Monopolos cortos

Cuando la longitud de un radiador monopolo resulta corta (<λ/4 o sus múltiplos impares) para la frecuencia de trabajo, presenta en sus terminales de entrada una reactancia capacitiva, cuyo valor se puede determinar según hemos visto en los apartados 3.10 y 3.11.

Ahora bien. Considerando a la antena como una línea de transmisión con extremo abierto (recurso que simplifica bastante los cálculos en determinadas condiciones) y de longitud H menor de λ/4, la reactancia que presenta en la entrada, es

$$Xe = -j\frac{Zo}{Tg(\beta H)}$$

La cual, tiene carácter capacitivo.

Esto hará que en la entrada, la antena presente una impedancia de valor complejo compuesta de resistencia y reactancia. Para conseguir la resonancia, habrá que convertir el monopolo en un radiador con una parte física y otra virtual cuyo conjunto alcance la de longitud eléctrica de λ/4 y no presente reactancia en los terminales de entrada.

Existen dos métodos para anular esta reactancia.

Uno de ellos consiste en compensar la reactancia capacitiva de la entrada, añadiendo en serie una inductancia que presente la misma reactancia pero inductiva, que al tener signo contrario, la anulará.

Al carecer la entrada del monopolo de reactancia, presentando sólo una resistencia pura, éste, estará en resonancia con la frecuencia de trabajo. Sólo nos faltará adaptar la parte resistiva, que será de poco valor, a la impedancia normalizada de 50 ohmios de la alimentación para conseguir que la antena absorba la totalidad de la potencia suministrada.

Dado que la inclusión de la bobina no modifica la distribución de corriente (sólo aumenta la intensidad), tampoco se modifica el resto de características como la directividad, la resistencia de radiación, etc.

La figura 1 lo explica gráficamente

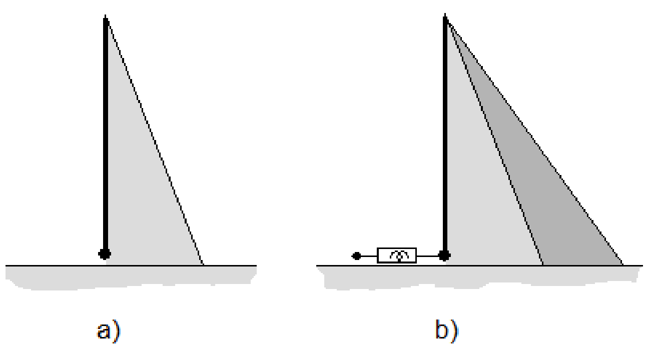

Fig. 1

Ahora bien la presencia de la bobina significa la aparición de otra resistencia de pérdidas introducida por el efecto piel del conductor y que habrá que sumar al resto de resistencias de pérdidas y a la resistencia de radiación, para determinar el valor de la intensidad de la corriente en la entrada y por lo tanto el rendimiento del sistema.

La potencia radiada será la suministrada, menos la disipada en las resistencias de pérdidas; o sea, la disipada en la resistencia de radiación.

Si la bobina se inserta en un punto del monopolo diferente de la entrada, la bobina se comporta de forma diferente, ya que aumenta la longitud eléctrica del radiador y si la inductancia es de suficiente valor, anulará la reactancia presentada en la entrada, produciéndose la resonancia del sistema.

En estas condiciones, desde el punto de vista eléctrico, consideraremos tres sectores en el radiador.

El tramo A, entre la entrada y la base de la bobina
El tramo B, longitud equivalente de radiador, introducida por la bobina, y
El tramo C, resto de radiador, por encima de la bobina.
La figura 2 ilustra gráficamente lo expuesto.

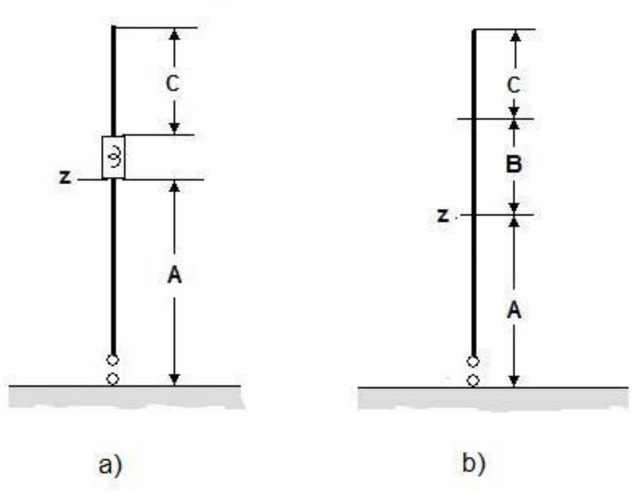

Fig 2

En a) vemos el radiador seccionado en dos tramos para insertar la bobina en el punto “z”
En b) vemos el equivalente eléctrico del sistema con los tres tramos mencionados anteriormente.

