

# Comportamiento de un Rayo como Antena Lineal Delgada

**Néstor E. Arias**

En este trabajo se presenta el cálculo de los campos electromagnéticos cercanos y lejanos al punto de impacto de una descarga atmosférica (rayo) mediante un modelo que simula el comportamiento de la descarga con un símil de antena lineal delgada y se utiliza un software de matemática (Mathcad 7®) para el cálculo de los campos. Además, se hace una reseña de un rayo y de una antena lineal a fin de unificar conceptos.

Palabras Clave: Descargas Atmosféricas, Campos Electromagnéticos

---

*Behaviour of a ray as a thin lineal antenna*

*In this work the calculation of electromagnetic fields near and distant to the impact point of an atmospheric discharge (ray) is presented by means of a model that simulates the discharge behaviour with a simile of a thin lineal antenna. A mathematical software (Mathcad 7®) is used to calculate the fields. A review of a ray and a lineal antenna is carried out in order to unify concepts.*

*Keywords: Atmospheric Unloading, Electromagnetic fields*

## **Consideraciones preliminares**

### **Rayo**

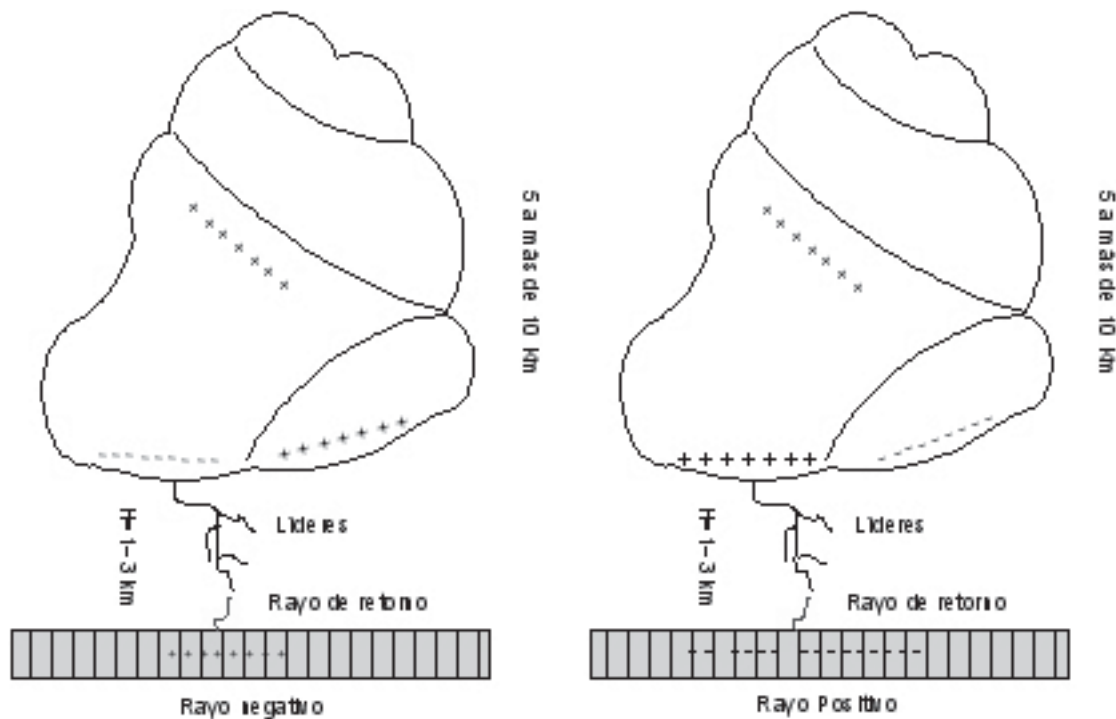


Fig.1

El rayo es un fenómeno atmosférico muy complejo y no es bien conocida la física exacta por la cual se desarrollan las cargas que desencadenan un rayo, cada descarga es singular e irreplicable, depende de un sinnúmero de parámetros que varían según la región geográfica, variables físicas y punto de impacto.

Uno de los parámetros más importantes de un rayo es la intensidad de descarga, ésta es conocida mediante mediciones y su interpretación ayuda al análisis de los campos que se originan en una descarga. La intensidad de descarga es la relación corriente tiempo del rayo.

Un valor medio de corrientes de descargas es del orden de 3 – 50 Kamperio y se han medido en algunas regiones, hasta 200 Kamperio de corriente máxima.

A su vez, el rayo tiene una duración variable que es del orden de los pocos microsegundos hasta los milisegundos. De la intensidad de descarga y su función con el tiempo se pueden deducir otros parámetros involucrados con el rayo, como ser:

- Cantidad de carga en culombio
- Energía calculada de la expresión temporal
- Potencia calculada de la expresión temporal
- Energía calculada del espectro de frecuencias involucradas en la descarga
- Potencia calculada del espectro de frecuencias involucradas en la descarga
- Intensidades de campos, Eléctricos, Magnéticos y Electromagnéticos, cercanos y lejanos al punto de impacto.
- Densidad espectral de frecuencias
- Otros

Es notable la información que contiene la curva intensidad de descarga que, además, puede medirse para luego proceder a su análisis.

Para resumir, y en forma condensada, se pueden distinguir dos grandes líneas de tipos de descargas: Rayos Negativos y Rayos Positivos. En la figura 1 se esquematizan estas descargas.

Las nubes de dimensiones aproximadas de: 10 Km por 10 Km,  $10^8$  metro<sup>2</sup> y 1-12 Km de altura adquieren cargas eléctricas en cantidades significativas que producen potenciales del orden de los giga voltio. Estos enormes poten-

ciales producen rupturas y polarizaciones en las moléculas del aire circundante formándose guías escalonadas o conductos erráticos denominados líderes que se aproximan a tierra. Cuando éstos llegan a unos cien metros, surge desde tierra una descarga conocida como rayo de retorno que une la tierra con la guía escalonada, iniciándose así la descarga del rayo.

En las figuras 2 y 3 se muestran dos modelos representativos de intensidad de descarga de rayos negativos y positivos. Como se aprecia, ambos tienen un perfil similar. La diferencia principal se hace evidente al observar la enorme cantidad de carga que disipa un rayo positivo (alrededor de 100 C) esto es debido a que el tiempo de duración del mismo es del orden de los 3000 microsegundos (3 milisegundos) diez veces mayor que una descarga negativa. Ambos rayos pueden tener la misma corriente máxima de pico, pero la energía en juego es significativamente mayor para la descarga positiva.

