3.1 RESISTENCIA DE RADIACION

La potencia radiada por un radiador elemental cuya longitud tiende a cero y su corriente es constante, medida en el campo lejano, se determina por el producto vectorial de las intensidades del campo eléctrico (V/m) y magnético (I/m).

El producto de estas dos magnitudes $(V \cdot I)$ nos da la potencia radiada por ese radiador en el punto de medida de los campos.

Al desarrollar ese producto, tenemos que para un radiador cuya longitud es muy pequeña en el cual, la distribución de la corriente es constante, la potencia radiada es,

$$P_r = I^2 \times 80\pi^2 \left(\frac{l}{\lambda}\right)^2$$

Esto quiere decir, que para que un producto de dos magnitudes, una de las cuales es I^2, nos dé una potencia, el otro factor debe ser una resistencia. Por eso, el factor

$\left[80\pi^2 \left(\frac{l}{\lambda}\right)^2\right]$ es la resistencia de radiación de un radiador elemental con corriente constante

Por otra parte, la expresión general de la resistencia de radiación de un monopolo de longitud eléctrica H, supuesta una distribución senoidal de la corriente a lo largo del mismo y referida a un vientre de corriente, es:

$$\text{Rrv} = 15\left\{[2+2\cos(b)]\cdot S_1(b)-\cos(b)\cdot S_1(2b)-2sen(b)\cdot S_i(b) + sen(b)\cdot S_i(2b)\right\}$$

$$\text{siendo } b = 2\beta H$$

Los términos S_1 y S_i corresponden a la expresión de una integrales que parecen frecuentemente en los problemas de radiación y existen tablas para hallar sus valores. Se llaman senos y cosenos integrales. No obstante existe una forma sencilla aunque laboriosa de calcular estos términos, mediante las siguientes series:

Seno integral .- $S_i(x) = x - \frac{x^3}{3 \cdot 3!} + \frac{x^5}{5 \cdot 5!} - \frac{x^7}{7 \cdot 7!} + \ldots\ldots..$

$$S_1(x) = \frac{x^2}{2 \cdot 2!} - \frac{x^4}{4 \cdot 4!} + \frac{x^6}{6 \cdot 6!} - \frac{x^8}{8 \cdot 8!} + \ldots\ldots..$$

Con 30 términos (15 positivos y 15 negativos) se consigue una aproximación aceptable

El término S_1 también lo denominan algunos autores como C_{in}

Existe un tercer término que completa el grupo de estos operadores que es coseno integral.

Coseno integral.- $C_i(x) = \ln(x) + C - S_1$

siendo $C = 0'5772157$ la constante de Euler.

Esta formulación se ha determinado por el método llamado " de la f. e. m. inducida".

De todas maneras, la aplicación de esta fórmula es demasiado laboriosa si no se dispone de una buena herramienta de cálculo tipo ordenador .

Para fines prácticos y con buena aproximación se puede operar con las siguiente simplificación, en la se se elude el empleo de los senos y cosenos integrales:

Monopolo de altura H > 0'15 λ

$$R_{rv} = 15[\cos(2\beta H)\cdot\left(\ln\frac{2H}{\lambda} + 1'722\right) - \frac{\pi}{2} sen(2\beta H) + 4'83 + 2\ln\frac{2H}{\lambda}] \text{ ohmios}$$

Hallada la resistencia de radiación en el vientre de corriente, tendremos que en el punto de alimentación R_{ra} valdrá,

$$R_{ra} = \frac{R_{rv}}{sen^2 \beta H} \text{ ohmios}$$

Para un monopolo de altura H< 0'15 λ, si consideramos su altura efectiva H_e , dado que en estas condiciones, la corriente en el radiador se distribuye de forma constante como en un dipolo de Hertz, la resistencia de radiación en el punto de alimentación es,

$$R_{ra} = 1600\left(\frac{H_e}{\lambda}\right)^2 \text{ ohmios}$$

Si queremos ser más precisos, en lugar de 160 utilizaremos su verdadero valor de $160\pi^2$.

Lógicamente esta resistencia R_{ra} es la componente resistiva de la impedancia de entrada de la antena conocida más adelante como R_e

Estas dos últimas fórmulas se deben emplear con precaución ya que se basan en una distribución constante de la corriente en la antena y eso sólo ocurre en radiadores elementales, antenas muy cortas respecto a la longitud de onda de trabajo, antenas cortadas a su longitud eficaz y rematadas en sus extremos con una capacidad adecuada o antenas de Hertz. Por esto los resultados obtenidos con estas fórmulas dan un error tanto mayor (hasta un 10 % aproximadamente), cuanto más cercana sea su longitud al valor de 0,2 λ.

