

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, INGENIERÍA Y  
AGRIMENSURA – UNR  
ESCUELA DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA  
FÍSICA III

**TORMENTAS ELÉCTRICAS, RAYOS Y**  
**PARARRAYOS**

*Realizado por:*  
Geraldina T. Golup

2002

## **INTRODUCCIÓN**

Los rayos han sido temidos y venerados desde los principios de la historia. Los griegos creían que eran producidos por Zeus, los vikingos pensaban que el causante era Thor y en la Biblia se menciona en varias ocasiones al rayo y al trueno como hechos divinos.

Recién a mediados del siglo XVIII, Benjamin Franklin (1706-1790) realizó los primeros experimentos que mostraron la semejanza entre el rayo y las chispas eléctricas observadas en laboratorios. Franklin probó la naturaleza eléctrica de los rayos y también concluyó que la parte baja de las células de tormenta eléctrica están generalmente cargadas negativamente. Demostró la influencia de la conexión a tierra de un conductor y del aislamiento. Analizó lo que sucedía en un conductor en forma de punta conectado a tierra, creando el pararrayos.

En 1823, una comisión de “notables” de la Academia de Ciencias de Francia, formada por Poisson, Lefevre-Gineau, Girard, Dulong, Fresnel y Gay-Lussac, fue creada con el objetivo de mejorar el pararrayos de Franklin y escribir un informe con recomendaciones sobre la protección de edificios contra descargas eléctricas. Éste fue utilizado como standard hasta la aparición en 1879 del libro de Anderson titulado “Pararrayos, su historia, naturaleza y modo de aplicación”, que se utiliza como referencia hasta en la actualidad.

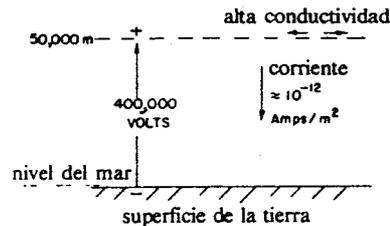
También durante el siglo XIX, Pockels, en Alemania, midió las corrientes de los rayos analizando el campo magnético inducido. En el siglo XX, Charles Thomson Rees Wilson (1869-1959) ganó el premio Nobel de Física en 1927 por su método de hacer visibles las trayectorias de las partículas cargadas eléctricamente por condensación de vapor y postuló una teoría sobre la separación de cargas en tormentas eléctricas.

Aunque se ha avanzado mucho desde la época de Franklin todavía no se conoce totalmente qué pasa dentro de una tormenta eléctrica. El siguiente informe intenta resumir los conocimientos actuales sobre tormentas eléctricas, rayos y pararrayos.

# CAPÍTULO I: Tormentas eléctricas y rayos

## 1. La electricidad en la atmósfera

Existe un campo eléctrico vertical de 100 volt/metro en el aire durante un día normal a nivel del mar aproximadamente (la superficie de la tierra se considera cargada negativamente). Pero a medida que la altitud es mayor el campo se vuelve cada vez más débil. La diferencia total de potencial desde el nivel del mar hasta la parte superior de la atmósfera (50.000 metros) es alrededor de 400.000 volts. Se podría decir que la tierra actúa como un capacitor esférico con carga neta negativa de un millón de coulombios y con una carga positiva igual en la atmósfera.



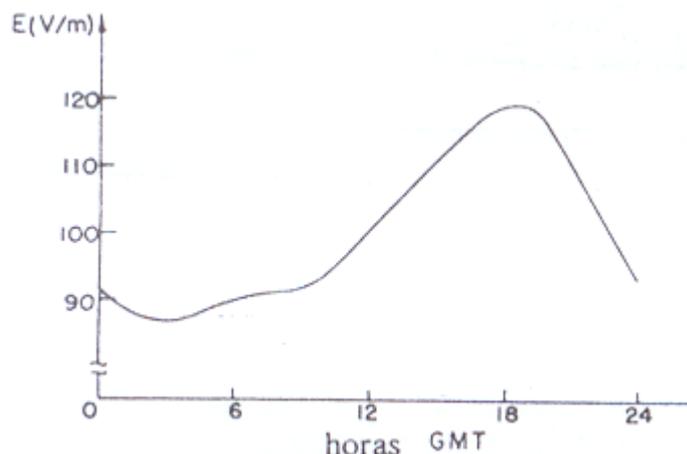
Condiciones eléctricas normales en atmósfera despejada.

