

# LA FÍSICA DEL RAYO

Almacenamiento ideal de la energía  
producida por un rayo mediante la  
ramificación de un pararrayos

## RESUMEN

¿La energía de un rayo se podría almacenar? ¿Cómo debería ser ese proceso? ¿Qué tipo de material debería utilizarse? ¿Qué características debería tener este material para soportar los factores extremos en este tipo de descarga? Preguntándome esto me he planteado la siguiente pregunta de investigación: ¿Sería posible almacenar la energía de un rayo mediante la ramificación de un pararrayos?

La monografía consiste en la elaboración de los cálculos necesarios para una estructura ideal de almacenamiento, fruto de la revisión de los distintos dispositivos que se han propuesto a lo largo de la historia.

En un primer momento el mejor procedimiento parecía la jaula de Faraday, porque acumula la carga en su superficie, pero este hecho provoca muchas pérdidas de energía incontrolables. Analizando las distintas teorías he llegado a la conclusión de que el mejor proceso de almacenamiento es la ramificación de un pararrayos, con conductores de una distancia “ $d$ ” conectados a condensadores de las mismas características.

Sabiendo que las nubes de tipo cumulonimbus se forman en la troposfera (20 km) y que un avión vuela a unos 5-10 km del suelo, he decidido hacer la media de la distancia para realizar los cálculos de esta monografía.

El material que debería utilizarse para el pararrayos, los conductores de la ramificación, los conductores de cobre armados o de fuerza, es el cobre, a alta tensión, serán capaces de transportar hasta 65 kV.

Cuando el espacio entre los dos conductores de un condensador se ve ocupado por un dieléctrico, la capacidad aumenta en un factor  $k$ . Para la realización de los cálculos he utilizado el titanato de estroncio, que tiene una constante dieléctrica de 240, la más elevada encontrada en la bibliografía.

Por lo tanto, aunque es una posibilidad aún dificultosa por las dimensiones, tanto del espacio donde debería estar ubicada la estructura, como del propio condensador, y por el coste que supondría, según mis cálculos, no puede decirse que sea inviable almacenar la carga del rayo, pero aún queda mucho por investigar.

# ÍNDICE

1. Introducción.....	4
2. Tormentas eléctricas.....	5
2.1.    Formación.....	5
2.2.    Rayos.....	5
2.3.    Tipos de nubes.....	6
3. Almacenamiento de la energía eléctrica.....	11
3.1.    Proceso de almacenamiento.....	11
3.1.1. Pasos del análisis para decidir el dispositivo o dispositivos más adecuados de almacenamiento.....	11
3.1.2. Descripción del proceso seguido.....	11
3.1.3. Nomenclaturas utilizadas.....	12
3.1.4. Datos relevantes.....	13
3.1.5. Fórmulas utilizadas.....	14
3.2.    Material y cálculos correspondientes.....	15
3.2.1. Pararrayos.....	15
3.2.2. Conductores.....	17
3.2.3. Cobre.....	17
3.2.4. Condensadores Esféricos.....	19
3.2.4.1. ¿Qué son?.....	19
3.2.4.2. Dieléctrico.....	20
3.2.5. Cálculos de las características de un rayo de intensidad media y de la estructura ideada.....	23
3.3.    Protección.....	27
3.3.1. Estructura.....	27
3.3.2. Jaula de Faraday y aislamiento.....	27
4. Propuestas para la utilización de la energía almacenada.....	28
4.1.    Desconexión térmica automática y utilizations posibles.....	28
5. Conclusiones.....	29
6. Referencias y bibliografía.....	30
7. Agradecimientos y reconocimientos.....	32

## 1. INTRODUCCIÓN

¿La energía mueve el mundo? John Wesley<sup>1</sup> (1703-1791) afirmaba que “la electricidad es el alma del universo”. No era físico, pero podemos sentirnos identificados con esta cita, puesto que todos nos deslumbramos ante la fuerza de la energía natural desbocada: un diluvio, un tsunami, un tornado, un volcán en erupción o la fuerza de un rayo.

En un mundo que cada vez más necesita de la electricidad para mover su realidad y busca nuevas fuentes de energía, estos fenómenos naturales son un reto, y lo son porque no los dominamos.

En esta monografía de Física querría profundizar en uno de esos fenómenos: el rayo. La energía que descarga se pierde, en el mejor de los casos, o es fuente de destrucción. Ha habido y hay muchas líneas de investigación sobre la explotación de la energía posible que acumula una tormenta. Pero aprovechar dicha energía sigue siendo un sueño. A una alumna de bachillerato se le puede permitir soñar.

¿Podría llegar a recogerse la energía que descarga un rayo? ¿Cómo debería ser el proceso de almacenamiento de dicha energía? ¿Qué tipo de material debería utilizarse? ¿Qué características debería tener para soportar la temperatura, la intensidad, el voltaje... en este tipo de descarga?

Era un terreno absolutamente nuevo para mí. El programa curricular de Física de Bachillerato nos daba en el primer curso nociones de mecánica, dinámica, corriente continua y óptica. Realizar el trabajo me ha servido para entrar en parte del currículo de segundo; lo he estudiado a partir de la bibliografía existente (Tipler y Mosca, y Serway, entre otros), y con la participación en dos campus de investigación en la Universidad de Barcelona<sup>2</sup> y en la Universidad de Girona<sup>3</sup>.

Esta monografía consiste en el planteamiento y la elaboración de los cálculos necesarios para una estructura ideal de almacenamiento.

---

<sup>1</sup>John Wesley, teólogo y filólogo inglés, fundador de los metodistas.

<sup>2</sup>Physics, Campus de Física UB, Junio 2013.

<sup>3</sup>Jove Campus de Recerca, del 1 al 12 de Julio; dos tutoras me ayudaron con la bibliografía y las dudas que me iban pasando por la cabeza mientras estudiaba el tema enunciado.

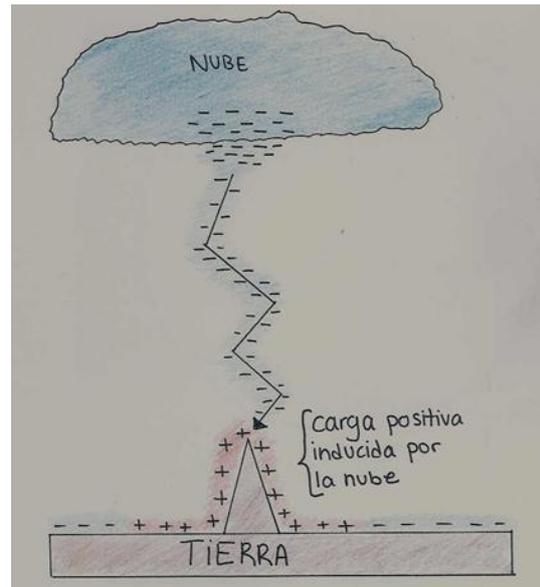
## 2. TORMENTAS ELÉCTRICAS

### 2.1. Formación

Por la acumulación de nubes densas a causa de los movimientos de grandes masas de aire y agua, en el interior de la nube se crean zonas de cargas positivas y negativas. Estas zonas dan lugar a grandes diferencias de potencial, que dan nombre a los rayos.<sup>45</sup>

### 2.2. Rayos

Descargas eléctricas de gran intensidad, los rayos son las reacciones eléctricas causadas por la saturación de cargas electrostáticas, que han sido generadas y acumuladas progresivamente durante el fenómeno eléctrico que origina una tormenta. Los iones positivos y negativos se separan, las moléculas se rompen y crean un camino de electrones conducidos hasta la zona de potencial 0, el suelo; suelen converger en los objetos acabados en punta. Van acompañados de liberación luminosa, debido a la ionización del aire



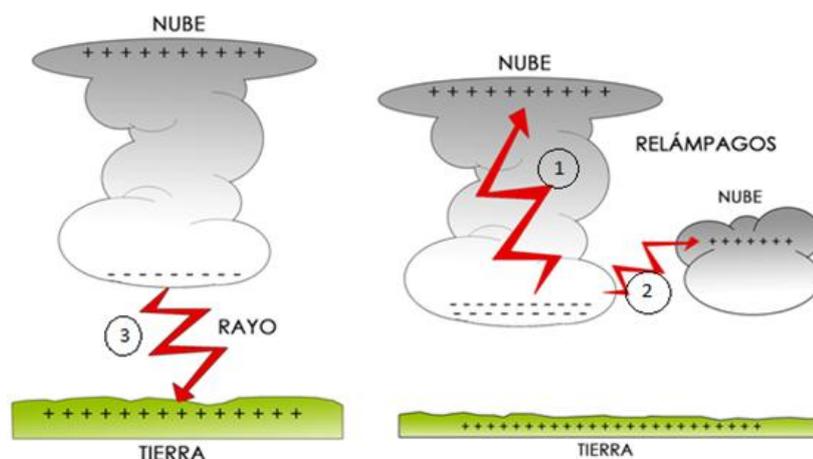
causada por las ddp, el medio se vuelve conductor porque los electrones y los átomos ionizados se mueven con rapidez; a su vez, chocan con otros átomos, dando lugar a nuevas ionizaciones y energía acústica, los truenos.<sup>6</sup> En el cuadro siguiente, indico los tipos de rayos según la dirección que toman.

