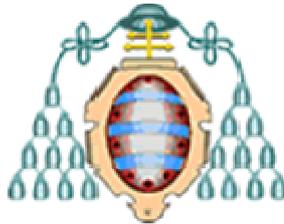
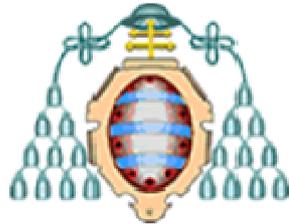


**TRABAJO FIN DE MÁSTER EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DE LOS MATERIALES: SISTEMA DE INHIBIDOR A LA FORMACIÓN DEL RAYO Y POSIBLES APLICACIONES.**



**UNIVERSIDAD DE OVIEDO**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER EN CIENCIAS Y  
TECNOLOGÍA DE LOS MATERIALES: SISTEMA DE  
INHIBIDOR A LA FORMACIÓN DEL RAYO Y POSIBLES  
APLICACIONES**



## DOCUMENTO I

# FORMACIÓN DEL RAYO

## **1- INTRODUCCIÓN**

## **2- FORMACIÓN DEL RAYO**

## **3- CAMPO ELÉCTRICO EN UNA TORMENTA**

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente la economía, industria, sector público e incluso los hogares dependen en gran medida de la tecnología electrónica. Cualquier avería o fallo en los sistemas de transmisión eléctrica pueden dar lugar a una verdadera catástrofe. Una de las causas más frecuentes es debida a sobretensiones procedentes de descargas eléctricas en una tormenta. La solución más eficiente es que el rayo no caiga.

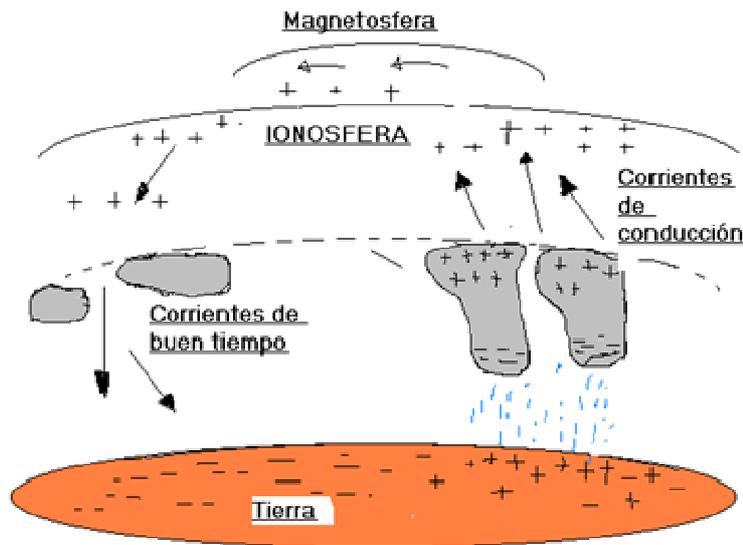
El INHIBIDOR crea un campo eléctrico más pequeño que el necesario para que se produzca la descarga entre nube y tierra.

Antes de describir cómo funciona el INHIBIDOR veamos brevemente el fenómeno del rayo.

## 2. FORMACIÓN DEL RAYO

El circuito global eléctrico que se asocia a la tierra es el de un condensador esférico. El suelo terrestre hace de placa interna con carga negativa (con buen tiempo) y la IONOSFERA de placa externa cargada positivamente.

En este gran circuito son las nubes con carga eléctrica, denominadas Cumulonimbos, las encargadas de transportar iones positivos a la Ionosfera. El mecanismo está representado en la figura 1.



(Figura 1)

Por encima de las nubes de tormenta hay una corriente de conducción que arrastran cargas positivas de la nube a la Ionosfera. En este extremo de la atmósfera y como consecuencia de la Magnetosfera se distribuye los iones positivos por todo el globo.

Desde la Ionosfera la corriente fluye hacia abajo como CORRIENTE DE BUEN TIEMPO en otras zonas del planeta. En estos lugares el gradiente eléctrico es del orden de 100 V/m, mientras que en las zonas de tormentas eléctricas el

campo eléctrico es del orden de 100.000 a 200.000 V/m. Si no existieran las nubes de tormenta, la tierra se descargaría en poco más de una hora. Por tanto son éstas las que mantienen constante la corriente de buen tiempo.

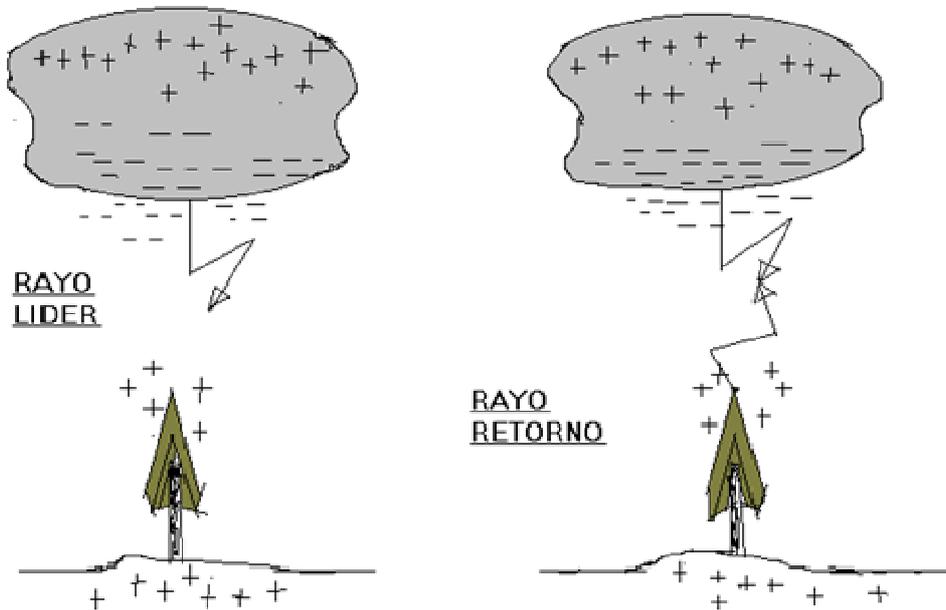
Una de las teorías más extendidas sobre separación de cargas en la nube es la que apunta que las gotas grandes se cargan negativamente y por gravedad se acumulan en la parte inferior de la nube, mientras que las gotas de menor tamaño se cargan positivamente siendo arrastradas por corrientes aéreas a la parte superior de la nube\*

Esta situación hace que la tierra se cargue positivamente en la zona que se encuentra por debajo de la nube. En estas condiciones la nube llega a producir la suficiente carga eléctrica como para crear un campo eléctrico lo suficientemente intenso como para romper el dieléctrico aire y convertirlo en conductor.

\*Existen varias teorías sobre separación de cargas en los Cumulonimbos:

- a) Teoría de la Precipitación: modelo inductivo de Elster – Geitel y Wilson
- b) Teoría de la Convección.
- c) Modelo de distribución de cargas: modelos Dipolar y Tripolar

**TRABAJO FIN DE MÁSTER EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DE LOS MATERIALES: SISTEMA DE INHIBIDOR A LA FORMACIÓN DEL RAYO Y POSIBLES APLICACIONES.**

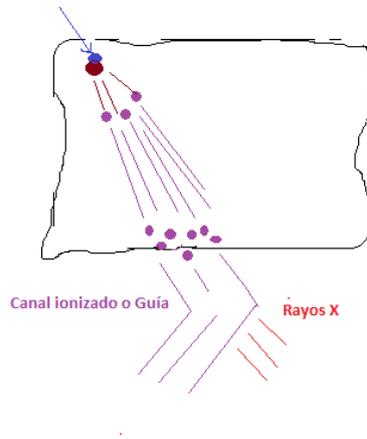


Es en este instante, cuando se origina una chispa que partiendo de la nube, va abriendo en el aire un camino estrecho que avanza de forma escalonada y con ramificaciones múltiples. Este chorro iónico se denomina DESCARGA LIDER o " STEPPED LEADER ".