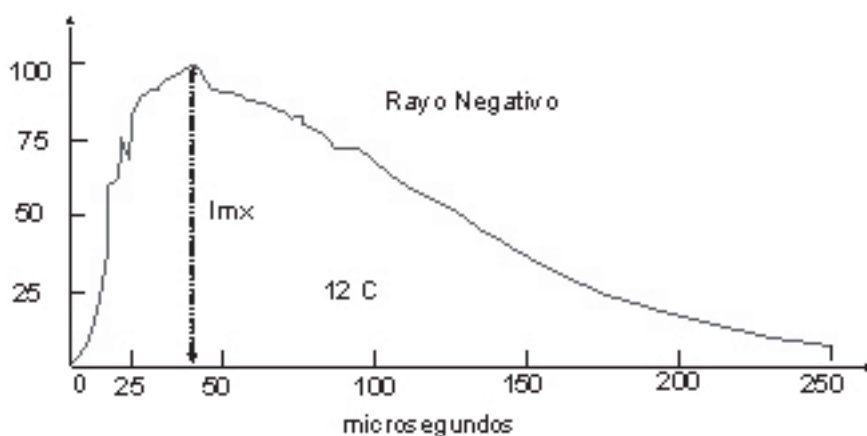


Fig.2

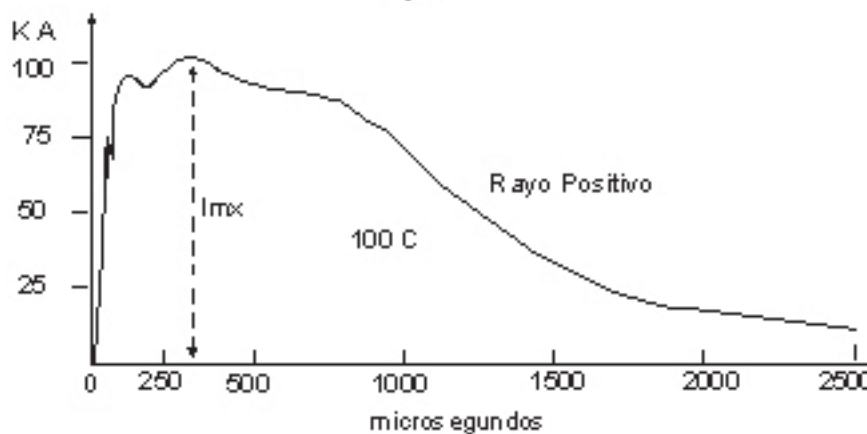


Fig.3

Es de resaltar que los ejemplos dados son de los más violentos en cada tipo.

Otro tema fundamental en el análisis de rayos, es que el mismo se comporta como un sistema de fuente ideal de corriente y es en principio y con reserva, independiente de la resistencia de tierra, aunque de ésta dependen otros parámetros.

Entre otros, una resistencia grande de tierra influye a que se manifiesten por corriente de conducción, grandes potenciales en la zona de impacto, además, la conductividad  $\sigma$  y la constante dieléctrica de la tierra, influyen en la distribución de los campos

El rayo ya establecido, es un ducto de cargas y en su interior es un plasma de sección muy pequeña frente a su longitud, aproximadamente 5 – 10 cm de diámetro.

La curva de intensidad de descarga es obtenida por medición.

Innumerables descargas medidas en diversas regiones geográficas, permiten estructurar datos estadísticos y con ellos es posible realizar estudios generales.

De la curva corriente- tiempo, se puede obtener información de la cantidad de carga en culombio que se transporta en un rayo. Y así, siguiendo con el análisis, si se conoce una función analítica que se aproxime a la intensidad de descarga, y mediante la Transformada de Fourier se puede obtener el espectro de frecuencias involucradas con el rayo. Si, por otra parte se conoce la intensidad de descarga de una medición y mediante un gráfico o una grabación, se puede practicar un muestreo en el tiempo en forma manual o por soft, y aplicando la Transformada Discreta de Fourier (TDF) o la Transformada Rápida de Fourier (TRF) se obtiene el espectro discreto de frecuencias.

En la figura 4, se muestra una curva de intensidad de descarga para un rayo negativo de mediana intensidad. Esta corresponde a valores promedios estadísticos de:

- Intensidad máxima en KA
- Pendiente  $di/dt$ .

Puesto que la curva mencionada representa a un rayo promedio, ésta será tomada como ejemplo de intensidad de descarga a los fines del cálculo de campos propuesto en este trabajo.

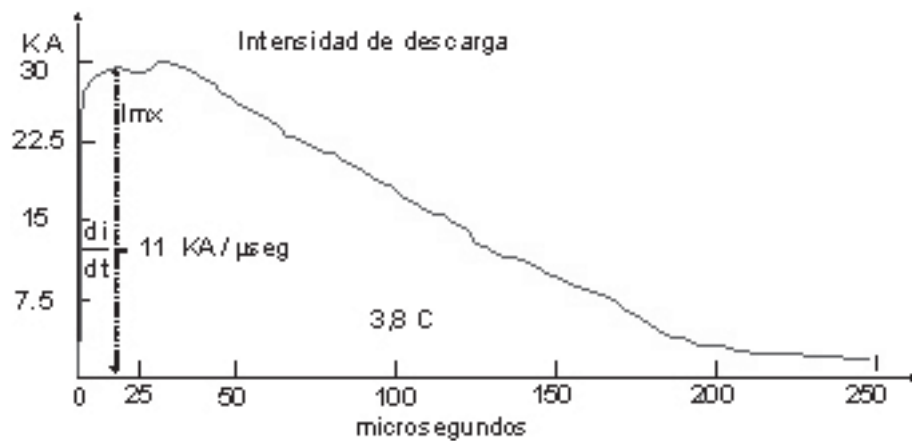


fig.4 Rayo Negativo de mediana intensidad

En la figura 5 se puede apreciar el espectro de frecuencias obtenido con la TDF. Allí se observa la presencia de frecuencias muy bajas (KHz) con altas intensidades de corrientes y, frecuencias altas, con bajas intensidades de corrientes.

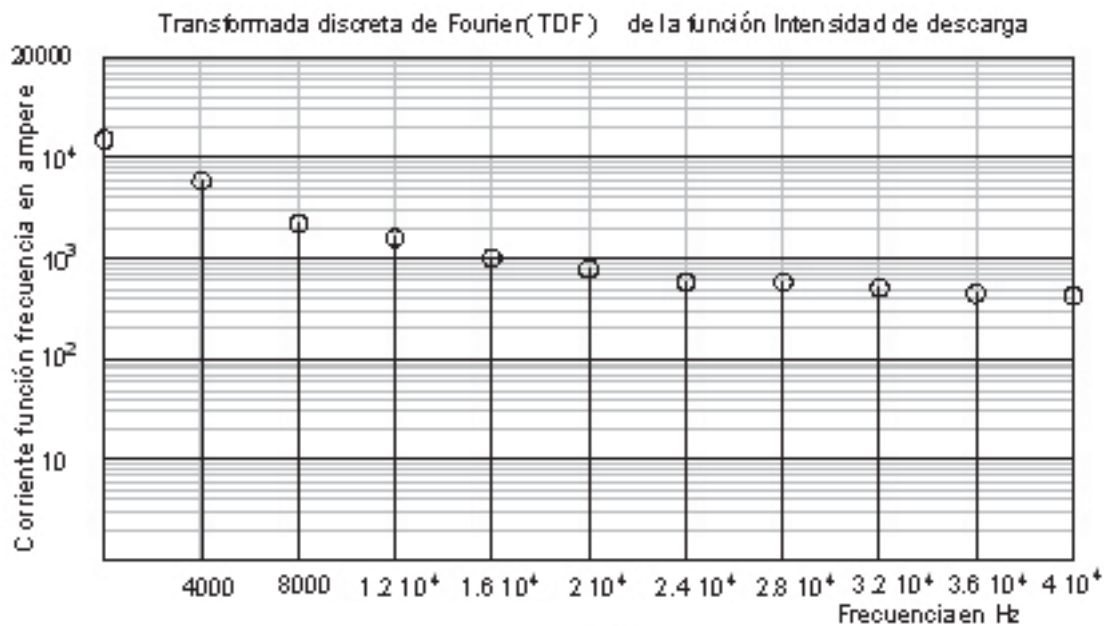


Fig.5

## Antena

A continuación, se hace una breve descripción de los conceptos fundamentales de una antena lineal delgada corta, que son conocimientos básicos y generales de antenas.

