4. Monopolos cortos

4.1 Concepto y particularidades

Se denomina monopolo corto al monopolo cuya altura es tan pequeña que su distribución de corriente varía prácticamente de forma lineal. En otros radiadores, aunque la altura sea inferior a un cuarto de onda, la función senoidal de la distribución de la corriente es más evidente y los cálculos de sus características eléctricas no admiten las simplificaciones que, por el contrario, sí se toleran en los radiadores cortos, dado que las desviaciones de los valores considerados *lineales* respecto a los reales podrían ser intolerables. De esta manera, en un monopolo de altura igual a 30º la distribución de la corriente es *lineal*, mientras que en un monopolo con una altura de 60º, aunque menor de un cuarto de λ, no hay una distribución lineal.

De todas formas, la condición de linealidad de este tramo de función senoidal es convencional, orientada a la simplificación de operaciones y asumido cierto grado de error en los resultados obtenidos comparados con los verdaderos.

En la figura 4.1 se han esquematizado los valores significativos para errores máximos asumidos del 2% y del 5% en dichos valores.

Se ha exagerado la curva para mostrar el detalle de la desviación entre las líneas recta y curva.

En la figura de la derecha vemos que la línea recta que linealiza la senoide es la secante que corta a la curva en los 24,3º grados para un 2% de desviación máxima, prolongándose hasta los 31,3º para un error de +2%.

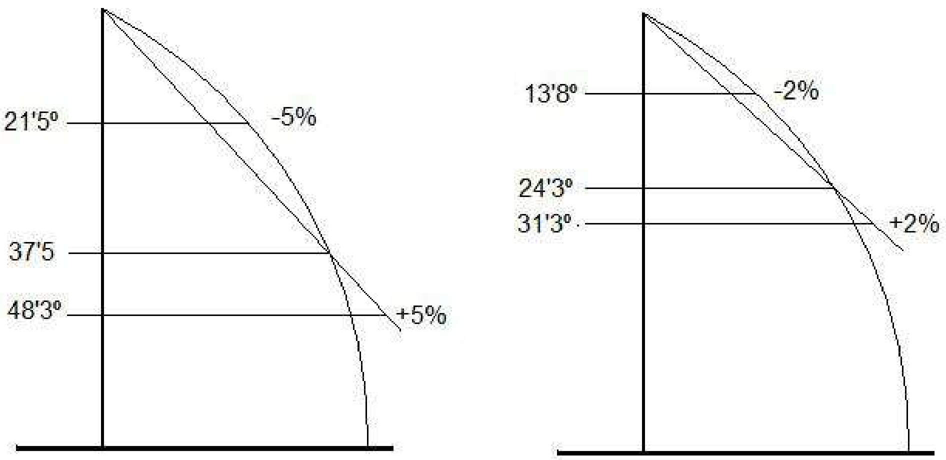

Fig. 4.1

Si asumimos un error máximo del 5%, la linealidad de la curva alcanza los 48º.

Estos datos se hallan aplicando el teorema del valor medio.

Hay autores que consideran que la corriente tiene una distribución lineal hasta los 36º (0,1 λ). Podemos asumir este criterio, ya que solo supera ligeramente la asunción del 2% de error máximo.

Por otra parte, hay autores que admiten la linealidad hasta los 45º (0,125 λ) pero creemos que en este caso se asume demasiada inexactitud.

Aplicando el mismo procedimiento a partir de los 90º, empleando la función coseno y con un error del 2%, podemos asumir que la corriente es constante en el tramo de 74º hasta 90º (26º).

Nosotros asumiremos el error aproximado del 2% y afirmaremos que la distribución de la corriente en un monopolo con una altura de 36º (0,1 λ) es lineal. Además, conocemos que su valor en el tope siempre es nulo [sen (0º) = 0].

Podemos formar una figura geométrica como la de la figura 4.2.

