

UNION DE RADIOAFICIONADOS ESPAÑOLES
Avenida de Monte Igueldo nº 102 – 28053 MADRID



Altura de las Antenas y Efectividad en las Comunicaciones

Segunda Edición

Guía para Responsables de Urbanismo y Radioaficionados

*Por R. Dean Straw, N6BV, Editor Técnico Senior y Gerald L. Hall, K1TD, Editor Técnico Retirado
Traducido por Salvador Doménech Fernández, EA5DY/EA4IG*



Copyright 1999
ARRL
Main Street 225
Newington, CT 06111, USA

SUMARIO

Los radioaficionados se comunican con estaciones repartidas por todo el mundo. Algunos contactos pueden ser de ámbito local, mientras que otros pueden ser literalmente de alcance mundial. Los radioaficionados utilizan para realizar sus comunicados una amplia variedad de frecuencias asignadas internacionalmente.

A excepción de los contactos locales, los cuales se realizan principalmente en frecuencias muy altas (VHF) y ultra-altas (UHF), los comunicados entre dos puntos cualquiera de la tierra utilizan fundamentalmente señales de altas frecuencias (HF) que se propagan por la ionosfera. La ionosfera terrestre actúa como un espejo situado a una altura de unos 230 kilómetros. El ángulo vertical de radiación de una señal emitida desde una antena es uno de los factores clave a la hora de determinar la distancia efectiva de la comunicación. La capacidad de comunicación a largas distancias requiere generalmente un ángulo de radiación bajo, lo cual implica que la antena debe situarse en un lugar elevado sobre el suelo en términos de la longitud de onda de la señal de radio que es transmitida.

Una antena de tipo directiva situada a una altura de unos 20 metros o más, proporciona un rendimiento muy superior que la misma antena situada a 10 metros, manteniéndose el resto de factores idénticos. A una altura de 36 metros, o aún superior, se obtendrían incluso más ventajas para comunicaciones de larga distancia. Para una estación receptora distante, una antena transmisora a 36 metros de altura proporcionará el efecto de aproximadamente 8 a 10 veces más potencia de transmisión que la misma antena a 10 metros de altura. Dependiendo de los niveles de ruido e interferencia, esta diferencia de rendimiento es a menudo suficiente para marcar la diferencia entre realizar el contacto en condiciones aceptables o ser incapaz de realizar en absoluto el comunicado.

Los radioaficionados cuentan con una bien merecida reputación por proporcionar comunicaciones vitales en situaciones de emergencia, tales como las que se presentan en inundaciones, huracanes o terremotos. Las comunicaciones de corto alcance en las frecuencias de VHF y UHF también requieren una altura suficiente sobre el terreno circundante para garantizar que la antena tiene un horizonte despejado.

En términos de seguridad y de consideraciones estéticas, podría parecer intuitivamente razonable para un responsable de urbanismo el querer restringir las instalaciones de antena a alturas reducidas. Sin embargo, tales restricciones de altura resultan a menudo contraproducentes y frustrantes para las partes involucradas. Si un radioaficionado ve limitada la altura de su antena a digamos 10 metros, sufrirá de una deficiente transmisión de sus señales, así como de una pobre recepción de señales distantes. En un intento de compensar la deficiencia en transmisión (no puede hacer nada respecto al problema de la pobre recepción) puede aumentar la potencia de emisión, digamos de 150 vatios a 1.500 vatios, la potencia máxima legal. Este incremento de la potencia aumentaría muy significativamente el *potencial* de interferencias en teléfonos, televisores y equipos de video y audio en su vecindario.

Al contrario, si la antena puede ser ubicada alejada de los dispositivos electrónicos del vecindario – es decir, poniéndola más alta- se reducirá de manera notable la probabilidad de interferencias, la cual disminuye de manera inversa al cuadrado de la distancia. Por ejemplo, duplicando la altura se reduce el potencial de interferencias un 75%. Como un beneficio adicional, una antena de grandes dimensiones no parece ni mucho menos tan grande a 36 metros de altura como puede parecerlo a 10 metros.

ALTURA DE LAS ANTENAS Y EFECTIVIDAD EN LAS COMUNICACIONES

*Por R. Dean Straw, N6BV, Editor Técnico Senior y Gerald L. Hall, K1TD, Editor Técnico Retirado
Traducido por Salvador Doménech Fernández, EA5DY/EA4IG*

El objeto de este documento es proporcionar información general sobre la efectividad de las comunicaciones y su relación con la altura física de las antenas. Se pretende que sus destinatarios sean tanto radioaficionados como los Responsables Municipales de Urbanismo, ante los cuales, en ocasiones, debe presentarse el radioaficionado para obtener permisos de obra para las antenas y sus torres.

