

# PROYECTO DE INSTALACION DE UNA ANTENA VERTICAL CORTA.

## General.-

Este proyecto consta de la descripción del sistema radiante, y la determinación de los parámetros del radiador como parte de un sistema de comunicación y de los elementos de adaptación a una línea coaxial de alimentación con una  $Z_0$  de  $50 \Omega$ . para un radiador que trabaje en la frecuencia de 1830 KHz.

Se quiere señalar que para estos cálculos iniciales se han tenido que estimar algunos valores de capacidad y resistencia que tendrán que ser determinadas finalmente mediante medidas empíricas (experimentales) y realizar los ajustes finales de la misma forma empírica

## Aspectos mecánicos.-

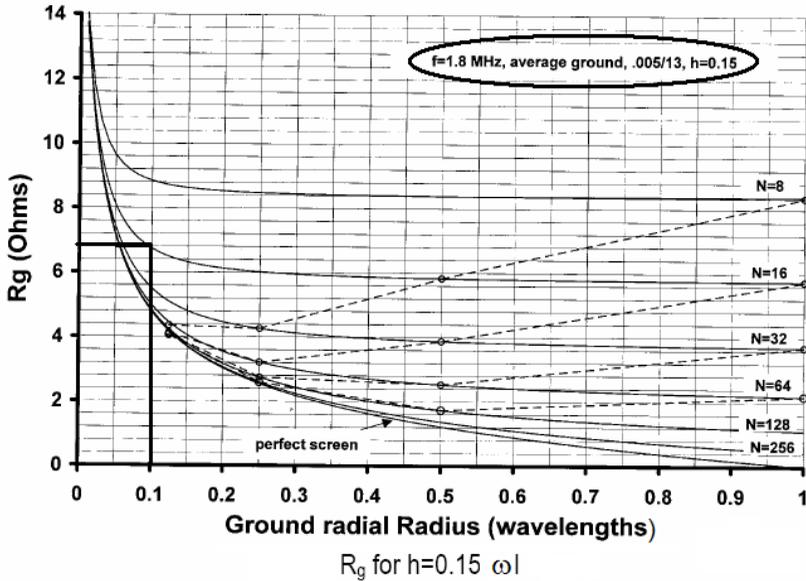
Consta de una torre de acero galvanizado de sección triangular y de 33 cm de lado. La longitud (altura) de la torre es de 15 mts.

Estará aislada del suelo mediante un aislador cerámico apropiado y sobre un plano de tierra artificial

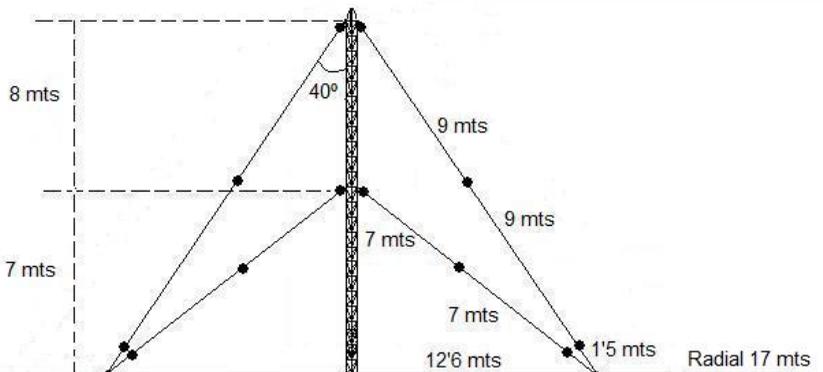
La torre, estará arriostrada con 2 juegos de vientos sujetos a la torre en puntos de la torre a 15 y 7 metros de altura. Cada juego constará a su vez de tres vientos dispuestos a  $120^\circ$ . Los vientos superiores, se separarán de la torre en un ángulo de  $40^\circ$ . Se instalarán además 3 vientos adicionales que protegerán a la torre de los esfuerzos de torsión a los que estará sometida debido a la presencia de un sombrero capacitivo en su tope, como se verá más adelante