Una antena lineal delgada corta, es una antena cuyas dimensiones son pequeñas relativas a la longitud de onda en la frecuencia de trabajo. Así, si la antena está construida con un conductor que tiene una longitud  $\Delta z = 1000$  metros y un diámetro  $d = 6 \cdot 10^{-3}$  metro, trabajando en la frecuencia de 1000 Hz cuya longitud de onda es:  $\lambda = 3 \cdot 10^5$  metro. Las dimensiones relativas a son:

$$\Delta z_1 = \Delta z / \lambda = 3 \cdot 10^{-3} \quad \text{y} \quad d_1 = d / \lambda = 2 \cdot 10^{-7}$$

Las dimensiones relativas a la longitud de onda muestran que a pesar de que la longitud del conductor es grande en términos de dimensiones físicas, en términos relativos a la longitud de onda las dimensiones son pequeñas. Esta situación es relevante para el cálculo de los campos puesto que uno de los vectores a considerar, el vector potencial magnético, se simplifica notablemente cuando las dimensiones relativas son pequeñas, tanto en antenas lineales cortas como en antenas lineales delgadas en general.

Un elemento de corriente es una antena elemental, y una antena lineal delgada de longitud genérica, puede ser estudiada integrando el elemento de corriente en su longitud.

A veces, es necesario en el cálculo de antenas, que la corriente en la misma sea senoidal, además, se puede suponer que la distribución espacial de la corriente a lo largo de la antena también sea senoidal. De esta manera, los cálculos de integrales y diferenciales necesarios para obtener los campos magnéticos y eléctricos se simplifican y, por supuesto, éstas son aproximaciones de cálculo que deben ser verificadas con mediciones.

Una antena lineal delgada (monopolo) actuando arriba de un plano de tierra, produce una antena imagen y puede ser estudiada como un dipolo.

En la figura 7 se muestra una antena lineal delgada arriba de un plano de tierra, sus dimensiones, el vector potencial magnético en su origen,  $A_z$ , y el vector potencial magnético retardado a la distancia  $d$ ,  $[A_z]$ .

## Procedimientos y Cálculo de Campos para una Antena Rayo

Se ha visto en los párrafos anteriores, que un rayo tiene una longitud de un kilómetro o más de altura y una sección del canal rayo del orden de los centímetros con características de alta conductividad. Las frecuencias involucradas en la intensidad de descarga van desde los Hz hasta los megaciclos, con energías significativas en la zona de bajas frecuencias, además, por lo dicho en el párrafo de antenas en lo referente a longitudes relativas pequeñas,

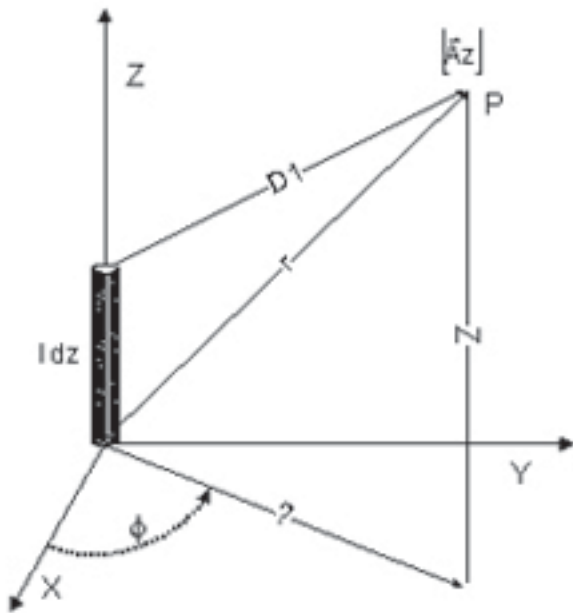


Fig.6 Elemento de corriente

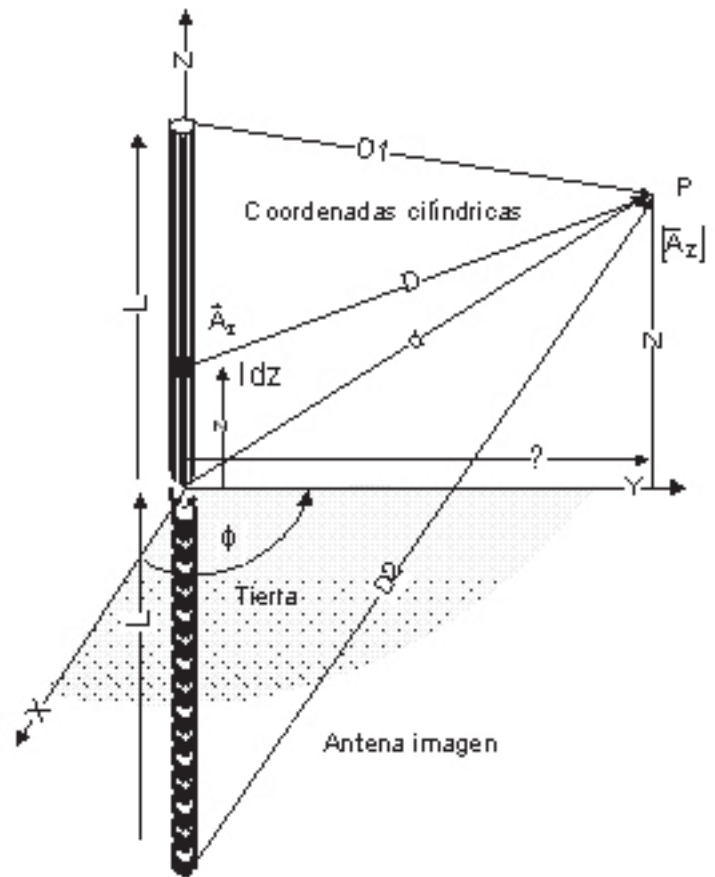


Fig.7 Antena lineal delgada sobre tierra y su imagen

hace que todo lo expresado, “amerite simular un rayo con una antena lineal delgada”.

Para este trabajo se hace un modelo de cálculo en donde el rayo se simula como una antena lineal delgada de longitud  $L$  excitada por fuentes de corrientes senoidales, figuras 8 y 9.

Si se puede calcular el potencial magnético en el punto  $P$ , es posible conocer los campos eléctricos y el campo magnético en ese punto.