Cuando el " Stepped Leader " está próximo al suelo ( del orden 100 a 200 metros) y debido al intenso campo eléctrico que hay entre el extremo del camino y zonas puntiagudas de la superficie de la tierra, se produce una corriente eléctrica ascendente desde la tierra a la nube. Este rayo ascendente se denomina DESCARGA DE RETORNO o " RETURN ESTROKE ".

La intensidad de descarga es del orden de 30 KA , llegando alcanzar  $t^{\circ}$  de 30.000 ° C.

**TRABAJO FIN DE MÁSTER EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DE LOS MATERIALES: SISTEMA DE INHIBIDOR A LA FORMACIÓN DEL RAYO Y POSIBLES APLICACIONES.**



1º) Un protón se mueve velozmente procedente del espacio y choca con una molécula del aire originando una lluvia de partículas de alta energía (electrones)

2º) Estas partículas chocan con moléculas de aire de la nube de tormenta, liberando electrones de alta energía.

Debido a los campos eléctricos que se originan, los electrones se aceleran produciendo una avalancha-----> Guía de electrones.

3º) Los electrones perforan el aire dando origen a un canal o guía. Esta guía avanza de forma escalonada y con ramificaciones múltiples (Rayo Líder).

Cada vez que las partículas (electrones) chocan con las moléculas del aire, cambian de dirección emitiendo rayos X.

4º) Cuando este canal está cerca del suelo se inicia un rayo desde el suelo (Rayo Retorno) en busca del Rayo Líder.

Una vez unido los dos rayos, la intensidad de descarga oscila entre los 30 KA hasta los 500KA (casos excepcionales) y tº de 30.000 ºC

Se puede considerar el conjunto nube-tierra como un condensador de capacidad:

$$C = E_0 \cdot S / L$$

$$E_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$S = \pi \cdot R^2 \quad ; R = \text{Radio medio de la nube}$$

L = Distancia entre nube y tierra.

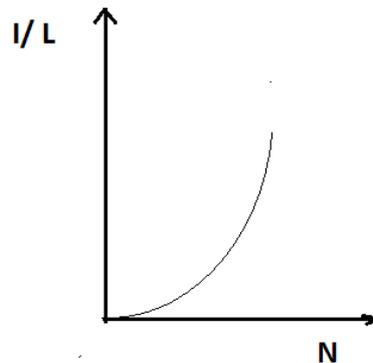
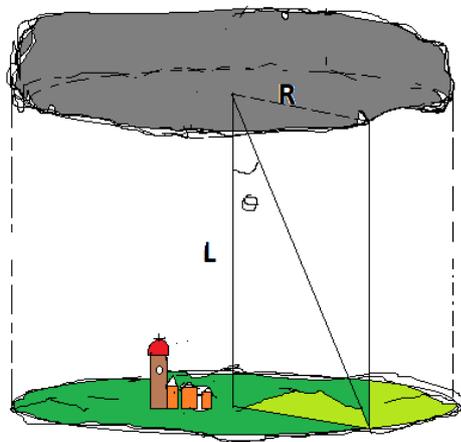
El INHIBIDOR actúa de forma que evita que se origine la descarga de retorno. Esto se logra disminuyendo el campo eléctrico en esa zona y es el INHIBIDOR el que consigue este efecto.

La intensidad del rayo depende de tres factores y son: **campo eléctrico ( E )** entre nube – tierra, **capacidad ( C ) del condensador** formado por la nube – tierra y por último de la **velocidad del rayo ( V )** que normalmente suele ser poco más de un tercio de la luz.

$$I = E \cdot C \cdot V; \quad \text{donde: } C = E_0 \cdot \pi \cdot R^2 / L.$$

Si denominamos N a la relación entre el radio R de la nube y la distancia L tendremos:

$$N = R / L; \quad R = N \cdot L$$



$$I = E_0 \cdot \pi \cdot E \cdot V \cdot L \cdot N^2; \quad I / L = E_0 \cdot \pi \cdot E \cdot V \cdot N^2; \quad I/L = \text{Amperios/metro}$$

En general el valor del campo E oscila entre 100 y 200 KV / m y la velocidad V del rayo suele ser el 40 % de la velocidad de la luz.

$$I / L = K \cdot N^2; \quad \text{donde: } K = E_0 \cdot \pi \cdot E \cdot V$$

### 3. CAMPO ELÉCTRICO EN UNA TORMENTA

El rayo se origina cuando entre una zona puntual de la nube y otra en la tierra se produce una diferencia de potencial tan grande que se perfora el dieléctrico del aire ( la rigidez dieléctrica del aire es del orden de 3.000 KV/m ).

Una forma de explicar cómo incide el rayo en un punto de la tierra es:

Todo cuerpo en determinadas circunstancias presenta un campo eléctrico específico. Éste se puede representar por la siguiente expresión:

$$E_z = T \cdot \sigma / 2 \cdot E_0$$

Donde T es un parámetro característico del objeto y es función de las características, dimensiones y posición del cuerpo.

$\sigma$  = Densidad superficial de carga en Coulomb/m<sup>2</sup>

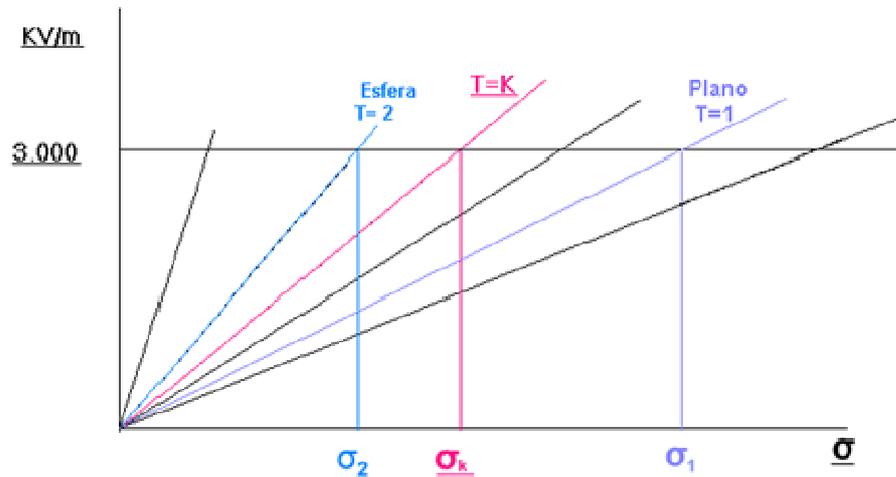
$E_0$  = Constante dieléctrica de valor  $8,85 \cdot 10^{-12}$  F/m

$E_z$  = Campo Eléctrico según componente vertical

El valor de T suele ser función del radio y altura del cuerpo.

Una Punta Franklin puede ser cualquier figura o cuerpo cuyo radio tiende a cero.

**TRABAJO FIN DE MÁSTER EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DE LOS MATERIALES: SISTEMA DE INHIBIDOR A LA FORMACIÓN DEL RAYO Y POSIBLES APLICACIONES.**



P.F= Punta Franklin

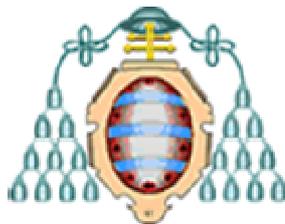
T= K, donde K es un parámetro característico del Inhibidor

(Gráfico 1 )

Como se puede observar en el gráfico 1 igualando el límite de 3.000 KV/m con una recta determinada obtendremos la densidad superficial correspondiente. Conocido este valor se puede determinar la carga necesaria para iniciar el efecto corona. En general el valor de la carga es proporcional al cuadrado del radio. En el caso de una PF el radio tiende a cero con lo cual la carga necesaria para iniciar el Rayo Retorno es muy pequeña.