Analizemos esta situación:

El tramo A por analogía con una línea de transmisión se puede considerar un línea menor de $\lambda/4$ acabada en su extremo (parte inferior de la bobina) con una reactancia capacitiva formada por otra línea corta (B+C) abierta en su extremo.

La reactancia de entrada será,

$$Xe = Zo\frac{Zo\tan(\beta A) + Xz}{Zo - Xz\tan(\beta A)}$$

En resonancia, Xe valdrá cero y entonces, despejando, podemos determinar la reactancia en el punto “z”, Xz.

$$Xz = -jZo\tan(\beta A)$$

La reactancia presentada por el tramo C, será

$$Xc = -j\frac{Zo}{\tan(\beta C)}$$

Que debe ser la misma que presenta en el punto Z los tramos B+C.

La reactancia de la bobina Xb será la diferencia de Xz y Xc

$$Xb = -jZo\tan(\beta A) + j\frac{Zo}{\tan(\beta C)}$$

Cuanto más cerca del tope se inserte la bobina, menor será la longitud de C y mayor la reactancia que presente (Xc). Por otra parte, aumentará la longitud de A y disminuirá Xz.

Aumentará la diferencia entre Xz y Xc lo que significa un aumento de la reactancia de la bobina y por lo tanto su inducción , tamaño, resistencia de pérdidas y la tensión que debe soportar (Xb*I) lo que necesitará especiales cuidados en su construcción y diseño.

La inserción de la bobina en un punto del radiador, como hemos visto y al contrario que cuando la insertamos en la entrada, sí que afecta a los parámetros de la antena ya que modifica la distribución de la corriente por haber alargado eléctricamente el radiador. Ver la figura 3

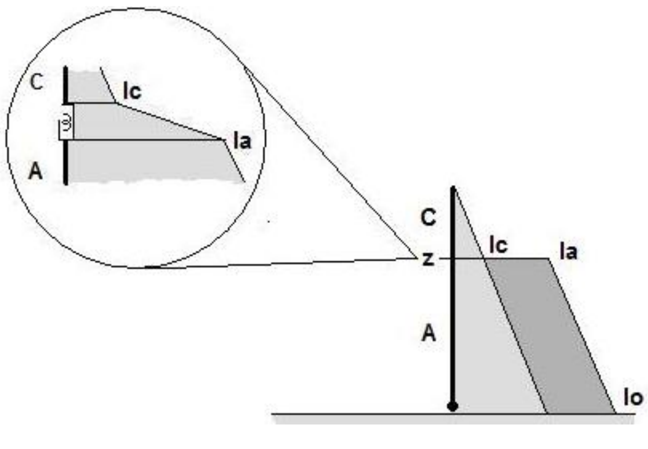

Fig 3

Dado que desde la entrada, se ve un radiador más largo, la intensidad de la base Io aumentará y en A se distribuirá como corresponde a un radiador más largo, hasta el punto “z” encerrando un área prácticamente trapezoidal.

En el tramo C, la distribución será la correspondiente al mismo tramo de un radiador de la longitud eléctrica conseguida.

Esto supone un aumento de la altura efectiva y la resistencia de radiación. El resto de características no se modifican.

La distribución de la corriente a lo largo de la bobina, disminuirá linealmente desde Ia hasta Ic como se ve en el detalle de la figura.

El otro método, consiste en situar una capacidad en el tope del radiador.

Esta capacidad, consiste en cualquier estructura metálica que presenta una capacidad estática, bien en el espacio libre o frente al plano de tierra, que presenta una reactancia capacitiva igual a la del tramo de radiador que falta a continuación del tope del monopolo, para conseguir la longitud de radiador deseada.