Se examina en detalle el rendimiento de antenas polarizadas horizontalmente a alturas de 10, 20 y 36 metros. No se consideran las antenas polarizadas verticalmente puesto que en frecuencias de onda corta, sobre un terreno promedio y para ángulos de radiación bajos, son normalmente menos efectivas que las antenas horizontales.

Propagación ionosférica

Las frecuencias entre 3 y 30 megahercios (abreviadamente MHz) son a menudo llamadas bandas de "onda corta". En términos de ingeniería, este rango de frecuencias se define como el segmento de *alta frecuencia (HF -High Frequency-)* del espectro radioeléctrico. La comunicación por radio en HF entre dos puntos que distan entre sí más de entre 25 y 40 kilómetros, depende casi únicamente de la propagación de las señales de radio por medio de la ionosfera. La ionosfera es una región de la atmósfera superior terrestre que es ionizada principalmente por los rayos ultravioleta solares.

La ionosfera terrestre tiene la propiedad de refractar o curvar las ondas de radio que inciden en ella. La ionosfera no es una única "sabana" ionizada. Al contrario, por una diversidad de razones complejas, consiste en varias capas discretas a diferentes alturas sobre la tierra. Desde el punto de vista de la propagación de ondas de radio, cada capa ionizada tiene características particulares, relacionadas fundamentalmente con diferentes niveles de ionización en diversas capas. La capa ionizada que resulta más útil para radiocomunicaciones de HF es la llamada *capa F*.

La capa F existe a alturas que varían desde aproximadamente unos 190 kilómetros hasta unos 400 kilómetros sobre la superficie terrestre. Tanto la altura de la capa como la cantidad de ionización dependen de la latitud desde el ecuador, la hora del día, la estación del año y el nivel de actividad de las manchas solares. La actividad de manchas solares varía generalmente en ciclos de una duración aproximada de once años, aunque erupciones de corta duración pueden crear cambios en las condiciones de propagación que pueden durar desde unos minutos a varios días. La ionosfera no es homogénea y esta sujeta a continuos cambios. De hecho, la estimación exacta de la ionosfera en un momento dado es tan variable que se describe mejor en términos estadísticos.

La capa F desaparece por la noche en periodos de baja o media actividad solar, puesto que la energía ultravioleta requerida para mantener la ionización ya no se recibe desde el sol. La cantidad de onda de

radio incidente que será reflejada en una capa de la ionosfera está directamente relacionada con la intensidad de ionización de esa capa, así como de la frecuencia de la onda de radio.

La trayectoria de la onda de radio en la ionosfera puede representarse de manera muy simplificada mediante un triángulo, tal como muestra la **figura 1**, La base del triángulo es la superficie de la tierra entre dos puntos distantes, y el vértice superior del triángulo es el punto de refracción en la ionosfera. Si se cumplen todas las condiciones necesarias, la onda de radio viajará desde el primer punto sobre la superficie de la Tierra hasta la ionosfera, donde será doblada (refractada) suficientemente para viajar hasta el segundo punto, a muchos cientos de kilómetros de distancia.