El INHIBIDOR se diseña de forma que logre dos efectos:

- a) Su característica  $T = K$  es tal que la carga máxima para originar el Rayo Retorno sea elevada lo cual es difícil de conseguir (con superficies amplias es necesario acumular mucha carga para iniciar el efecto corona).
- b) Evita acumulación de cargas en el Inhibidor pues está cargando y descargando continuamente



## DOCUMENTO II

### FUNCIONAMIENTO DEL INHIBIDOR

**1 – CARACTERÍSTICAS Y FUNCIONAMIENTO DEL INHIBIDOR**

**2 – PROCESO DE CARGAS Y DESCARGAS EN EL INHIBIDOR**

**3 – IMPORTANCIA DE LA IMPEDANCIA**

**4 – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL INHIBIDOR**

**5 – CORRECTOR DE CAMPO**

**6 – FILTRO DE TIERRAS ( INDUC – CONTROL )**

**7 – ELEMENTOS AUXILIARES**

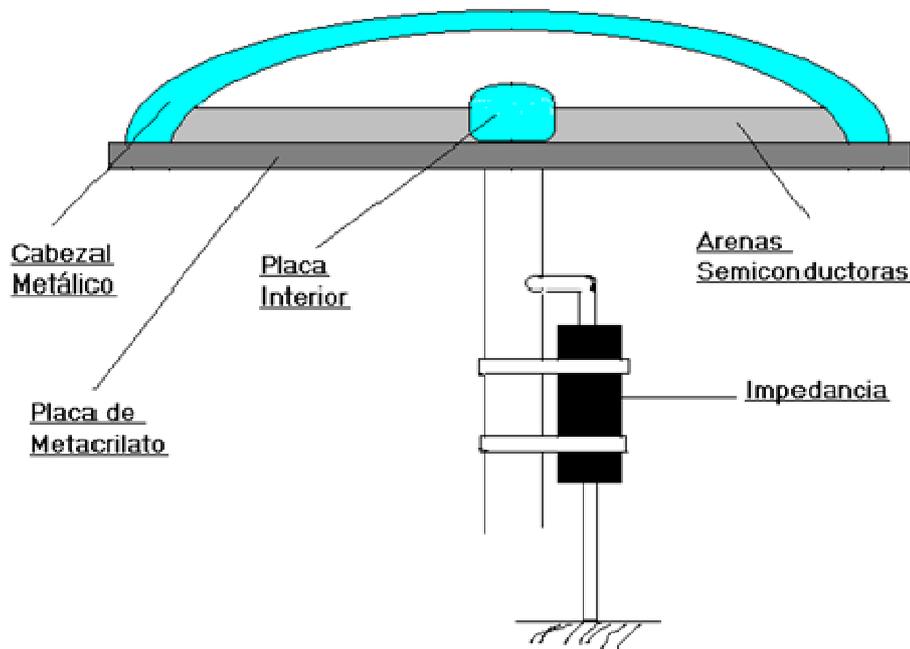
**8 – VENTAJAS DEL SISTEMA**

**9 – INSTALACIONES RECOMENDADAS: algunas instalaciones realizadas.**

**10 – SISTEMA DE CAPTACIÓN DEL RAYO ATMOSFÉRICO MEDIANTE INHIBIDORES A LA FORMACIÓN DEL RAYO Y LA PUNTA FRANKLIN.**

## 1. CARACTERÍSTICAS Y FUNCIONAMIENTO DEL INHIBIDOR

El INHIBIDOR funciona como un condensador y básicamente se compone de un cabezal metálico semiesférico hueco y un mástil. En su interior hay un dieléctrico semiconductor (arenas de sílice con una granulometría determinada) y aire. Su comportamiento es parecido a un Varistor (elemento que ofrece gran resistencia a corrientes con determinadas tensiones pero deja pasar corriente cuando se sobrepasa cierto voltaje).

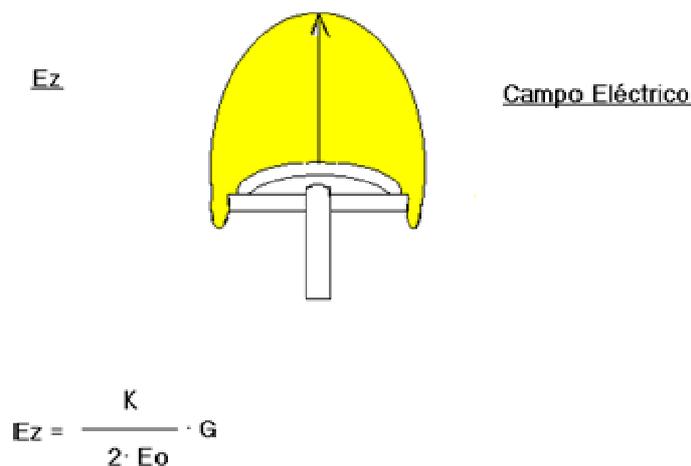


(Figura 3 )

La placa interior está unida a tierra mediante una impedancia  $L - r$

El INHIBIDOR consigue crear un campo eléctrico más pequeño que el necesario para traspasar la rigidez dieléctrica del aire. Esto se logra gracias a su configuración y al proceso de acumulación de cargas en el exterior de la semiesfera. Es decir, las cargas eléctricas se distribuyen en una superficie más amplia dando origen a un campo eléctrico más pequeño que el formado, por ejemplo, por la punta Franklin\*.

El campo eléctrico que genera el INHIBIDOR tiene forma ovalada tal y como indica la figura:



( Figura 4 )

$E_z$  = Componente vertical

K = Constante característica del INHIBIDOR

## **TRABAJO FIN DE MÁSTER EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DE LOS MATERIALES: SISTEMA DE INHIBIDOR A LA FORMACIÓN DEL RAYO Y POSIBLES APLICACIONES.**

\* El INHIBIDOR se basa en el teorema de Gauss, cuya aplicación respecto al campo eléctrico creado por una superficie cerrada conductora es:

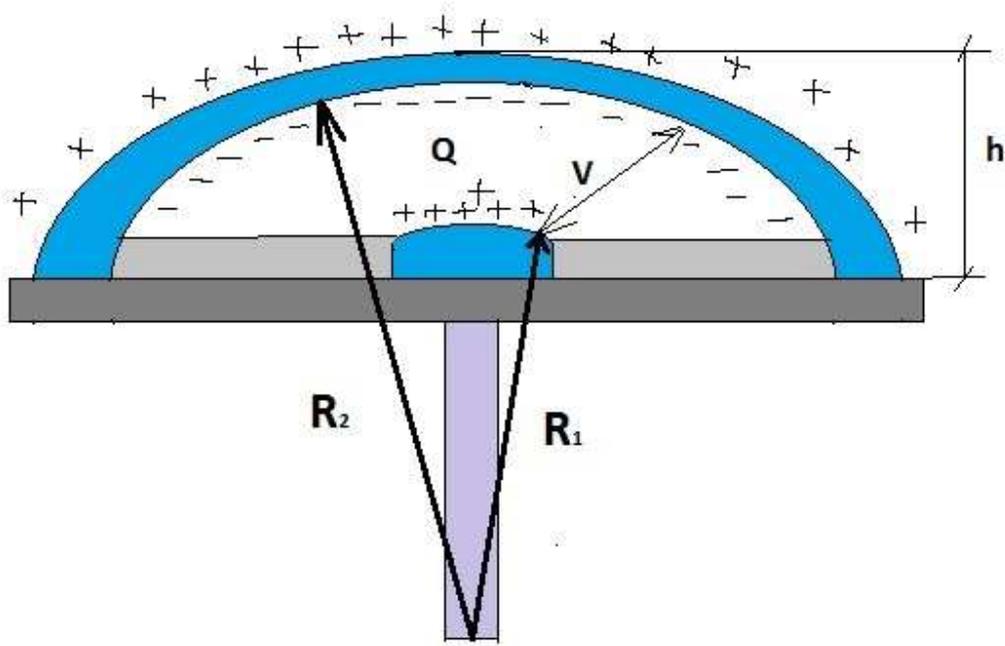
$$E = Q / E_0 \cdot S ; \quad Q = \text{carga total}; E_0 = \text{constante dieléctrica}; \quad S = \text{superficie.}$$

Al ser la superficie S del INHIBIDOR mayor que el de una punta, el campo eléctrico es considerablemente menor.