. Este es el caso más común y recibe el nombre de "sombrero capacitivo" y si está constituido por una estructura plana circular o por una esfera, los cálculos matemáticos, proporcionan resultados más fáciles de hallar que si se emplean estructuras más complejas, como pude ser los radiales horizontales o inclinados (umbrellas) o mallas de hilos de composición más complicada.

Estudiemos el sistema compuesto por un radiador vertical corto, de radio "a" y altura H. A este sistema radiante le falta una porción de conductor para conseguir la resonancia a la frecuencia de trabajo, a la cual le llamaremos H'.

Esta porción que falta, H', considerada como línea de transmisión abierta, debería presentar en el extremo de radiador una impedancia característica Zo, igual a la de dicho radiador para mantener la uniformidad del sistema así como una reactancia capacitiva (la que presenta una línea de transmisión abierta, de longitud menor de un cuarto de onda) y que viene dada por

$$Xc = -j\frac{Zo}{\tan(\beta H')} \quad Xc = \frac{Zo}{\tan(\beta H')}$$

Vamos a añadir al extremo del radiador un disco conductor de un radio tal, que cumpla con las mismas características eléctricas que H'.

Ver figura: 4

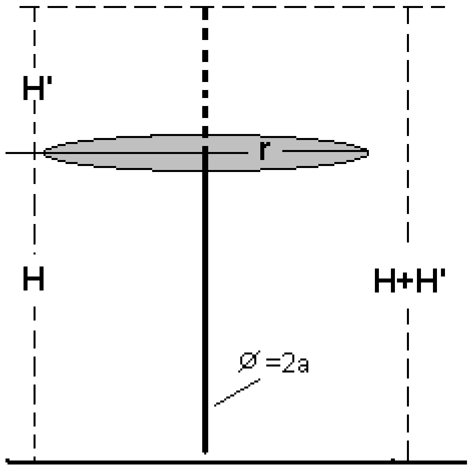

Fig 4

Aquí vemos el caso de un monopolo cuya longitud eléctrica H ha sido alargada virtualmente, otra longitud H', hasta conseguir una longitud eléctrica total de H+H', con la inclusión de una disco plano de radio "r".

Vamos a determinar el radio del disco preciso que cumpla la condición de alargamiento requerida.

Se ha determinado que la capacidad estática de un disco conductor aislado, tratado como un esferoide aplastado, vale

$$C=\frac{20r}{9\pi}\ \text{pF} \quad \text{(el radio del disco"r", en centímetros)}$$

La fórmula, expresada en Faradios y metros será:

$$C=\frac{20R*10^{-10}}{9\pi}\ \text{Faradios (R es el radio del disco en mts)}$$

La reactancia que presente esta capacidad debe ser igual a la presentada por H' en el tope del radiador.

Las fórmulas anteriores son válidas en el caso de que el radio del disco sea pequeño respecto a H (*r*<<H). En caso contrario, habrá que considerar la presencia del plano de tierra (perfectamente conductora) y la capacidad del disco, será la básica entre dos placas paeralelas, o sea,

$$C = \varepsilon \frac{A}{d} \quad \text{siendo}$$

A.- el área de las placas
d.- la separación
ε.- Permitividad del vacio (8'854 + 10^{-12} Faradios/metro)
y en este caso,

$$C = \frac{8'854*10^{-12} * \pi * r^2}{H} Faradios$$

H y r en metros
Por otra parte, según el método aproximado de Howe la impedancia característica de un conductor aislado, en función de su longitud y capacidad estática, viene dada por:

$$Z_o = \frac{L \times 10^{-8}}{3C_a} \text{ohmios}$$

siendo en este caso "L", la longitud en metros del conductor y Ca su capacidad estática en Faradios. Luego en nuestro caso, la Z_0 de la porción de radiador que falta, H', es

$$Z_0 = \frac{H'*10^{-8}}{3Ca}$$

Como Ca debe ser igual a la capacidad del disco, sustituimos la expresión de C en Z_O y simplificando, obtenemos:

$$Zo = \frac{15\pi H'}{R}$$

de donde

$$H' = \frac{RZo}{15\pi} \text{ mts}$$

De aquí, deducimos que

$$R = \frac{15\pi * H'}{Z_o}$$

Ahora bien, como esta Z_o debe ser la misma que la de H' que a su vez debe ser la misma que la de la porción física del radiador de altura H y de radio " a ", igualamos las dos expresiones

$$60\left(\ln\left(\frac{2H}{a}\right) - 1\right) = \frac{15\pi * H'}{R}$$

de donde $$R = \frac{\pi * H'}{4*\left(\ln\left(\frac{2H}{a}\right) - 1\right)} \text{ mts}$$

Como se puede observar, aquí, hemos calculado el radio del disco en función de la altura (o longitud) y el radio, de H y H'

La capacidad en el extremo de un radiador vertical corto se puede conseguir por otros métodos.

