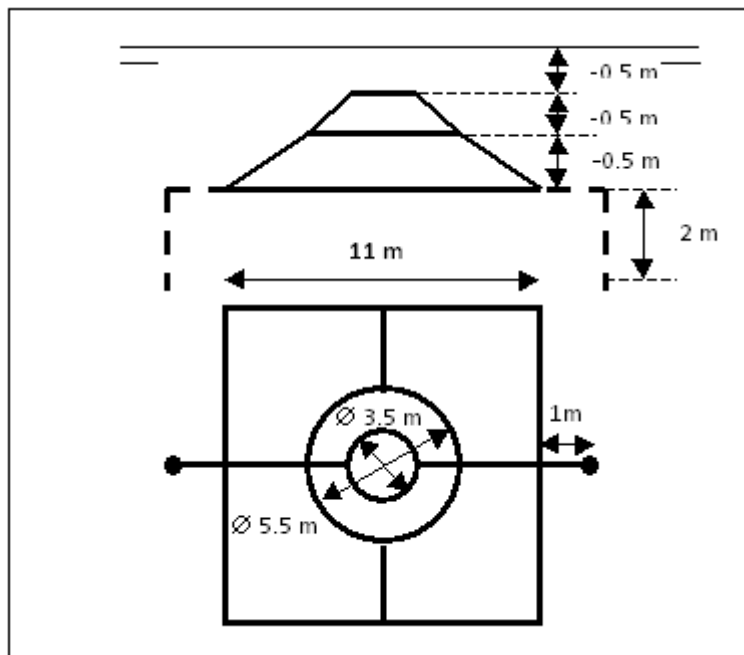
Geometría de puesta a tierra, tipo 2

Emplea un octógono como geometría base para la realización de la puesta a tierra. En este caso se disponen dos octógonos introducidos en el terreno a dos niveles distintos, tal y como se puede observar en la figura anterior.

## Tipo 3

Se trata de un anillo interior a la torre del aerogenerador alrededor del perímetro interno de la torre; otro anillo concéntrico y exterior a la base del aerogenerador sobre la cimentación del mismo y un anillo de forma cuadrada concéntrico exterior a la cimentación unido por cuatro puntos a los redondos de acero situados en los puntos medios de las aristas externas de la cimentación. Estos tres anillos concéntricos se unen formando una superficie equipotencial, como se observa en la siguiente figura. En caso de no obtener una resistencia adecuada, se sugiere añadir dos picas a un metro de distancia del cuadrado.

Además del apantallamiento contra emisiones radiadas de interferencias, se deberá proteger el sistema de cables contra la influencia de interferencias conducidas en las fronteras de las zonas de protección (LPZ) contra rayos, esto garantizará la confiable operación de los equipos eléctricos y electrónicos existentes.



Geometría de puesta a tierra, tipo 3

En la zona de protección LPZ OA - 1, se deberán instalar dispositivos de protección contra sobretensiones (DPS), los cuales sean capaces de descargar a tierra corrientes parciales de rayos sin provocar ningún daño a los equipos que se encuentran protegiendo. Estos DPS tipo 1 son probados con corrientes de impulso de forma de onda 10/350  $\mu$ s.

En las fronteras LPZ OA - 1 y LPZ 1 y mayores, solamente bajos impulsos de corriente con menor energía deberán ser controlados, estos impulsos resultan de tensiones inducidas en el exterior o por sobretensiones generadas por el propio sistema. En estas zonas deberán colocarse DPS tipo 2 los cuales son probados con corrientes de impulso con forma de onda 8/20  $\mu$ s.

Los DPS seleccionados deberán tener en cuenta las características de operación y el nivel de aislamiento de los equipos eléctricos y electrónicos que se desean proteger.