## **2. PROCESO DE CARGA Y DESCARGA EN EL INHIBIDOR**

Cuando aparecen alteraciones eléctricas como consecuencia de tormentas, el INHIBIDOR se carga. A medida que el potencial eléctrico entre nube y tierra aumenta, también lo hace el potencial interno del condensador.

Las cargas Q positivas procedentes de la tierra inducen otras iguales y de signo contrario en la pared interna de la placa exterior semiesférica. A su vez estas cargas Q negativas originan otras iguales pero de distinto signo en el exterior.



(Figura 5 )

El valor de la carga en el interior viene expresado:

$Q_{int} = C_{int} \cdot V_{int}$  ; donde la capacidad ( $C_{int}$ ) es igual a:

$C_{int} = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot E_0 \cdot h / \ln (R_2/R_1)$  ; donde  $n$  = relación entre la permitividad del dieléctrico interior y la del aire.

Cuando la diferencia de potencial interna entre placas del INHIBIDOR supera un valor umbral, el dieléctrico se trasforma en conductor produciéndose la descarga del condensador, quedando la zona externa del INHIBIDOR cargada positivamente.

Tenemos :

$$Q_{int}(1) = Q_{ext}(1) = Q_{int} + \Delta Q$$

$$V_{int}(1) = V_{umb} + \Delta V;$$

$$Q_{ext}(1) = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot E_o \cdot h / \ln(R_2/R_1) \cdot (V_{umb} + \Delta V)$$

El proceso de cargas y descargas del INHIBIDOR provoca que no se acumulen cargas positivas en la parte externa de la semiesfera. Esta situación es muy distinta a la creada por la punta Franklin donde hay concentración de cargas.

La carga total  $Q_{ext}(T)$  origina un proceso de mini-descargas:

El valor de  $Q_{ext}(T)$  es igual a:

$Q_{ext}(T) = Q_{int}(1) + Q_{int}(3) + \dots + Q_{int}(i)$ ; cada número (i) impar representa una descarga :

$$Q_{int}(1) = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot E_o \cdot h / \ln(R_2/R_1) \cdot (V_{umb} + \Delta V)$$

$$Q_{int}(3) = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot E_o \cdot h / \ln(R_2/R_1) \cdot (V_{umb} + \Delta V)$$

.....

$$Q_{int}(i) = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot E_o \cdot h / \ln(R_2/R_1) \cdot (V_{umb} + \Delta V)$$

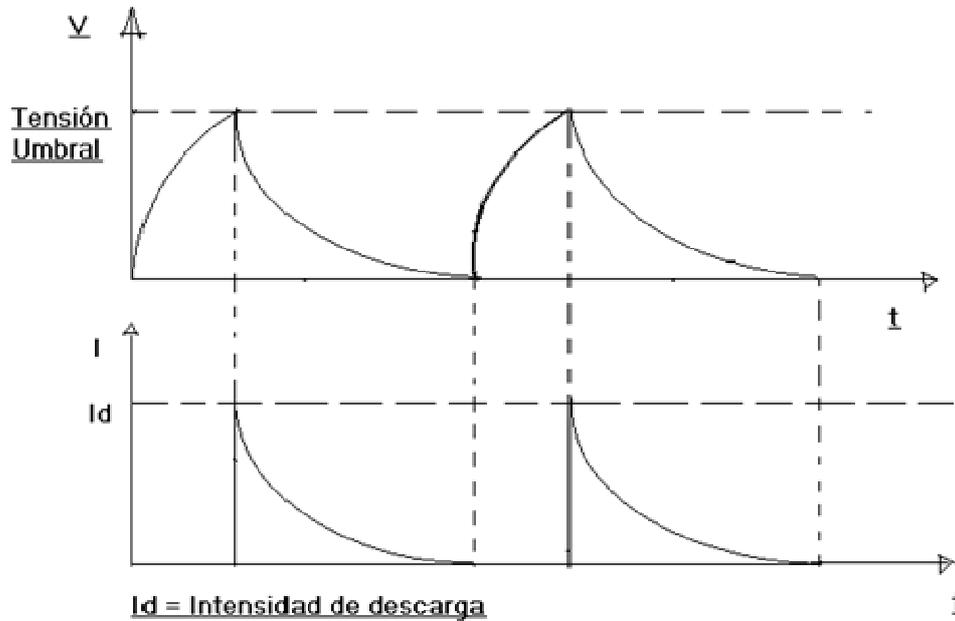
La carga total del exterior es, para  $\Delta V = 0$  y  $V_{umb} = V_{int}$ :

$$Q_{ext}(T) = i \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \cdot E_o \cdot h / \ln(R_2/R_1) \cdot V_{int}$$

$$Q_{ext}(T) = i \cdot Q_{int} ; \text{ donde } i = n^\circ \text{ de descargas}$$

El valor  $Q_{ext}(T)$  sería el valor máximo de cargas en caso de acumulación, pero se evita debido al proceso de cargas y descargas continuas.

Las descargas del INHIBIDOR se comporta a base de impulsos, que en función del tiempo tenemos dientes de sierra, es decir:



### 3. IMPORTANCIA DE LA IMPEDANCIA

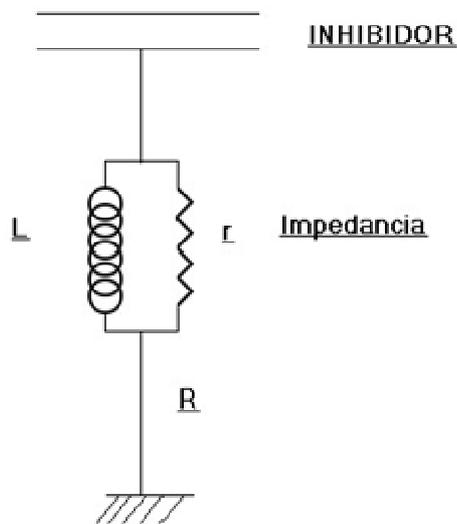
Si no existiera la impedancia el comportamiento del INHIBIDOR sería a base de impulsos (dientes de sierra) tal y como indica el gráfico anterior.

Al colocar la impedancia  $L - r$  en paralelo los impulsos se transforman en ondas senoidales cuya amplitud es mucho más pequeña. Se obtiene un movimiento oscilatorio que decrece exponencialmente. Estamos en una situación de minidescargas con intensidades de miliamperios.

**TRABAJO FIN DE MÁSTER EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DE LOS MATERIALES: SISTEMA DE INHIBIDOR A LA FORMACIÓN DEL RAYO Y POSIBLES APLICACIONES.**

Los valores de  $L$  -  $r$  de la impedancia se dimensionan adecuadamente de forma que el circuito ofrezca la mínima dificultad posible tanto para las descargas del INHIBIDOR como el camino hacia arriba de las cargas positivas inducidas en tierra.