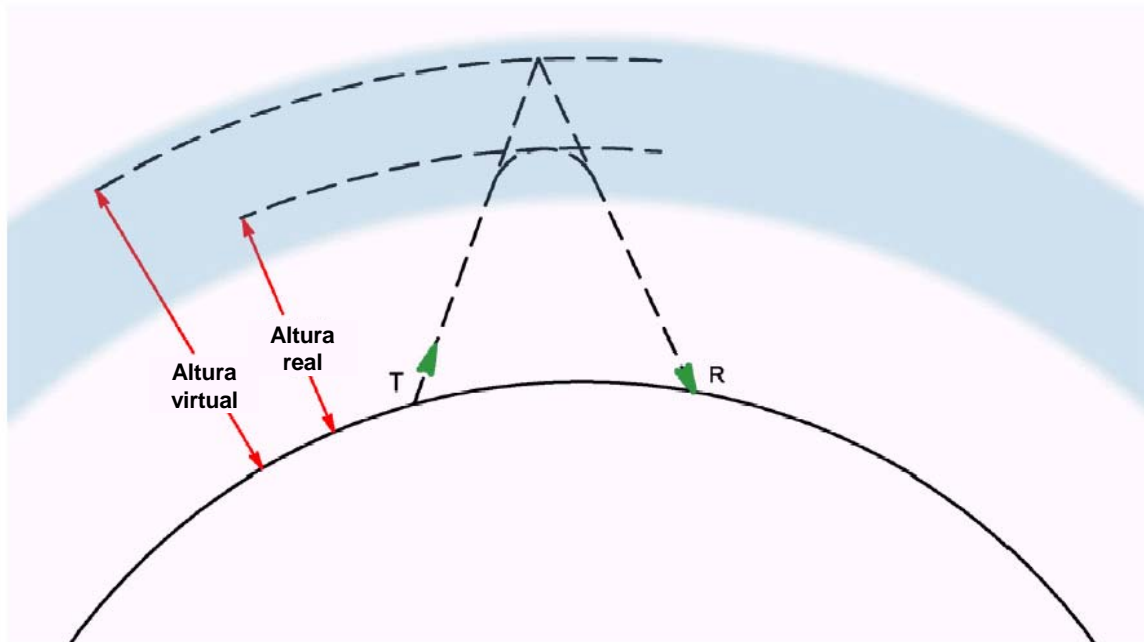


Figura 1- Sección transversal simplificada de la propagación ionosférica El triángulo simple va desde el transmisor T hasta la altura virtual y desde aquí de vuelta hasta el receptor R. La capa F existe típicamente a una altitud de 230 kilómetros sobre la Tierra en latitudes medias. La distancia entre T y R puede variar entre unos pocos kilómetros y unos 4.000 kilómetros bajo condiciones normales de propagación.

Por supuesto que la superficie de la Tierra no es plana sino curva. Las ondas de radio de alta frecuencia se comportan esencialmente de la misma forma que las ondas de luz – tienden a viajar en línea recta, pero con una ligera tendencia a curvarse hacia abajo debido a la refracción del aire-. Por esta razón, en este rango de frecuencias, no es posible comunicar por un camino directo más allá de distancias entre 25 y 40 kilómetros, ligeramente por encima del horizonte óptico. La curvatura de la Tierra hace que la superficie quede por debajo del camino de la onda de radio para distancias superiores. Por tanto, es la ionosfera la que permite que puedan realizarse comunicaciones en HF entre puntos separados por cientos o incluso miles de kilómetros de distancia. El rango de frecuencias entre 3 y 30 MHz es singular a este respecto, ya que la propagación ionosférica no existe de manera consistente fuera de este rango.

Una de las condiciones necesarias para las comunicaciones ionosféricas es que la onda de radio debe incidir sobre la ionosfera con el ángulo correcto. Esto queda ilustrado en la **figura 2**, otro gráfico simplificado de la geometría involucrada. Las ondas de radio que abandonan la tierra con ángulos altos de elevación sobre el horizonte son dobladas muy ligeramente por la refracción y se pierden en el espacio exterior. Para esa misma frecuencia de operación, a medida que se reduce el ángulo de

elevación hacia el horizonte, se alcanza un punto en el que la refracción de la onda es suficiente para devolverla hacia la superficie de la Tierra. Para ángulos sucesivamente inferiores, la onda regresará a la tierra a distancias cada vez mayores.

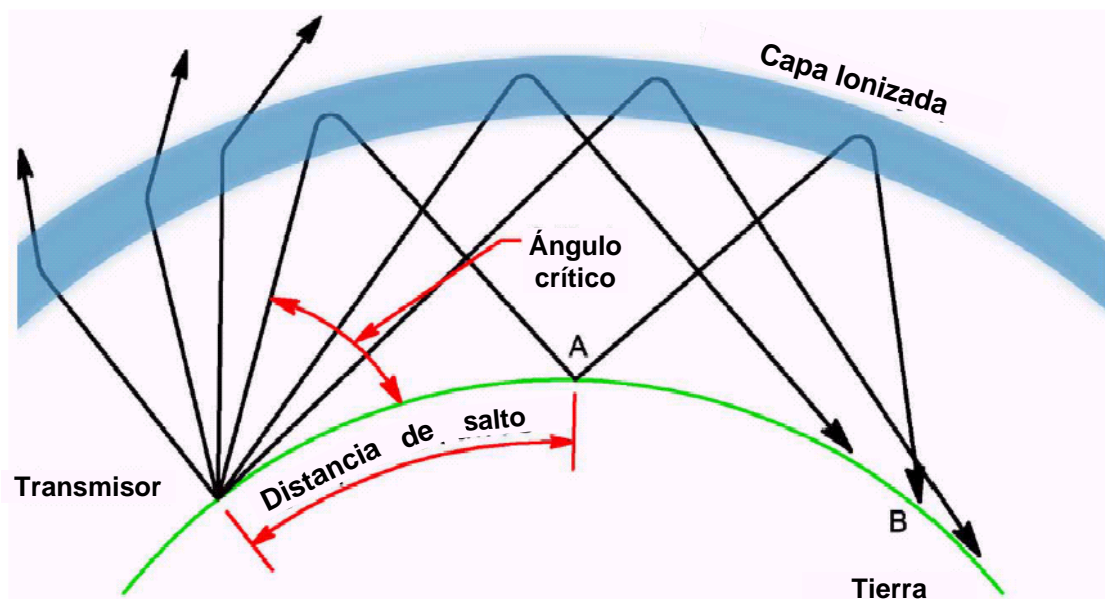


Figura 2- Comportamiento de las ondas de radio frente a la ionosfera. Los rayos que entran en la región ionizada con ángulos por encima del ángulo crítico no son curvados suficientemente para retornar a la Tierra y se pierden en el espacio. Las ondas que penetran con ángulos por debajo del ángulo crítico alcanzan la Tierra a distancias cada vez mayores a medida que el ángulo se aproxima a la horizontal. La distancia máxima que normalmente puede cubrirse en un único salto es de unos 4000 kilómetros. Se pueden cubrir mayores distancias mediante saltos múltiples.