#### TIPOS DE RAYOS

1-Descargas entre zonas de una misma nube

2-Entre dos nubes

3-Entre la nube y la superficie terrestre.



Fuente: <http://ventanaabiertamyblog.files.wordpress.com/2010/06/el-rayo.jpg>

<sup>4</sup><http://meteolamatanza.es/enciclopedia-meteo/tormentas-electricas>

<sup>5</sup><http://www.youtube.com/watch?v=64U7U-a4ejk>

<sup>6</sup>*Física per a la ciència i la tecnologia*, volum 2 *Electricitat i magnetisme, La llum, Física moderna*. Editorial Reverté, Projecte Scriptorium (Paul A. Tipler, Gene Mosca).

## 2.3. Tipos de nubes

Para poder clasificar las nubes debemos tener en cuenta su forma, altura y color. La formación de nubes depende de la velocidad de la corriente de aire ascendiente.<sup>7 8</sup> Con los datos recogidos de la bibliografía, he elaborado el siguiente cuadro, en el que se tienen en cuenta las características para saber qué tipo de nube debo analizar para realizar mis cálculos.

TIPO DE NUBE SEGÚN UBICACIÓN	Distancia de la tierra a la nube	Tipos de nubes	Características significativas
<b>Baja</b>	Desde la superficie hasta 2000 metros.	1.Estratos  2.Estratocúmulos  3.Nimbostratos	1.Producen nieblas, el tiempo es anticiclónico. Raramente producen precipitaciones.  2. Se asocian al buen tiempo. Cuando es verano, aparecen a media tarde como evoluciones de cúmulos. No son indicadoras de cambio de tiempo.  3.Suelen dar lluvias o nevadas continuas. Asociadas a frentes cálidos.
<b>Media</b>	2000-8000 m en el trópico  2000-4000 m en la zona polar.	4.Altocúmulos  5.Altoestratos	4.Aislados, predicen buen tiempo. En aumento indican la proximidad de un frente o una borrasca.  5.Asociados a frentes cálidos, suelen dar lluvias o nevadas débiles continuas.
<b>Alta</b>	6000-18000 m en el trópico  3000-8000 m en las regiones polares.	6.Cirros  7.Cirrocúmulos  8.Cirrostratos	6. Aislados, significan buen tiempo. Si avanzan organizados es síntoma de cambio de tiempo.  7.No suele indicar cambio de tiempo  8. Típico de climas cálidos. Se asocian a un cambio significativo del tiempo.
<b>Vertical</b>	Estas nubes ocupan todos los niveles de la troposfera y pueden llegar incluso a la estratosfera.	9.Cúmulos  10.Cumulonimbos	9. No producen precipitación y están asociadas al buen tiempo.  10.Producentormentas de lluvia o granizo. Asociadas a fenómenos eléctricos: rayos y relámpagos.

<sup>7</sup><http://roble.pntic.mec.es/jgah0028/Tipos%20de%20nubes.html>

<sup>8</sup>[http://www.windows2universe.org/earth/Atmosphere/clouds/cloud\\_types.html&lang=sp](http://www.windows2universe.org/earth/Atmosphere/clouds/cloud_types.html&lang=sp)

**Imágenes de los distintos tipos de nube correlativamente a los números que aparecen en el cuadro anterior.**

**1. Estratos**



Fuente: <http://www.windows2universe.org/earth/Atmosphere/clouds/stratus.html&lang=sp>

**2. Estratocúmulos**



Fuente: <http://www.windows2universe.org/earth/Atmosphere/clouds/stratocumulus.html&lang=sp>

**3. Nimbostratos**



Fuente: <http://www.windows2universe.org/earth/Atmosphere/clouds/nimbostratus.html&lang=sp>

#### 4. Altocúmulos



Fuente: <http://www.windows2universe.org/earth/Atmosphere/clouds/altocumulus.html&lang=sp>

#### 5. Altoestratos



Fuente: <http://www.windows2universe.org/earth/Atmosphere/clouds/altostratus.html&lang=sp>

#### 6. Cirros



Fuente: <http://www.windows2universe.org/earth/Atmosphere/clouds/cirrus.html&lang=sp>

### 7. Cirrocúmulos



Fuente: <http://www.windows2universe.org/earth/Atmosphere/clouds/cirrocumulus.html&lang=sp>

### 8. Cirrostratos



Fuente: <http://www.windows2universe.org/earth/Atmosphere/clouds/cirrostratus.html&lang=sp>

### 9. Cúmulos



Fuente: <http://www.windows2universe.org/earth/Atmosphere/clouds/cumulus.html&lang=sp>

## 10. Cumulonimbos



Fuente:<http://www.windows2universe.org/earth/Atmosphere/clouds/cumulonimbus.html&lang=sp>

Esta última es la que genera las tormentas eléctricas.

## **3. ALMACENAMIENTO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA**

### **3.1. Proceso de almacenamiento**

#### **3.1.1. Pasos del análisis para decidir el dispositivo o dispositivos más adecuados de almacenamiento**

En un primer momento creí que el mejor procedimiento de almacenamiento sería utilizar una jaula de Faraday porque acumula la carga en su superficie<sup>9</sup>, pero el hecho de que la carga esté en la superficie, y no en su interior, provoca muchas pérdidas incontrolables. Mediante este dispositivo era prácticamente imposible aproximar la carga y la energía que teníamos. Sin embargo, por lo que respecta a las características de este invento, se sabe que su interior está aislado, por lo que se ha podido utilizar en la estructura para protegerla.

Seguidamente, estudié los condensadores -dispositivos que almacenan energía-; me parecieron muy interesantes, así que pensé: Si conecto un condensador principal al pararrayos y este está conectado a varios condensadores paralelamente (ya calcularía cuántos), ¿podría funcionar? Era tentador; pero no lo hice de esta forma porque el hecho de que estén conectados paralelamente no disminuye el voltaje -que era lo que yo buscaba-, sino que queda igual que la fuente principal; por lo tanto, la descarté. También he prescindido de esta teoría porque sabemos que es prácticamente imposible que un solo condensador almacene toda la energía de un rayo, por motivos de capacidad, dimensiones, tensión de trabajo, etc.

Finalmente, estudiando teorías y hablando con Doctores en Física de la universidad, he llegado a la conclusión de que el mejor proceso de almacenamiento es: la ramificación de un pararrayos, con conductores de una distancia “d” conectados a condensadores en su extremo de las mismas características.

#### **3.1.2. ¿Qué proceso seguiremos para almacenar la energía de las tormentas eléctricas?**

El proceso de almacenamiento ha sido pensado para almacenar la energía de un rayo de manera eficaz y siguiendo las teorías que se han ido desarrollando a lo largo de la historia de la ciencia física.

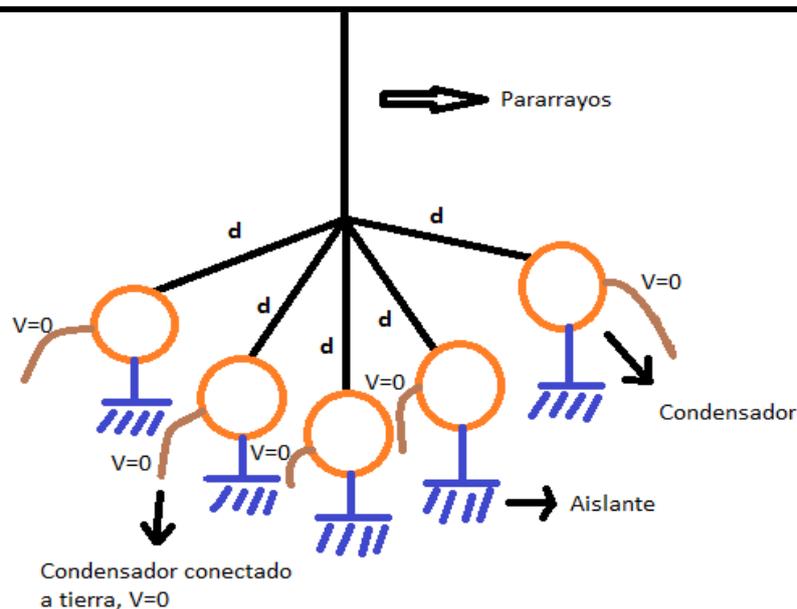
Cuando la electricidad se ramifica y hay la misma distancia en cada “rama” y al final condensadores de unas características X iguales, la carga y el voltaje se reparten de manera equitativa, se dividen según el número de ramas que haya y se conducen hacia el condensador de las mismas características que los otros.