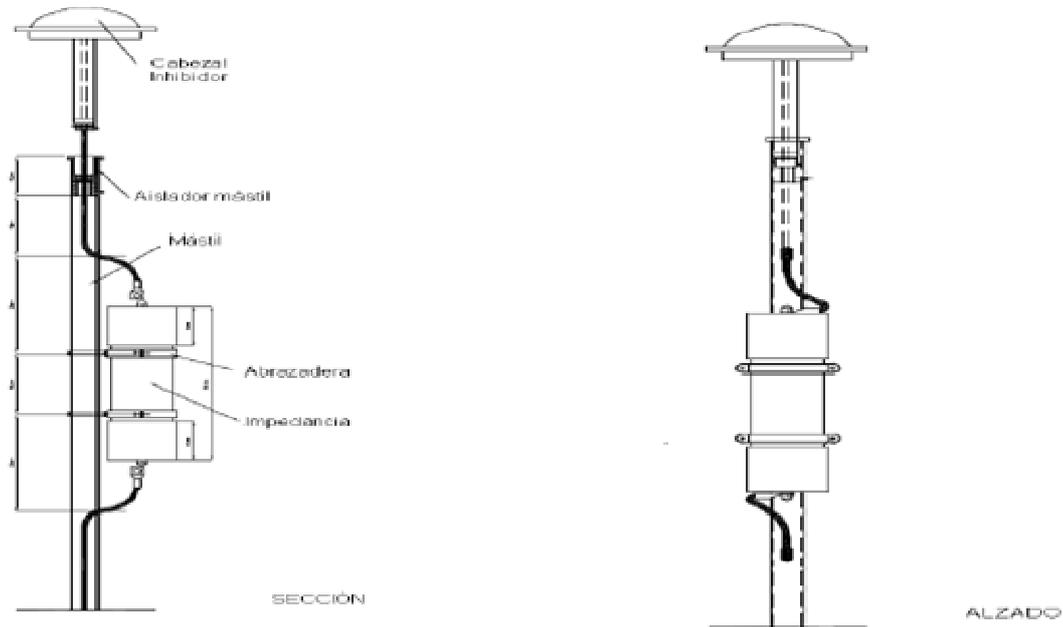
El circuito eléctrico formado por INHIBIDOR, impedancia y cable es:



Todo lo expuesto ha sido en el supuesto de nubes de carga negativa en su base. El INHIBIDOR funciona igual, pero a la inversa, cuando la nube está cargada positiva.

#### **4. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL INHIBIDOR**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DE LOS MATERIALES: SISTEMA DE INHIBIDOR A LA FORMACIÓN DEL RAYO Y POSIBLES APLICACIONES.**



Alzado del Inhibidor de la formación del rayo

Algunas características son:

- Peso del Inhibidor = 3,75 Kg
- Peso de la bobina de amortiguamiento = 4 Kg.
- **Radio de actuación:** según pruebas realizadas el radio de actuación del Inhibidor es de 60/70 m.. Por tanto el número de Inhibidores por superficie ( Ni ) es:

$Ni = S / Si$  ; donde S = superficie a proteger, Si = superficie que protege un Inhibidor. Si suponemos un radio de 60m, obtenemos  $Si = 11310 \text{ m}^2$

**$Ni = S / 11310$  ; donde S = superficie a proteger.**

El Inhibidor es incompatible con la punta Franklin, por tanto no puede compartir espacios; es decir, o bien está el pararrayos convencional o está el Inhibidor.

**Puesta a tierra:** el sistema del Inhibidor no puede sobrepasar en su puesta a tierra de los 50 Ohmios.

Materiales del Inhibidor: es una aleación de Al – Si con pequeñas cantidades de Fe, Cu, Mn, Mg y otros elementos

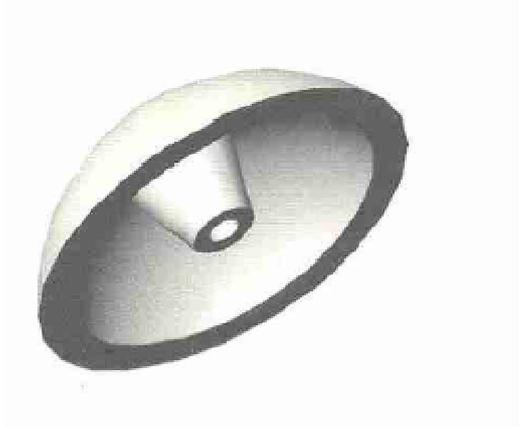
En agosto del 2011 el laboratorio L.C.O.E. realizó una serie de ensayos comprobando que el Inhibidor soporta, en caso de una caída del rayo, intensidades de 100 KA.

## 5. CORRECTOR DE CAMPO

En determinadas situaciones y según el tipo de instalaciones a proteger, se utiliza este elemento complementario, cuya misión es la de evitar el llamado “ efecto punta “ en algunos objetos como: antenas, cornisas y en general todo punto extremadamente fino.

El Corrector de Campo está constituido por un casquete semiesférico hueco y un casquillo para su facilitar su acoplamiento a un mástil de 35 mm.

En la figura se muestra las piezas:



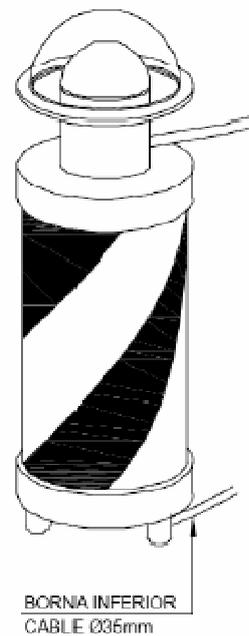
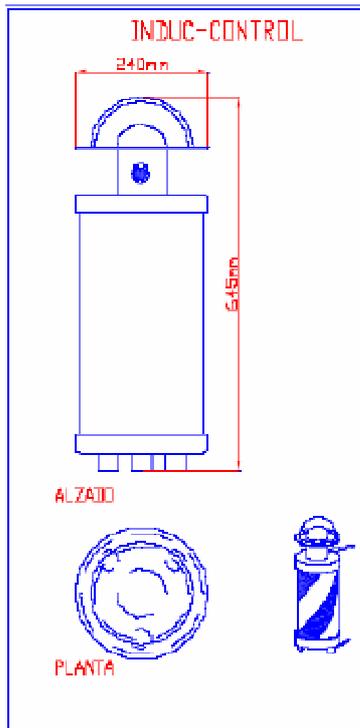
Peso del Corrector de Campo = 1,75 Kg

La diferencia entre el Corrector de campo y el Inhibidor es que éste lleva unas arenas semiconductoras y un dieléctrico en su interior, mientras que el Corrector es simplemente un casquete esférico hueco sin nada en su interior ( no lleva tapa ni cierre alguno ).

## **6. FILTRO DE TIERRAS ( INDUC – CONTROL )**

La finalidad del INDUC - CONTROL es la protección de equipos frente a posibles corrientes de retorno por tierra, procedentes de descargas producidas en un radio aproximado de 1 Km.

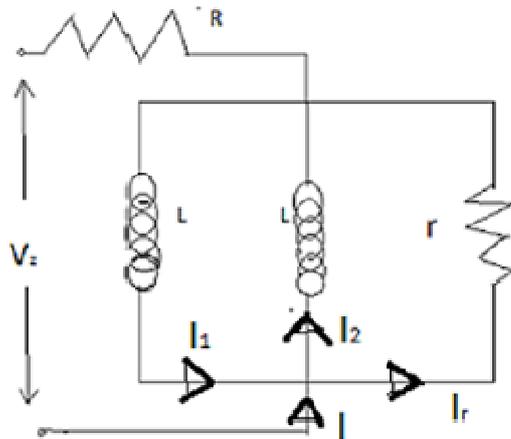
**TRABAJO FIN DE MÁSTER EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DE LOS MATERIALES: SISTEMA DE INHIBIDOR A LA FORMACIÓN DEL RAYO Y POSIBLES APLICACIONES.**



Se instalará lo más cercano posible al Cuadro General de Baja Tensión, intercalado entre la pletina general del cuadro y la tierra equipotencial

Básicamente el filtro está formado por dos bobinas en paralelo enrolladas en sentidos opuestos, también lleva una resistencia Óhmica.

**TRABAJO FIN DE MÁSTER EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DE LOS MATERIALES: SISTEMA DE INHIBIDOR A LA FORMACIÓN DEL RAYO Y POSIBLES APLICACIONES.**



El filtro de tierras está formado por dos bobinas en paralelo enrolladas en sentidos opuestos, también lleva una resistencia r

## 7. ELEMENTOS AUXILIARES

- **Amperímetro:** se instalará un amperímetro entre el Inhibidor y su puesta a tierra en un lugar protegido, visible y accesible.

La misión del amperímetro es registrar los miliamperios que se producen cuando el Inhibidor está sometido a el campo eléctrico de la tormenta.