Conectando uno o varios hilos horizontales en el extremo formando una “T” o una “L invertida” según se ve en la figura 5

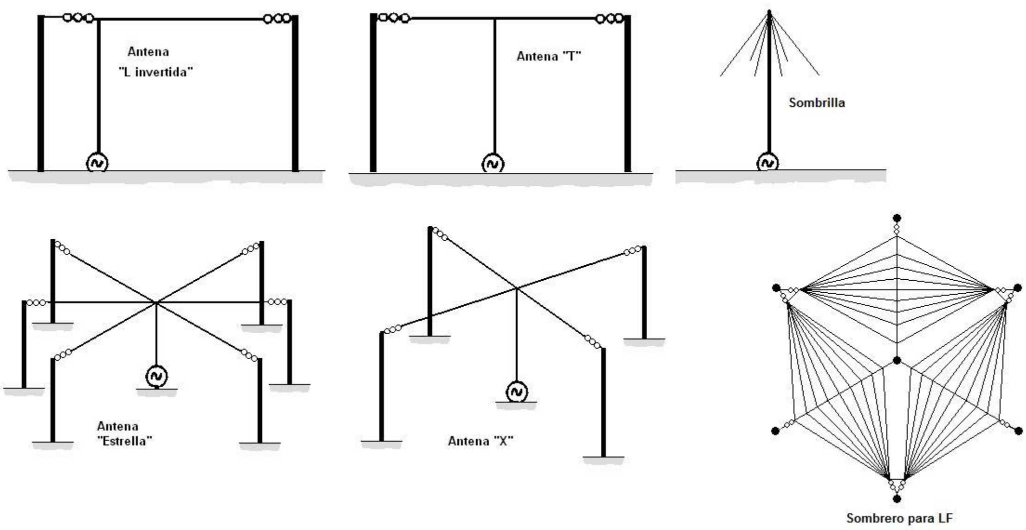

Fig 5

Analizaremos las antenas en L invertida, T, y sombrilla por ser las más comunes de este tipo.

Asimismo el algoritmo para el diseño de las antenas T y L invertida, se desarrollan al mismo tiempo, dada su analogía.

La distribución de la corriente en el radiador vertical es prácticamente trapezoidal en lugar de la distribución triangular que tendría sin carga. Iz varía de forma lineal desde el valor Io en la Base a It en el tope. Asimismo, en L, la corriente puntual I_ϱ varía desde It hasta cero en el extremo de L.

La figura 6 muestra una antena L invertida con la distribución de corriente y además se contempla la imagen de la antena ante la presencia del plano de tierra

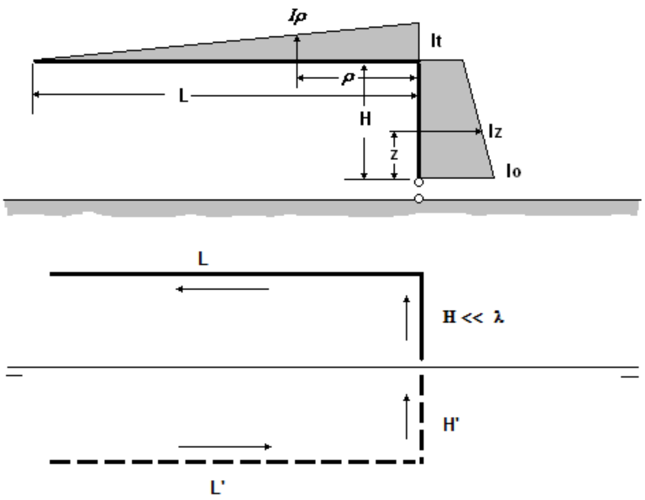

Fig 6

La impedancia característica de H es:

$$Z_{OH} = 60\left(\ln \frac{H}{a}\right)$$

Y la de la carga L (línea de transmisión unifilar en presencia de tierra)

$$Z_{OL} = 60\left(\ln \frac{2h}{a}\right)$$

siendo h la altura de L sobre tierra que en este caso, h=H

Si debemos disminuir Z_{OL}, podemos conectar en el tope varios (n) conductores en paralelo y repartidos uniformemente en el espacio (caso de una antena en T en la que n=2, o en Estrella (n>2). Tambien podemos considerar un solo conductor, formado a su vez por varios conductores paralelos entre sí y en un mismo plano paralelo al plano de tierra o formando un poliedro dispuestos en las aristas del mismo que se pueden convertir en un solo conductor con su radio equivalente al conjunto.