---

<sup>9</sup>La explicación técnica completa está en el apartado 3.3. Protección de la estructura ideal.

Voy a realizar mi propuesta siguiendo estos pasos y utilizando el material que se detalla a continuación<sup>10</sup>.

1. Captación: Pararrayos
2. Conducción: Conductores de cobre armado
3. Llegada al condensador: Condensadores esféricos (se tendrá en cuenta el dieléctrico y las dimensiones, así como las características del material)
4. Desconexión automática mediante un sistema térmico: Térmicos.  
Mediante esta desconexión automática podrán utilizarse los condensadores independientemente, porque cuando no pase más carga, se enfriará y el conductor se desconectará automáticamente.
5. Posibles utilizations, sabiendo que los condensadores estarán sometidos a alta tensión, de la energía de los condensadores, como generadores; se deberá someter a un circuito con transformadores, incluidos para disminuir el voltaje.<sup>11</sup>



### 3.1.3. Nomenclaturas utilizadas

1. Intensidad de campo  $\rightarrow E$
2. Densidad de carga  $\rightarrow \sigma$
3. Carga  $\rightarrow Q$
4. Voltaje  $\rightarrow V$
5. Capacidad  $\rightarrow C$
6. Distancia media entre la tormenta y la tierra  $\rightarrow d$
7. Radio del condensador esférico  $\rightarrow R$
8. Constante de la ruptura dieléctrica del aire  $\rightarrow \epsilon_0$
9. Constante dieléctrica  $\rightarrow K$
10. Superficie  $\rightarrow S$
11. Energía que contiene un condensador  $\rightarrow E$

<sup>10</sup> 3.2. Material utilizado y cálculos correspondientes

<sup>11</sup> Explicado en el punto 4. Propuestas para la utilización de la energía almacenada

### 3.1.4. Datos relevantes

A lo largo del proceso deben tenerse en cuenta varios factores, sobre todo en relación a los cálculos. Siguiendo la numeración del apartado 3.1.3., expongo la relevancia de cada uno de dichos factores.

1. La intensidad de campo que utilizado será aquella que llega a provocar la ruptura dieléctrica del aire, igual que un rayo. Consigue romper las moléculas del aire y crear un camino de electrones que dan como resultado un rayo.  $E=3 \cdot 10^6 \text{ V/m}$ .
2. La densidad de carga servirá para saber cuánta carga hay en cierta superficie: habrá más densidad cuanto más carga haya en menos superficie.
3. La carga es el flujo de electrones que generará una corriente eléctrica.
4. El voltaje que genera un rayo dependerá de la distancia de la nube a la tierra, - que explicaremos más adelante-; dependiendo del rayo será de una manera u otra. El condensador o capacitor deberá estar conectado al suelo, de voltaje 0, para que funcione correctamente.
5. La capacidad de un condensador es fundamental en nuestros cálculos: cuanto mayor sea, más podrá almacenar y menos capacitores vamos a necesitar. La capacidad depende de muchos factores como serían la temperatura, el radio del condensador, el dieléctrico, etc. Todas estas cuestiones se irán viendo a lo largo del trabajo.
6. La distancia entre la tormenta y la tierra ha sido uno de los datos más difíciles de encontrar. En un principio, sabiendo que las nubes de tipo cumulonimbus se forman en la troposfera -como hemos observado antes-, había buscado la distancia de la troposfera a la tierra: 20 km. Aunque, yendo más allá, sabemos que un avión vuela a una altura considerable porque de esta manera evita las turbulencias y tormentas eléctricas, y eso es unos 5-10 km del suelo; por lo tanto, he decidido establecer la media de la distancia a la que vuelan los aviones para los cálculos.
7. El radio de un condensador esférico se encuentra explicado con detalle en el apartado de los materiales utilizados. Se sabe que un condensador esférico tendrá dos placas paralelas pero esféricas; por lo tanto, encontraré dos radios: a y b. Mediante estos radios podré saber el volumen de dieléctrico necesario para cada condensador.
8. La constante de ruptura dieléctrica del aire es necesaria para la realización de los cálculos, básicamente, porque el rayo, cuando se produce, rompe esta molécula, provoca la ruptura del medio -el aire, en este caso-.  $\epsilon_0=1,00059 \cdot 8,84 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ .
9. La constante del dieléctrico que utilizaré para el condensador deberá darse de la siguiente forma: la constante total es la multiplicación de K, la constante que



encontramos en la bibliografía, por  $\epsilon_0$ , que dará  $\epsilon$ . La mayoría de veces no se tiene en cuenta la constante de ruptura dieléctrica del aire, pero en este caso buscaré la precisión.

10. La superficie que debemos tener en cuenta para los cálculos de la densidad, carga y otros es la del condensador esférico, sabiendo que es una esfera tal que  $S=4\pi \cdot R^2$ .
11. La energía que contendrán los condensadores será nuestro resultado final, ¿cuántos Joules podremos almacenar?

### 3.1.5. Fórmulas utilizadas<sup>12</sup>

**Intensidad de campo [N/C], [V/m]**

$$E = \frac{\sigma}{2 \cdot \epsilon_0 \cdot K}$$

**Densidad de carga superficial ( $\sigma$ ) [C/m<sup>2</sup>]**

$$\sigma = \frac{Q}{S}$$

**Capacidad de un condensador esférico (C) (aproximación<sup>13</sup>) [F]**

$$C = 4\pi \cdot \epsilon \cdot R$$

**Carga (Q) [C]**

$$Q = \frac{C}{V}$$

**Diferencia de potencial (V), (ddp) [V]**

$$V_+ - V_- = E \cdot d$$

**Energía que contiene un condensador**

$$E = \frac{1}{2} \cdot V^2 \cdot C$$

<sup>12</sup>A continuación presentamos las fórmulas utilizadas y sus unidades entre corchetes.

<sup>13</sup>Explicado en el apartado del material, condensadores esféricos

## 3.2. Material utilizado y cálculos correspondientes

Antes de proceder a la realización de los cálculos es necesario presentar, por una parte, el material y las estructuras que deberían utilizarse y, por otra, las fórmulas que se aplicarán, comentando en cada caso la decisión tomada. Se pretende calcular las características que deben tener los materiales para ser capaces de almacenar la energía eléctrica generada por un rayo.

### 3.2.1. Pararrayos

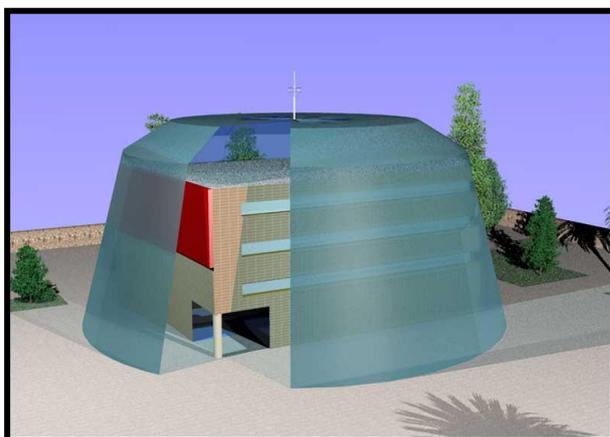
Ingesco<sup>14</sup> me ha proporcionado la información que utilizaré en este apartado.

Un pararrayos -invención de Benjamin Franklin- es un dispositivo que se coloca sobre edificios, barcos, etc. para preservarlos de los efectos de las descargas eléctricas producidas en la atmósfera<sup>15</sup>. Su misión es:

1. **Interceptar** una descarga atmosférica directa sobre la estructura.
2. **Conducir** la corriente en forma segura hacia tierra.
3. **Dispersar** la corriente de la descarga en el suelo.

Según la tipología de dispositivos, la protección externa puede ser:

• **Protección activa:** Pararrayos que por un medio u otro emiten un flujo de iones dirigidos a la nube, aumentando la probabilidad de descarga sobre ellos.



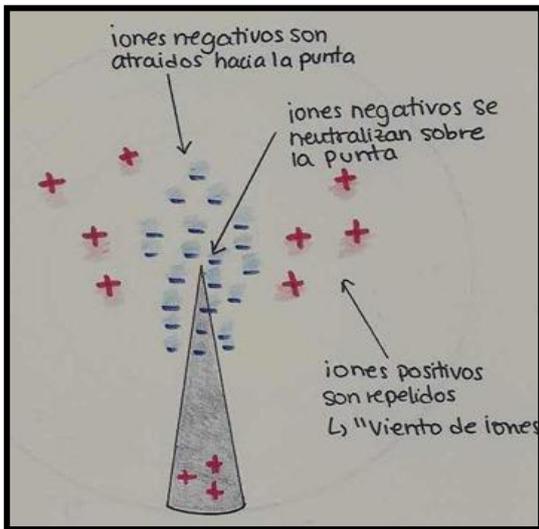
• **Protección pasiva:** Sistemas que no provocan el arco disruptivo (rayo), no aumentando la probabilidad de descarga en el edificio a proteger (acción preventiva)

La carga eléctrica positiva de estos iones atrae los rayos (carga negativa), lo que aumenta la probabilidad de que la descarga se produzca sobre el captador.