Si la onda de radio abandona la Tierra con un ángulo de elevación de cero grados, justo hacia el horizonte (o justo tangente a la superficie de la Tierra), la máxima distancia que podría alcanzarse bajo condiciones normales de la ionosfera es de aproximadamente 4.000 kilómetros. Sin embargo la Tierra misma también actúa como un reflector de las ondas de radio que llegan a su vez reflejadas desde la ionosfera. Es frecuente que una señal de radio sea reflejada desde el punto de recepción en la Tierra de nuevo hacia la ionosfera, alcanzando la Tierra una segunda vez a una distancia todavía mayor.

Al igual que en el caso de las ondas de luz, el ángulo de reflexión es el mismo que el ángulo de incidencia, de manera que una onda que alcance la superficie de la Tierra con un ángulo de, digamos, 15° se reflejará hacia arriba desde la superficie con el mismo ángulo. Así, la distancia hasta el segundo punto de recepción será aproximadamente el doble de la distancia hasta el primero. Este efecto se ilustra también en la figura 2, donde la señal viaja desde el transmisor a la izquierda del dibujo hasta el punto A tras rebotar en la ionosfera. Desde el punto A la señal viaja de nuevo gracias a la ionosfera hasta el punto B, a la derecha. Se denomina *salto* al trayecto de una señal que saliendo de la Tierra regresa a la misma a través de la ionosfera. Bajo ciertas condiciones es posible encontrar cuatro o cinco saltos en un enlace de radio, pero lo normal es que no sean más de dos o tres. De esta manera, las comunicaciones en HF pueden realizarse por encima de miles de kilómetros.

Respecto al salto de las señales deben mencionarse dos puntos importantes. Primero, se produce una importante pérdida de señal en cada salto. Las capas inferiores de la ionosfera absorben energía de las señales que las atraviesan, y la ionosfera tiende a dispersar la energía de radio en varias direcciones, en

lugar de confinarla en un único haz. La Tierra también dispersa en el punto de reflexión. De esta manera, sólo una pequeña fracción de la energía transmitida alcanza un punto de recepción distante.

En la figura 2 se muestran dos caminos de la señal de radio que van desde el transmisor hasta el punto B, uno consistente en un único salto y el otro consistente en dos saltos. Medidas realizadas indican que aunque puede haber una gran variación entre las intensidades de ambas señales en una situación como esta, la señal recibida en el punto B por la onda de un solo salto será de cinco a diez veces mayor que la de dos saltos. (el terreno en el punto intermedio de reflexión de la onda de dos saltos, el ángulo por el cual se refleja la onda en la tierra y las condiciones de la ionosfera en la zona de todos los puntos de refracción son los principales factores que determinarán la relación entre las dos señales). Los niveles de señal se comparan generalmente en decibelios, abreviadamente dB. El decibelio es una unidad logarítmica. Una diferencia entre señales de tres decibelios es equivalente a una relación de potencias de 2 a 1; una diferencia de 10 dB equivale a una relación de potencias de 10 a 1. De este modo, una pérdida de señal por un salto adicional es de 7 a 10 dB.

La pérdida adicional por salto se convierte en significativa para distancias mayores. Para un ejemplo simplificado, una distancia de 6.000 kilómetros puede cubrirse con dos saltos de 3.000 kilómetros cada uno o cuatro saltos de 1.500 kilómetros cada uno. A efectos ilustrativos supóngase que la pérdida por cada salto adicional es de 10 dB o un décimo de la relación de potencias. Bajo tales condiciones, la señal de cuatro saltos se recibirá con sólo una centésima parte, o 20 dB más débil, que la señal de dos saltos. La razón de que esto ocurra es que sólo un décimo de la señal de dos saltos se recibe tras el tercer salto y sólo un décimo de este décimo se recibe tras el cuarto salto. Es por esta razón por lo que sólo son útiles hasta cuatro o cinco saltos de propagación; la señal de recepción llega a ser demasiado débil para ser escuchada.