Contrario a los DPS que se utilizan para los sistemas eléctricos de potencia, una especial [atención](#) debe prestarse a la compatibilidad y características de los sistemas de medición, control y sistemas de [procesamiento de datos](#) a la hora de instalar DPS en estos sistemas. Estos DPS deben ser conectados en serie con las líneas de procesamiento de datos y deben ser capaces de reducir el nivel de interferencia por debajo de la inmunidad de los equipos a ser protegidos.

## 10. SEGURIDAD PERSONAL DURANTE TORMENTAS ELÉCTRICAS

Todo el personal que trabaja en la construcción o mantenimiento de un parque eólico debe conocer las siguientes recomendaciones para tenerlas en cuenta durante una tormenta, evitando riesgos para las personas.

El riesgo de ser alcanzado por un rayo es mayor entre las personas que trabajan en el exterior, las que caminan o permanecen al aire libre durante una tormenta eléctrica.

Cuando se tenga indicios de tormenta eléctrica es recomendable, como medida de protección, tener en cuenta las siguientes instrucciones:

- No acercarse a las bajantes de los pararrayos
- Proteger adecuadamente los equipos sensibles de uso eléctrico, electrónico, telefónico o de comunicaciones, desconectarlos retirando el enchufe del tomacorriente evitando así el uso de ellos.
- Buscar refugio en el interior de vehículos, edificaciones y estructuras que ofrezcan protección contra rayos.
- A menos que sea absolutamente necesario, no salir al exterior ni permanecer a la intemperie durante una tormenta eléctrica.
- Permanecer en el interior del vehículo, edificación o estructura hasta que haya desaparecido la tormenta.

Protéjase de los rayos en:

- Contenedores totalmente metálicos.
- Refugios subterráneos.
- Automóviles y otros vehículos cerrados con carrocería metálica.
- Viviendas y edificaciones con un sistema adecuado de protección contra rayos.

No se ubique en estos sitios ofrecen poca o ninguna protección contra rayos:

- Edificaciones no protegidas alejadas de otras viviendas.
- Tiendas de campaña y refugios temporales en zonas despobladas.
- Vehículos descubiertos o no metálicos.

Aléjese de estos sitios en caso de tormenta eléctrica:

- Terrenos deportivos y campo abierto.
- Piscinas, playas y lagos.
- Cercanía a líneas de transmisión eléctrica, cables aéreos, vías de ferrocarril, tendedores de ropa, cercas ganaderas, mallas eslabonadas y vallas metálicas.

- Árboles solitarios.
- Torres metálicas: de comunicaciones, de líneas de alta tensión, de perforación, etc.

Si debe permanecer en una zona de tormenta:

- Busque zonas bajas.
- Evite edificaciones sin protección adecuada y refugios elevados.
- Prefiera zonas pobladas de árboles, evitando árboles solitarios.
- Busque edificaciones y refugios en zonas bajas.

Si se encuentra aislado en una zona donde se esté presentando una tormenta:

- No se acueste sobre el suelo.
- Junte los pies.
- No escampe bajo un árbol solitario.
- No coloque las manos sobre el suelo, colóquelas sobre las rodillas.
- Adopte la posición de cuclillas.