Se construirá un plano de tierra formado por 16 hilos radiales de 17 mts de longitud que corresponden a una longitud de  $0.1 \lambda$  en el espacio libre. (Si están enterrados, teniendo en cuenta que una tierra media tiene una velocidad de propagación de  $0.27$ , su longitud efectiva sería  $(17/0.27)$  equivalente a 63 mts en el espacio libre o  $0.38 \lambda$ ). A esta frecuencia y sobre un suelo de valor medio, con una constante dieléctrica  $\epsilon_r = 13$  y una con-

ductividad  $\sigma = 0'005$  mhos/m, según la gráfica adjunta, se puede estimar una resistencia de pérdidas en el plano de tierra, de  $7 \Omega$ . Consideraremos además otras pérdidas (aisladores, resistencias óhmicas, entorno, etc) y las estimaremos en otros 3 ohmios por lo que el total de resistencia de pérdidas lo consideraremos de 10 ohmios.



Los puntos de anclaje al suelo de los vientos, se situarán a 12'6 mts de la base de la torre.



### Parámetros del Radiador para 1'83 MHz

$$\lambda = \frac{300}{1'83} = 163'93 \approx 164 \text{ mts}$$

$$H_0 = 15 \text{ mts (altura física)}$$

$$H = H_0 \times 1'05 = 15'75 \approx 16 \text{ mts (altura eléctrica)}$$

$$\frac{H}{\lambda} = \frac{16}{164} = 0'097\lambda \quad (\text{fracción de longitud de onda de la altura eléctrica de la torre})$$

$$\text{Longitud angular } \beta H = 2\pi \frac{H}{\lambda} = 0'6 \text{ radianes}$$

$$\text{Radio equivalente.- } r_{eq} = 0'33 \times 0'4214 = 0'139 \approx 0'14 \text{ mts}$$

(La torre de 33 cm de lado equivale a un tubo cilíndrico de 28 cm de diámetro)

$$Z_0 = 60 \left( \ln \frac{15}{0'14} - 1 - \frac{1}{2} \ln \frac{30}{164} \right) = 271'4 \approx 272 \Omega \quad (\text{Impedancia característica de la torre})$$

La resistencia de radiación en el vientre de corriente, por el método de la fuerza electromotriz inducida, aplicando las fórmulas expuestas en:

Balanis "Antenna Theory- Analysis & Design."- John Wiley& Sons- 2ª Ed- pág 146 y 410.

Jordan/Balmain "Ondas Electromagnéticas y Sistemas Radiantes- Paraninfo-2ª Ed.-pág. 611. (metodo de la f.e.m. inducida)

Todas ellas, coincidentes, nos da:

$$R_{rv} = 1'23 \Omega$$

y por lo tanto su resistencia en la base es

$$R_b = \frac{R_{rv}}{\text{sen}^2(\beta H)} = \frac{1'23}{0'318} = 3'86 \approx 4 \Omega$$

Asimismo, las reactancias de antena, por el mismo método, valen:

En el vientre de corriente

$$X_v = -114 \Omega$$

Y en la base

$$X_b = X_e = -260 \Omega$$

Considerando a la antena como una línea de transmisión abierta, la impedancia en la base del radiador

$$R'_b = 3'83 \approx 4 \Omega$$

$$X'_b = -393 \Omega$$

Las resistencias en la base coinciden pero vemos una diferencia en los valores de la reactancia en la base. (260  $\Omega$  vs. 393  $\Omega$ ).

En muchas literaturas, ante monopolos cortos como es este caso, utiliza medios de cálculo más rápidos y que proporcionan suficiente aproximación.