Fuente: FEYNMAN, LEIGHTON, SANDS, "Física" Vol II, Addison- Wesley- Longman.

La densidad de corriente eléctrica en la atmósfera es alrededor de 10 microamperes por metro cuadrado paralelo a la tierra. Ésta es producida por el campo eléctrico y dado que el aire es conductor esta corriente pasa del cielo a la tierra.

La conductividad de la atmósfera se debe a que existen iones que se desplazan en el campo produciendo la corriente. Esta ionización, que aumenta por unidad de volumen con la altitud, es producida fundamentalmente por rayos cósmicos. También existen, por ejemplo, partículas de polvo que flotan en el aire y se cargan (llamadas "núcleos") y cristales de NaCl, producidos por el choque de olas marinas, que captan cargas formando los llamados "grandes iones". Por lo tanto la conductividad del aire es variable y como consecuencia también varía el potencial.

Existe una variación de la corriente del  $\pm 15\%$  y es máxima a las 19:00 horas de Greenwich cualquiera sea el lugar del mundo donde se realizan las mediciones. Esto indica que hay una conductividad lateral mayor en la parte superior de la atmósfera que evita que la diferencia de potencial varíe localmente.



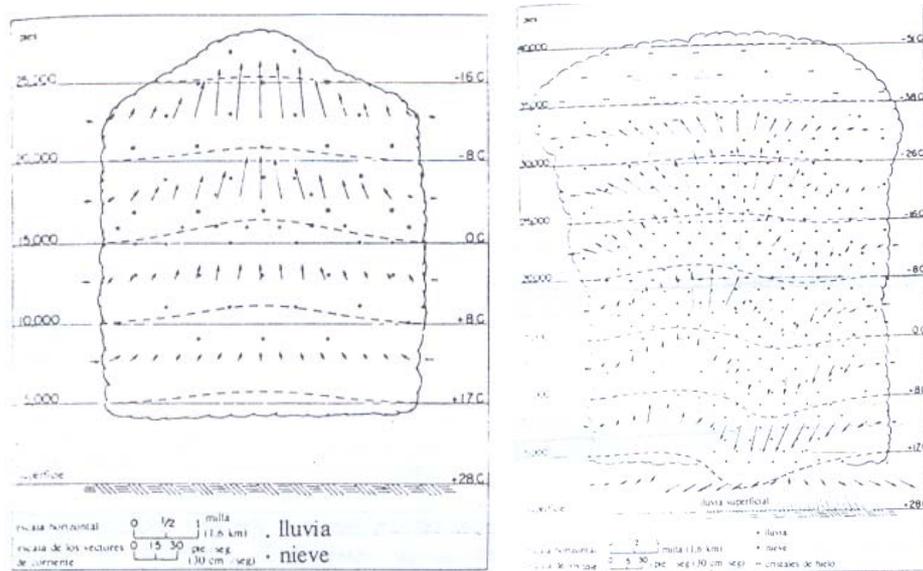
Variación diaria promedio del campo eléctrico atmosférico en un día despejado sobre los océanos, referido a la hora Greenwich.

Fuente: FEYNMAN, LEIGHTON, SANDS, "Física" Vol II, Addison- Wesley- Longman

La corriente eléctrica que lleva cargas positivas a la superficie terrestre es cercana a los 1800 amperes. Si sólo existiera esta corriente la tierra se descargaría en media hora aproximadamente. Las tormentas eléctricas y sus rayos son quienes mantienen esta diferencia de potencial. El 90% de los rayos llevan cargas negativas hacia la tierra y de esta manera cargan la tierra a un promedio de 1800 amperes. Se producen aproximadamente 40.000 tormentas eléctricas diarias alrededor del mundo y caen estimadamente 100 rayos por segundo habiendo un máximo de actividad a las 19:00 horas de Greenwich.

## 2. Las tormentas eléctricas

Una tormenta eléctrica está formada por varias células (regiones con una superficie límite horizontal donde ocurren los procesos básicos). Al principio existe una corriente ascendente de aire con velocidades en aumento cerca del tope. A medida que asciende el aire húmedo y tibio de abajo, se enfría y condensa, arrastrando el aire de los costados. Al condensarse libera calor y por lo tanto seguirá siendo más caliente que el aire circundante y continuará subiendo a zonas más frías. La corriente, de unos 100 kilómetros por hora, sube hasta llegar a los 10.000 o 15.000 metros del nivel de la superficie.