¿Cómo funciona un pararrayos?

<sup>14</sup>Una empresa de pararrayos con la cual he mantenido contacto; así pues, la siguiente explicación se basará en datos de su empresa.

<sup>15</sup><http://www.wordreference.com/definicion/pararrayos>

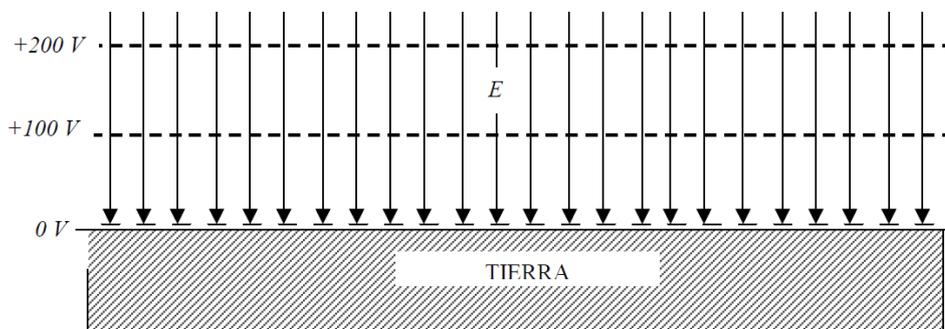


### Partes de un pararrayos<sup>16</sup>:

- **Varilla:** cilíndrica de 3 a 5 metros de altura con una punta o puntas de acero galvanizado o cobre, instalada en la parte más elevada del edificio o cualquier otra construcción que lo requiera. La punta está recubierta de wolframio (punto de fusión 3650 °C) con el fin de soportar las altas temperaturas que produce el rayo al caer.
- **Conductor aéreo:** formado por un cable de cobre de más de 8 milímetros de diámetro o cable de hierro de más de 11 milímetros de diámetro. También se pueden utilizar tubos de los mismos materiales. No está aislado del edificio que protege.
- **Conductor subterráneo:** placas de cobre o acero galvanizado de un metro cuadrado de superficie como mínimo, hundidas en tierra húmeda y unidas al conductor aéreo. Si el terreno es seco se utiliza como conductor subterráneo un cable extenso enterrado a lo largo del edificio

Para los cálculos puedo aprovechar el material de un pararrayos que se utiliza corrientemente en los edificios. Los conductores que se usan en el pararrayos tienen unas características concretas que me ayudarían en la teoría de almacenamiento ideal de las tormentas eléctricas.

Las líneas de campo y las superficies equipotenciales -aquellas en las que el potencial eléctrico tiene un valor constante- se ven indicadas en el siguiente dibujo; se observa que un rayo viene de un potencial elevado y en la tierra es nulo:



Fuente: <http://bacterio.uc3m.es/docencia/profesores/herrerros/itts/ficheros/Pararray.pdf>

<sup>16</sup><http://www.fceia.unr.edu.ar/~fisica3/Tormentas.pdf>

¿Qué papel tiene el pararrayos en nuestro almacenamiento ideal? El más importante: sin él, el proceso de almacenamiento no sería posible. Su función es captar el rayo mediante el efecto punta (Benjamin Franklin). Utilizaré el material corriente de un pararrayos para la estructura porque, así, el dispositivo, ya inventado, podrá soportar tal temperatura, intensidad, voltaje u otros.

### 3.2.2. Conductores<sup>17</sup>

A continuación, se observan las propiedades que deben tener los conductores para que funcionen correctamente: van a ser útiles en nuestra estructura.

#### Propiedades

- Estado de equilibrio electrostático: Las cargas del conductor no se mueven, debido a que la fuerza y el equilibrio sobre cada una de ellas son nulos.

Sistema en equilibrio electrostático: Momento en que no hay más separación de carga.

Si le aplicamos a un material conductor un campo eléctrico externo aparece una fuerza sobre las cargas positivas hacia un sentido y sobre las cargas negativas el opuesto.

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}_{aplicado}$$

- Permite el movimiento de cargas por su interior. Esta propiedad provocará una separación entre las cargas: las positivas a un lado y las negativas a otro.

En el momento en que las cargas se separan y surgen densidades de carga opuestas, aparece un campo eléctrico adicional debido a las propias cargas del conductor. La fuerza sobre cada carga del material es:

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{E}_{aplicado} + \vec{E}_{propio})$$

Este campo propio va en sentido opuesto al aplicado, por lo que la fuerza se reduce.

$$\vec{E} = \vec{E}_{aplicado} + \vec{E}_{propio} = \vec{0}$$

- Periodo transitorio: El momento en que las cargas se desplazan entre equilibrio y equilibrio

### 3.2.3. Cobre<sup>18</sup>

Para el almacenamiento de la energía voy a utilizar el cobre, el mismo que en los pararrayos. Es un metal que conduce la electricidad con mucha facilidad, por lo tanto, uno de los materiales principales para la propuesta.

<sup>17</sup> Materiales que, puestos en contacto con un cuerpo cargado de electricidad, transmiten esta a todos los puntos de su superficie. (<http://www.voltimum.es/news/7545/cm/conductores-electricos.html>)

<sup>18</sup> [http://www.procobre.org/archivos/peru/conductores\\_electricos.pdf](http://www.procobre.org/archivos/peru/conductores_electricos.pdf)

Se sabe que los materiales utilizados no son siempre puros. Tomando el cobre puro como patrón haré una comparativa de características. Se pueden encontrar distintos tipos de cobre que utilizamos para conductores eléctricos:

TIPOS DE COBRE	CONDUCTIVIDAD	RESISTIVIDAD	CAPACIDAD DE RUPTURA A LA CARGA
<b>Cobre de temple duro</b>	97%	$0,018 \cdot \left(\frac{X \text{ mm}^2}{m}\right)$	37 - 45 kg/mm <sup>2</sup>
<b>Cobrerecocido o de temple blando</b>	100%	$0,01724 = \frac{1}{58} \cdot \left(\frac{X \text{ mm}^2}{m}\right)$	25 kg/mm <sup>2</sup>

### Partes que componen los conductores eléctricos

- **Alma o elemento conductor**

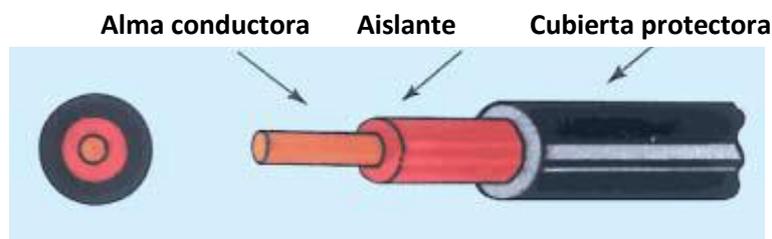
Sirve de camino a la energía eléctrica desde las centrales generadoras a los centros de distribución.

- **Aislamiento**

Evita que la energía eléctrica que circula por él entre en contacto con las personas, objetos o partes de la instalación. Del mismo modo, el aislamiento debe evitar que conductores de distinto voltaje puedan hacer contacto entre sí. Ayudan a proteger el conductor: a la resistencia a los agentes químicos, los rayos solares, la humedad, altas temperaturas, llamas, etc.

- **Cubiertas protectoras**

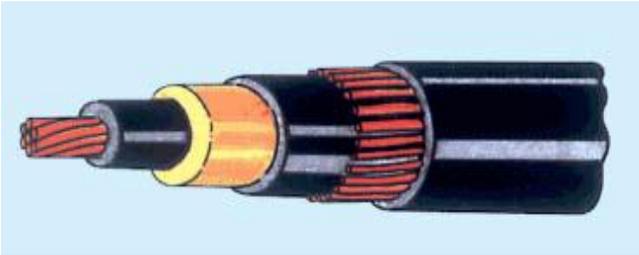
Protección polimérica sobre el aislamiento, protegen la integridad del aislamiento y del alma conductora contra daños mecánicos como raspaduras o golpes.



