

ANTENA RADIANTE PARA LA CADENA DECCA DE NAVEGACION HIPERBOLICA INSTALADA EN EL NOROESTE DE ESPAÑA POR LA DIRECCION GENERAL DE PUERTOS Y SEÑALES MARITIMAS

Por EMILIO FERNANDEZ CASADO

Doctor-Ingeniero de Telecomunicación

Jefe de Instalaciones de Marconi Española, S. A.

El autor trata de justificar el tipo de antena utilizado, mástil de 110 m. de altura y arriestrado, para la CADENA DECCA de Navegación Hiperbólica, que se monta, a propuesta de la Jefatura de Señales Marítimas a la Dirección General de Puertos y Señales Marítimas, en el Noroeste de España. También se comprueban, de una forma elemental, sus características radioeléctricas (impedancia de entrada, altura eficaz, resistencia de radiación, capacidad, voltajes, etc.) y se comparan con las medidas realizadas en la antena de Vitigudino.

La CADENA comprende cuatro estaciones:

Manzaneda (ORENSE), que es la principal,

y tres estaciones Esclavas, dependientes de aquélla:

Boal (ASTURIAS), Noya (CORUÑA) y Vitigudino (SALAMANCA).

Cada una de estas estaciones Esclavas produce con la Principal una familia de hipérbolas, y la intersección de dos de diferente familia da el «fijo», o posición en una cartografía especial.

Existen 10 Cadenas de este tipo en Europa, así como otras varias en Canadá, Bahamas, Golfo Pérsico, India, etc., **montadas por «The DECCA Navigator Co. Ltd.»**, cuya **representación en España la ostenta MARCONI ESPAÑOLA, S. A.**

Fué elegida para el desembarco de Normandía (en la II Guerra Mundial) debido a su extraordinaria precisión

Las condiciones generales exigidas a una antena destinada a funcionar con este sistema de navegación son las siguientes:

a) Debe, como toda antena transmisora, radiar la mayor cantidad de energía; esto es, poseer un rendimiento elevado.

b) Utilizándose en su aplicación los campos que producen a las mayores distancias posibles, y que deben ser iguales en todas las direcciones, debe poseer una "función radiación" omnidireccional azimutalmente y radiar poco bajo ángulos cenitales elevados.

Su mayor alcance exige también "alturas eficaces" elevadas.

c) Y lo que la distingue en particular, de otras antenas transmisoras, es que debe tener una gran anchura de banda, ya que hay momentos en que, por ejemplo, en el tipo Mark X, debe radiar hasta 5 frecuencias distintas, sin perder las características esenciales (a) y (b) en ninguna de ellas.

d) Otra condición a considerar son los elementos de acople corrientes en los transmisores aquí utilizados.

Radioeléctricamente hablando, estas cuatro condiciones podemos resumirlas en:

Antena vertical, o cuerpo radioeléctrico de revolución, para que sea omnidireccional su radiación, y de gran altura física para obtener la mayor "altura eficaz" aumentada ésta por artificios radioeléctricos, para no alcanzar alturas reales prohibitivas económicamente. El empleo de ondas largas (de 70 a 130 Kc. por segundo) en el sistema siempre hace que las antenas resulten más bien cortas eléctricamente.

Por esta última razón, la radiación bajo ángulos cenitales elevados es pequeña en estas condiciones y, naturalmente, siempre nula en la dirección del propio elemento radiante.

La poca longitud eléctrica citada hace que se produzcan elevadas tensiones, sobre todo en sus extremos, debiendo tomarse precauciones especiales tanto en sus aisladores (plateado de sus contactos con cables, provisión de aros anticorona, etc.) que serán siempre de gran tamaño y sin aristas; asimismo los cables no pueden pasar de un diámetro inferior a aquel en el que ya puedan producirse fugas por exceso de tensión o intensidad.