La reactancia del conductor L vista desde el tope del radiador vertical será la de una línea de transmisión corta y abierta en su extremo.

$$Xt = -j\frac{Z_{OL}}{n\tan(\beta L)}$$

(n es el número de conductores conectados al tope como hemos reseñado anteriormente y en este caso, n=1)

Y como hemos visto anteriormente, la reactancia en la entrada, Xe, será

$$Xe = Z_{OH}\,\frac{Z_{OH}\tan(\beta H) + Xt}{Z_{OH} - Xt * \tan\beta H)}$$

Si llevamos la antena a resonancia, Xe = 0 y la longitud de L_{RES} para conseguirlo, deberá ser:

$$L_{RES} = \frac{\arctan\left(\frac{Z_{OL}}{Z_{OH}}\,n\tan(\beta H)\right)}{\beta}$$

Por otro lado si $L \neq L_{RES}$ la parte vertical H se habrá alargado por encima del tope una longitud H' de valor

$$H' = \frac{\arctan\left(\frac{Z_{OH}}{Z_{OL}}\,n\tan(\beta L)\right)}{\beta}$$

Si observamos la antena y su imagen en presencia del plano de tierra, vemos que las corrientes en H y su imagen, están en fase mientras que las de L y la suya, están en oposición. Esto significa que si H es pequeño respecto a la longitud de onda de la frecuencia de trabajo, L estará lo suficientemente cerca del plano de tierra para que su corriente sea anulada por la de la imagen y en L no habrá radiación. Solo radiará H que al aumentar el área delimitada por la corriente (respecto a la de un monopolo sin cargar de igual altura H), habrá aumentado su resistencia de radiación y por lo tanto su eficiencia.

Asimismo, siempre que está dispuesta horizontalmente, la carga L se podrá plegar sobre sí misma si la disposición del espacio lo requiere.

Por otra parte, si la carga que supone L no es suficiente para llevar la antena a resonancia, se deberá añadir la inducción necesaria para conseguirlo, considerando que la altura del monopolo será H'.

También se pueden combinar los dos métodos de carga, cuando no es posible o aconsejable la utilización de un solo tipo.

En la figura 7 se pueden observar algunas de las combinaciones posibles.

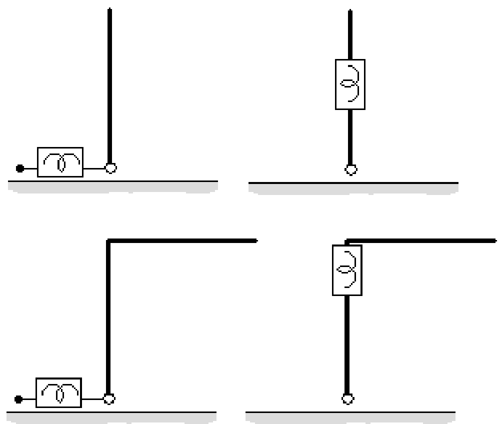

Fig. 7

Aunque la carga capacitiva se ha representado con un conductor como L invertida, ésta puede ser de cualquiera de los tipos vistos anteriormente.

Estas cargas capacitivas vistas hasta ahora necesitan la disposición mecánica precisa para emplazar los conductores en la posición adecuada. Esto supone la instalación de mástiles y riostras necesarias para soportar la estructura, lo cual significa un coste a veces muy oneroso.

Otro sistema de carga capacitiva más sencillo puesto que sólo necesita la utilización de un solo mástil, consiste en la disposición de varios conductores conectados al tope del radiador vertical, dispuestos en forma inclinada a modo de las varillas de un paraguas o sombrilla, de ahí su nombre, ("umbrella" en inglés) y que además, adecuadamente aislados contribuyen al arriostramiento del mástil. Ver figura 8.