Se han adoptado para este trabajo las expresiones obtenidas por autores tales como: **S.A. Schelkunoff and H.T. Friis** (1952) y **E.C. Jordan and K.G. Balmain** (1968) que permiten el cálculo de los campos eléctricos y el campo magnético cercano y lejano de una antena lineal delgada.

Para el cálculo se adopta un sistema de coordenadas cilíndricas, así:

Vector potencial magnético (retardado) en el punto  $P$ :

$$[A_z] = \frac{\mu I_{mx}}{4\pi} \left[ \int_0^L \frac{\text{sen}(\beta(L-z)) e^{-j\beta D}}{D} dz + \int_{-L}^0 \frac{\text{sen}(\beta(L+z)) e^{-j\beta D}}{D} dz \right] \quad (1)$$

En donde:

$$I = I_{mx} \text{sen}(L-z) \quad \text{para } z > 0 \quad (2)$$

$$I = I_{mx} \text{sen}(L+z) \quad \text{para } z < 0$$

$L$  = longitud del monopolo en metros

$\lambda$  = longitud de onda [m]

$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  [H/m]

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \quad [\text{rad/m}] \text{ Constante de propagación} \quad (3)$$

$$d = \sqrt{Z^2 + Y^2} \quad [\text{m}] \quad (4)$$

$$D = \sqrt{(Z - z)^2 + Y^2} \quad [\text{m}] \quad (5)$$

$$D_1 = \sqrt{(Z - L)^2 + Y^2} \quad (6)$$

$$D_2 = \sqrt{(Z + L)^2 + Y^2} \quad [\text{m}] \quad (7)$$

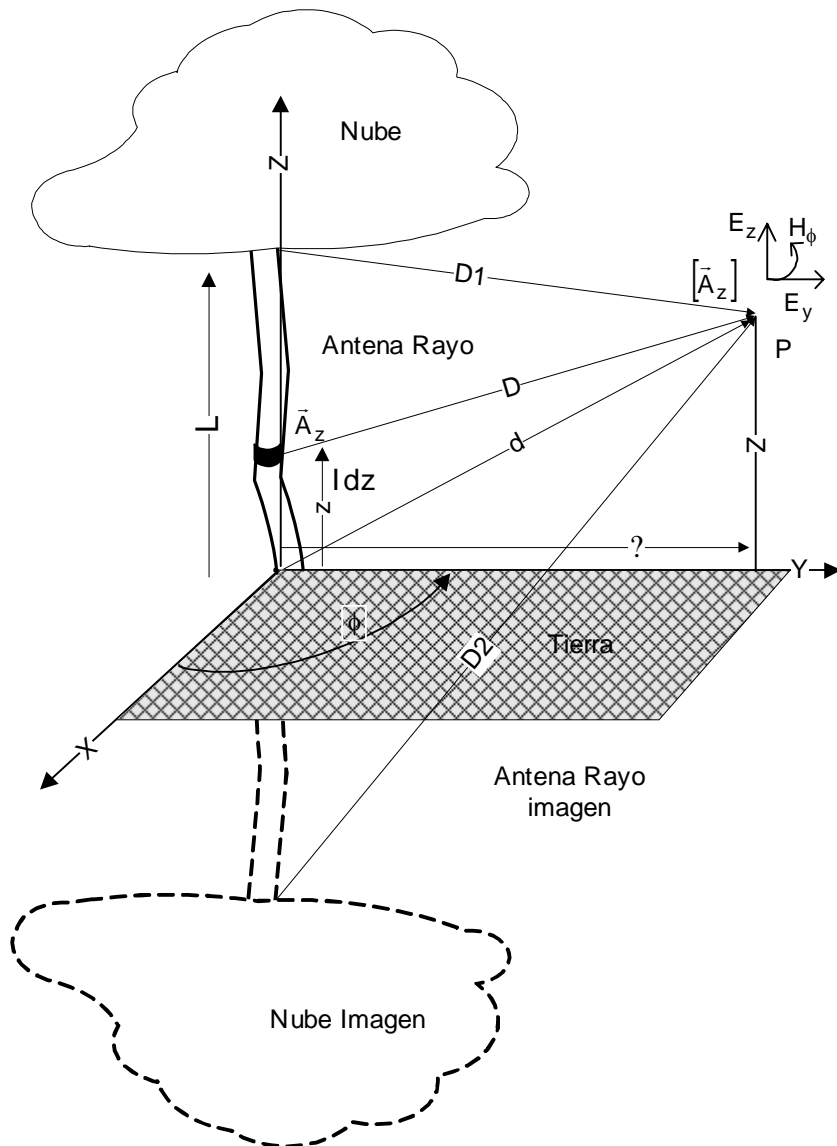


Fig.8 Antena Rayo y su imagen

Dado que el elemento de corriente en la antena tiene dirección z, el campo magnético tiene dirección  $\phi$ , o sea que, resolviendo el rotor de  $A_z$  queda una sola componente, y es:

$$H_\phi = \frac{1}{\mu} (\nabla \times A_z)_\phi = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial \rho} \quad (8)$$

Como el campo magnético envuelve a la antena, que es la fuente de corriente (Ley de Ampère), se puede tomar el punto P sin pérdida de generalidad, en el plano Z-Y. ( $X = 0$ ) así  $\rho = Y$ , por lo tanto:

$$H_\phi = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial Y} \quad (9)$$

Procediendo, se obtiene:

$$H_\phi = \frac{j30 I_m}{\eta Y} \left( e^{-j\beta D_1} + e^{-j\beta D_2} - 2 \cos(\beta L) e^{-j\beta d} \right) \quad (10)$$

La expresión (10), representa el campo magnético que se puede calcular en todo punto del espacio, (campo cercano y lejano).

Resolviendo el rotor del campo  $H_\phi$ , se obtienen dos campos eléctricos,  $E_z$  y  $E_y$ :

$$E_z = -j30 I \left( \frac{e^{-j\beta D_1}}{D_1} + \frac{e^{-j\beta D_2}}{D_2} - 2 \cos(\beta L) \frac{e^{-j\beta d}}{d} \right) \quad (11)$$

$$E_y = j30 I \left( \frac{Z-L}{Y} \frac{e^{-j\beta D_1}}{D_1} + \frac{Z+L}{Y} \frac{e^{-j\beta D_2}}{D_2} - \frac{2Z \cos(\beta L)}{Y} \frac{e^{-j\beta d}}{d} \right) \quad (12)$$

$E_z$ , es el campo eléctrico paralelo al rayo.

$E_y$  es el campo eléctrico normal al rayo (paralelo a la tierra). Tiene la característica de ser cero a ras del suelo ( $Z = 0$ ).

Al igual que el campo magnético ecuación (10), las expresiones (11) y (12) permiten calcular los campos Eléctricos en toda región del espacio.

Se desarrolla un ejemplo para un rayo negativo como el de la figura 4 que es un modelo gráfico de intensidad de descarga, con características de rayo promedio estadístico, se toman cien muestras con igual período de muestreo y se estructura un arreglo que permitirá un tratamiento posterior con la Transformada Rápida de Fourier y determinar así, la densidad espectral de frecuencias y las corrientes correspondientes a cada grupo de frecuencias.