Si no consideramos la longitud efectiva y la altura del monopolo es suficientemente corta (aprox. 0'1 λ), la distribución de corriente es prácticamente lineal tomando valores de cero en el extremo del radiador e "Io" en el punto de alimentación. En estas condiciones, y dado que la potencia radiada sería la mitad de la correspondiente con distribución constante de la intensidad, la densidad de potencia se reduce a la cuarta parte y la resistencia de radiación en el punto de alimentación será de:

$$R_{re} = 400\left(\frac{H}{\lambda}\right)^2$$

La resistencia de radiación varía con el cuadrado de la potencia radiada

La figura 1 es una gráfica que nos proporciona la resistencia de radiación de un monopolo de altura H aplicando la fórmula general, referida al vientre de corriente. La resistencia de radiación de dipolo de semilongitud H será el doble de la señalada

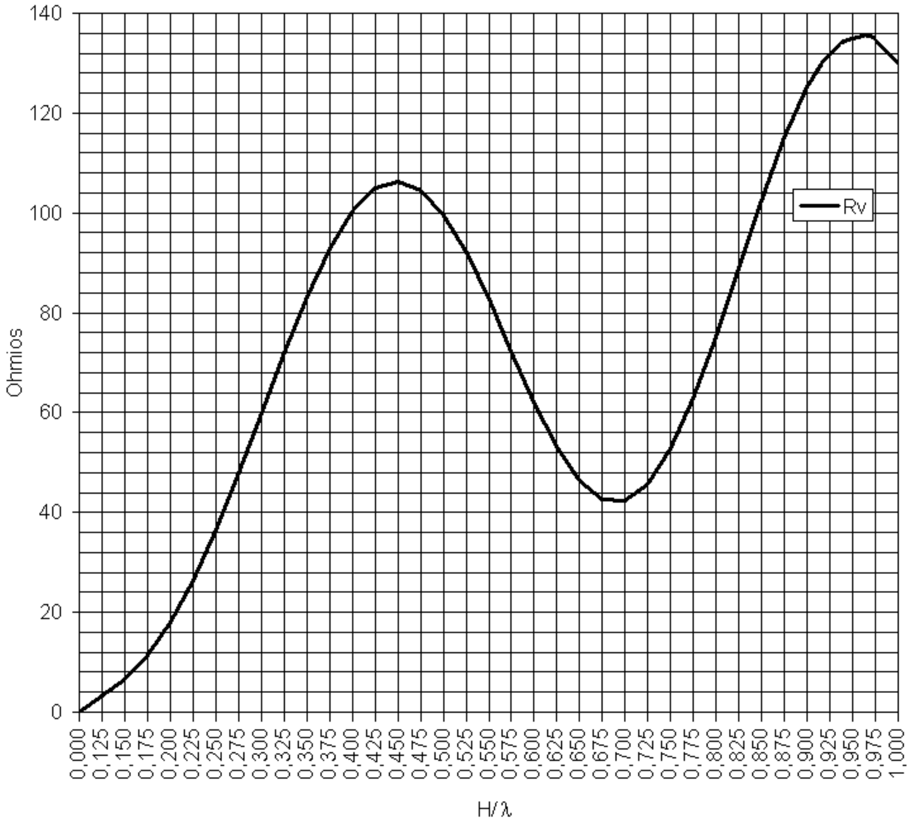

Fig. 1

IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA

La impedancia característica de un punto cualquiera de un monopolo delgado es:

$$Z_{op} = 60 \ln\left(\frac{2r}{a}\right) \text{ ohmios}$$

Siendo:

r = distancia del punto considerado al punto de alimentación del monopolo

a = radio del conductor ("r " y "a " en las mismas unidades)

La Impedancia característica media de un monopolo viene dada aproximadamente por:

$$Z_{om} = 60\left[\ln\left(\frac{2H_o}{a}\right) - 1\right] \text{ ohmios}$$

siendo:

H_0 = Semilongitud "física" del dipolo

a = radio del conductor (H_0 y "a " en las mismas unidades).

El valor más próximo al real viene dado por la siguiente expresion general:

$$Z_o = 60\left(\ln\frac{H_o}{a} - 1 - \frac{1}{2}\ln\frac{2H_o}{\lambda}\right) \text{ ohmios}$$

FACTOR DE ATENUACION

Viene determinado por:

$$\alpha = \frac{R_{rv}}{HZ_o} \text{ nepers}$$

siendo:

R_{rv} = Resistencia de radiación en el vientre de corriente (fórmula siguiente)

H = Altura del monopolo o semilongitud del dipolo en metros.