La longitud de los hilos del paraguas, ejercen una cierta acción de blindaje al mástil, limitando su capacidad de radiación, por lo que se debe encontrar una longitud y ángulo óptimos para alcanzar un compromiso de eficiencia.

Podemos obtener la capacidad deseada, modificando tres variables:
La longitud de los hilos " r "; el número de hilos " n " y el ángulo que forman con el radiador vertical " α ".

Lógicamente, para el diseño de esta carga deberemos fijar dos de las variables para determinar la tercera, siguiendo los criterios y limitaciones que nos demande el entorno en el que esté situada la antena.

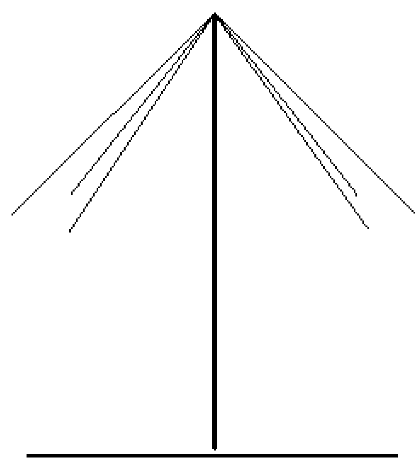

Fig 8

Normalmente, el espacio disponible nos fijará el ángulo que formen los hilos con el mástil radiador y el número de ellos que se pueden instalar.

En estas condiciones, la longitud de ellos en fracciones de la altura H del radiador, viene determinada por

$$r = \frac{1}{n}\left(\sqrt{1+\frac{n}{\cos\alpha}}-1\right)$$

Dando valores a "n" y α, hemos construido la siguienta tabla

VALOR DE " r " EN FRACCIONES DE H										
n	**Angulos**									
	10	**20**	**30**	**40**	**45**	**50**	**60**	**70**	**80**	**89**
1	0,42	0,437	0,468	0,518	0,55	0,6	0,73	0,98	1,6	6,64
2	0,37	0,384	0,41	0,45	0,48	0,51	0,62	0,81	1,27	4,88
3	0,34	0,349	0,371	0,406	0,43	0,46	0,55	0,71	1,09	4,05
4	0,31	0,323	0,343	0,374	0,4	0,42	0,5	0,64	0,98	3,54
5	0,29	0,303	0,321	0,349	0,37	0,39	0,46	0,59	0,89	3,19
6	0,28	0,286	0,303	0,329	0,35	0,37	0,43	0,55	0,83	2,93
7	0,26	0,272	0,288	0,312	0,33	0,35	0,41	0,52	0,78	2,72
8	0,25	0,261	0,275	0,298	0,31	0,33	0,39	0,49	0,73	2,55
9	0,24	0,25	0,264	0,286	0,3	0,32	0,37	0,47	0,7	2,41
10	0,23	0,241	0,254	0,275	0,29	0,31	0,36	0,45	0,67	2,3

La resistencia de radiación de un monopolo de igual altura H pero sin carga, se verá multiplicada por un factor M determinado por:

$$M = 4\left(1+\frac{\cos\alpha}{n}\right)^2\left(1-\sqrt{\frac{\cos\alpha}{n+\cos\alpha}}\right)^2$$

La siguiente tabla nos da el valor de M para distintos valores de "n" y "α"

VALOR DE " M "										
n	**Angulos**									
	10	**20**	**30**	**40**	**45**	**50**	**60**	**70**	**80**	**89**
1	1,38	1,391	1,415	1,454	1,48	1,51	1,61	1,77	2,09	3,13
2	1,61	1,632	1,666	1,717	1,75	1,79	1,91	2,09	2,43	3,35
3	1,78	1,806	1,843	1,9	1,94	1,98	2,11	2,3	2,63	3,45
4	1,92	1,939	1,979	2,038	2,08	2,12	2,25	2,44	2,76	3,52
5	2,02	2,047	2,088	2,148	2,19	2,24	2,36	2,55	2,86	3,57
6	2,11	2,137	2,178	2,239	2,28	2,33	2,45	2,63	2,93	3,6
7	2,19	2,214	2,255	2,316	2,36	2,4	2,53	2,71	3	3,63
8	2,26	2,281	2,322	2,383	2,42	2,47	2,59	2,77	3,05	3,65
9	2,32	2,34	2,38	2,441	2,48	2,53	2,65	2,82	3,09	3,67
10	2,37	2,392	2,433	2,493	2,53	2,58	2,7	2,86	3,13	3,69

Se puede observar que M tiende a 4 al acercarse "α" a 90º y cuando "n" tiende a infinito.