Se asigna a cada corriente del espectro  $I_n$  con sus amplitudes y fases, la correspondiente  $\Delta f_n$  como se indica en la figura 9.

Con los datos obtenidos, y mediante Mathcad 7®, se usan las ecuaciones (1) a (12) para determinar los campos:

$E_z$ ,  $E_y$  y  $H_\phi$  que por otra parte, pueden ser analizados en valores y en forma gráfica a diferentes distancias, cercanas o lejanas del punto de descarga.

La posterior manipulación en Mathcad 7® permite satisfacer inquietudes del comportamiento de los campos en toda la región elegida para su análisis.

### Calculos para un rayo negativo de mediana intensidad

it = READPRN("c:\it.prn") Datos recuperados del muestreo de la función intensidad de descarga de la figura 4. (13)

L = 2000 [m] Altura tierra nube, longitud de la antena rayo (14)

$\eta = 120 \pi [\Omega]$  Impedancia característica del vacío (15)

Período de tiempo de la descarga (16)

$$T = 250 \cdot 10^{-6} [\text{segundo}] \text{uestras que se toman de la función "it"} \quad (17)$$

Cuanto mayor sea el número de muestras, mayor será la frecuencia máxima a obtener con la Transformada Rápida de Fourier "TRF".

$$\tau = \frac{T}{P} [s] \quad \text{Tiempo entre muestras} \quad (18)$$

$$f_m = \frac{1}{2\tau} [\text{Hz}] \quad \text{Máxima frecuencia a obtener en la TRF} \quad (19)$$

Para el caso en cuestión, con  $P = 100$ ,  $f_m = 400 \text{ KHz}$

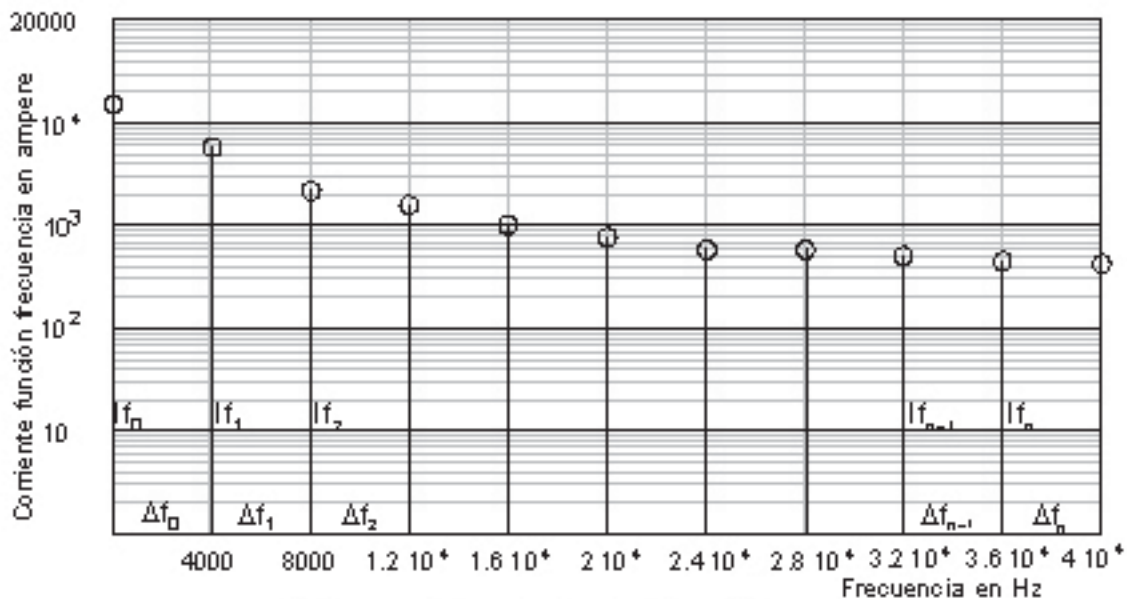
$$\Delta f = \frac{1}{\tau P} [\text{Hz}] \quad \text{Grupo de frecuencias bajas (mínimas) a obtener con la TRF} \quad (20)$$

$$If = \text{cfft}(it) \quad \text{TRF de la función "it"} \quad (21)$$

En la figura 9 se muestra el conjunto de frecuencias  $\Delta f$  con sus correspondientes corrientes  $If$ . Como se mencionó más arriba, para el cálculo de campos se asigna a cada corriente  $If_n$  (con magnitud y fase), su apropiada frecuencia  $\Delta f_n$

Esta asignación tiene sentido para el cálculo de campos, dado que se simula a la antena rayo excitada con la suma de generadores de corriente, en donde cada uno de ellos tiene la forma

$$If_n = |If_n| \sin(2\pi \Delta f_n t + \phi_n)$$

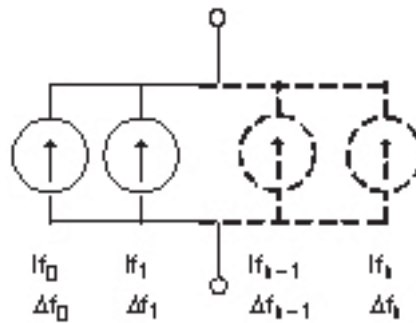


Aplicando los conceptos anteriores a las ecuaciones (10), (11) y (12), e introducidas en Mathcad®, se obtienen las expresiones de campos de la siguiente forma:

$$H\phi_r = \sum_{n=0}^N -i \frac{1}{4\pi} If_n \left[ \frac{e^{-i\beta_n D1}}{Y} + \frac{e^{-i\beta_n D2}}{Y} - 2\cos(\beta_n L) \frac{e^{-i\beta_n d}}{Y} \right] \quad (22)$$

$$EZ_r = \sum_{n=0}^N -i 30 I_n^* \left[ \frac{e^{-\gamma \beta_n D1}}{D1_r} + \frac{e^{-\gamma \beta_n D2}}{D2_r} - 2 \cos(\beta_n L) \frac{e^{-\gamma \beta_n d}}{d_r} \right] \quad (23)$$

$$EY_r = \sum_{n=0}^N -i 30 I_n^* \left[ \frac{Z - L e^{-\gamma \beta_n D1}}{Y D1_r} + \frac{Z + L e^{-\gamma \beta_n D2}}{Y D2_r} - \frac{2Z \cos(\beta_n L) e^{-\gamma \beta_n d}}{Y d_r} \right] \quad (24)$$



$$I_n = |I_n| \sin(2 \pi \Delta f_n t + \phi_n)$$

Modelo de fuentes de corrientes para la excitación de la antena rayo

Fig.10

Fijando valores de Z, que representa la altura a la que se desea conocer los campos, y haciendo variar Y entre distancias cercanas a la descarga y muy lejanas a la misma, mediante las ecuaciones (22), (23) y (24), se obtienen gráficas en escala logarítmica de los campos en función de la distancia como los de la figuras 11, que son los campos eléctricos Ez y Ey.

En la figura 12 el campo Magnético H<sub>φ</sub>

En estos casos se ha fijado Z = 2 metros que es la altura de un hombre, e Y = 10...400000 [m].