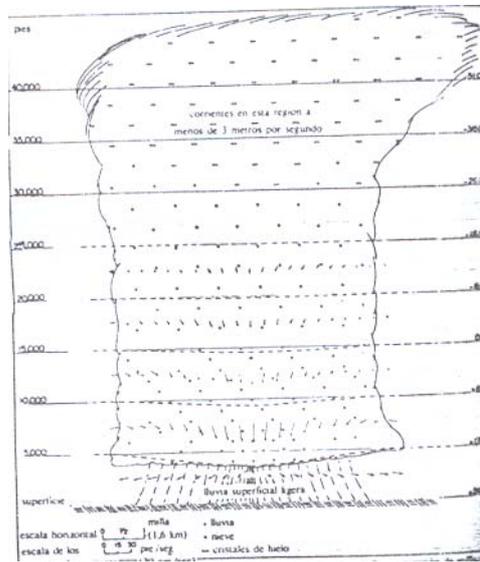


Una célula de tormenta eléctrica al principio y una célula ya madura.

Fuente: FEYNMAN, LEIGHTON, SANDS, "Física" Vol II, Addison- Wesley. Longman

Las gotas condensadas se sobreenfrían (llegan a temperaturas bajo del cero celsius). Al ser un estado metaestable, en un momento dado, hay una desaparición rápida de agua y formación de hielo. Estas partículas de hielo se vuelven demasiado pesadas como para que la corriente ascendente las siga manteniendo y comienzan a caer, arrastrando aire circundante y creando una corriente descendente del aire frío que originalmente estaba a gran altura. Este es el viento frío que anticipa la tormenta. Aparecen los fenómenos eléctricos.

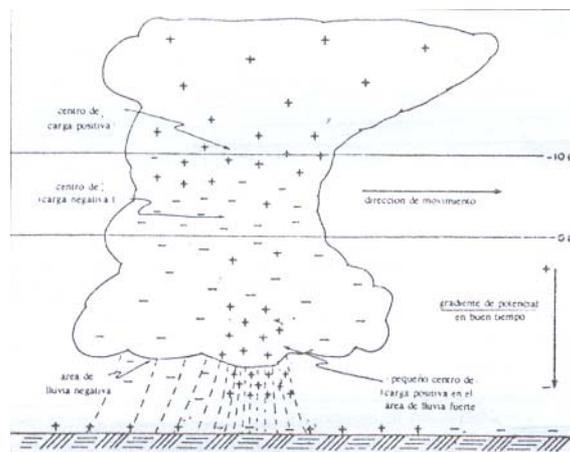
Después de media o una hora la corriente ascendente se detiene porque no hay suficiente aire caliente como para mantenerla. Caen las últimas gotas de agua y la célula llega a su fin.



Una célula en su última fase.  
Fuente: FEYNMAN, LEIGHTON, SANDS, "Física" Vol II, Addison- Wesley. Longman

### 3. Los rayos

El rayo es una enorme corriente eléctrica que circula entre dos nubes o entre una nube y tierra. Se sabe que la parte superior de la tormenta eléctrica (a 6 o 7 kilómetros de altura y a -20 C) tiene carga positiva y la inferior ( a 3 o 4 kilómetros y entre 0 C y -10 C) negativa, excepto por una pequeña zona de la parte inferior que tiene carga positiva. La carga de la parte de abajo puede producir diferencias de potenciales de 20, 30 o 100 millones de volts entre la nube y la tierra, superando el potencial de ruptura del aire. Cuando se produce la ruptura, los rayos transportan estas cargas negativas a la tierra y la célula regenera lo perdido en cinco segundos aproximadamente.



Distribución de cargas en una célula  
Fuente: FEYNMAN, LEIGHTON, SANDS, "Física" Vol II, Addison- Wesley. Longman

La separación de cargas en una tormenta eléctrica es explicada por la teoría de C. T. R. Wilson. Si tenemos una gota cayendo en el campo eléctrico, ella tendrá un momento dipolar inducido (siendo positiva en la parte de debajo de la gota y negativa en la de arriba). La gota repelerá iones positivos que se acerquen por la parte de abajo. Los iones positivos lentos tampoco se podrán adherirse a la gota por la parte superior ya que ésta está cayendo con una velocidad superior. En cambio, la gota atraerá a los iones lentos negativos, cargándose negativamente. Así los iones positivos quedan en la parte superior de la célula y los negativos quedan abajo.