Fuente: [http://www.procobre.org/archivos/peru/conductores\\_electricos.pdf](http://www.procobre.org/archivos/peru/conductores_electricos.pdf)

En el momento en que el pararrayos se ramifica en varios conductores, sabiendo que el voltaje y la carga se dividen en el número de ramificaciones, solo si los conductores miden una distancia “d” y los condensadores conectados a ellos tienen las mismas características, utilizaré el siguiente tipo de conductor:

## CONDUCTOR DE COBRE ARMADO



Fuente: [http://www.procobre.org/archivos/peru/conductores\\_electricos.pdf](http://www.procobre.org/archivos/peru/conductores_electricos.pdf)

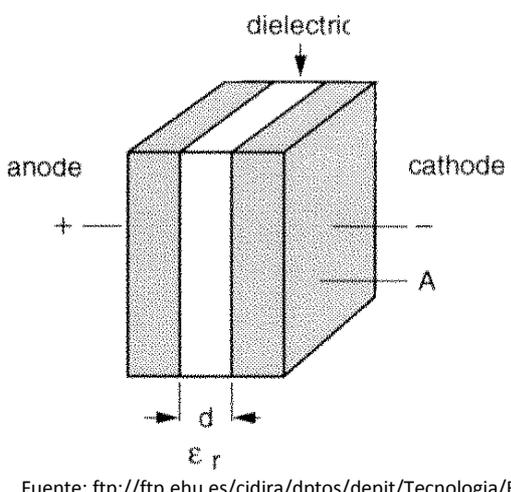
- Alambres y cables (Nº de hebras: 7 a 61).
- Tensiones de servicio: 0,6 a 35 kV (MT) y 46 a 65 kV (AT).
- Uso: Instalaciones de fuerza y alumbrado
- Tendido fijo

Para los conductores de la ramificación emplearé los conductores armados o de fuerza. Como se puede observar en sus características, a alta tensión es capaz de transportar hasta 65 kV; así pues, servirá para la estructura.

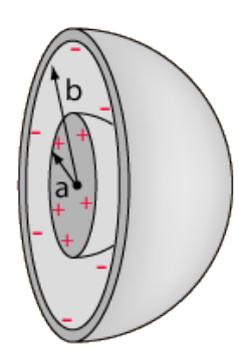
Pretendía calcular la pérdida por “efecto joule<sup>19</sup>” de los conductores; no lo he hecho debido a que estas pérdidas se podrían despreciar suponiendo que el rayo tiene una gran cantidad de energía.

### 3.2.4. Condensadores esféricos

#### 3.2.4.1. ¿Qué son?



El condensador es un dispositivo que almacena carga y energía. Consta de dos placas metálicas (armaduras) enfrentadas y separadas por un aislante polarizable, el dieléctrico.<sup>20</sup> Debe ir conectado al suelo, potencial 0.



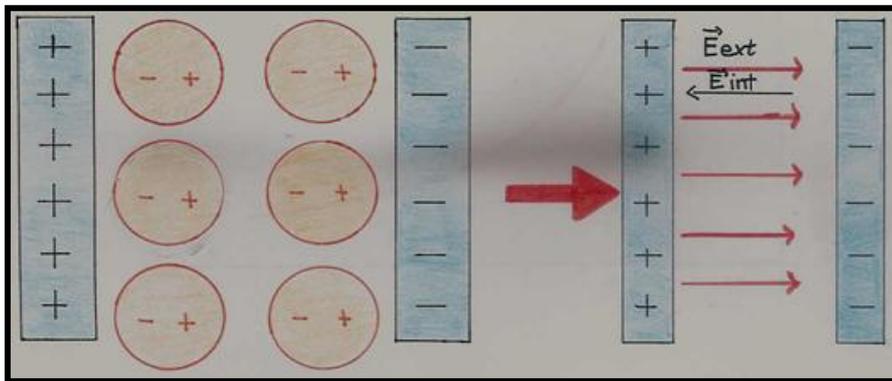
Fuente: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/electric/capsph.html>

Fuente: [ftp://ftp.ehu.es/cidira/dptos/depjt/Tecnologia/BK-ANGEL/02\\_Condensadores/Condensadores.pdf](ftp://ftp.ehu.es/cidira/dptos/depjt/Tecnologia/BK-ANGEL/02_Condensadores/Condensadores.pdf)

<sup>19</sup>Es el fenómeno por el cual si en un conductor circula corriente eléctrica, parte de la energía cinética de los electrones se transforma en calor debido a los choques que sufren con los átomos del material conductor por el que circulan, elevando la temperatura del mismo.

<sup>20</sup>Tipler, Paul A. y Mosca, Gene. *Física para la ciencia y la tecnología*, volumen 2 *Electricidad y magnetismo*, La luz, Física moderna. Reverté, Proyecto Scriptorium

### 3.2.4.2. El dieléctrico



El dieléctrico es un aislante<sup>21</sup>, no permite que las cargas traspasen el condensador. El hecho de ser un material polarizable indica que sus moléculas en un campo eléctrico se orientan en forma de dipolos, de modo que el polo negativo se ve atraído por la placa cargada positivamente y viceversa. Estas placas se van llenando de cargas positivas y negativas respectivamente, hasta alcanzar el mismo potencial. Si la tensión de la fuente baja, el condensador cede sus cargas hasta igualar la tensión, el campo eléctrico externo e interno se igualan.<sup>22</sup>

En la siguiente tabla elaborada a partir de los datos extraídos de Tipler y Mosca podemos observar distintos materiales con sus correspondientes constantes dieléctricas y sus resistencias a la ruptura dieléctrica<sup>23</sup>:

MATERIAL	CONSTANTE DIELECTRICA (K)	RESISTENCIA DEL DIELECTRICO, kV/mm
Aceite de transformador	2,24	12
Aire	1,00059	3
Baquelita	4,9	24
Gasolina	2,0 (70°F)	
Mica	5,4	10-100
Neopreno	6,9	12
Papel	3,7	16
Parafina	2,1-2,5	10
Plexiglás	3,4	40
Poliestireno	2,55	24
Porcelana	7	5,7
Titanato de estroncio	240	8
Vidrio (Pyrex)	5,6	14

<sup>21</sup>Son materiales cuyas cargas eléctricas internas no fluyen libremente; por lo tanto conduce una corriente eléctrica bajo la influencia de un campo eléctrico.

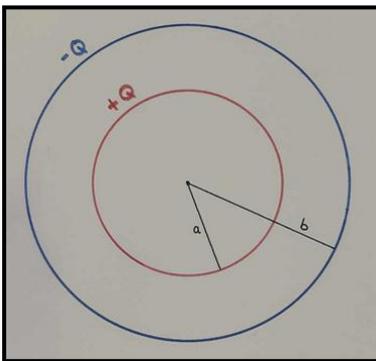
<sup>22</sup>cfr. <http://bacterio.uc3m.es/docencia/profesores/herreros/itts/ficheros/Pararray.pdf>

<sup>23</sup>Tipler, Paul A. y Mosca, Gene. *Física para la ciencia y la tecnología*, volumen 2 *Electricidad y magnetismo*, La luz, Física moderna. Reverté, Proyecto Scriptorium, pág. 819

Cuando el espacio entre los dos conductores de un condensador se ve ocupado por un dieléctrico, la capacidad aumenta en un factor  $k$  que es característico del dieléctrico. El hecho de que el dieléctrico sea un medio de separación de placas conductoras paralelas eleva la diferencia de potencial a la cual tiene lugar la ruptura dieléctrica, y también da soporte mecánico al condensador.<sup>24</sup>

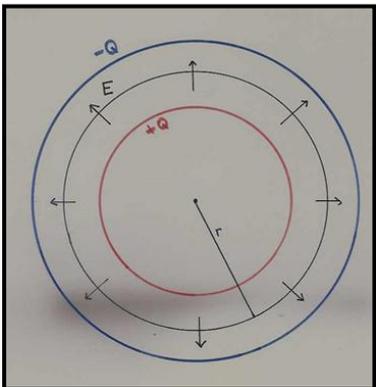
Para la realización de los cálculos, teniendo en cuenta todo lo dicho hasta ahora, voy a servirme del titanato de estroncio, que tiene una constante dieléctrica de 240: es la más elevada encontrada en la bibliografía.

A continuación se presenta la explicación de una parte vital del trabajo: los condensadores esféricos y sus fórmulas correspondientes.