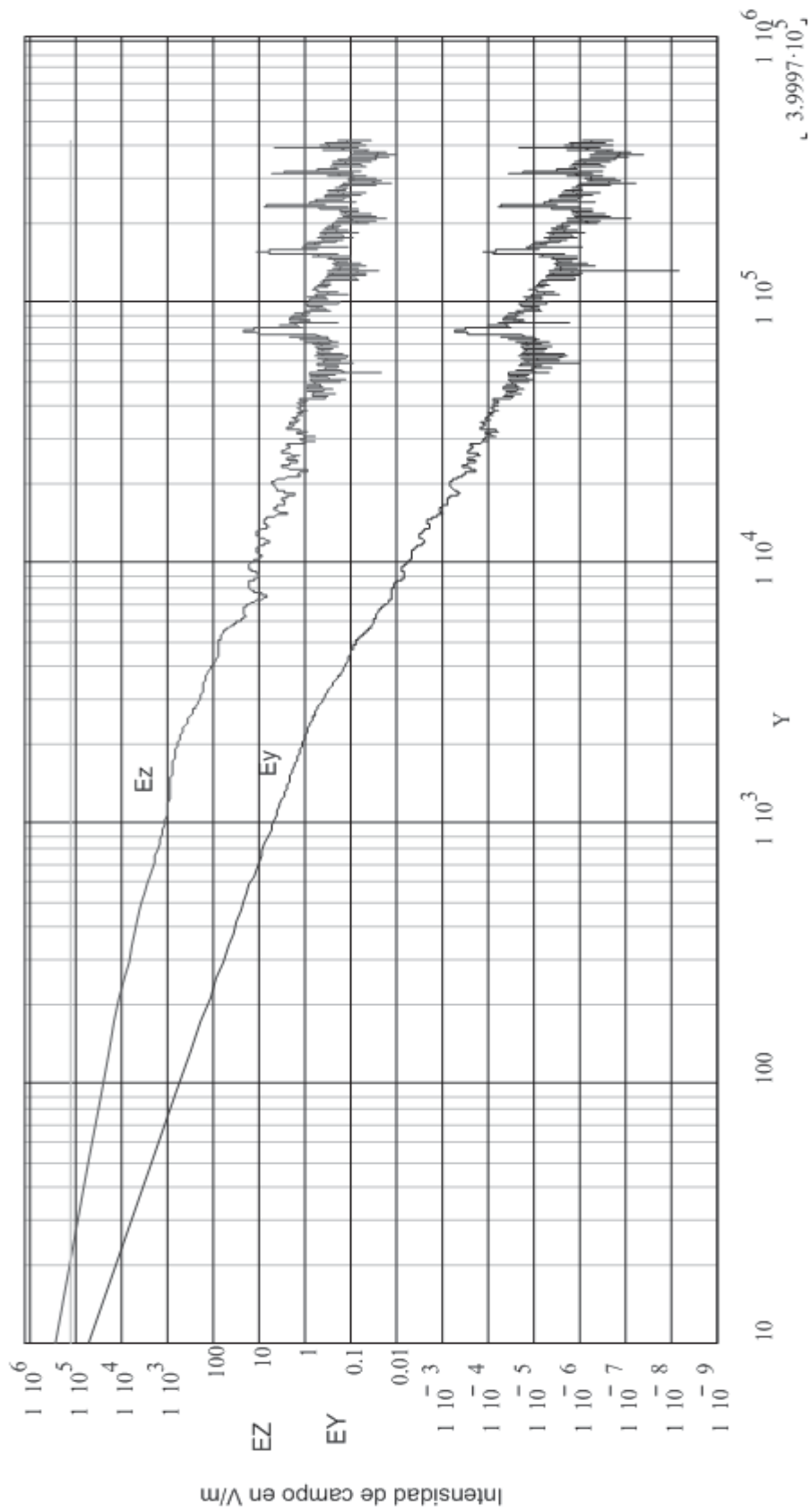


Fig. 11 Campos Eléctricos Ez, Ey función de la distancia en metro

Intensidad de campo en V/m

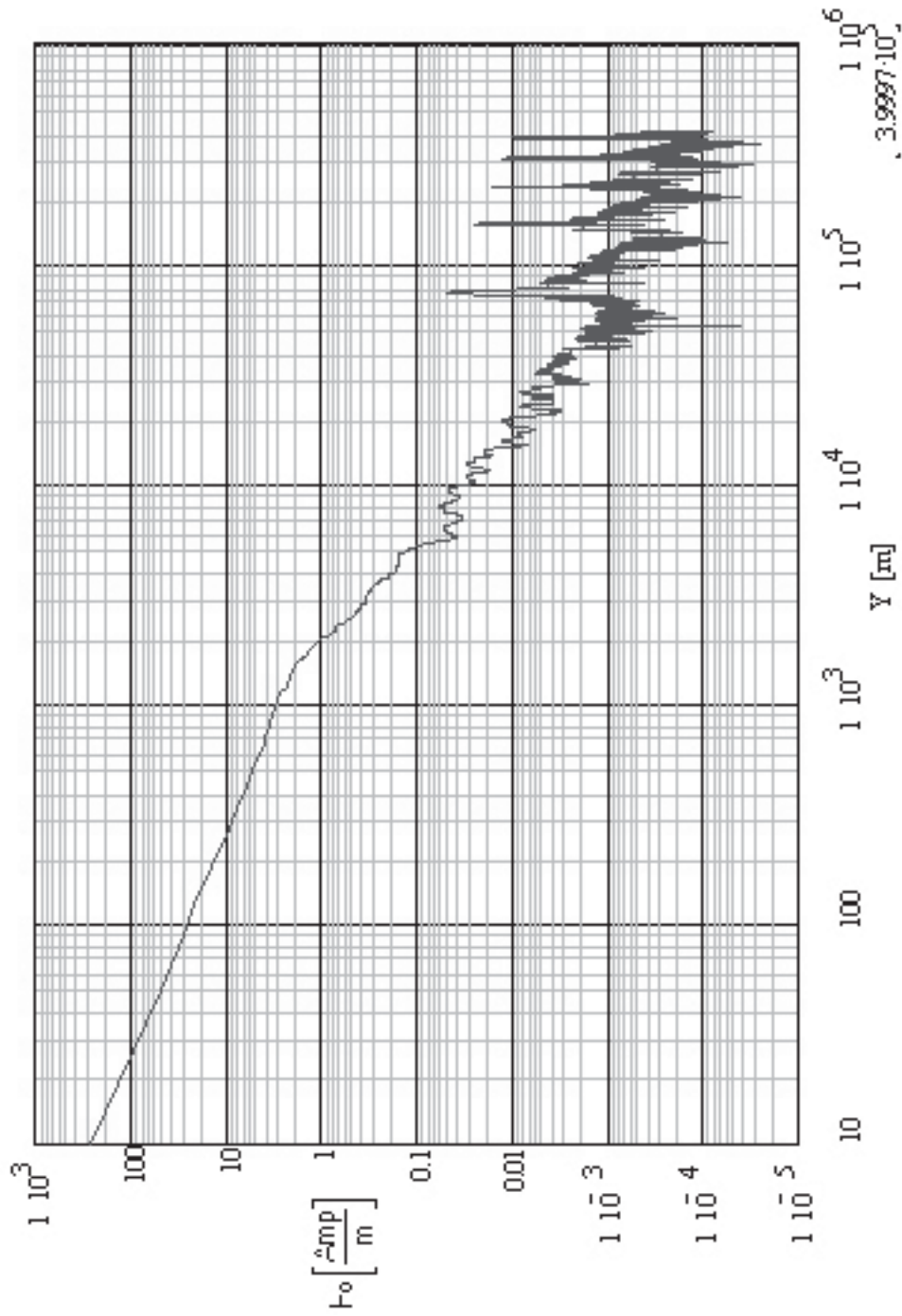


Fig.12 Campo Magnético H, función de la distancia en metro

Un procedimiento similar al anterior se hace para  $Z=2$  metros e  $Y=1..10$  metros en escala lineal tal como se muestra en las figuras 13 y 14.