Su anchura de banda exige cuerpos de elevadas dimensiones transversales, o en términos técnicos, de elevada impedancia característica (*surge-impedance*), lo que también significa una elevada capacidad, con la subsiguiente ventaja de que al disminuir la impe-

dancia de entrada disminuyen también las tensiones.

Esto último también se favorece al alargar eléctricamente la antena, para conseguir mejorar su radiación, bien sea real o ficticialmente.

Por otra parte, la sincronización de la antena exigía que las capacidades dinámicas en la base de la antena estuviesen comprendidas entre unos 2 500 y 5 000 picofaradios.

Después de varios tanteos se eligió el tipo de antena que se adaptaba eléctricamente mejor a nuestros materiales nacionales, optándose por el tipo de mástil arriostrado de 110 m. de altura y representado en la figura 1.^a

Como se aprecia, consiste mecánicamente en una estructura tubular de sección variable, muy estilizada, arriostrada por cuatro órdenes de vientos en tres planos verticales a 120° entre sí.

No haremos referencia a las características mecánicas, que pueden constituir un complemento a este artículo, y sí sólo a la somera comprobación de sus características radioeléctricas.

Con objeto de disminuir las pérdidas en el terreno (muy elevadas en esta clase de ondas) y mejorar así su rendimiento, se dotó al mástil de una eficaz red de tierra construida por 88 hilos radiales de 90 m. de longitud. Esto permite también considerar a la tierra como suficientemente metalizada a efectos de cálculos de capacidad y radiación, y evitar grandes variaciones debidas a diferentes condiciones climatológicas que afectarían gravemente a los ajustes en casetas de acoplo.

Téngase presente que la "penetración" de las ondas electromagnéticas en el terreno viene dada por:

$$p = \frac{1}{\sqrt{\pi f \cdot \mu \sigma}} \text{ cm.,}$$

y, por ejemplo, en terreno de margá o yeso y onda de unos $\lambda = 3\,500$ m. con:

$$\sigma = 10^{-4} \text{ Mhos/cm.}^2;$$

$$f = 85.000 \text{ c/s};$$

$$\mu = 4\pi \cdot 10^{-9} \text{ H/cm.}$$

resulta una $p = 17$ m., aproximadamente, que es muy elevada.

Para un estudio elemental, debemos considerar que sus dimensiones eléctricas nos autorizan a sustituir las funciones hiperbólicas por circulares y emplear con menos riesgo ciertos principios utilizados en la técnica general de líneas. Esto da una idea más explícita de lo que se pudiera llamar "arte" de proyectar una antena y da suficiente aproximación en los resultados.

Se apreciará que su estructura consta principalmente de dos partes bien distintas: una, de unos $m = 40$ m. de altura, en que su sección es prácticamente constante y de un diámetro $d = 0,65$ m., y de

otra en que aparte del tubo y sus vientos mecánicos, existe un sistema de hilos radiantes que modifican esencialmente sus características radioeléctricas. En esta última se han dejado los vientos mecánicos conectados en ciertas longitudes al tubo, de forma que no apantallan la radiación principal (la producida por la parte del tubo con mayor corriente) del mismo y aumentan la capacidad unitaria, de forma que prácticamente mantiene una impedancia característica del orden de la del tramo inferior.

La capacidad estática total de este tramo inferior puede calcularse por la fórmula elemental:

$$C = \frac{24,21 \cdot m}{\log_{10} \frac{2m}{d} - k} \text{ picofaradios,}$$

y considerando la altura del basamento y aislador de su base corresponderá un $K = 0,403$ y, por tanto, $C = 535$ picofaradios, o sea una capacidad unitaria media de $C_1 = \frac{C}{m} = 13,4$ picofaradios/metro, y, por tanto, la impedancia característica media del tubo es del orden de:

$$Z_0 = \frac{1}{c \cdot C_1} = \frac{10\,000}{3 \cdot C_1} = 250 \text{ ohmios,}$$

siendo c la velocidad de propagación electromagnética de la onda en el tubo ($c = 3 \cdot 10^8$ m./seg.).