La atenuación total de una antena dipolo o monopolo será

$$\alpha H = \frac{R_{rv}}{Z_o} \text{ nepers.}$$

IMPEDANCIA DE ENTRADA

La impedancia de entrada en los terminales de alimentación de una antena, calculada como si se tratara de una línea de transmisión abierta, es un valor complejo de la forma $R_e \pm jX_e$, cuya parte real, R_e es la resistencia de entrada que viene dada por:

$$R_e = \frac{Z_o}{2}\left[\frac{senh(2\alpha H)}{\cosh^2(\alpha H) - \cos^2(\beta H)}\right] \text{ohmios}$$

o bien por:

$$R_e = Z_o\left[\frac{senh(2\alpha H)}{\cosh(2\alpha H) - \cos(2\beta H)}\right] \text{ohmios}$$

Esta R_e se corresponde con la resistencia de radiación referida al punto de alimentación de la antena cuando esta se comporta como un circuito resonante.

Asimismo, la parte imaginaria de esta impedancia compleja de entrada es la reactancia de entrada que se determina por:

$$X_e = \frac{Z_o}{2}\left[\frac{-sen(2\beta H)}{\cosh^2(\alpha H) - \cos^2(\beta H)}\right] \text{ohmios}$$

o bien por

$$X_e = Z_o\left[\frac{-senh(2\beta H)}{\cosh(2\alpha H) - \cos(2\beta H)}\right] \text{ohmios}$$

Recordemos que αH es la atenuación en nepers

Cuando X_e tiene signo negativo, estamos ante una reactancia capacitiva. En caso contrario, es inductiva. El módulo es:

$$Z_e = \sqrt{R_e^2 + X_e^2} \text{ ohmios}$$

Que también se puede determinar directamente por

$$Z_e = Z_o \frac{\sqrt{senh^2(2\alpha H) + sen^2(2\beta H)}}{\cosh(2\alpha H) - \cos(2\beta H)} \text{ ohmios}$$

Estos valores difieren algo de los obtenidos por el método de la f. e. m. inducida que proporciona resultados puramente teóricos. En cambio, los obtenidos de esta forma se acercan más a los obtenidos por otros medios y por los medidos. En definitiva, son más prácticos, por lo que muchos autores prefieren este procedimiento de cálculo.

DIRECTIVIDAD

La ganancia directiva máxima de un dipolo en función de su resistencia de radiación en el vientre de corriente y su semilongitud eléctrica H es, en el supuesto de que la potencia radiada sea 1 vatio y medida la intensidad de campo a una distancia unidad, en la dirección del eje 90º-180º (perpendicular al eje del dipolo)

$$G_{dmáx} = \frac{120}{R_{rv}}[1 - \cos(\beta H)]^2$$

Esta fórmula es válida también para el monopolo

Se puede construir una tabla como la 3.12.1 en la que se muestran los valores de la Gdmáx para dipolos de diferentes semilongitudes relacionadas con la longitud de onda (H/λ) y en el plano perpendicular al eje de la antena, que correspondería al eje 90-180 grados del diagrama de radiación (θ = 90º)

En la figura 3.4 se ha construido la gráfica correspondiente a los valores obtenidos en la tabla 3.12.1