Una vez que comienza la separación de cargas, se forman campos eléctricos muy intensos que pueden ionizar el aire circundante, moviéndose las cargas y chocando con átomos a los que se

les arrancan electrones obteniéndose más cargas y así sucesivamente. Por lo tanto, aunque no se conoce exactamente el origen de los rayos, se sabe aproximadamente cómo se separan las cargas en una tormenta eléctrica.

Además de los rayos nube- tierra, otros tipos de rayos son :

- Rayos difusos: se presentan como un resplandor que ilumina el cielo. Son reflejos en el cielo de una tempestad muy lejana, localizada bajo el horizonte, cuyas chispas no se ven y cuyos truenos no se escuchan.
- Rayos laminares: son aquellos resplandores que resultan de la descarga dentro de la nube, entre las cargas positivas y negativas.
- Rayo esferoidal, rayo de bola o rosario: se presenta en forma de una esfera luminosa, llegando a alcanzar el tamaño de una pelota de fútbol. En algunas ocasiones aparecen varios de ellos formando un rosario. A veces desaparecen escuchándose un estallido y otras veces lo hacen silenciosamente.



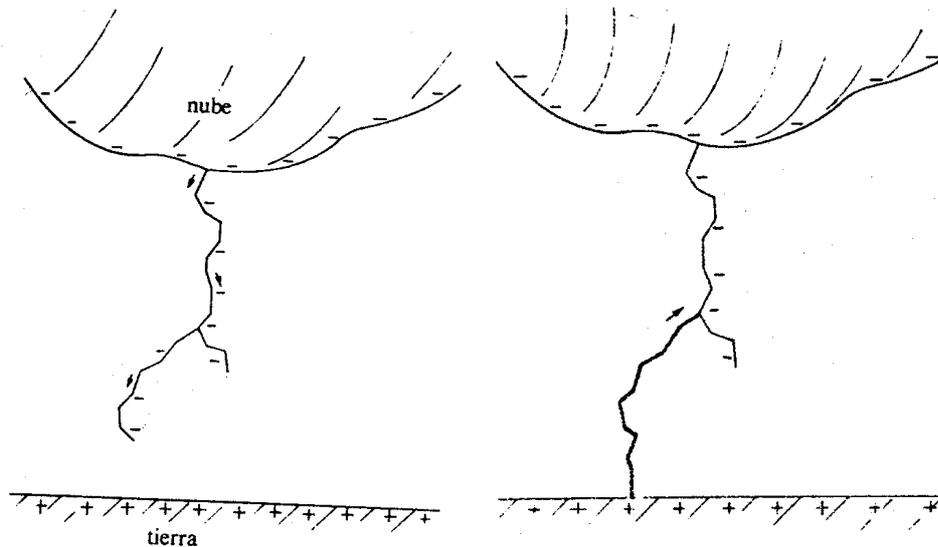
Rayos entre nubes y rayos entre las nubes y tierra.

#### Formación del rayo:

Si tenemos una nube con cargas negativas sobre una superficie llana su potencial es negativo en comparación con el de abajo y las cargas negativas serán aceleradas hacia la tierra. Primero, se produce una descarga llamada “guía escalonada” (no es brillante como el rayo) que baja a un sexto de la velocidad de la luz. Recorre aproximadamente 50 metros, se detiene unos 50 microsegundos y sigue. Para y sigue sucesivamente, moviéndose en forma escalonada (puede parar hasta 10.000 veces). La columna está repleta de cargas negativas y el aire se vuelve más conductor al ser ionizado por estas cargas en movimiento.

Cuando la guía escalonada está a unos 100 metros del suelo existe una descarga que sube desde la tierra a encontrarla. Al hacer contacto, se crea una conexión nube – tierra y las cargas de la nube pueden escaparse.

El rayo que se ve es el rayo de retorno, que va desde el suelo a la nube (como se produce tan rápido uno cree que es al revés). El brillo del rayo es aproximadamente igual al que harían 100 millones de lamparitas juntas.



Guía escalonada y rayo de retorno.

Fuente: FEYNMAN, LEIGHTON, SANDS, "Física" Vol II, Addison- Wesley. Longman

El calor producido por la descarga eléctrica calienta el aire y lo expande bruscamente, dando lugar a ondas de presión que se expanden como ondas sonoras y así produciendo el trueno. Como la velocidad del sonido es aproximadamente 340 metros/seg, el trueno se escucha después de desaparecer el rayo.