“Un condensador esférico está formado por dos superficies conductoras esféricas, concéntricas de radios  $a$  y  $b$ , cargadas con cargas iguales y opuestas  $+Q$  y  $-Q$ , respectivamente.”<sup>25</sup>

Colocaré un radio imaginario para determinar el campo eléctrico en las distintas regiones aplicando la ley de Gauss<sup>26</sup>.



$$\oint E \cdot dS = \oint E \cdot dS \cdot \cos 0^\circ = E \oint dS = E \cdot 4\pi \cdot r^2$$

Para averiguar la carga  $q$  encerrada en dicha superficie esférica, para distintos valores del radio  $r$ , aplicaré la ley de Gauss:

$$\oint E \cdot dS = \frac{q}{\epsilon}$$

·  $r < a \rightarrow$  superficie esférica de  $r$ ,  $q=0$  y  $E=0$

·  $a < r < b \rightarrow$  superficie esférica de  $r$ ,  $q=+Q$

$$E \cdot 4\pi \cdot r^2 = \frac{Q}{\epsilon}$$

<sup>24</sup>Tipler y Mosca, Física para la ciencia y la tecnología, volumen 2 Electricidad y magnetismo, P.818-9

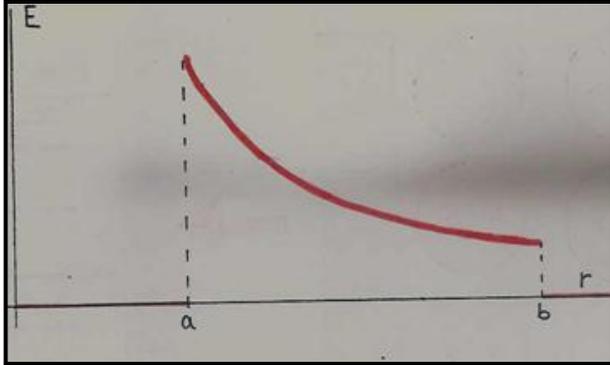
<sup>25</sup>[http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/campo\\_electrico/esfera1/esfera1.htm](http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/campo_electrico/esfera1/esfera1.htm)

<sup>26</sup> Ley de Gauss: El flujo del campo eléctrico, flujo de masa, a través de una superficie  $S$  se define como la cantidad de masa que atraviesa dicha superficie por unidad de tiempo.

$$E = \frac{Q}{4\pi \cdot \epsilon \cdot r^2}$$

·  $r > b \rightarrow$  superficie esférica de radio  $r$ ,  $q = +Q - Q = 0$ , y  $E = 0$

En la siguiente función se representa el módulo del campo E en función del radio r



La diferencia de potencial entre las dos placas de radios  $a$  y  $b$  es

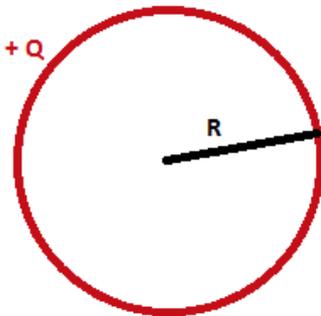
$$V' - V = \int_a^b \frac{1}{4\pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2} \cdot dr$$

$$V_+ + V_- = \frac{1}{4\pi \cdot \epsilon_0} \cdot \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{b} \right)$$

· Capacidad de un condensador esférico [Faradios]

$$C = \frac{Q}{V' - V} = \frac{4\pi \cdot \epsilon}{\left( \frac{1}{a} - \frac{1}{b} \right)}$$

$$C = 4\pi \cdot \epsilon \cdot \left( \frac{ab}{b - a} \right)$$



Si  $b \rightarrow \infty$ , tenemos la capacidad de un condensador esférico de radio  $R = a$

$$C = 4\pi \cdot \epsilon \cdot R$$

Carga almacenada (Q) [Coulomb]: en la siguiente fórmula tendremos en cuenta la constante dieléctrica sabiendo que esta aumentará la capacidad, como ya se ha dicho.

$$K \cdot \epsilon_0 \cdot Q = C \cdot \Delta V$$

### 3.2.5. Cálculos de las características de un rayo de intensidad media y de la estructura ideada

Los cálculos siguientes los he hecho suponiendo que en un rayo solo actúan fuerzas conservativas<sup>27</sup>, aunque, por supuesto, no es así.

Empezaré calculando la diferencia de potencial que tiene el rayo:

$$\Delta V = E \cdot d$$

Sabiendo que  $E=3 \cdot 10^6$  y la distancia media entre una tormenta y la tierra es  $d = \frac{10000+5000}{2}$ , explicado antes el porqué de utilizar estos datos y no otros en el apartado de datos relevantes.

$$\Delta V = 3 \cdot 10^6 \cdot 7500$$

$$\Delta V = 2,25 \cdot 10^{10} \text{ V}$$

Observando este cálculo y comparándolo con los datos de la bibliografía, se aprecia que nuestro cálculo es mayor que las medias que aparecen en los textos consultados. Viendo esto, he decidido hacer los cálculos con la media que han establecido los expertos. Se ha intentado buscar un resultado coherente, pero puede que, por falta de muchos conocimientos, no haya sabido manipularlo de manera correcta.

“Cuando se produce un rayo, la diferencia de potencial entre una nube y un objeto de la tierra puede ser de  $10^6$  a  $10^9$  V, la intensidad de la descarga se sitúa entre los 5.000 y los 350.000.000 A; y la temperatura puede llegar a los 27.000 °C.”<sup>28</sup>

Sabiendo el voltaje podremos seguir realizando los cálculos con total normalidad; haremos una media de los dos extremos y así la aproximación llegará a ser coherente.

Tenemos muchas incógnitas en nuestros cálculos; vamos a realizar el siguiente sistema de ecuaciones para resolverlas:

$$\left\{ \begin{array}{l} C = 4\pi \cdot (K \cdot \epsilon_0) \cdot R_{condensador} \\ V = \frac{Q}{C} \\ \sigma = \frac{Q}{S_{rayo}} \\ Q = I \cdot t \end{array} \right.$$

<sup>27</sup> Las fuerzas conservativas son aquellas en las que el trabajo a lo largo de un camino cerrado es nulo. El trabajo depende de los puntos inicial y final y no de la trayectoria. En este caso trabajaré la fuerza y el campo eléctrico.

<sup>28</sup> M.J. Martínez de Murguía Larrechi: *Física-2*, Ciències i tecnologia, Vicens Vives.

$$\text{Voltaje medio} \rightarrow V_{\text{medio}} = \frac{10^6 + 10^9}{2} = 5,005 \cdot 10^8 V$$

Constante del dieléctrico del capacitor  $\rightarrow K=240$

$$\text{Constante de la ruptura dieléctrica del aire} \rightarrow \epsilon_{\text{aire}} = 8,84 \cdot 10^{-12} \cdot 1,00059$$

$$\text{Densidad de carga superficial} \rightarrow E = 2 \cdot \epsilon_{\text{aire}} \cdot \sigma$$

Calcularemos la densidad total de la tormenta eléctrica:

$$3 \cdot 10^6 = 2 \cdot (1,00059 \cdot 8,84 \cdot 10^{-12}) \cdot \sigma$$

$$\sigma = 1,696 \cdot 10^{17} C/m^2$$

Sabemos que durante una tormenta eléctrica caen una cantidad X de rayos; así mismo, tendremos que calcular cuánta densidad de carga se atribuye a cada rayo. Vamos a dividir la densidad de carga total por la frecuencia de rayos media provocada por la tormenta (según la Ingesco y el libro Física 2 McGraw Hill caen unos 100 rayos captables por tormenta):

$$\frac{1,696 \cdot 10^{17}}{100} = 1,696 \cdot 10^{15} C/m^2$$

Ramificando el pararrayos en varios conductores, el voltaje y la carga se dividirán. Para saber el número de condensadores necesarios para la estructura, deberemos dividir el voltaje total del rayo por el voltaje que queramos tener en cada condensador. Usaremos el voltaje de rayos poco intensos y más usuales,  $10^6 V$ ; lo dividiremos por el voltaje de alta tensión que resiste el conductor que hemos citado anteriormente:

$$\frac{10^6}{65000} = 153,85 \sim 154 \text{ condensadores}$$

Para saber la carga que lleva el rayo podríamos realizar una aproximación de la superficie que tiene este, pero habría mucho margen de error. La superficie que aparece como S es la del rayo, asimismo no podemos utilizar dicha área como si fuera la del condensador porque no lo es<sup>29</sup>.

<sup>29</sup> Un rayo, como queda dicho, se produce a unos 7,5 km de la tierra aproximadamente; sabiendo que no forma una recta podríamos suponer que mide 10 km. Observando esta fotografía (figura 1), podemos realizar una aproximación de la base de dicho rayo para luego poder calcular el área del supuesto. No lo haré de esta forma porque habría tal margen de error que no sería nada preciso.



Fig. 1

Siguiendo con los cálculos de la carga de un rayo, lo más coherente que he podido deducir es: sabiendo cuánto tarda un rayo en tener lugar<sup>30</sup> y su intensidad se puede encontrar la carga mediante la fórmula  $\rightarrow Q = I \cdot t$ .

Utilizaré los distintos datos extraídos de la bibliografía<sup>31 32</sup>:

$$t = 1 \cdot 10^{-3} s$$

$$I = 30000 A$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C = 4\pi \cdot (240 \cdot 8,84 \cdot 10^{-12}) \cdot R \\ 65000 = \frac{Q}{C} \\ 1,696 \cdot 10^{15} = \frac{Q}{S_{rayo}} \\ Q = 30000 \cdot 10^{-3} \end{array} \right.$$

$$Q = 30 C$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C = 4\pi \cdot (240 \cdot 8,84 \cdot 10^{-12}) \cdot R \\ 65000 = \frac{30}{C} \end{array} \right.$$

$$C = 4,6 \cdot 10^{-4} F$$

$$4,6 \cdot 10^{-4} = 4\pi \cdot (240 \cdot 8,84 \cdot 10^{-12}) \cdot R$$

$$R = 1,7254 \cdot 10^4 m$$

La capacidad calculada resulta muy alta. Esto sería un almacenamiento ideal y aproximado, pero no podemos dar con exactitud muchos datos dado que tampoco tengo las herramientas ni los conocimientos suficientes. Es obvio que el radio del condensador salga tan elevado porque una capacidad así es difícil de obtener; el radio solo se adapta a las condiciones que le da un enunciado concreto<sup>33</sup>.