*La resistencia de radiación en la base de un monopolo corto es:*

$$R_{rb} = 40\pi^2 \left( \frac{H}{\lambda} \right)^2 = 40\pi^2 \times 0'096^2 = 3'76 \approx 4 \Omega$$

*La reactancia de entrada de un monopolo corto, como una línea de transmisión abierta y de longitud menor de  $\frac{1}{4}$  de onda, es:*

$$X_b = X_e = \frac{Z_0}{\tan(\beta H)} = \frac{272}{\tan(2\pi \times 0'097)} = -387 \Omega$$

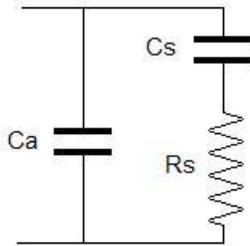
Vamos a decidirnos por los valores hallados por el método de analogía con una línea de transmisión abierta por estimar que los datos son más reales y se acercan más a los obtenidos por procedimientos empíricos.

La resistencia de entrada será la suma de la resistencia en la base más la de pérdidas:

$$R_e = R_b + R_p = 4 + 10 = 14 \Omega$$

La reactancia de entrada deberá tener en cuenta la capacidad existente entre los terminales de la base, debida a la presencia del aislador.

Podemos estimar que el valor de esta capacidad parásita está en torno a los 30  $\mu\text{F}$  por lo que el circuito eléctrico equivalente será

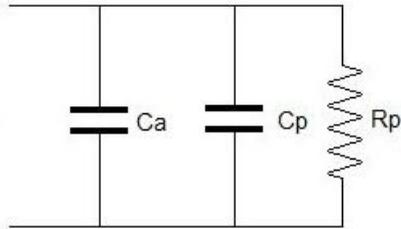


$$R_s = R_e = 14 \Omega$$

$$C_s = X_b = -393 \Omega \text{ qu corresponde a una capacidad de } 297 \mu\text{F}$$

$$C_a = X_{\text{aislador}} = 2900 \Omega \text{ correspondientes a la capacidad de } 30 \mu\text{F}$$

Considerando el circuito en su equivalente paralelo que estará formado por:



En el que

$$R_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{R_s} \text{ y } X_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{X_s}$$

Despues de aplicar las fórmulas,

$$R_p = 11210 \Omega$$

$C_p = -394 \Omega$  que corresponde a una capacidad de 220 pF

$C_a = 30 \mu\text{F}$ .

La capacidad total será de  $220 + 30 = 250 \mu\text{F}$  (-348  $\Omega$ )

luego el circuito resumido es una resistencia de 11210  $\Omega$  en paralelo con una reactancia de -348  $\Omega$

Insertando una bobina entre los terminales de la base de la torre que presente una reactancia inductiva de 348  $\Omega$ , obtendremos un circuito resonante paralelo con una impedancia resistiva de entrada de 11210  $\Omega$ .

La inductancia de la bobina será

$$L = \frac{X_l}{2\pi f} = \frac{348}{11'5} = 30 \mu\text{H}$$

Vamos a construir la bobina, empleando un soporte cilíndrico de 10 cm de diámetro y un hilo de cobre de 3 m/m de diámetro.

Las espiras las arrollaremos en una capa separadas una distancia igual a su diámetro:

El número de espiras /cm será:

$$n = \frac{10}{2d} \frac{10}{6} = 1'666$$

el diámetro entre centros del hilo será,  $d = 10 + 0'3 = 10'3$  cm

$$x = \frac{50}{nd^2} = \frac{50}{1'666 \times 10'3^2} = 0'283$$

Aplicando la fórmula que determina el número de espiras, con estos datos

$$N = Lx \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{46}{Ldx^2}} \right)$$

$$N = 30 \times 0'283 \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{46}{30 \times 10'3 \times 0'283^2}} \right) = 22'94 \approx 23 \text{ espiras.}$$