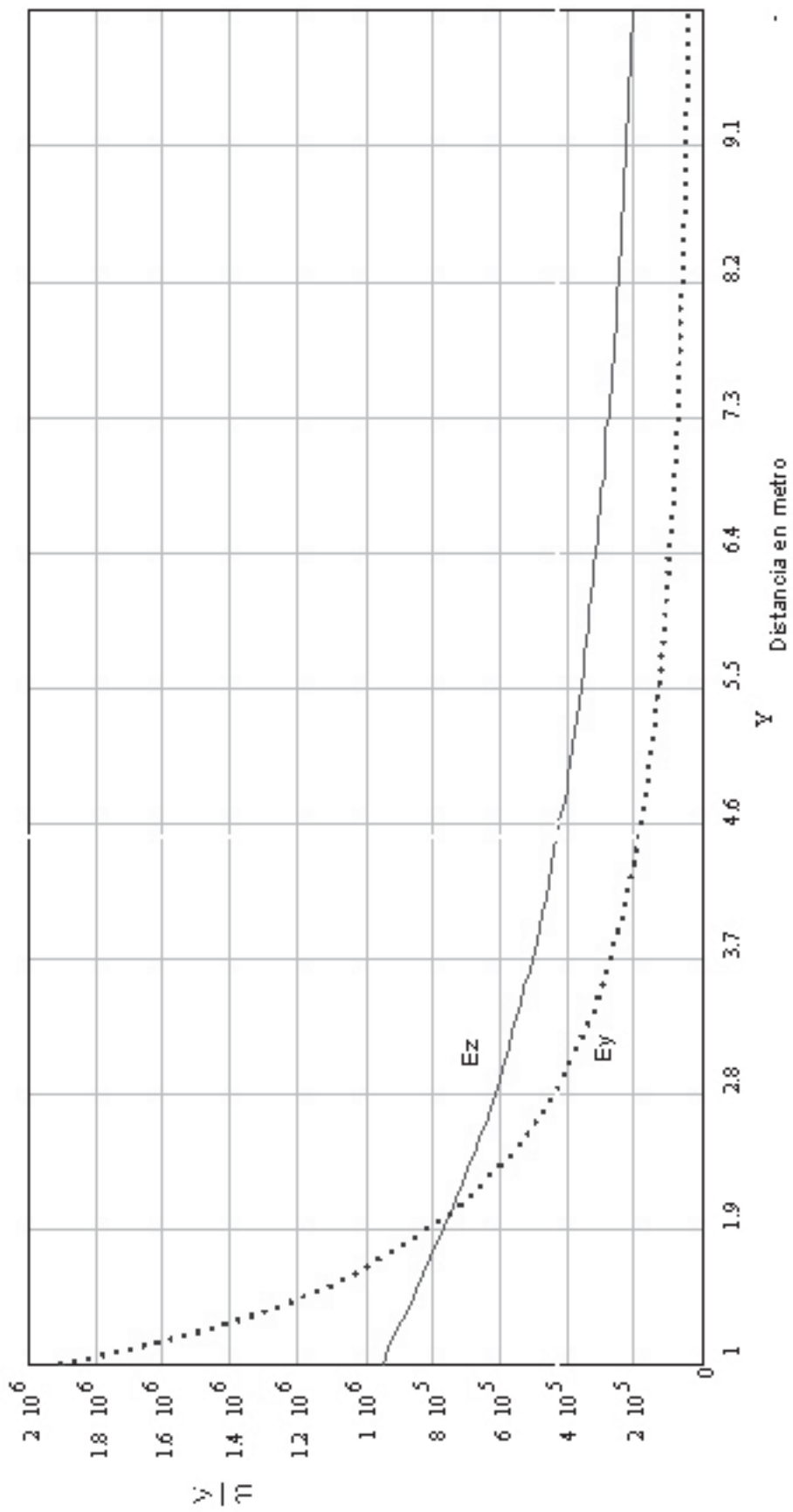


Fig. 13 Campos Eléctricos Ez y Ey muy cercanos al rayo

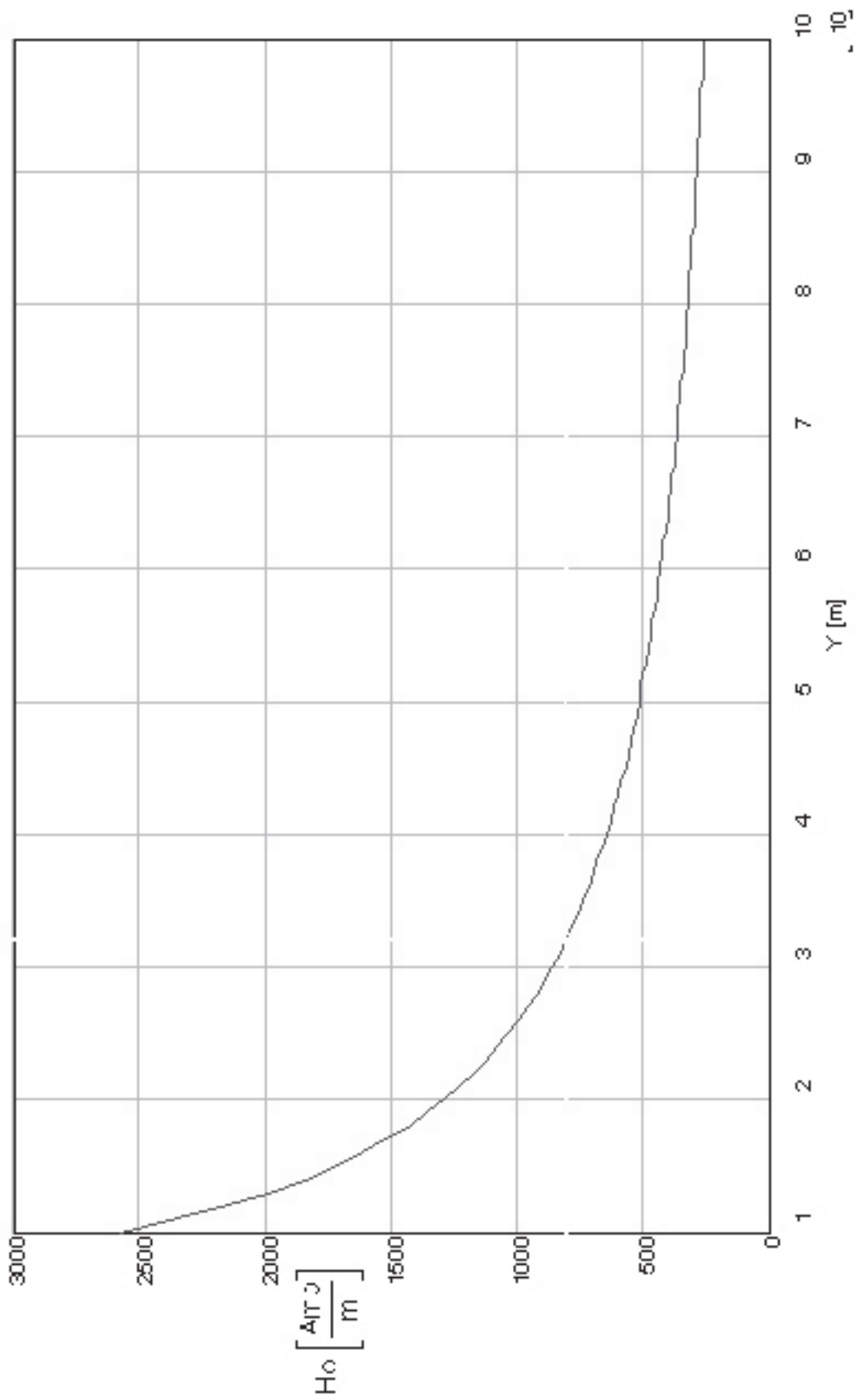


Fig. 14 Campo Magnético H muy cercano al rayo

## Observaciones de las diferentes regiones de campos

En las figuras 11 a 14 se observan dos grandes regiones:

- Región de campo cercano
- Región de campo lejano

Región de Campo Cercano

La región de campo cercano está definida como la comprendida entre el evento y hasta una distancia de  $\lambda/2\pi$ . Dado que la frecuencia mínima que se ha tomado para el desarrollo del tema en cuestión es:  $\Delta f = 4000 \text{ Hz}$ , con  $\lambda = 75000 \text{ [m]}$   $\therefore \lambda/2\pi \cong 12000 \text{ [m]}$ . Una región circundante al rayo de 12 Km de diámetro es definida como Región de Campo Cercano, en donde coexisten campos inducidos y radiantes. En esta región interactúan fuertemente los campos con todos los elementos, principalmente aquellos que son conductores y que pertenecen a la región.

Como dato ilustrativo, un rayo positivo con una frecuencia mínima de 400 Hz, tiene una región de campo cercano de: 120 Km de diámetro. Por la intensidad del rayo positivo, y por la enorme cobertura del "campo cercano" afianza el concepto que el rayo positivo es uno de los responsable de incendios en bosques.

Obviamente que la zona muy cercana al rayo tiene un interés particular, esto es debido a que se produce en ella enormes valores de intensidad de campo, y que es motivo de estudio para el diseño de protecciones.

Con el mismo concepto anterior, para un rayo negativo de mediana intensidad como el calculado, se define Región de Campo Lejano más allá de los 12 Km, El estudio de esta región tiene importancia en las Telecomunicaciones, fundamentalmente por la generación de altísimos niveles de ruido electromagnético en las frecuencias de HF y, además, es de utilidad el conocimiento de los valores de campo en esta región para el análisis y medición de la ocurrencia de rayos (niveles cerámicos).

## Cálculo de la potencia radiada por el rayo

Tomando valores de intensidad de campo  $E_z$  a una distancia considerable como 400 Km, que puede suponerse que pertenece a la región de campo lejano, es posible calcular el vector de Poynting a esa distancia.

Para aliviar y simplificar los cálculos, se supone que el vector de Poynting es producido por una única frecuencia en el generador (rayo) y que el valor leído de  $E_z$  en la figura 11 también corresponde para este fin, al campo producido por una única frecuencia.