- **Contador de Rayos:** en teoría no hace falta, ya que el Inhibidor

rechaza el rayo. No obstante se instalará uno en el lugar más idóneo para que registre todas las alteraciones electromagnéticas en un radio de 60 / 70 m.

## 8 . VENTAJAS DEL SISTEMA

- Impide la formación del rayo de retorno y por consiguiente la formación del canal de descarga

- Ausencia de efectos secundarios al no haber una caída directa del rayo. Hay un importante ahorro en reparaciones.

**TRABAJO FIN DE MÁSTER EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DE LOS MATERIALES: SISTEMA DE INHIBIDOR A LA FORMACIÓN DEL RAYO Y POSIBLES APLICACIONES.**

- El mantenimiento es mínimo, sólo se necesita visualizarlo una vez al año y comprobar que las sujeciones, empalmes eléctricos, etc. están correctamente.
- No consume energía, el Inhibidor sólo entra en funcionamiento en presencia de una campo eléctrico.

**9. INSTALACIONES RECOMENDADAS**

- Subestaciones eléctricas
- Equipos meteorológicos y de comunicaciones
- Estaciones de esquí
- Parques fotovoltaicos
- Complejos industriales
- Edificios históricos y singulares
- Hospitales
- Parques naturales
- Complejos hoteleros

**ALGUNAS INSTALACIONES REALIZADAS**

- **Factoría SEAT**, en Martorell, 150.000 m<sup>2</sup> de superficie protegida con este sistema.
- Centro de proceso de datos de **Volkswagen – Gedas**, en Martorell
- **Industrias Sedó S.A.**, en Tarragona
- **Repetidor de comunicaciones Movistar** para Telefónica Móviles, S.A. en Barcelona

TRABAJO FIN DE MÁSTER EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DE LOS MATERIALES: SISTEMA DE INHIBIDOR A LA FORMACIÓN DEL RAYO Y POSIBLES APLICACIONES.

- **Gran Hotel Rey don Jaime**, en Castelldefels ( Barcelona )

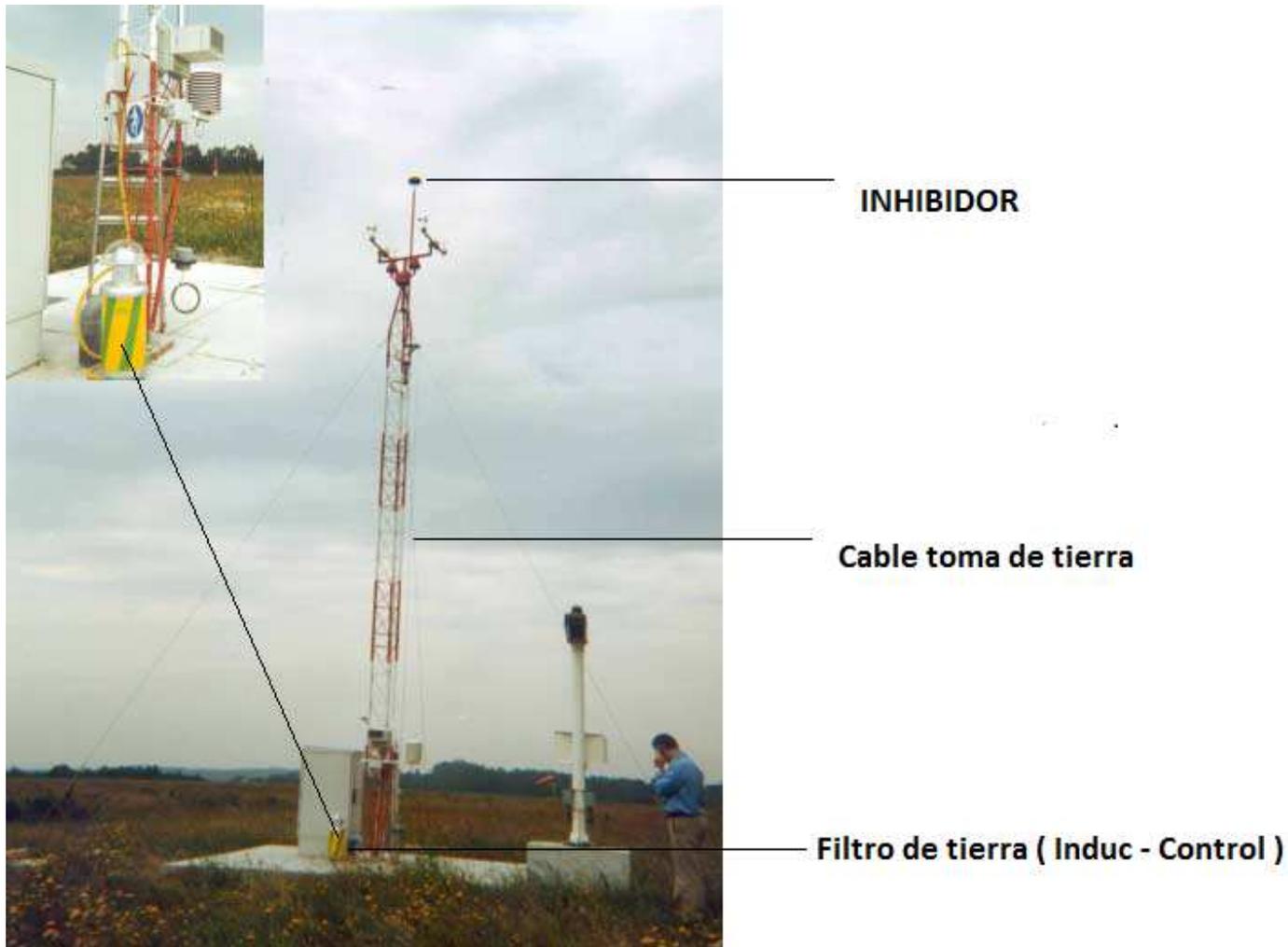
- **AENA – Aeropuertos de Vigo**

- **ADIF**: protección de **Estaciones y Subestaciones** en las provincias de Alicante, Valencia, Albacete, Salamanca, Zamora, León, Orense, etc.



**Aeropuerto de Vigo**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DE LOS MATERIALES: SISTEMA DE INHIBIDOR A LA FORMACIÓN DEL RAYO Y POSIBLES APLICACIONES.**



**Estación meteorológica en el Aeropuerto de Santiago de Compostela.**

## 10. SISTEMA DE CAPTACIÓN DEL RAYO ATMOSFÉRICO MEDIANTE INHIBIDORES A LA FORMACIÓN DEL RAYO Y LA PUNTA FRANKLIN.

El Inhibidor junto con la punta Franklin puede utilizarse como captador del rayo en una tormenta eléctrica.

El sistema consiste, tal y como indica la figura, en colocar cuatro Inhibidores en los vértices A,B,C y D de un cuadrado de lado  $2 \cdot r$ , donde  $r$  = radio de actuación máxima del Inhibidor. En el centro del cuadrado se colocaría una punta Franklin cuya altura debe superar a los Inhibidores en 1,5 metros.

También deben instalarse 8 Correctores de Campo: cuatro de ellos se colocan en los vértices A',B',C' y D' de un cuadrado de lado  $2 \cdot R$  y girado  $90^\circ$  respecto al anterior; los otros cuatro Correctores se ponen en la circunferencia central de radio  $R - r$  y en la posición A'', B'', C'' y D''.