En este momento es útil que consideremos que altura l_A en metros, nos falta para que nuestro mástil presente en su entrada las impedancias necesarias para que puedan sintonizarse con los elementos de que disponemos en las casetas de acoplo (que son sólo bobinas), y que, en nuestro caso, por tanto, deben ser reactancias capacitivas solamente (unos $C_d = 3\,800$ picofaradios para el centro de la banda de las longitudes eléctricas que comprenden a nuestras 5 frecuencias DECCA y que es de 30° aproximadamente).

Además, la resistencia es del orden de ohmios, despreciable frente a la citada reactancia del orden de $X = 450$ ohmios correspondiente a dicha $\lambda = 3\,240$ metros.

Por lo tanto, calcularemos l_A de forma que:

$$\frac{-j}{\omega \cdot C_d} = -j \cdot Z_0 \cdot \cot \left(\frac{360^\circ}{\lambda} \cdot (H + l_A) \right);$$

y como $H = 110$ m., resulta $l_A = 160$ metros.

Este valor, además, nos proporciona aproximadamente la longitud de onda propia λ_p , que es aquella para la que presentará la antena en su base sólo resistencia, y que valdrá:

$$\lambda_p \approx 4 \cdot (H + l_A) = 1\,080 \text{ m. (277,7 Kc/s).}$$

Como no se desea alargar más el mástil, se utilizará el artificio de prolongar eléctricamente su longi-

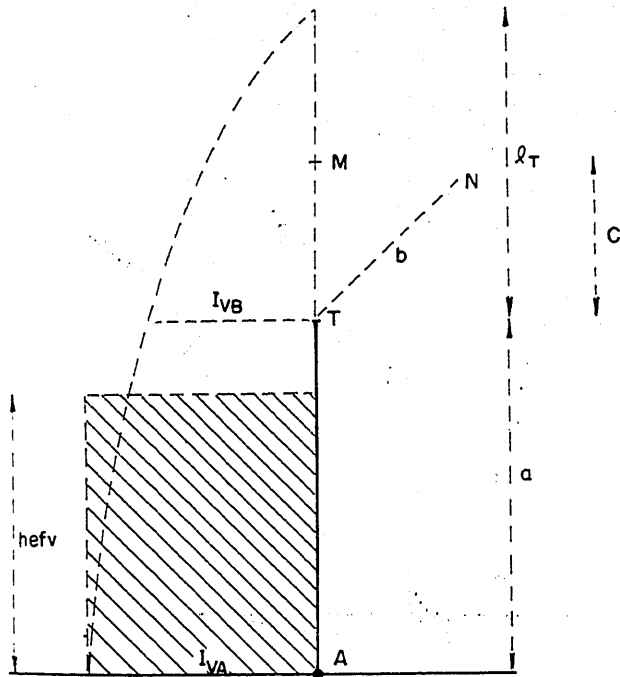


Figura 3.a

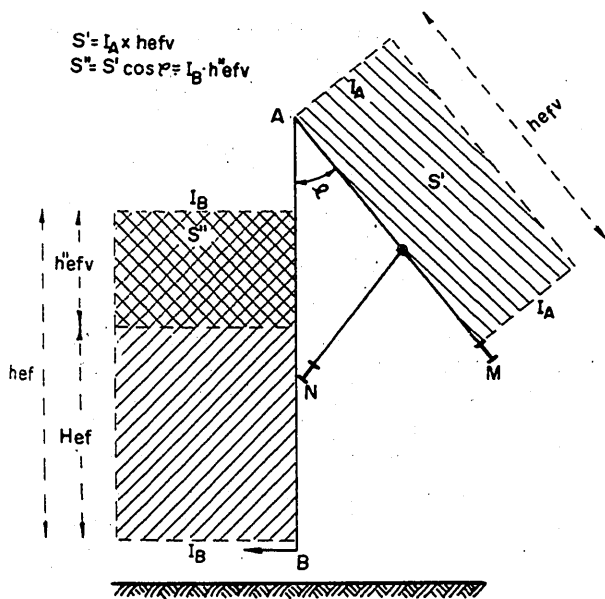


Figura 4.a

por la segunda, y como por la distribución supuesta:

$$\frac{l_B}{l_A} = \frac{\text{sen } \alpha \cdot (H + l_A)}{\text{sen } \alpha \cdot l_A};$$

con los valores dados resulta:

$$\frac{l_B}{l_A} = 1,64;$$

y, por tanto:

$$h''_{efv} = h'_{efv} \cdot \frac{1}{1,64} = 18 \text{ metros};$$

resultando en definitiva:

$$H_{ef} = 93 - 18 = 75 \text{ metros}.$$

Resistencia de radiación. — Esta es variable también para cada λ y, por ejemplo, para $\lambda = 3561$ m., se calculará a partir de h_{ef} (sin las correcciones dadas) con la suficiente exactitud (dado que $H < \frac{4}{\lambda}$) por:

$$R_r = \frac{1579}{l^2} \cdot h_{ef}^2 = 1,07 \text{ ohmios}.$$

Resistencia de pérdidas en el terreno. — Son las únicas a considerar, ya que las pérdidas por Joule y otras razones en la propia antena, son despreciables junto a éstas y a R_r .

Podemos estimar R_p utilizando la fórmula simplificada:

$$R_p = \left[\frac{\cos \alpha \cdot l_A - \cos \alpha \cdot (H + l_A)}{\text{sen } \alpha \cdot (H + l_A)} \right]^2 \cdot K \cdot \left\{ \log_e \left(\frac{\lambda}{3r} \right) + \left[\frac{\text{sen } \alpha \cdot l_A}{\cos \alpha \cdot l_A - \cos \alpha \cdot (H + l_A)} \right]^2 \cdot \log_e \left(\frac{W_1}{W_2} \right) + \frac{2 \cdot \cos \alpha \cdot (H + l_A)}{\cos \alpha \cdot l_A - \cos \alpha \cdot (H + l_A)} \cdot \left[\log_e \left(\frac{1 + W_1}{1 + W_2} \right) - \frac{\cos \alpha \cdot l_A}{2 \cdot (\cos \alpha \cdot l_A - \cos \alpha \cdot (H + l_A))} \cdot \left[\left(\alpha \cdot \frac{\lambda}{3} \right)^2 \cdot (W_2 - 1) - (\alpha \cdot r)^2 \cdot (W_1 - 1) \right] \right] \right\}$$

$$\text{con } W_1 = \sqrt{1 + \left(\frac{H}{r} \right)^2} \text{ y } W_2 = \sqrt{1 + \left(\frac{3H}{\lambda} \right)^2}$$

para $r = 90$ m., y la λ citada resulta aproximadamente:

$$R_p = 3,5 \text{ ohmios};$$

por lo tanto, el rendimiento con esta onda es del orden de:

$$\eta = \frac{R_r}{R_r + R_p} \cdot 100 = 23\%.$$

Es esencial para disminuir R_p el procurar que todas las corrientes que regresan por los hilos radiales, como consecuencia de las corrientes de desplazamiento en el espacio, alcancen la base del mástil con