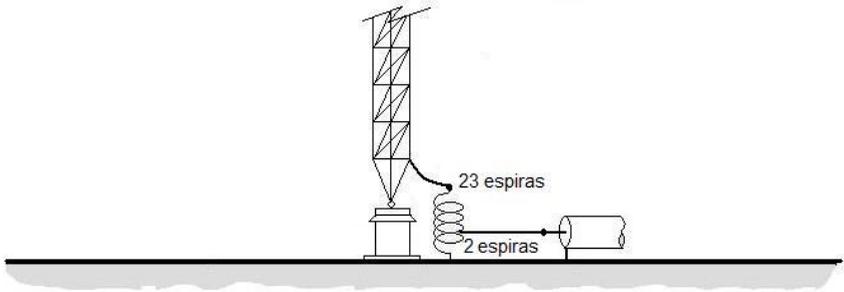
Estas 23 espiras presentarán una reactancia suficiente para anular la reactancia capacitiva, pero para adaptar la impedancia a los  $50 \Omega$  deberemos de considerar el autotransformador en el que

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 ; \quad \sqrt{\frac{11210}{50}} = \frac{23}{N_2}$$

por lo que la relación de espiras es de 15, o sea.

Los  $50 \Omega$  de la alimentación se conectarán en la espira n°  $1'5 \approx 2$  a partir del extremo frío de la bobina

El esquema de esta alimentación será,

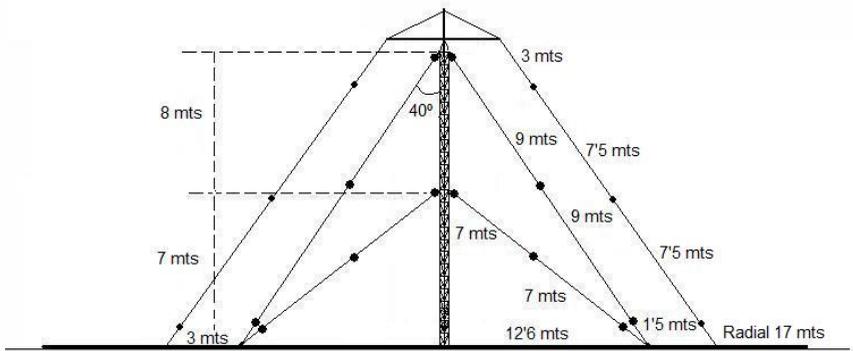


A pesar de estar adaptada la resistencia de entrada de la torre a la alimentación de  $50 \Omega$ , recordemos que de los 14 ohmios iniciales de la base, sólo 4 corresponden a la resistencia de radiación en la base y esto supone una eficiencia del 28'6% que en realidad es baja para nuestros propósitos por lo que deberemos tratar de alargar eléctricamente la antena.

A esta decisión también ayuda el hecho de que la relación de transformación de resistencia requerida es muy grande (de 11210 a 50) y por lo tanto es necesario un ajuste muy crítico y estable.

De todas las opciones disponibles, vamos a elegir la instalación de un sombrero capacitivo en el tope de la torre, desechando otras que necesitan más espacio, del cual carecemos.

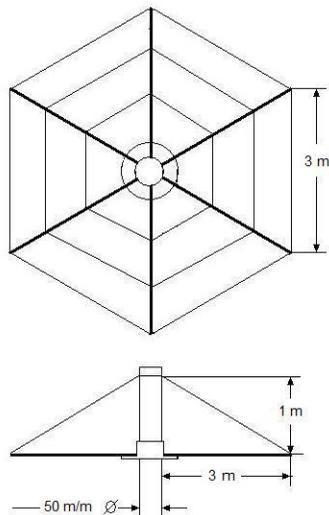
Un esquema del nuevo montaje se muestra en la figura siguiente



Para la construcción del sombrero, teniendo en cuenta la carga al viento que puede representar y la consiguiente fatiga de los elementos de sujeción la construiremos con materiales livianos. Varillas e hilo de aluminio y duraluminio.

Elegiremos la forma exagonal por ser la más cercana al disco circular que es el ideal del sombrero. Su radio equivalente al de un círculo es 0'92 veces el lado (o radio).

La figura, es un esquema del citado sombrero con vistas de planta y alzado.