El segundo punto importante que debe tenerse en cuenta en la propagación multisalto es que la geometría del primer salto determina la geometría de los saltos sucesivos. Y es el ángulo de elevación del transmisor el que determina la geometría del primer salto.

Resulta evidente de la discusión precedente que se precisa un conocimiento detallado del rango de ángulos de elevación que permitan una comunicación efectiva, a fin de realizar una evaluación rigurosa de un posible enlace de comunicaciones. El rango de ángulos debería ser válido estadísticamente durante todo el ciclo de manchas solares de 11 años, puesto que el comportamiento del Sol determina los cambios en la naturaleza de la ionosfera terrestre. La ARRL realizó un estudio muy detallado a principios de los años 1990 para determinar los ángulos necesarios para propagación por todo el mundo. Los resultados de este estudio serán examinados posteriormente, tras presentar la relación entre la altura de la antena y el ángulo de elevación de la señal emitida.

Antenas horizontales sobre suelo plano

Una antena simple ampliamente utilizada para comunicaciones en HF es el dipolo horizontal de media onda. El dipolo es una longitud recta de cable (o tubo) en la cual la energía de radiofrecuencia se alimenta en su centro. Debido a su simplicidad, el dipolo es susceptible de ser fácilmente sujeto a análisis teóricos de rendimiento. Además, los resultados de un análisis adecuado están bien corroborados por la práctica. Por estas razones, el dipolo de media onda es un estándar adecuado contra el que se pueden comparar otros sistemas de antena.

Debido a que la tierra actúa como un reflector para las ondas de radio de HF, las propiedades directivas de cualquier antena quedan considerablemente modificadas por el suelo. Si una antena dipolo se sitúa horizontalmente sobre el suelo, la mayor parte de la energía radiada hacia abajo desde el dipolo es

reflejada hacia arriba. Estas ondas reflejadas se combinan con las ondas directas (aquellas radiadas por encima de la horizontal) de diversas formas, dependiendo de la altura de la antena la frecuencia y las características eléctricas del suelo y debajo de la antena.

A determinados ángulos verticales sobre el horizonte, la ondas directa y reflejada pueden estar exactamente en fase – es decir, los máximos de intensidad de campo de ambas señales se alcanzan en el mismo instante en un punto distante-. En este caso, la intensidad de campo resultante es igual a la suma de sus dos componentes. En otros ángulos verticales las dos ondas pueden estar completamente fuera de fase en un punto distante – es decir, los campos en el mismo instante pero las direcciones de fase son opuestas-. El campo resultante en este caso es la diferencia entre los dos. En otros ángulos, el campo resultante tendrá valores intermedios. De esta manera, el efecto del suelo es aumentar la intensidad de radiación a determinados ángulos y disminuirla en otros. Los ángulos de elevación en los cuales se producen máximos y mínimos depende principalmente de la altura de la antena sobre el suelo (las características eléctricas del suelo tienen también un ligero efecto).

Para simplificar, consideremos el suelo como un conductor perfecto, completamente plano, de manera que puedan hacerse cálculos trigonométricos directos para determinar la cantidad relativa de intensidad de radiación sobre cualquier ángulo vertical a cualquier altura del dipolo. Los gráficos resultantes de tales cálculos son a menudo representados sobre ejes rectangulares para mostrar una mejor resolución para rangos de ángulos de elevación que sean particularmente útiles, aunque son también representados sobre diagramas polares de manera que se puedan examinar fácilmente tanto la radiación delantera como la trasera. La **figura 3** muestra una superposición de dos patrones de respuesta de sendos dipolos a diferentes alturas sobre un suelo plano perfectamente conductor. El dipolo inferior está situado a media longitud de onda sobre el suelo, mientras que el dipolo superior se sitúa a una longitud de onda sobre el suelo. El patrón de la antena inferior presenta un pico a un ángulo de elevación de alrededor de 30° , mientras que la antena superior tiene dos lóbulos principales, uno con pico a 15° y el otro a alrededor de unos 50° de ángulo de elevación.