El valor de R es:  $R = 2^{1/2} \cdot r$

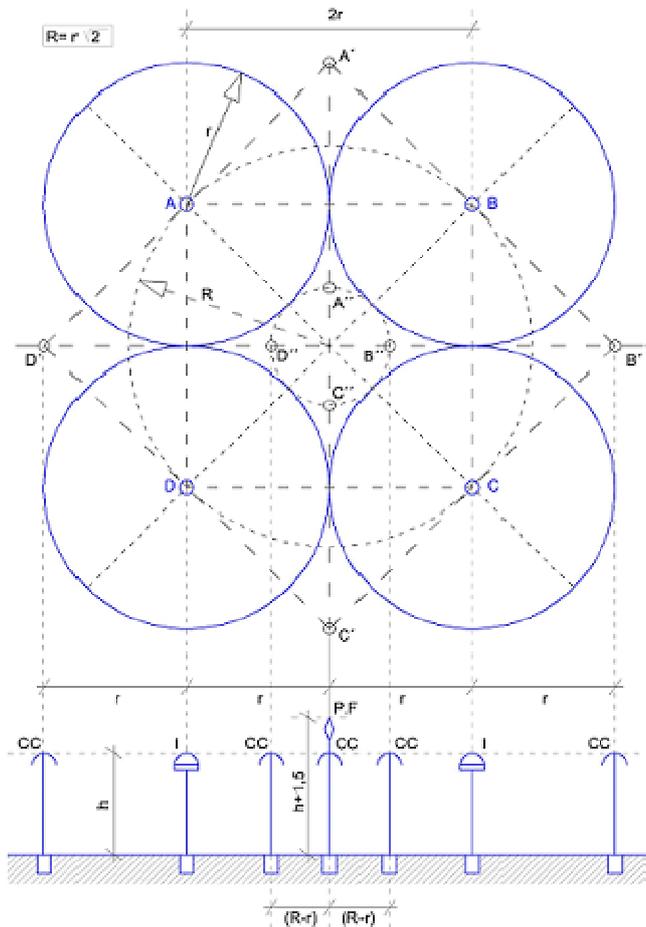
De esta forma se crea una zona amplia, donde el campo eléctrico es menor que el necesario para que se genere el rayo de retorno, mientras que en el centro se forma un único punto muy sensible al rayo debido al efecto punta del pararrayos Franklin.

Denominamos **APIC = Área Protegida Inhibidores y Correctores**

$$\text{APIC} = 16 \cdot R^2 = 32 \cdot r^2$$

En la zona central, donde debe caer el rayo, tiene una superficie de seguridad de  $SS = \pi \cdot (R - r)^2 = 0,41 \cdot \pi \cdot r^2$

**TRABAJO FIN DE MÁSTER EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DE LOS MATERIALES: SISTEMA DE INHIBIDOR A LA FORMACIÓN DEL RAYO Y POSIBLES APLICACIONES.**

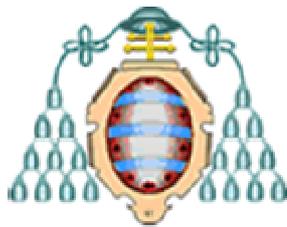


**I** = Inhibidor

**CC** = Corrector de Campo

En los puntos **A, B, C** y **D** Inhibidores.

En los puntos **A', B', C', D', A'', B'', C''** y **D''** Correctores de Campo.

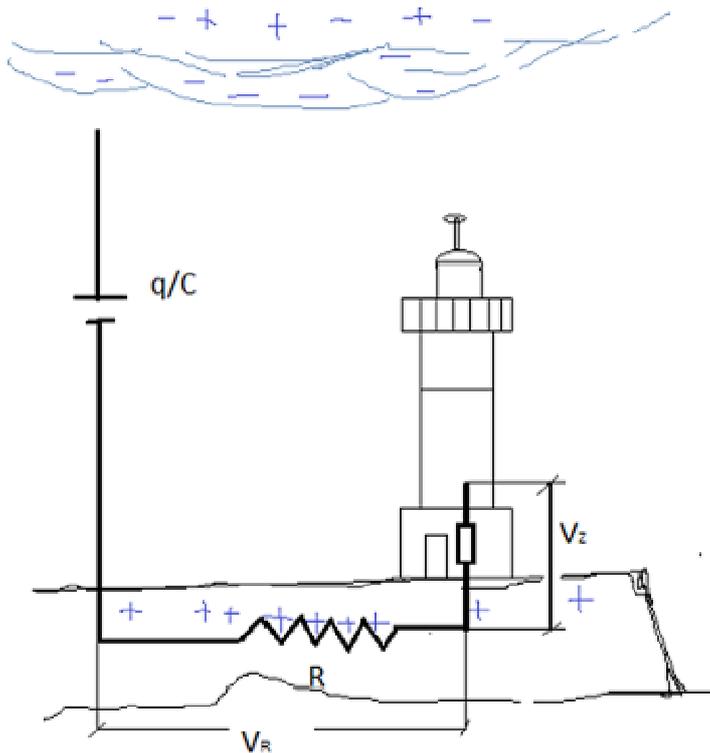


## DOCUMENTO III

## ANEXO

## FILTRO DE TIERRAS INDUC – CONTROL

El circuito eléctrico está formado por:



- Condensador Nube – Tierra, con una **capacidad C**.
- **Resistencia R** del terreno
- **Filtro de tierra Induc – Control** formado por dos bobinas enrollados en sentidos opuestos y una resistencia Óhmica en paralelo.

Tenemos las siguientes caídas de tensión:

---

[Escriba texto]

Página 32

$V_z$  = Caída de tensión en el Induc – Control

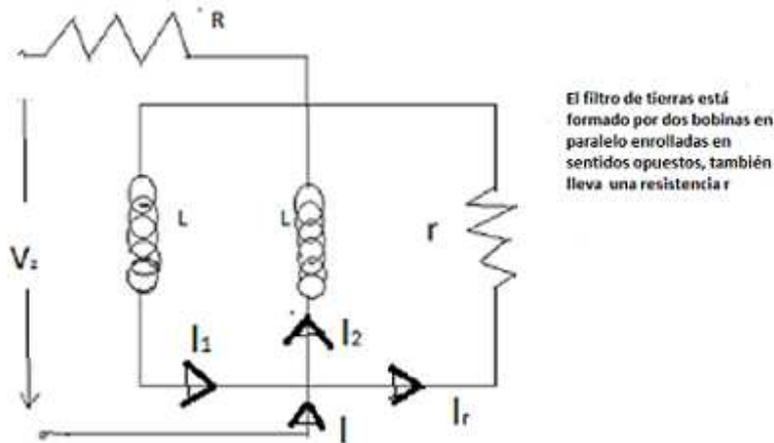
$V_R$  = Caída de tensión en la resistencia R del terreno.

Debe de cumplirse la siguiente ecuación:

$$q/C = V_R + V_z \quad (1)$$

$q$  = Carga Nube – Tierra

$C$  = Capacidad del condensador Nube – Tierra



$$I + I_1 = I_2 + I_r \quad (2)$$

Diferenciando la ecuación ( 2 ) respecto al tiempo tenemos:

$$dI/dt + dI_1/dt = dI_2/dt + dI_r/dt \quad (3)$$

Los valores de  $V_R$  y  $V_z$  corresponden a:

$$V_R = I \cdot R$$

$$V_z = - ( - L ) \cdot dI_2 / dt = - L \cdot dI_1 / dt = I_r \cdot r \quad (4)$$

1º Ecuación:

$$dI_1 / dt = I \cdot R / L - q / C \cdot L \quad (5)$$

2º Ecuación:

$$dI_2 / dt = q / C \cdot L - I \cdot R / L \quad (6)$$

3º Ecuación:

$$dI_r / dt = (1 / C \cdot r) \cdot dq / dt - (R / r) \cdot dI / dt \quad (7)$$

Sustituyendo las ecuaciones (5), (6) y (7) en la expresión (3) y haciendo operaciones se llega al siguiente resultado:

$$(d^2 / dt^2) \cdot (1 + R / r) + (2 \cdot R / L + 1 / C \cdot r) \cdot dq / dt + (2 / C \cdot L) \cdot q = 0 \quad (8)$$

Esta ecuación diferencial se resuelve de la siguiente manera:

$q = e^{mt}$ ;  $dq / dt = m \cdot e^{mt}$ ;  $d^2q / dt^2 = m^2 \cdot e^{mt}$ ; sustituyendo estos valores en (8) y haciendo operaciones obtenemos:

$$m^2 + m \cdot (2C \cdot R \cdot r + L) / C \cdot L \cdot (R + r) + 2r / C \cdot L \cdot (R + r) = 0 \quad (9)$$