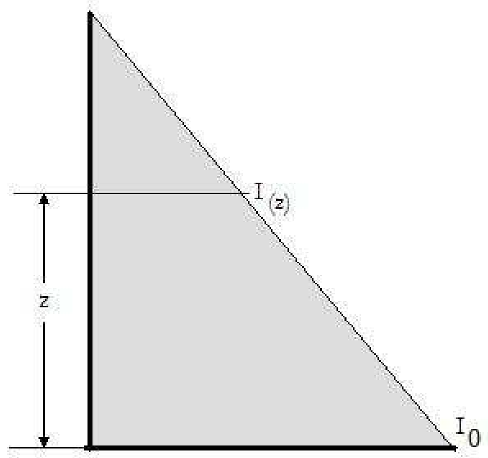

Fig. 4.2

En ella se observa que la envolvente de los valores puntuales de la corriente es una línea que se extiende desde un valor nulo en el tope del radiador hasta un valor I_0 en la base. Esta línea, junto con la altura y la corriente de la base, encierra un área triangular que podríamos expresar en amperios-grado y que es directamente proporcional a la potencia radiada.

Determinado ya el concepto de distribución lineal de la corriente en un monopolo corto, vamos a estudiarlo.

Partiendo del valor de la resistencia de radiación de un dipolo elemental en el que la corriente es constante, aquí determinamos que la resistencia de radiación es:

$$Rr = 40\pi^2 \left(\frac{H}{\lambda} \right)^2 \approx 400 \left(\frac{H}{\lambda} \right)^2$$

En esta ocasión, no aparece el concepto de altura efectiva H_e aunque sí está presente, ya que se refleja por su valor $H/2$.

Considerando al radiador como una línea de transmisión corta y abierta en el extremo, sabemos que su impedancia de entrada es una reactancia capacitiva de valor:

$$X_e = \frac{Z_0}{\tan(\beta H)}$$

Z_0 viene determinada por:

$$Z_0 = 60\left(\ln\frac{2H}{a} - 1\right)$$

siendo H la altura del monopolo y a, su radio en las mismas unidades que H.

Conociendo la impedancia de entrada R_b y la impedancia característica podremos determinar el resto de parámetros tal como hemos visto en el ejemplo del capítulo anterior.

En el apéndice se ha incluido el Anexo III con una gráfica en la que se puede determinar con bastante exactitud el valor de R_b de un monopolo hasta 0,25 λ.

4.1.1 Capacidades

Dado el carácter lineal de la distribución de la corriente, muchos ingenieros suelen calcular los parámetros de un radiador corto basándose en la capacidad estática del mismo de la forma que detallaremos a continuación.

Los estudios de electrostática demuestran que la capacidad por unidad de longitud de un conductor vertical sobre un plano de tierra viene dada por:

$$Cv = \frac{1}{60v_0 \ln\left(\frac{1{,}15h}{d}\right)} \text{ F/m}$$

Esta fórmula se suele transformar para hacerla más práctica y se convierte en:

$$Cv \approx \frac{24{,}16}{\log\left(\frac{1{,}15h}{d}\right)} \text{ ρF/m},$$

donde h es la altura del hilo o radiador y d su diámetro. Tanto h como d deben expresarse en las mismas unidades.

De la misma forma que hemos determinado la capacidad por unidad de longitud de un conductor vertical, la capacidad de un hilo horizontal sobre el plano de tierra es:

$$Ch = \frac{24{,}16}{\log\left(\frac{4h}{d}\right)}\ \rho\mathrm{F/m.}$$

Algunos autores determinan la capacidad de un hilo vertical aplicando esta última fórmula, pero fijando el valor de *h* a la mitad de la altura del conductor vertical (altura media).

Con el mismo procedimiento calculan la capacidad de un hilo inclinado frente a tierra, tomando como *h* la altura media de sus extremos a tierra y considerando además el ángulo formado por el hilo y la vertical, o tomando como *h* la altura de la parte superior del hilo y el ángulo formado con la horizontal.

En el capítulo 2 se ha tratado este tema con algo más de detalle.

4.1.2 Impedancia característica

La impedancia característica de ese conductor, según el método aproximado de Howe, además de con la formulación anteriormente vista, también se determina por:

$$Z_0 = \frac{1}{v_0 C}\ \Omega/m$$

para $v_0 = 3 \times 10^8\ m/s$

$C = F/m$

O también,

$Z_0 = \frac{10.000}{3C}\Omega/\mathrm{m}$ si expresamos C en $\rho F/m$.

Esta última fórmula es válida para cualquier conductor cuando nos basamos en su capacidad electrostática.