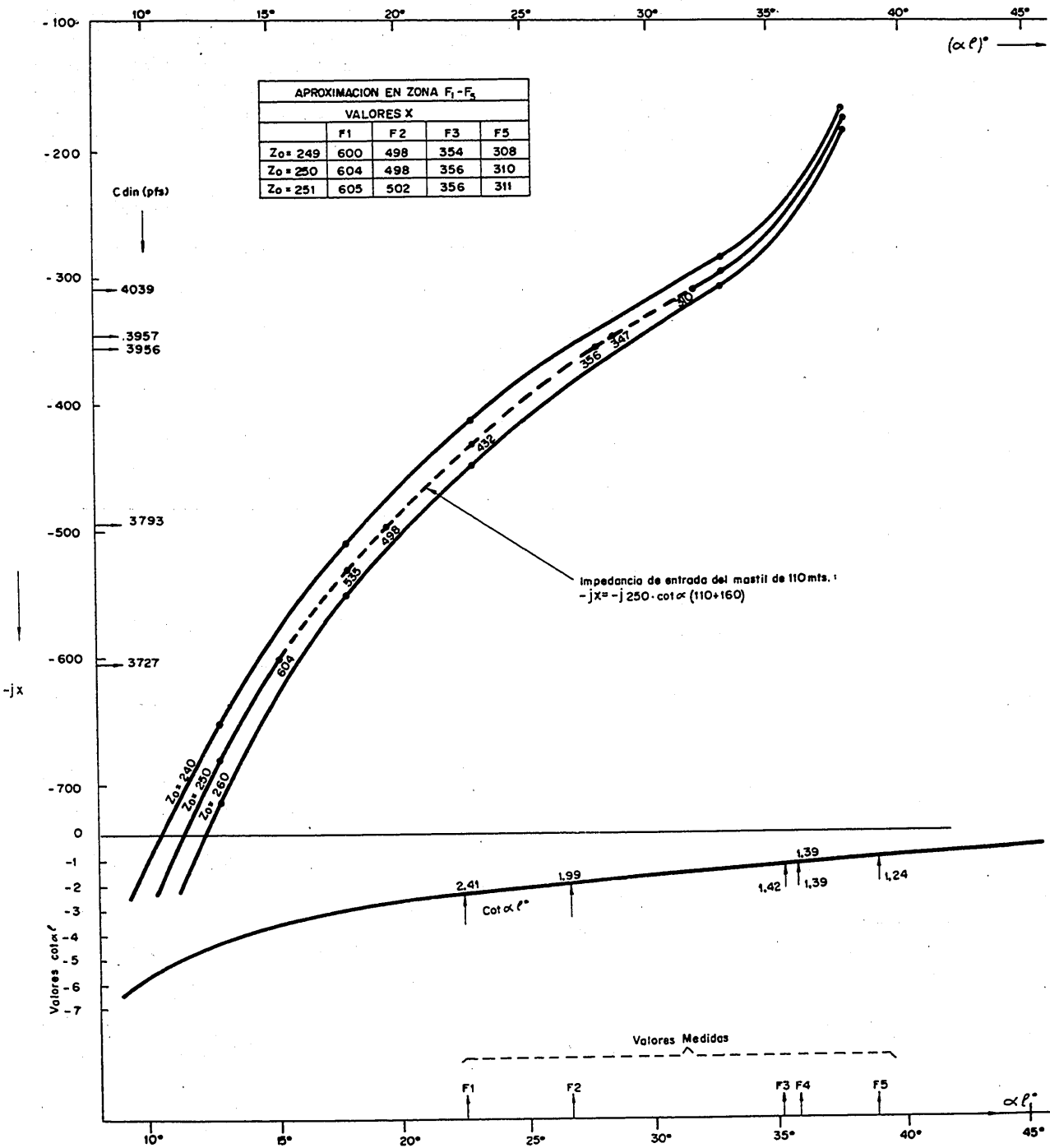


Figura 6.^a.

Por lo tanto, las mayores tensiones que podrán presentarse son del orden:

- Mark-X (con refuerzo) . . . 60 000 voltios de cresta
- Mark-X (normal). 45 000 > > >
- Mark-V. 32 500 > > >

Función radiación. — El campo eléctrico que produce una antena en las condiciones supuestas puede expresarse en términos prácticos por:

$$E = \frac{60 \cdot I_B \cdot H_{ev} \cdot \alpha}{D} \cdot F(\varphi, \psi) = \frac{377 \cdot I_B \cdot H_e}{D \cdot \lambda} \cdot F(\varphi, \psi),$$

en la que D es la distancia en kilómetros; λ , en metros, y E se expresa en milivoltios/metro. $F(\varphi, \psi)$ es la "función radiación" que regula la distribución de la magnitud del campo según la dirección que se considere y definida por los ángulos azimutal ψ y cenital φ (respecto del plano del terreno).