$$\text{Así: } P = \frac{|E_z|^2}{\eta} \quad \text{con: } |E_z| = 500 \cdot 10^{-3} \frac{V}{m} \quad \text{figura 11, } \eta = 120 \pi [\Omega] \quad \text{es: } P = 66 \cdot 10^{-4} [W/m^2]$$

Distancia desde el rayo hasta el punto de medición  $R = 410^5 [m]$

Potencia instantánea desarrollada en el rayo en el tiempo  $T = 250$  microsegundos:

$$W_{\text{rad}} = P \pi R^2 \quad \therefore$$

$$W_{\text{rad}} = 3 \cdot 10^8 [W]$$

## Conclusiones

Por lo visto, el análisis de un rayo comportándose como una antena lineal delgada, agrega un punto de vista adicional al cálculo y a la interpretación de la distribución de los campos producidos por la descarga.

El método usado, permite obtener resultados de campos generalizados en una única acción de cálculo, además, es posible realizar análisis del comportamiento de los campos en cada región, particularizando para cada frecuencia involucrada en la descarga.

Seguramente que, algunos ajustes deben realizarse a fin de aproximar el modelo con los resultados de mediciones en cada punto o región de descargas, y, se debe considerar el agregado de la conductividad y la constante dieléctrica del terreno.

---

Trabajo desarrollado en el Laboratorio de Telecomunicaciones del Departamento de Electricidad, Electrónica y Computación de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la Universidad Nacional de Tucumán.

---

### Referencias

- **Sergei A. Schelkunoff and Harald T. Friis** 1952 *Antennas Theory and Practice*, John Wiley & Sons, Inc.
- **Edward C. Jordan and Keit G. Balmain** 1968 *Electromagnetic Waves and Radiating Systems*, Second Edition, Prentice Hall, Inc.

### Bibliografía

- **Ramo Simon and John R. Whinnery** 1953 *Fields and Waves in Modern Radio*. John Wiley & Sons, Inc
- **Arias Néstor E.** 2001 *Calculating Multi-Element Antennas Using Mathcad®* Applied Microwave & Wireless February 2001
- **Cooray G.V.** 2003 *The Lightning Flash*". ISBN 085296-780-2, IEE Ed., USD99
- **Rühling Falk** 1994 *"Lightning"* Laboratorio de Alta Tensión. Instituto de Ingeniería Eléctrica. FACET, UNT.

### Agradecimiento

El autor agradece al Ing. Ricardo Díaz del Laboratorio de Alta Tensión del Departamento de Electricidad, Electrónica y Computación de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la Universidad Nacional de Tucumán por sus recomendaciones.

### Néstor E. Arias

Ingeniero Electricista Orientación Electrónica Universidad Nacional de Tucumán (1968).

Profesor Titular en las asignaturas Electromagnetismo I y Electromagnetismo II. Responsable del Laboratorio de Telecomunicaciones del Departamento de Electricidad, Electrónica y Computación FACET, UNT.

[narias@herrera.unt.edu.ar](mailto:narias@herrera.unt.edu.ar)