La determinación de la resistencia de radiación en la base de las distintas configuraciones de carga se pueden determinar por:

Carga inductiva en la base._

$$Rr = 36'6\frac{[1-\cos(\beta H)]^2}{sen^2(\beta H)}$$

Carga en el tope (cualquier carga).-

$$Rr = 36'6 sen^2(\beta H)$$

Carga inductiva en el radiador.-

$$Rr = 36'6\left[1 - sen^2\left(\frac{\pi}{2} - \beta C\right) + sen^2(\beta A)\right]$$

Sombrero capacitivo y carga inductiva en la base.-

$$Rr = 36'6\left[\frac{sen(\beta H) - sen(\beta H')}{\cos^2(\beta H')}\right]$$

Siendo H' la longitud eléctrica introducida por la carga inductiva en la base.

Monopolos largos.-

Si un radiador vertical de altura H, resulta largo para resonar a λ/4, presentará en la impedancia de entrada, una componente reactiva de carácter inductivo, tal como lo haría la línea de transmisión mayor de λ/4 con el extremo abierto y de valor

$$X_l = jZ_O tg(\beta H)$$

Que habrá que compensar o anular, insertando en su entrada una capacidad cuya reactancia capacitiva sea del mismo valor que X_l.

Hay que tener en cuenta que una vez compensada la reactancia inductiva, habrá que adaptar la resistencia de entrada, a la impedancia del conjunto línea-generador

Un monopolo largo especial es aquel cuya altura es de media onda (λ/2)

Este radiador resuena en paralelo, es decir; presenta en su entrada una impedancia resistiva pura de valor teórico infinito tal como lo hace una combinación en paralelo de una inductancia y una capacitancia, conformando un circuito resonante.

En la práctica el valor infinito se convierte en un valor alto de resistencia y la intensidad en la base tiene un pequeño valor en lugar del valor cero que se espera.

Este radiador tiene la ventaja de eliminar prácticamente las corrientes en el plano de tierra y por lo tanto sus pérdidas, permitiendo su instalación en puntos elevados lejos de un plano de tierra. Sólo habría que considerar la presencia de este plano, para los cálculos de impedancias mutuas y diagrama de radiación, con su imagen, como un dipolo vertical de media onda a una distancia determinada de un plano de tierra.

El ajuste de un radiador largo, se puede realizar con la instalación entre los terminales de entrada de un circuito LC aplicando la formulación de adaptación con circuitos en L, cuando $R_2 > R_1$ tal como se ha descrito en el capítulo 7 y se muestra en la figura 9

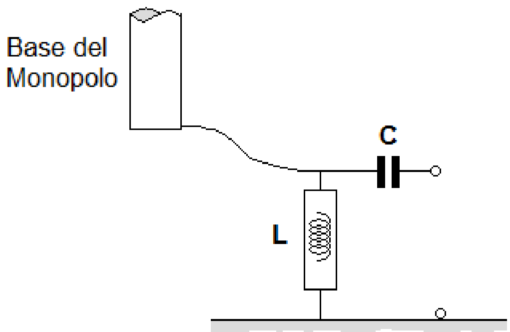

Fig. 9

El inconveniente de este montaje es su estrechez de banda aunque en muchas ocasiones, esto puede ser lo deseable.

En radiadores de altura H mayor de $\lambda/2$, lo más práctico es llevarlos a resonancia en ¾ de λ, insertando en su base, la inductancia calculada para un monopolo corto de altura

$$H - \frac{\lambda}{2}.$$

La inductancia, conectada entre los terminales de entrada, nos servirá al mismo tiempo para adaptar las impedancias de antena (equivalente paralelo de la resistencia de entrada) y el generador.

El inconveniente de un radiador de 3/$ de onda es que en su diagrama de radiación aparecen lóbulos secundarios que no son aprovechables pero que restan potencia de radiación al lóbulo principal.

Para evitar ese problema se suele elegir un radiador ligeramente superior a la media onda de tal manera que en su base aparezca algo de reactancia capacitiva, fácil de ajustar sin gasto apreciable de potencia. La existencia de lóbulos secundarios en el diagrama de radiación es despreciable.

Armando García
EA5ND (ex EA5BWL)