Resolviendo esta ecuación de segundo grado obtenemos las siguientes raíces:

$$m_1 = A + i \cdot W; \quad m_2 = A - i \cdot W; \quad \text{donde:}$$

$$A = - (2C \cdot R \cdot r + L) / 2C \cdot L \cdot (R + r)$$

$$W = ((8C \cdot L \cdot r^2) - (2C \cdot R \cdot r - L)^2)^{1/2} / 2C \cdot L \cdot (R + r)$$

El valor de la carga es:

$$q = C_1 \cdot e^{m_1 t} + C_2 \cdot e^{m_2 t} \quad (10)$$

Sustituyendo  $m_1$  y  $m_2$  por sus valores y empleando posteriormente las fórmulas de transformación de Euler ( $e^{ix} = \cos x + i \cdot \text{sen } x$ ;  $e^{-ix} = \cos x - i \cdot \text{sen } x$ ) obtenemos:

$$q = e^{At} \cdot (C_1 \cdot (\cos wt + i \cdot \text{sen } wt) + C_2 \cdot (\cos wt - i \cdot \text{sen } wt)) \quad (11)$$

### CÁLCULO DE LAS CONSTANTES $C_1$ Y $C_2$ :

Las condiciones un instante antes de la caída del rayo son:

a) Para  $t = 0$ , la carga será máxima, por tanto tendremos:

$$Q_{\text{max.}} = C_1 + C_2$$

b) Habrá una diferencia de potencial máxima entre zonas puntuales de la Nube – Tierra, pero en el instante  $t = 0$  la intensidad es nula:

$$I = - dq / dt = 0$$

Por tanto la derivada de  $q$  respecto de  $t$  es cero, para  $t = 0$ .

Una vez hallado los valores de  $C_1$  y  $C_2$  se sustituyen en la ecuación (11), haciendo operaciones y simplificando se llega al siguiente resultado:

$$q = Q \cdot e^{At} \cdot (\cos wt - (A/w) \cdot \text{sen } wt); \quad (12)$$

Si dividimos el valor de  $q$  por la capacidad  $C$  del condensador Nube – Tierra obtenemos:

$$q/C = (Q/C) \cdot e^{At} \cdot (\cos wt - (A/W) \cdot \text{sen } wt);$$

Si llamamos:

$V = q/C$  y  $V_0 = Q/C$  nos queda la ecuación de la tensión en función del tiempo:

$$V = V_0 \cdot e^{At} \cdot (\cos wt - (A/W) \cdot \text{sen } wt) \quad (13)$$

El valor de A es negativo, es decir  $A = - (2C \cdot R \cdot r + L) / 2C \cdot L \cdot (R+r)$ ; en lo sucesivo pondremos  $-A$ .

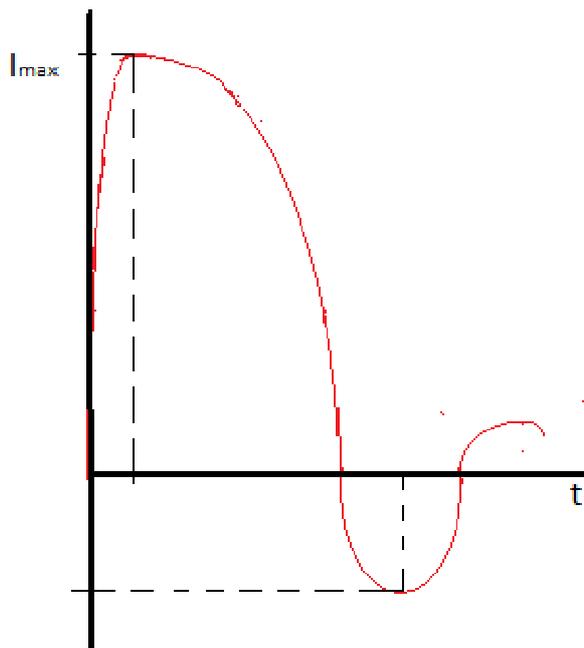
### CÁLCULO DE LA INTENSIDAD:

Sabemos que  $I = - dq / dt$ . Derivando la ecuación ( 12 ) respecto al tiempo y cambiando el signo obtenemos, una vez realizadas las simplificaciones correspondientes:

$$I = I_0 \cdot e^{-At} \cdot \text{sen } wt \quad ( 14 )$$

Dónde:

$$I_0 = Q \cdot ( A^2 + W^2 ) / W$$



$$I = I_0 \cdot e^{-At} \cdot \text{sen } wt .$$

**TRABAJO FIN DE MÁSTER EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DE LOS MATERIALES: SISTEMA DE INHIBIDOR A LA FORMACIÓN DEL RAYO Y POSIBLES APLICACIONES.**

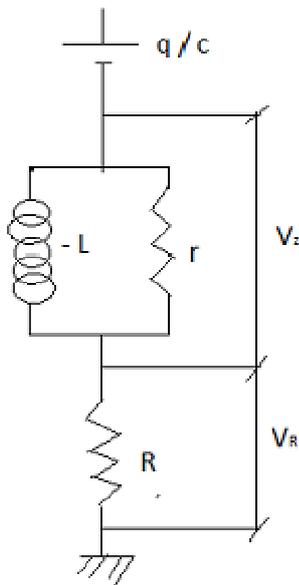
El filtro de tierras Induc – Control se diseña pensando en la posible capacidad del condensador tipo Nube – Tierra y lo mismo para la resistencia del terreno.

El valor máximo de la intensidad se alcanza rápidamente para enseguida disminuir y quedar totalmente anulada.

-----

**IMPEDANCIA DEL INHIBIDOR:**

La impedancia del inhibidor consiste en una bobina y una resistencia Óhmica



en paralelo, tal y como indica la figura.

En este circuito tenemos:

$q / c = V_z + I \cdot R$  ( 1 ) ; donde  $q$  = carga del Inhibidor,  $C$  = capacidad del Inhibidor.

$V_z$  = caída de tensión en la bobina e  $I \cdot R$  = caída de tensión en la resistencia R del cable.

$$V_z = -L \cdot \frac{dI_L}{dt} = I_r \cdot r \quad (2)$$

1º Ecuación:

$$\frac{dI_L}{dt} = (R/L) \cdot I - q/C \cdot L \quad (3)$$

2º Ecuación:

$$dI_r/dt = (1/C \cdot r) \cdot dq/dt - (R/r) \cdot dI/dt \quad (4)$$

Según el circuito tenemos:

$I + I_L = I_r$ ; que diferenciando respecto de  $t$  obtenemos:

$$dI/dt + dI_L/dt = dI_r/dt \quad (5)$$

También hay que tener en cuenta:  $I = -dq/dt$ .

Sustituyendo en (5) los valores de (3) y (4) nos queda:

$$(d^2q/dt^2) \cdot (1 + R/r) + (dq/dt) \cdot (R/L + 1/C \cdot r) + q/C \cdot L = 0 \quad (6)$$

Empleando el mismo razonamiento que anteriormente se llega al siguiente resultado:

$V = V_o \cdot e^{At} \cdot (\cos wt - (A/W) \cdot \sen wt)$ ; donde:

$$V_o = Q/C \quad y \quad V = q/C$$

$$A = - (C \cdot R \cdot r + L) / 2C \cdot L \cdot (R + r);$$

$$W = ((4C \cdot L \cdot r^2 - (C \cdot R \cdot r - L)^2)^{1/2} / 2C \cdot L \cdot (R + r)).$$

La intensidad equivale a:

**TRABAJO FIN DE MÁSTER EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DE LOS MATERIALES: SISTEMA DE INHIBIDOR A LA FORMACIÓN DEL RAYO Y POSIBLES APLICACIONES.**

**$I = I_0 \cdot e^{At} \cdot \text{sen } \omega t$  ; el valor de  $I_0$  es:**

$$I_0 = Q \cdot (A^2 + W^2) / W$$

**El valor de A es negativo.**

**FIN**