Para su armado, utilizaremos tubo de aluminio de 50 m/m de diámetro y 3 metros de longitud para los radios y los lados y para la malla, hilo de aluminio de 3 m/m de diámetro.

Ahora procederemos a los cálculos que determinen la capacidad del sombrero.

La capacidad de un disco sólido aislado en el espacio, tratado como un esferoide plano, viene dada por:

$$C = \frac{20R}{9\pi} \rho F \quad (R \text{ en cm})$$

Si la superficie exagonal del sombrero fuese sólida, equivaldría a un disco sólido, con radio equivalente,

$$r_{eq} = l \times 0'92 = 3 \times 0'92 = 2'76m \text{ ó } 276 \text{ cm.}$$

Su capacidad sería

$$C = \frac{20 \times 276}{9\pi} = 195 \text{ pF}$$

Dado que el sombrero no es sólido, si no que su superficie la forma una malla de hilo de aluminio, podemos suponer una efectividad del 70%, por lo que podemos estimar una capacidad de

$$195 \times 0'7 \approx 137 \text{ pF}$$

que suponen una reactancia capacitiva a 1'83 MHz de  $X_s = 635 \Omega$ .

Esta reactancia, es la que presentaría en su entrada, una línea de transmisión abierta, cuya longitud, vamos a hallar.

La reactancia que presenta en su entrada una línea de transmisión abierta es:

$$X_{LT} = \frac{Z_0}{\text{tg}(\beta H')} \text{ y en este caso,}$$

$$635 = \frac{272}{\text{tg}(\beta H')} \text{ por lo que } \beta H' = \text{atg} \frac{272}{635} = 0'4 \text{ radianes}$$

$$\text{De } \beta H' = \frac{2\pi H'}{\lambda} \text{ despejaremos } H'; \quad H' = \frac{0'4\lambda}{2\pi} = 10'44 \text{ mts.}$$

Ahora nos encontramos con un radiador vertical de longitud eléctrica;

$$H + H' = 16 + 10'44 \approx 26'5 \text{ mts y una } Z_0 \text{ de } 272 \Omega$$

Repitiendo los cálculos para este nuevo radiador, obtenemos los siguientes resultados:

$$R_b = 12 \Omega \text{ y en el vientre, } R_v = 8'63 \Omega$$

$$X_e = -177 \Omega$$

Recordando que estimamos una resistencia de pérdidas  $R_p = 10 \Omega$ , la resistencia de entrada será

$$R_e = R_b + R_p = 22 \Omega$$

Para compensar la reactancia  $X_e$  con una inducción en serie con la alimentación, repitiendo los cálculos anteriores, obtendremos un valor de  $15'4 \mu\text{H}$

Pero si queremos adaptar los  $22 \Omega$  de la resistencia de entrada a los  $50 \Omega$  de la alimentación, consideraremos el equivalente paralelo de la impedancia de entrada, insertaremos entre los terminales de la base una bobina adecuada y ajustaremos la toma de las espiras como un autotransformador.

El equivalente paralelo de la impedancia de entrada será:

$$R_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{R_s} = \frac{22^2 + 177^2}{22} = 1446 \Omega$$

$$X_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{X_s} = \frac{22^2 + 177^2}{177} = 180 \Omega$$

Para compensar  $X_p$  y formar un circuito resonante paralelo, la bobina a insertar tendrá la misma reactancia por lo que su inductancia, será de  $15'6 \mu\text{H}$  y repitiendo los cálculos para este nuevo valor de  $L$ , obtenemos un número de espiras necesarias de (15) .

Aplicando la fórmula de la relación de transformación en un transformador, tenemos:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2; \quad \frac{1446}{50} = \left( \frac{15}{x} \right)^2$$

Despejando  $x$  tenemos que debemos efectuar la conexión de la alimentación en la espira 279 (3) contando desde el extremo frío de la bobina.