En el rayo la corriente es de unos 10.000 amperes y se transporta unos 20 o 30 coulombios de carga.

Cuando el rayo de retorno desaparece, baja otra guía pero sin pausas (llamada "guía oscura"). Sigue el mismo camino llevando cargas negativas y cuando toca tierra sube otro rayo de retorno. Así, el rayo puede caer varias veces sucesivamente (se ha observado hasta 42 veces).

Si la guía se ramifica en dos partes, una puede tocar tierra antes que la otra. El rayo de retorno, que sube a lo largo de la rama que llega primero al suelo, llega a la nube, pasando también por la otra rama. Si la última llega al suelo al mismo tiempo que la original, la guía oscura puede tomar la otra rama, viendo el primer rayo en un lugar y el segundo en otro.

Una de cada diez veces el rayo es iniciado por guías que contienen cargas positivas. El rayo de retorno lleva cargas negativas y transfiere cargas positivas de la nube a la tierra. Habitualmente no hay guías oscuras subsecuentes. Los rayos "positivos" causan mucho más daño ya que generan corrientes dobles al valor habitual. Son los principales responsables de los incendios forestales.

## CAPÍTULO II: Pararrayos

En 1752, Benjamin Franklin realizó el siguiente experimento. Remontó un barrilete en una tormenta con un hilo mojado para conducir la electricidad. Él sostenía un tramo de hilo seco. El barrilete con una punta metálica y una llave cerca del extremo, estaba sometido a un campo eléctrico, el cual provocaba un movimiento de cargas desde la nube hacia la tierra, donde estaba Franklin registrando pequeñas descargas. Con este experimento se empezaron a crear los primeros pararrayos.

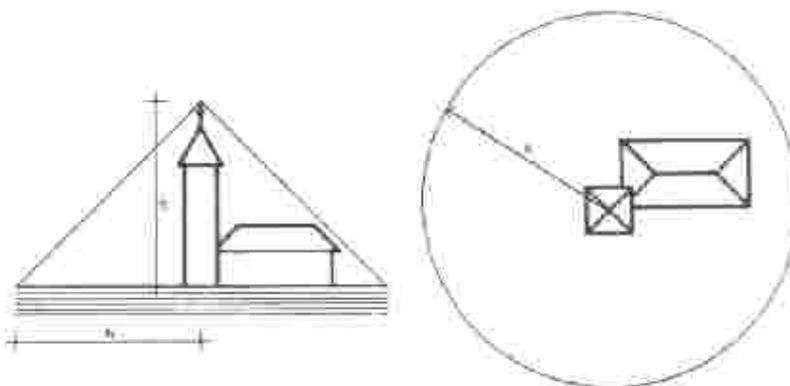
El pararrayos es un dispositivo usualmente acabado en punta que excita la aparición de la guía. Esto se debe a que en un objeto puntiagudo, el campo eléctrico es tan intenso que durante una tormenta se inicia una descarga desde la punta que busca la guía. El rayo tiende a caer en esa punta. Por lo tanto, si se produce el rayo, las cargas recorrerán el camino más corto y fácil, que es el que conduce el pararrayos. Como éste está conectado a tierra, el rayo se descarga sin causar daños.

Las partes principales más frecuentes de un pararrayos son:

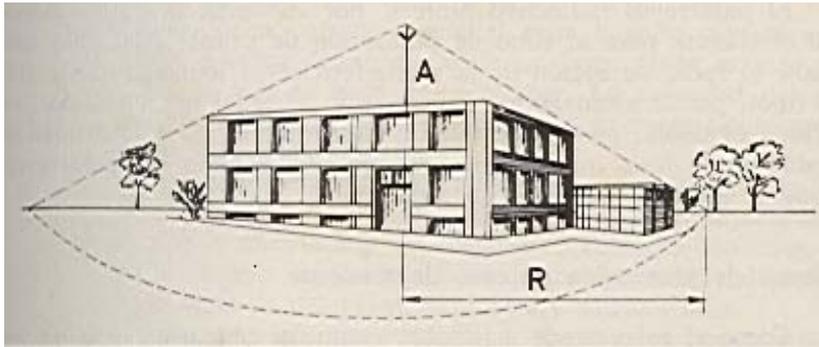
- La varilla: cilíndrica de 3 a 5 metros de altura con una punta o puntas de acero galvanizado o cobre, instalada en la parte más elevada del edificio o cualquier otra construcción que lo requiera. La punta está recubierta de wolframio (punto de fusión 3650C) con el fin de soportar las altas temperaturas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