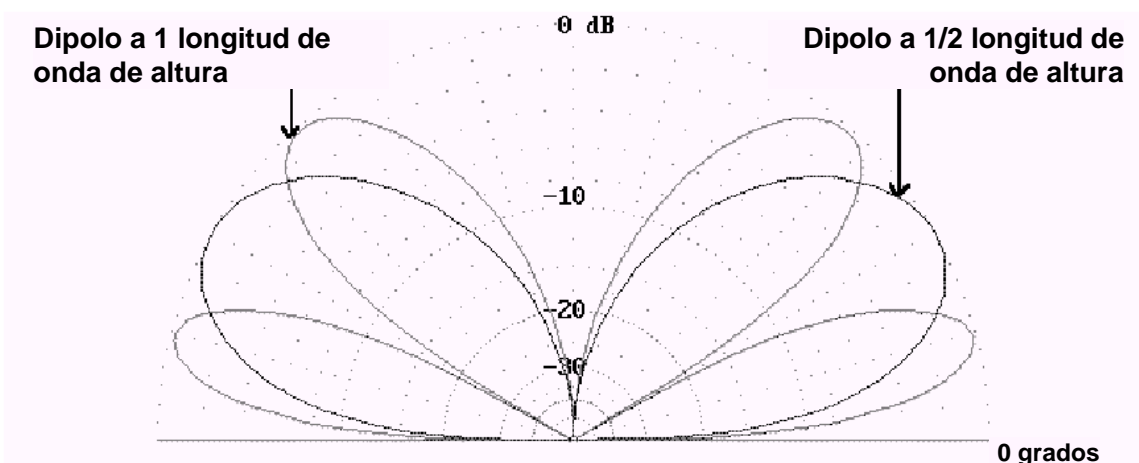


Figura 3-Comparación de las respuestas en elevación de dos dipolos: uno a $\frac{1}{2}$ longitud de onda de altura y el otro a 1 longitud de onda de altura

En los gráficos mostrados en la **figura 3**, el ángulo de elevación sobre el horizonte se representa de la misma manera que un semicírculo graduado. Los círculos concéntricos se calibran para representar relaciones de intensidad de campo, referenciadas a la intensidad representada por el círculo exterior.

Las alturas de las antenas se expresan frecuentemente en términos de longitud de onda. La razón es que la longitud de una onda de radio es inversamente proporcional a su frecuencia. Por tanto, una misma altura fija representará diferentes alturas eléctricas para diferentes radiofrecuencias. Por ejemplo, una altura de 20 metros representa media longitud de onda para una frecuencia de 7 MHz y sólo un cuarto de longitud de onda para 3,5 MHz. Por otra parte, 20 metros de altura representan dos longitudes de onda para 28 MHz.

Los lóbulos y mínimos de los patrones mostrados en la **figura 3** ilustran lo descrito anteriormente respecto al efecto del suelo por debajo de una antena consiste en hacer aumentar la intensidad de radiación en determinados ángulos verticales y hacerlos disminuir en otros. A una altura de media longitud de onda la energía radiada es mayor en un ángulo bastante elevado de 30°. Esta sería la situación de un dipolo para 14 MHz a diez metros de altura sobre el suelo.

A medida que la antena horizontal se eleva a alturas superiores, se forman lóbulos adicionales, posicionándose los inferiores cada vez más cerca del horizonte. La amplitud máxima de cada uno de los lóbulos es aproximadamente igual. Como puede verse en la **figura 3**, para una altura de antena de una longitud de onda, la energía en el lóbulo inferior es más fuerte a los 15°. Esta sería la situación de un dipolo de 14 MHz a 20 metros de altura.

El ángulo de elevación del lóbulo inferior para una antena horizontal por encima de un suelo perfectamente conductor puede determinarse matemáticamente:

$$Z = \arcsen (0,25/h)$$

Donde

Z = ángulo de elevación de la onda.

h = altura de la antena sobre el suelo en longitudes de onda.

Resumiendo, cuanto más alta se sitúe la antena horizontal, menor será el ángulo de su lóbulo de radiación. Como una sencilla regla general puede decirse que cuanto más alta se sitúe una antena de HF, más lejano será su alcance para comunicaciones efectivas. Esto es cierto para cualquier antena horizontal tanto sobre suelo real como sobre suelo teóricamente conductor perfecto.

Debe hacerse notar también que los *nulos* en el patrón de elevación juegan también un papel importante en la comunicación –o ausencia de la misma-. Si una señal llega con un ángulo en el que el sistema de antenas muestra un nulo profundo, la efectividad de la comunicación queda reducida enormemente. Es por tanto posible que a una determinada frecuencia, una antena esté *demasiado alta* para una buena eficiencia de la comunicación. Aunque esto muy raramente aparece como un problema en las bandas de radioaficionado por debajo de 14 MHz, se discutirá el tema de la altura óptima en más detalle más adelante.

La tierra real no refleja toda la energía de radiofrecuencia que incide sobre ella ya que tiene lugar una cierta absorción. Sobre una tierra real, por tanto, los patrones de radiación serán ligeramente diferentes de los mostrados en la **figura 3**, sin embargo las diferencias entre suelos teóricos y reales no son significativas para el rango de ángulos de elevación necesarios en una buena comunicación de HF. Existen modernos programas de ordenados que pueden realizar evaluaciones precisas, tomando en cuenta todos los factores significativos relativos al suelo.