<sup>30</sup> El rayo está compuesto por muchas descargas sucesivas separadas por un tiempo también breve. Cuando vemos la luz de un rayo, esta persiste en nuestra retina casi un segundo, un tiempo muy superior a lo que realmente dura. Además, lo que verdaderamente vemos no es la electricidad, sino el efecto que ésta produce en el aire: su calentamiento súbito, y el aire tiene una inercia térmica, sigue brillando un instante aún después de haber cesado la descarga eléctrica. Así pues, no extraña la afirmación de que la duración total de un rayo puede ser tan breve como una milésima de segundo.

<sup>31</sup> La intensidad máxima de la corriente de un rayo se determina por el grado de imantación que produce en una barra de acero la corriente que pasa por el rayo cae en el pararrayos.

<sup>32</sup> Yakov Perelman: *Física recreativa II*

<sup>33</sup> Si se compara con la tierra se ve que podría tener sentido, pero no del todo; por ejemplo: supongamos que la tierra es un condensador esférico, observando la diferencia de radios ya vemos que la tierra tiene un radio de  $6,37 \cdot 10^6$  m y el del condensador calculado es de  $1,7254 \cdot 10^4$  m.

He intentado realizar los cálculos de varias formas distintas, esta es la que tiene más sentido debido a que el condensador recibe cierta carga y voltaje, los cálculos se adaptan a las condiciones dadas, por eso observamos que, prácticamente, sería inviable. Sería necesario una mejora del material imposible y unas dimensiones muy grandes.

Suponiendo que fuera posible, calcularé la energía (en Joules) que habría en un rayo de condiciones aproximadas y, a continuación, para saber la energía total que tenemos almacenada en cada capacitor debemos calcular lo siguiente:

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2$$

$$E = \frac{1}{2} \cdot 4,6 \cdot 10^{-4} \cdot 65000^2$$

$$E = 971750 \text{ J} = 9,72 \cdot 10^5 \text{ J}$$

Si en cada condensador esférico tenemos  $9,72 \cdot 10^5 \text{ J}$ , ¿cuánta energía tendremos en total?

Energía de UN condensador x número de condensadores = Energía total almacenada

$$9,72 \cdot 10^5 \cdot 154 = 1,5 \cdot 10^8 \text{ J}$$

Sabiendo que  $C = 4\pi \cdot \varepsilon \cdot \left(\frac{ab}{b-a}\right)$ ,  $b$  es una aproximación a  $R$ , si calculamos  $a$  se pueden saber las dimensiones del volumen del dieléctrico que necesitaremos para cada condensador:

$$3,28 \cdot 10^{18} = 4\pi \cdot 2,1216 \cdot 10^{-9} \cdot \left(\frac{a \cdot 1,23 \cdot 10^{26}}{1,23 \cdot 10^{26} - a}\right) \rightarrow a = 0 \text{ m}$$

Se demuestra así que el dieléctrico ocupa el interior completo del capacitor; por lo tanto, aumenta la capacidad, el soporte mecánico y ayuda a mantener constante la diferencia de potencial. El volumen que ocuparía sería de:

$$V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3$$

$$V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (1,7254 \cdot 10^4)^3$$

$$V = 2,15 \cdot 10^{13} \text{ m}^3$$

Se observa que dichas dimensiones son imposibles de obtener, así pues, teóricamente podría almacenarse pero prácticamente resulta completamente inviable.

## 3.3. Protección

### 3.3.1. Estructura

Suponiendo que pudiera almacenarse la energía, la estructura debería:

- Estar en unas condiciones de temperatura baja, porque, como ya sabemos, el condensador tendrá pérdidas al calentarse.
- Estar situada en un ambiente que no sea húmedo, sino seco, porque la resistividad del material disminuye con el aumento de humedad y temperatura.

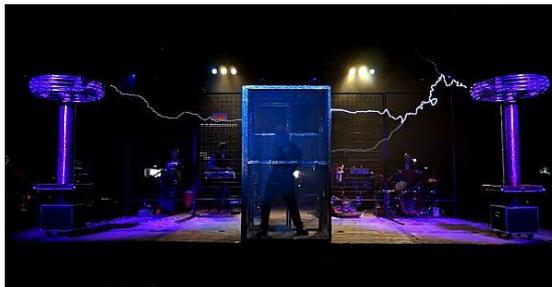
Para proteger la estructura del exterior he decidido hacerlo de la siguiente forma:

Emplearé una Jaula de Faraday que cubrirá la estructura, de esta manera se evitará que salgan cargas al exterior, porque se van a quedar en la superficie de la Jaula.

Los condensadores deben estar controlados, sobre todo en su tensión de trabajo; esta depende del tipo y grosor del dieléctrico con el que esté fabricado. Si se supera dicha tensión, el condensador puede perforarse, quedar cortocircuitado y/o explotar.<sup>34</sup>

### 3.3.2. Jaula de Faraday y aislamiento

Una Jaula de Faraday es cualquier recubrimiento metálico formando un sistema cerrado, bien conectado, formando un blindaje electrostático de manera que aislará el campo electromagnético (en el caso calculado solo eléctrico porque,

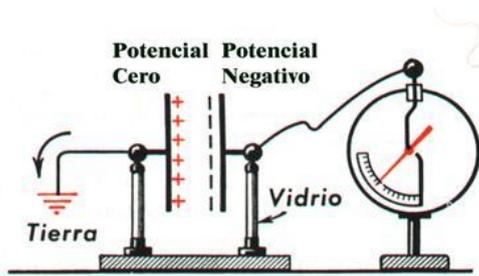


como ya he dicho, voy a suponer que en el rayo actúan solamente fuerzas conservativas). Así pues, las descargas que se producen en el <sup>35</sup> exterior de la jaula no afectan el interior. El efecto de la jaula provoca que el campo electromagnético en el interior de un conductor en equilibrio sea nulo, revocando el efecto de los campos externos.

Esto es debido a que, cuando el conductor sujeto a un campo electromagnético externo (eléctrico en este caso), se polariza de manera que queda cargado positivamente en la dirección en que va el campo electromagnético, y cargado negativamente en el sentido contrario. Puesto que el conductor se ha polarizado, este genera un campo eléctrico igual en magnitud pero opuesto en sentido al campo electromagnético, luego la suma de ambos campos dentro del conductor será igual a 0. EL movimiento de los electrones será aquel que los desplace hacia potenciales más altos.

<sup>34</sup><http://thales.cica.es/cadiz2/ecoweb/ed0184/Tema2/2.2.1.htm>

<sup>35</sup> Fuente:<http://thales.cica.es/cadiz2/ecoweb/ed0184/Tema2/2.2.1.htm>



La Jaula tendrá debajo una superficie aislante para que no salga al exterior la carga eléctrica.

Para que el capacitor no tenga altas pérdidas se aíslan del suelo con cerámica o porcelana, dos aislantes muy eficaces; de esta manera se evita que las cargas escapen. Debe instalarse

de la misma manera que muestra la imagen de la izquierda.

## 4. Propuestas para la utilización de la energía almacenada

### 4.1. Desconexión térmica automática y utilizaciones posibles

Para la utilización de la energía almacenada de cada condensador de manera independiente, mediante el proceso ideal tratado, se necesitarán los llamados “térmicos”. Se pretende conectar un térmico en cada conductor ramificado conectado al condensador; de esta manera, cuando la carga haya dejado de pasar, automáticamente se desconectará de la siguiente forma:



Los térmicos son dispositivos utilizados generalmente para la protección de equipos contra sobrecargas. Su funcionamiento está basado en el efecto calefactor de la corriente que pasa a través de un elemento

bimetal. En este tipo de protector, el punto de disparo depende de la magnitud de la sobreintensidad. Cuanto mayor sea esta, más rápidamente alcanza el bimetálico su temperatura de disparo. Por el contrario, una sobrecarga reducida tarda más tiempo en producir el seccionamiento deseado. Por ello es importante tener en cuenta los tiempos de reacción de los térmicos, sus temperaturas de funcionamiento y otras variables al elegir la ejecución más adecuada. Al aumentar la intensidad, se calienta el bimetálico hasta que alcanza su punto definido de torsión y consiguiente disparo<sup>36</sup>.