Los pararrayos se pueden clasificar en:

- Tipo Franklin: se basa en la teoría del “efecto punta”, es decir, que las cargas se acumulan en las partes puntiagudas de un conductor y los campos eléctricos son más intensos allí. Por lo tanto, las descargas eléctricas se dirigen a la punta del pararrayos, el punto más alto. El sistema está formado por las partes anteriormente descritas. La zona de cobertura es un cono, cuya base tiene un radio igual a la distancia desde tierra a la punta del pararrayos ( $A=R$ ).

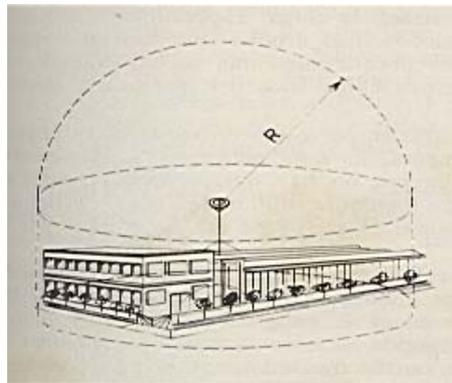
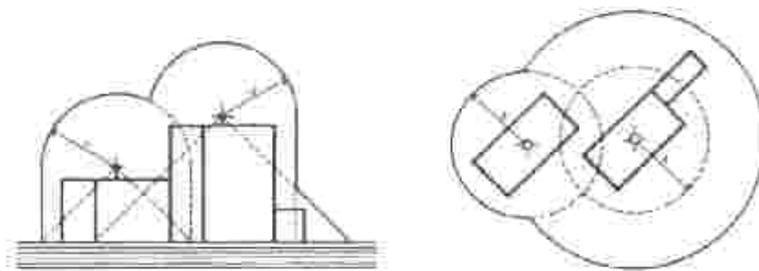


Tipo Franklin



Tipo Franklin

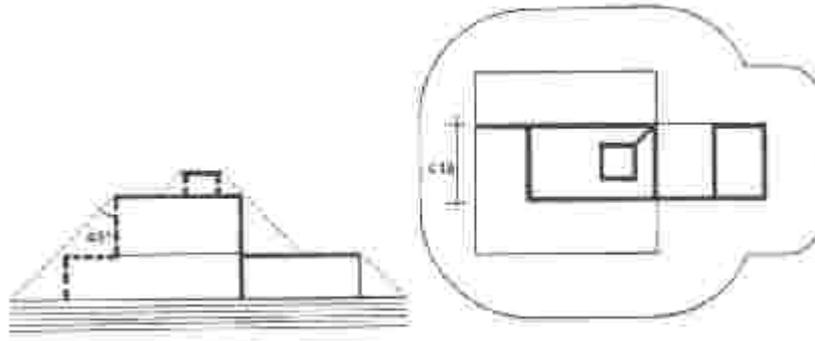
- Tipo radioactivo: contiene una caja con una pequeña cantidad de isótopo radioactivo cuyo fin es ionizar el aire circundante. Los iones que se producen favorecen el camino que ha de seguir la guía. Su area de protección es una semiesfera de unos 200 metros de radio que cae hasta el suelo en forma de cilindro. Actualmente se encuentra prohibido en muchos países.



Tipo radioactivo

- Tipo piezoeléctrico: se basa en el fenómeno que presenta el cuarzo, que al ser presionado produce una descarga eléctrica entre dos electrodos. En este caso, la fuerza es producida por el viento al actuar sobre el vástago del pararrayos, por lo que funciona mejor cuanto más fuerte sea el viento.
- Tipo ión - corona solar: tiene un dispositivo eléctrico emisor de iones y un acelerador de partículas polarizadas. Es más eficaz que el radioactivo ya que este último produce una ionización constante, mientras que la emisión del primero se incrementa en forma proporcional al cuadrado de la disminución de la distancia, lo que aumenta las probabilidades de que la guía descarge en él. No genera una ionización peligrosa a la salud de las personas que viven en la zona o al medio ambiente. Consiste en dos electrodos entre los cuales se producen efluvios eléctricos y una pequeña luminosidad (efecto corona). Necesita energía eléctrica para el ionizador y ésta se consigue generalmente con un panel solar.
- Tipo jaula de Faraday o reticular: se basa en el fenómeno descubierto por el físico inglés Michael Faraday (1791-1867). Si rodeamos un ambiente con una lámina conductora, el