Antenas directivas

Para comunicaciones punto a punto, es conveniente concentrar la energía radiada en un haz que pueda ser dirigido hacia el punto distante. Puede hacerse una analogía comparando una simple bombilla con el faro de un automóvil, el cual incorpora una lente de enfoque interna. Para iluminar un punto distante, el faro es mucho más efectivo.

Las antenas diseñadas para concentrar la energía radiada en un haz son llamadas antenas directivas. Dada una cantidad fija de potencia de transmisión alimentada a una antena emisora, las antenas directivas proporcionarán una intensidad de señal mayor sobre un receptor distante. En radiocomunicaciones, el uso de antenas directivas aporta beneficios también en recepción, ya que el patrón de la antena para emisión es el mismo para recepción. Una antena directiva ayuda a eliminar señales de las direcciones no deseadas, además de aumentar la fuerza de las señales recibidas por la dirección deseada. Se utiliza con frecuencia el término *ganancia* para referenciar el incremento de señal o de intensidad de campo que ofrece una antena directiva con respecto a una antena dipolo en el espacio libre (o a otra antena teórica en el espacio libre llamada antena isotrópica). La *ganancia* se expresa normalmente en decibelios. La antena isotrópica se define como aquella que radia de manera igual en todas direcciones, de modo similar a como una bombilla simple ilumina esencialmente igual en todas direcciones.

Un tipo de antena directiva particularmente bien conocido es la llamada antena *Yagi*, en reconocimiento a uno de sus inventores japoneses. Existen diferentes variedades de antena *Yagi*, cada una con diferentes características. Muchas antenas de televisión son variantes multielemento de antenas *Yagi*. En el próximo apartado de este documento, nos referiremos a antenas *Yagi* de cuatro elementos, con ganancias de 8,5 dBi en el espacio libre, lejos de cualquier influencia debida al suelo.

Esta antena tiene 8,5 dB más de ganancia que una antena isotrópica en el espacio libre, consiguiendo tal ganancia concentrando el patrón de radiación hacia determinadas direcciones. Piénsese en términos de un globo redondo e imagínese que se exprime para alargarlo en una dirección. El incremento de longitud en una dirección se consigue a expensas de la longitud en otras direcciones. Esto es análogo a cómo una antena consigue más intensidad de señal en una dirección, a expensas de la intensidad de señal en otras direcciones.

El patrón de elevación de una antena *Yagi* sobre un suelo plano variará con la altura eléctrica de la misma manera que lo hace un mucho más simple dipolo. La antena *Yagi* es una de las antenas más comúnmente utilizadas por radioaficionados y segunda en popularidad tras el dipolo.

Ensamblando las piezas

La **figura 4** muestra en forma de barras los ángulos de elevación necesarios para una comunicación desde una ubicación determinada, Boston, Massachusetts, a Europa continental usando la banda de aficionados de 14 MHz. La **figura 4** muestra el porcentaje de tiempo en el que está abierta la banda de 14 MHz para cada ángulo de elevación de 1° hasta 30°. Por ejemplo, 5° es el ángulo de elevación que acontece el 12% del tiempo en el que está disponible la banda para la comunicación, mientras que 11° acontece alrededor del 10% del tiempo en el que está abierta la banda. El rango de ángulos de elevación a los que debe acomodarse una estación de radioaficionado que desee contactar con Europa desde Boston es de 1° a 28°.

Adicionalmente al gráfico de barras de estadísticas de ángulo de elevación, la figura 4 muestra también superpuestas los patrones de las respuestas en elevación de tres antenas *Yagi*, situadas a tres alturas

diferentes sobre un suelo plano. Puede observarse que la antena a 36 metros resulta ser la mejor para cubrir los ángulos más probables para esta frecuencia en particular, aunque está penalizada para los ángulos de radiación más elevados de 12° de este camino de propagación. Sin embargo, si se acepta una cierta menor ganancia en los ángulos inferiores, la antena a 20 metros podría considerarse como la mejor opción para cubrir todos los ángulos de elevación.