En nuestro caso, y considerando solamente la parte radiante vertical, que es la útil, por emplearse en este sistema la polarización vertical, para simplificar, y llamando d a la altura sobre el suelo del extremo superior del mástil, H su altura y l_A su alargamiento eléctrico ya dicho:

$$F(\varphi, \psi) = \frac{1}{\cos \varphi} \cdot [\cos(\alpha \cdot l_A) \cdot \cos(\alpha \cdot d \cdot \sin \varphi) - \cos \alpha \cdot (H + l_A) \cdot \cos[\alpha \cdot (d - H) \cdot \sin \varphi] - \sin \varphi \cdot [\sin(\alpha \cdot l_A) \cdot \sin(\alpha \cdot d \cdot \sin \varphi) - \sin \alpha \cdot (H + l_A) \cdot \sin[\alpha \cdot (d - H) \cdot \sin \varphi]]]$$

que, como vemos, no depende de ψ y, por tanto, da una radiación omnidireccional.

Su mayor valor corresponde a $\varphi = 0$, o sea sobre la superficie del terreno. Naturalmente, que si la tierra no estuviese suficientemente metalizada como para que no fuera aplicable el teorema de las imágenes, pudiera no ser cierta esta fórmula e incluso corresponder un mínimo en la dirección $\varphi = 0$.

Dado que $d \approx H$ se reduce a:

$$F(\varphi, \psi) = \frac{1}{\cos \varphi} \cdot [\cos \alpha \cdot l_A \cdot \cos(\alpha \cdot H \cdot \sin \varphi) - \cos \alpha \cdot (H + l_A) \cdot \sin \varphi \cdot \sin(\alpha \cdot l_A) \cdot \sin(\alpha \cdot H \cdot \sin \varphi)].$$

La realidad es que en antenas tan cortas como ésta la $F(\varphi, \psi)$ se diferencia poco de la del "doblete eléctrico" $f(\varphi, \psi) = \cos \varphi$.

Medidas efectuadas.— Se han comprobado las características eléctricas del mástil instalado en Vitigudino (Estación Esclava Púrpura).

Con objeto de evitar las dificultades que surgen en esta clase de medidas como consecuencia de la captación por el propio mástil de estáticos y señales es-

púreas que enmascaran las mismas, se ha empleado el "método de sustitución", pero con generador de señales de potencia (salidas del orden de 140 voltios de R.F.) y midiendo máximos (en vez de mínimos) sobre un voltímetro de válvula de R.F. Como condensador de comparación se utilizó uno de 3 500 pFs, de aire, del tipo utilizado como antena artificial en el calibrado de emisoras.

Así se obtuvieron los siguientes valores:

Frecuencia DECCA	Capacidad C_d Medida (dinámica) pFs	Reactancia — ohms.
Púrpura 70,692 Kc/s.	3727	— j 604
Negra 84,230 >	3793	— j 493
Roja 113,107 >	3956	— j 356
Naranja 115,934 >	3957	— j 347
Verde 127,245 >	4039	— j 310

Como se apreciará, la curva de reactancia (fig. 6.^a) sigue (con error de ± 1 ohmio) la de la función:

$$-j \cdot X_d = -j 250 \cdot \cotg \alpha \cdot (110 + 160),$$

lo que confirma los valores calculados:

$$Z_0 = 250 \text{ ohmios}$$

y

$$L_A = 160 \text{ metros.}$$

Los valores estáticos deducidos de las medidas serian, pues:

$$C_s = 3 \text{ 603 picofaradios}$$

$$L_s = 15,4 \mu \text{ Hs}$$

deducidos, considerando $\tan \alpha \cdot l \approx \alpha l$ y una distribución triangular de corriente, o sea:

$$X_d = \frac{1}{\omega \cdot C_d} \approx \frac{1}{\omega \cdot C_s} - 3 \cdot L_s \cdot \omega.$$