PREGUNTA	RESPUESTA
¿Durante una tormenta eléctrica se evita que haya personal trabajando al aire libre?	
¿Durante una tormenta eléctrica se evita que haya personal caminando al aire libre?	
¿Durante una tormenta eléctrica se evita que haya personal que permanece al aire libre?	
¿Durante una tormenta eléctrica permanece el personal, dentro de vehículos y edificaciones?	
¿Durante una tormenta se evita la cercanía del personal a terrenos deportivos y campo abierto?	
Durante una tormenta se evita la cercanía a piscinas, playas, lagos.?	
Durante una tormenta se evita la cercanía a líneas de transmisión, redes y subestaciones eléctricas.?	
Durante una tormenta se evita la cercanía a torres de comunicaciones?	
Durante una tormenta se evita escampar en árboles solitarios?	
Durante una tormenta se evita la cercanía a vías de ferrocarril, oleoductos y ducterías metálicas?	
Se aleja al personal durante una tormenta, de mallas eslabonadas, cercas, vallas metálicas, tendederos de ropa?	
Se evita que el personal se acerque durante una tormenta, a grandes tanques metálicos?	
Durante una tormenta se aleja al personal de las partes altas?	
Se evita el uso de vehículos no metálicos ante una tormenta?	
Se utilizan contenedores totalmente metálicos, como refugio ante tormentas?	
Se utilizan refugios subterráneos en caso de tormenta?	
Se utilizan automóviles y otros vehículos cerrados con carrocería, como refugio ante tormentas?	
Se evita acostarse en el suelo mientras se está presentando una tormenta?	
Se evita colocar las manos en el suelo mientras se está presentando una tormenta?	
Se juntan los pies mientras se está presentando una tormenta?	
Se adopta la posición de cuclillas por el personal que se encuentra aislado, mientras se está presentando una tormenta?	
Se evita la cercanía de árboles cuyas ramas están próximas a redes eléctricas?	
Se desconectan los aparatos eléctricos cuando se inicia una tormenta.?	
Se desconectan los equipos telefónicos cuando se inicia la tormenta.?	
Se evita el uso de aparatos eléctricos en el momento de la tormenta.?	
Se evita el uso de aparatos electrónicos en el momento de la tormenta.?	
Se evita el uso de aparatos telefónicos en el momento de la tormenta.?	
Se evita el contacto con cables, alambres, tubería metálica de agua, energía, gas, etc. durante una tormenta.?	
<b>TOTAL RESPUESTAS (Si)</b>	
<b>Porcentaje acciones positivas</b>	

## 11. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- Estaciones de transformación, distribución y protección de sistemas eléctricos de la CEAC de Ramírez Vázquez.
- B. Hermoso, H. Torres, and S. Visacro, "Striking Distance and Attractive Radius: A New
- B. Hermoso, "Etapas en las descargas atmosféricas, aportaciones investigadoras y modelos,"
- B. Hermoso, Curso protección contra el rayo en aerogeneradores, COPITI, Navarra.
- Stevenson Willan Análisis de sistemas Eléctricos de potencia Graw-Hill.
- Elementos de Diseño de Subestaciones de Enríquez Harper.
- Normas de la IEEE St 80 de Puestas a Tierra.
- Norma Francesa NF C 17-102. acerca de apantallamiento.
- Arevalo and V. Cooray, "'The mesh method' in lightning protection standards - Revisited,"
- A. Borghetti, F. Napolitano, C. A. Nucci, M. Paolone, and M. Bernardi, "Numerical Solution of
- K. Berger, Anderson, R.B. , "Parameters of lightning flashes," *Electra* pp. 223-237, 1975.
- H. J. Christian, "Global Lightning Activity," in *12th International Conference on Atmospheric*
- *Electricity*, Versailles, France, 2003, pp. 673–676.
- B. J. Franklin, "Experiments and observations on Electricity," *Phil. Tran. Royal Soc*, vol. A47,
- A. J. Eriksson, "Improved electrogeometric model for transmission line shielding analysis,"
- *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. PWRD-2, pp. 871-886, 1987.
- A. J. Eriksson, "The Incidence of Lightning Strikes to Power Lines," *Power Delivery, IEEE*
- A. M. Rizk, "Switching impulse strength of air insulation: leader inception criterion," *Power*
- *Geophysical Research Letters*, vol. 29, Jun 15 2002.
- V. A. Rakov and M. A. Uman, "Waveforms of first and subsequent leaders in negative lightning
- *J. Geophys. Res.*, vol. 95, pp. 561-577, 1990.
- E. Krider, C. Weidman, and C. Noggle, "The electric fields produced by lightning stepped
- Salvatore," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 283, pp. 478-525, 1967.
- B. Hutzler, "Notes Bibliographiques concernant la simulation en laboratoire des points d'impact