Debemos observar que la capacidad utilizada es la que se calcula por unidad de longitud, por lo que Z_0 también será la impedancia característica por unidad de longitud. En este caso será el valor medio de dicha impedancia, que es el que hemos usado normalmente.

Veamos un ejemplo de aplicación de lo visto hasta ahora:

Tenemos un mástil de sección circular de 8,6 *m* de altura y un diámetro de 50 *mm* y queremos conocer sus parámetros para radiar 3,7 *MHz*.

$$\lambda = \frac{300}{3{,}7} = 81{,}08\,m$$

$$H = H_0 \times 1{,}05 = 9{,}03 \approx 9\,m$$

$$\beta H = \frac{360 \times 9}{81{,}08} = 39{,}96\,\text{grados}$$

$$Cv = \frac{24{,}15}{\log_{10}\left(\frac{1{,}15 \times 9}{0{,}05}\right)} \times 9 = 93{,}8 \approx 94\,\rho\text{F}$$

El valor medio de *Cv* es:

$$Cv_1 = \frac{94}{9} = 10{,}4\,\rho\text{F/m}$$

$$Z_0 = \frac{10.000}{3 \times 10{,}4} = 320{,}5 \approx 320\,\Omega$$

$$Rb = 400\left(\frac{9}{81{,}08}\right)^2 = 4{,}93 \approx 5\,\Omega$$

$$X_e = \frac{320}{\tan(39{,}96)} = -381{,}89 \approx -382\,\Omega$$

Para compensar esta reactancia tendremos que insertar en la entrada una inducción en serie, que con un *Q* asumido de 200, ofrecerá una resistencia adicional de:

$$R_l = \frac{382}{200} = 1{,}91 \approx 2\,\Omega$$

Si además suponemos una resistencia de pérdidas en el plano de tierra *Rg* de 13 Ω, la resistencia de entrada será:

$$R_e = Rb + Rg + Rl = 20\,\Omega$$

El rendimiento, a su vez, será:

$$\eta = \frac{5 \times 100}{20} = 25\%.$$

Aquí hemos resumido otros conceptos ya mencionados en capítulos anteriores.

4.2 Monopolos cargados

En el ejemplo anterior hemos visto que el radiador de 8,6 *m* de altura tenía un rendimiento muy bajo, ya que solo era utilizable el 25% de la potencia suministrada. Por esta razón, es preciso aumentar dicho rendimiento.

Solo tenemos dos puntos en los que se puede actuar: aumentar la resistencia de radiación y/o disminuir las pérdidas introducidas por el plano de tierra.

La resistencia de pérdidas en el plano de tierra se consigue aumentando la conductividad del suelo como veremos posteriormente.

En cuanto a la resistencia de radiación, deberemos aumentar la corriente alargando eléctricamente el radiador y eso se logra principalmente de dos formas: aumentando la capacidad estática del radiador o insertando una inducción que alargue eléctricamente el mismo.

Vamos a estudiar los dos procedimientos, pero antes debemos tomar una decisión.

Podemos ajustar los parámetros de la antena hasta llevarla a la resonancia o por el contrario, *reservarnos* algo de reactancia capacitiva en la entrada para después, con una ligera acción de ajuste adicional, poder controlar la adaptación de la antena como carga a la línea de alimentación y al generador.

4.2.1 Carga inductiva

Consiste en la inclusión de una bobina en serie con el radiador, cuya reactancia inductiva compense la reactancia capacitiva presente en la base de dicho radiador.

El efecto de la inclusión de una bobina en el radiador depende de dónde esté situada.

Una bobina situada en la base del monopolo simplemente compensa o disminuye su reactancia capacitiva, manteniendo intactas el resto de las características del radiador.

Si la bobina se inserta en un punto del monopolo diferente de la entrada, el monopolo variará sus características de radiación, ya que se va a modificar la distribución de corriente en el mismo.

Analicemos la figura 4.3 con un ejemplo.

En a) tenemos un monopolo de altura $\lambda/4$ que es resonante y nos servirá de referencia. La intensidad en la base será la máxima y la normalizaremos a un valor de un amperio ya que $\lambda/4 = 90º$ y sen(90º) = 1.

En *b*) tenemos un monopolo corto de 60º de altura. La intensidad en la base comparándola con a), valdrá:

$$I_b = I_0 sen60º = 0{,}866 \text{ A}$$