campo eléctrico externo redistribuye los electrones libres en el conductor, dejando una carga positiva neta sobre la superficie externa en algunas regiones y una carga negativa neta en otras. Esta distribución de carga ocasiona un campo eléctrico adicional tal que el campo total en todo punto interior es cero, tal como lo predice la ley de Gauss (por este principio sabemos que estar dentro de un automóvil durante una tormenta es más seguro ya que si se produce una descarga en él, la carga tiende a permanecer sobre la carrocería metálica y dentro de él no se genera campo eléctrico). El dispositivo consiste en un retículo o malla tendida a lo largo de los aleros del tejado o terraza de grandes edificios y conectada eléctricamente a tierra. Se emplean en aquellos edificios donde predomina la superficie frente a la altura.



Tipo jaula de Faraday

## **CONCLUSIONES:**

Actualmente podemos, en líneas generales, decir qué pasa dentro de una célula de tormenta eléctrica y conocemos métodos de protección y prevención de las consecuencias de los rayos.

Existen sistemas que registran las descargas eléctricas en el momento que ocurren y así se puede estudiar la frecuencia con que suceden, viendo cuáles son las zonas más afectadas.

Se está trabajando en métodos de predicción de descargas eléctricas, especialmente de rayos “positivos”, y con el rápido avance de la tecnología satelital, es posible que en unos años más se obtengan técnicas más exactas.

Se han creado diferentes métodos de protección contra rayos pero se necesitan formas de protección mejores dado que la tecnología electrónica actual es cada vez más sensible. El campo de la investigación de tormentas eléctricas continúa siendo muy activo y queda mucho por descubrir.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- FEYNMAN, LEIGHTON, SANDS, “Física” Vol II, Addison- Wesley- Longman
- SEARS, ZEMANSKY, YOUNG, FREEDMAN, “Física Universitaria” Vol II, Addison- Wesley- Longman, novena edición.
- TIPLER, “Física” Vol II, Reverté, 1983.
- Revista “National Geographic” Vol 184, Julio 1993
- [www.contenidos.com/fisica/pararrayos](http://www.contenidos.com/fisica/pararrayos)
- [www.pararrayos.info/page2](http://www.pararrayos.info/page2)
- [www.proinexargentina.com/pages/pararrayos](http://www.proinexargentina.com/pages/pararrayos)
- [www.dlh.lahora.com.ec/paginas/ciencia/pararrayos](http://www.dlh.lahora.com.ec/paginas/ciencia/pararrayos)
- [www.qsl.net/la1rx/rayo/pararrayos](http://www.qsl.net/la1rx/rayo/pararrayos)
- [www.lightningsafety.com/nesi\\_lhm/conventionalLPT](http://www.lightningsafety.com/nesi_lhm/conventionalLPT)
- [www.strikeone.com.au/avoid/avoid](http://www.strikeone.com.au/avoid/avoid)
- [www.qsl.net/ccar/light](http://www.qsl.net/ccar/light)
- [www.electricityforum.com/et/oct99/light](http://www.electricityforum.com/et/oct99/light)
- [www.pao/ksc.nasa.gov/kspao/release](http://www.pao/ksc.nasa.gov/kspao/release)
- [www.blackmagic.com/ses/bruceg/EMC/rocket](http://www.blackmagic.com/ses/bruceg/EMC/rocket)
- [www.jaibana.udea.edu.co/programas/electrica/altatension/relatoria001](http://www.jaibana.udea.edu.co/programas/electrica/altatension/relatoria001)
- [www.nexer.com.ar/productos/mastiles/pararrayos](http://www.nexer.com.ar/productos/mastiles/pararrayos)
- [www.angelfire.com/ct2/lightning/info](http://www.angelfire.com/ct2/lightning/info)
- [www.nationalgeographic.com/features/96/lightning](http://www.nationalgeographic.com/features/96/lightning)
- [www.pages.prodigy.net/powerstation/gallery1](http://www.pages.prodigy.net/powerstation/gallery1)
- [www.weather-photography.com](http://www.weather-photography.com)
- [www.chaseday.com/lightning](http://www.chaseday.com/lightning)
- [www.iit.edu/johnsonp/smart00/lesson2](http://www.iit.edu/johnsonp/smart00/lesson2)