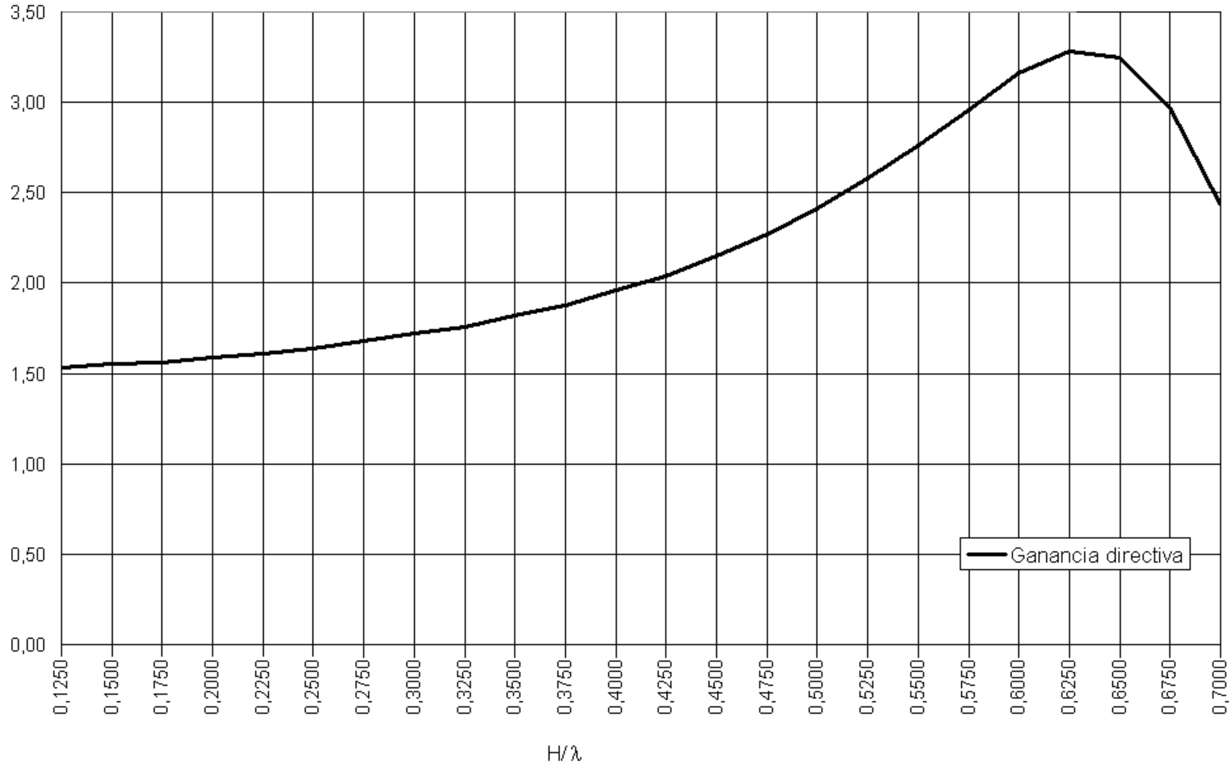

Fig. 3.4

La ganancia directiva de un monopolo de la misma altura que la semilongitud H del dipolo, será el doble en cada uno de los valores dado que su resistencia de radiación es la mitad.

Obsérvese la coincidencia del valor de 1’64 para un dipolo de media onda (semilongitud de 0’25 λ) también hallado con otros razonamientos.

Asimismo, podemos determinar que la semilongitud con mayor ganancia, es la de 0’625 λ con un valor de 3’13 y que corresponde a 5/8 de λ (dipolo de 1’25λ de longitud total).

Se puede ver que para valores de H/λ superiores a 0’75 (longitud total de 1’5λ), parece que la ganancia directiva disminuye. Esto es debido a que el lóbulo de radiación se aleja de dicho eje, dado que la fórmula empleada es la reseñada con anterioridad y que determina la Directividad en el eje 90-180.

En estas condiciones, para ilustrar este tema hemos construido la tabla 3.12.1 aplicando la citada fórmula, para distintos valores de H/λ.

Tabla 3.12.1

Ganancia directiva de un dipolo de semilongitud H

H/λ	$Gd_{máx}$
0.125	0.68
0.150	0.86
0.175	1.1
0.2	1.33
0.225	1.51
0.250	1.64
0.275	1.74
0.3	**1.82**

H/λ	$Gd_{máx}$
0.325	1.88
0.350	1.94
0.375	1.99
0.4	2.06
0.425	2.13
0.450	2.22
0.475	2.32
0.5	**2.44**

H/λ	$Gd_{máx}$
0.525	2.57
0.550	2.73
0.575	2.89
0.6	3.04
0.625	3.13
0.650	3.09
0.675	2.83
0.7	**2.34**

H/λ	**$Gd_{máx}$**
0.725	**1.72**
0.750	**1.13**
0.775	**0.68**
0.8	**0.39**
0.825	**0.21**
0.850	**0.10**
0.875	**0.05**
0.9	**0.02**

Una expresión general para construir la gráfica de directividad de un monopolo de altura H, se emplea la fórmula de cálculo de la intensidad de campo eléctrico (potencia radiada = 1 W, a una distancia r = 1)

$$E = \frac{60}{R_{rv}} \left[\frac{\cos(\beta H) - \cos(\beta H \cos\theta)}{sen\theta} \right]$$

Ahora bien, como para dibujar la gráfica no nos interesan los valores absolutos del campo sino su distribución relativa, solamente emplearemos el segundo factor de la fórmula denominado “factor de campo,” $F_{(\theta)}$.

Armando García

EA5ND