El rendimiento de la antena será;

$$\eta = \frac{R_b}{R_e} = \frac{12}{22} = 54'5\%$$

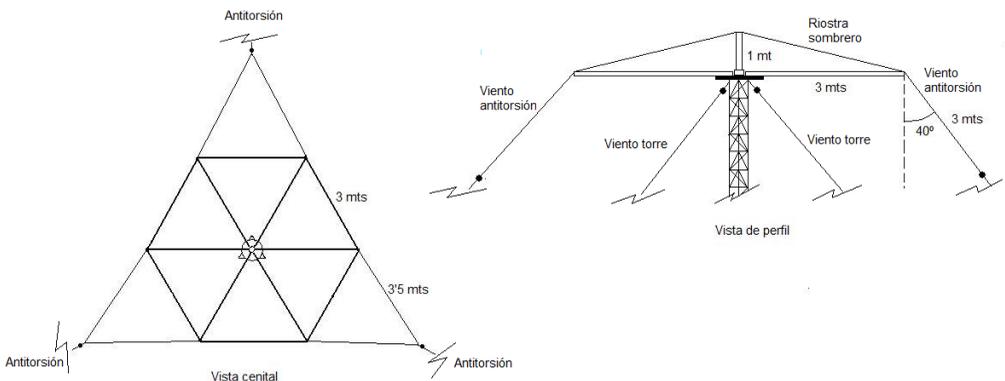
La ganancia de la antena es de  $G_{dm\acute{a}x} = 3'11$  en valores absolutos ó  $-0'2$  dB respecto al monopolo patrón

Obtenidos los datos teóricos de las prestaciones de esta antena, podemos ejecutar algunas acciones para mejorar sus prestaciones.

Tendiendo riostras con un buen contacto metálico desde los vértices del sombrero capacitivo a un mástil central de 1 m de altura, además de proporcionar fortaleza, aumenta la capacidad del conjunto al aumentar el volumen, aumentando por lo tanto la altura eléctrica equivalente.

Por otra parte, y a fin de evitar el esfuerzo de torsión al que se ve sometida la torre por efecto del viento en la vela ofrecida por el sombrero, se deberá arriostrar éste, según la figura siguiente. los vientos tendrán continuidad eléctrica un tramo conveniente para que actúen como una “umbrella”, evitando en lo posible su efecto de blindaje del mástil. De una manera conservadora, insertaremos el primer aislador en los primeros 3 m de las riostras.

Un detalle de la situación del sombrero se muestra en la figura siguiente



La inserción de los vientos antitorsión añaden una capacidad estimada de unos 30  $\rho\text{F}$  al sombrero y las riostras superiores del sombrero añadirán otros 10  $\rho\text{F}$ . Estos valores se han estimado en base a cálculos aproximados de capacidad de conductores en presencia de tierra y cargas volumétricas. Repitiendo los cálculos en base a una capacidad total aproximada de 180  $\rho\text{F}$ , repitiendo los cálculos anteriores a partir de este punto, tendremos:

180  $\rho\text{F}$  equivalen a 483  $\Omega$  de reactancia capacitiva

La línea abierta equivalente que tenga esta reactancia en su entrada, tendrá una longitud angular de 0'56 radianes que equivalen a 14'7 mts.

La altura eléctrica total de la torre será de  $16+14'7 = 30'7$  mts (0'187  $\lambda$ )

La resistencia de entrada (contando los 10  $\Omega$  de pérdidas estimados, es de 27  $\Omega$  y la reactancia de entrada, de -132 $\Omega$ . Esta impedancia la adaptaremos a 50  $\Omega$  con una bobina entre los terminales de entrada de 11  $\mu\text{H}$  que con la misma forma e hilo anteriores, suponen 13 espiras y la toma en la espira n° 4.

El rendimiento de la antena será del  $17/27 = 63\%$

Estos datos son el punto de partida para cuantificar empíricamente los parámetros reales, mediante las oportunas medidas de campo y en la antena.

---

Fuente de formulación:

Cálculo de Antenas  
Armando García Domínguez EA5BWL  
3ª Edición Marcombo