### ¿En qué podríamos utilizar la energía almacenada?

En primer lugar, la energía almacenada tiene una diferencia de potencial de 65 kV, alta tensión, por lo tanto antes de utilizarse deberá ser disminuida mediante transformadores de voltaje. La energía puede emplearse en grandes almacenes, casas, centrales eléctricas, fábricas, edificios de todo tipo, etc.

<sup>36</sup>[http://www.p-tec.es/index.php?option=com\\_content&view=article&id=5&Itemid=6](http://www.p-tec.es/index.php?option=com_content&view=article&id=5&Itemid=6)

## 5. Conclusiones

En el curso de la investigación realizada he podido responder a algunas de las preguntas que se planteaban en la Introducción. Respecto a si podría llegar a recogerse la energía que descarga un rayo, mediante el proceso que he ideado, teóricamente sí, pero las dimensiones que debería tener toda la estructura han resultado inviables. Antes de realizar los cálculos que me llevaron a esta conclusión, ya había establecido una aproximación que había resultado viable, a partir de las medias que se encuentran en la información bibliográfica. Probablemente la causa de la inviabilidad esté en la metodología que he utilizado para los cálculos, puesto que no conozco todo lo que los expertos manejan en sus propuestas ni tengo los aparatos necesarios.

Respecto a cómo debería ser el proceso de almacenamiento de dicha energía, en la monografía creo haber demostrado que es absolutamente necesaria la ramificación del pararrayos para que el voltaje se divida y la carga se reparta. Como he dicho en un principio, el campo estudiado es solo el eléctrico, así pues, los cálculos los he realizado suponiendo que es conservativo. La utilización de condensadores esféricos se explica por un motivo obvio y que ya he citado en el párrafo anterior: en el nivel de conocimientos que ahora poseo, el cálculo es más sencillo si trabajo con condensadores en los que las líneas de campo sean iguales en todos los puntos, por lo tanto, los esféricos son la solución.

En tercer lugar, y en cuanto al tipo de material que debería utilizarse para el diseño de la estructura, el pararrayos ha de ser de cobre; los conductores, armados (o de fuerza); el dieléctrico del interior del condensador, de titanato de estroncio; y el condensador estará aislado mediante cerámica o porcelana en la parte inferior de este. Todas estas características permitirían que la estructura soporte los factores extremos que se pueden dar en la descarga de un rayo. Asimismo, para la viabilidad del almacenamiento de un pararrayos, debería mejorarse el material para que las dimensiones fueran más pequeñas.

Por lo tanto, aunque es una posibilidad dificultosa por las dimensiones, tanto del espacio donde debería estar ubicada la estructura, como del propio condensador, y por el coste que supondría, no puede decirse que sea inviable almacenar la carga del rayo, pero aún queda mucho por investigar.

No pretendía descubrir la respuesta perfecta, sino que me fascina la naturaleza y decidí investigar y aprender sobre una pequeña parte de ella: los rayos. Y, ¿qué mejor manera de aprender que estudiarlo obligándome a mí misma? ¿Qué hay más divertido que aprender?

## 6. Referencias y bibliografía

### Condensadores y dieléctricos

[ftp://ftp.ehu.es/cidira/dptos/depjt/Tecnologia/BK-ANGEL/02\\_Condensadores/Condensadores.pdf](ftp://ftp.ehu.es/cidira/dptos/depjt/Tecnologia/BK-ANGEL/02_Condensadores/Condensadores.pdf)

[http://centrodeartigos.com/articulos-utiles/article\\_105666.html](http://centrodeartigos.com/articulos-utiles/article_105666.html)

<http://huamanigabriels.wikispaces.com/file/view/Condensadores.pdf>

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/electric/capsph.html>

<http://perso.wanadoo.es/abeldg/documentacion/condensadores.pdf>

[http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/campo\\_electrico/esfera1/esfera1.htm](http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/campo_electrico/esfera1/esfera1.htm)

### Conductores

<http://answers.yahoo.com/question/index?qid=20120728111202AAdM739>

[http://www.procobre.org/archivos/peru/conductores\\_electricos.pdf](http://www.procobre.org/archivos/peru/conductores_electricos.pdf)

<http://www.voltimum.es/news/7545/cm/conductores-electricos.html>

### Efecto punta

<http://bacterio.uc3m.es/docencia/profesores/herreros/itts/ficheros/Pararray.pdf>

<http://www.fceia.unr.edu.ar/~fisica3/Tormentas.pdf>

### Jaula de Faraday

<http://blogs.20minutos.es/yaestaellistoquetodolosabe/el-efecto-jaula-de-faraday-explicado-de-una-manera-sencilla-y-clara/>

<http://nelsonpz.files.wordpress.com/2011/08/jaula-de-faraday.pdf>

<http://ocw.mit.edu/courses/physics/8-02-electricity-and-magnetism-spring-2002/video-lectures/lecture-5-electrostatic-shielding-faraday-cage/>

[http://www.jpimentel.com/ciencias\\_experimentales/pagwebciencias/pagweb/Los\\_talleres\\_de\\_ciencias/electricidad\\_y\\_magnetismo/electrostatica\\_jaula\\_faraday.htm](http://www.jpimentel.com/ciencias_experimentales/pagwebciencias/pagweb/Los_talleres_de_ciencias/electricidad_y_magnetismo/electrostatica_jaula_faraday.htm)

<http://www.taringa.net/posts/info/1367996/Jaula-de-Faraday.html>

### Ley de Gauss

<http://acer.forestaes.upm.es/basicas/udfisica/asignaturas/fisica/electro/gauss.html>

## **Pararrayos**

<http://www.fceia.unr.edu.ar/~fisica3/Tormentas.pdf>

[http://www.ingesco.com/index.php/es/productos/proteccion-externa?gclid=CL\\_RtqjKoroCFfMPtAodRWOAvw](http://www.ingesco.com/index.php/es/productos/proteccion-externa?gclid=CL_RtqjKoroCFfMPtAodRWOAvw)

## **Protección del circuito**

<http://thales.cica.es/cadiz2/ecoweb/ed0184/Tema2/2.2.1.htm>

## **Sistema térmico**

[http://www.p-tec.es/index.php?option=com\\_content&view=article&id=5&Itemid=6](http://www.p-tec.es/index.php?option=com_content&view=article&id=5&Itemid=6)

## **Tipos de nubes**

<http://educacion.uncomo.com/articulo/tipos-de-nubes-y-sus-caracteristicas-17407.html>

<http://roble.pntic.mec.es/jgah0028/Tipos%20de%20nubes.html>

## **Tormentas eléctricas**

<http://100ciaencasa.blogspot.com.es/2012/01/tanta-energia-contiene-un-rayo.html>

<http://meteolamatanza.es/enciclopedia-meteo/tormentas-electricas>

<http://www.afinidadelctrica.com.ar/articulo.php?IdArticulo=164>

<http://www.youtube.com/watch?v=64U7U-a4ejk>

<http://www.youtube.com/watch?v=TxHR6weD0zw>

## **Libros y artículos consultados:**

“Thunderstorms and lightning. A preparedness guide”, U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, January 1994

Fallas S., Juan Carlos, y Oviedo, R. *Fenómenos Atmosféricos y Cambio Climático. Guía para el Docente*. Jiménez y Tanzi. Costa Rica, 1993.

Lea, Susan M., y Burke, John Rober. *Física, la naturaleza de las cosas*. Paraninfo. Thomson learning, Madrid, 2001.

Llaugé, F., *La Meteorología*, Marcombo, España, 1971-1976. Pág. 65-76.

Martínez de Murguía Larrechi, M.J., *Física-2, Ciències i tecnologia*, Vicens Vives, Barcelona, 2009.

Tipler, Paul A. y Mosca, Gene. *Física para la ciencia y la tecnología* (Traducción de la 6a edición norteamericana) volumen 2 *Electricidad y magnetismo, La luz, Física moderna*. Reverté, Proyecto Scriptorium, Barcelona, 2010.

## **7. Agradecimientos y reconocimientos**

Doy Gracias a Judit Acín por haber aceptado ser la tutora de esta monografía mostrando interés y haberme proporcionado gran parte de la bibliografía. También, agradezco a la Universidad de Girona por haberme dado la oportunidad de participar en el “Jove Campus de Recerca” y a la Universidad de Barcelona por el campus “Physics”. Asimismo, a la Doctora Lluïsa Escoda por haberme resuelto dudas que han ido surgiendo a lo largo del trabajo y su tiempo dedicado a intentar entenderme. Agradecer también a Ferran Serra, estudiante de la Universidad de Girona, por haber estado disponible cuando he necesitado resolver alguna cuestión y ser un apoyo positivo. A Marc Duque por haber mostrado interés en el trabajo y hacer que brotasen siempre las dudas durante la elaboración de este estudio. Finalmente, a mi familia, de modo especial a mi madre, le doy las gracias por ser mi amparo cuando lo he necesitado.