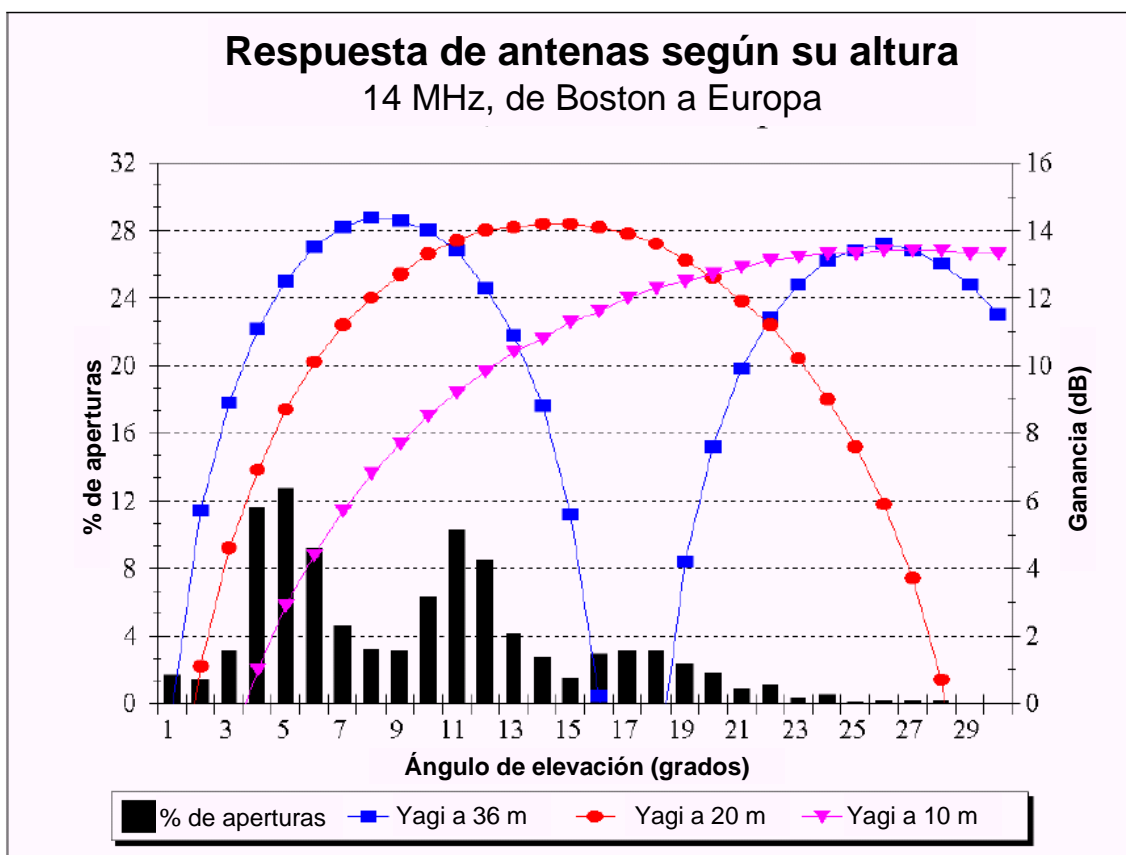


Figura 4- Patrones de respuesta en elevación para tres Yagis a 36, 20 y 10 metros de altura , a 14 MHz y sobre suelo plano. . Los patrones se superponen a estadísticas de ángulo de elevación para el camino desde Boston a Europa continental durante todo el ciclo de manchas solares de 11 años. La antena a 36 metros es claramente la mejor opción para cubrir los ángulos necesarios más bajos, pero está algo penalizada para los ángulos superiores.

Se precisan otros gráficos para mostrar áreas de recepción objetivo en el mundo. A efectos de comparación, la **figura 5** es también para la banda de 14 MHz pero en esta ocasión desde Boston hasta Sydney, Australia. El ángulo máximo para este muy largo camino es de alrededor de 2°, aconteciendo el 19% del tiempo en el que la banda esté abierta a la comunicación. Aquí incluso la antena a 36 metros de altura no es la ideal. Aun así, a un reducido ángulo de 5°, la antena a 36 metros de altura es 10 dB mejor que la de 10 metros de altura.

Las **figuras 4 y 5** han mostrado la situación para la banda de 14 MHz, la más popular y ampliamente utilizada por radioaficionados para contactos de larga distancia. Cuando la actividad de manchas solares es media o alta, las bandas de 21 y 28 MHz se abren durante el día para comunicaciones a larga distancia. La **figura 6** muestra las estadísticas de ángulo de elevación para 28 MHz, comparadas con los patrones de elevación de las mismas tres antenas de la **figura 5**. Claramente se observa como la respuesta en elevación de la antena a 36 metros tiene un serio (e indeseable) nulo a 8°.

metros está a una altura de casi 3,4 longitudes de onda 28 MHz (mientras que sólo a 1,7 longitudes de onda a 14 MHz). Para muchos ángulos de despegue la Yagi para 28 MHz a 36 metros de altura estaría simplemente demasiado alta.

El radioaficionado que deba operar en diversas frecuencias podría recurrir a dos o más torres de diferentes alturas para mantener una cobertura de los ángulos de elevación necesarios en todas las bandas autorizadas. Las antenas se pueden montar en ocasiones a diferentes alturas sobre una única torre, aunque para apuntar a todas las direcciones necesarias será más difícil el poder girar las antenas que estén apiladas verticalmente sobre una misma torre. Además, antenas de diferentes frecuencias situadas cerca entre sí, interaccionan eléctricamente produciendo una seria degradación en sus rendimientos.

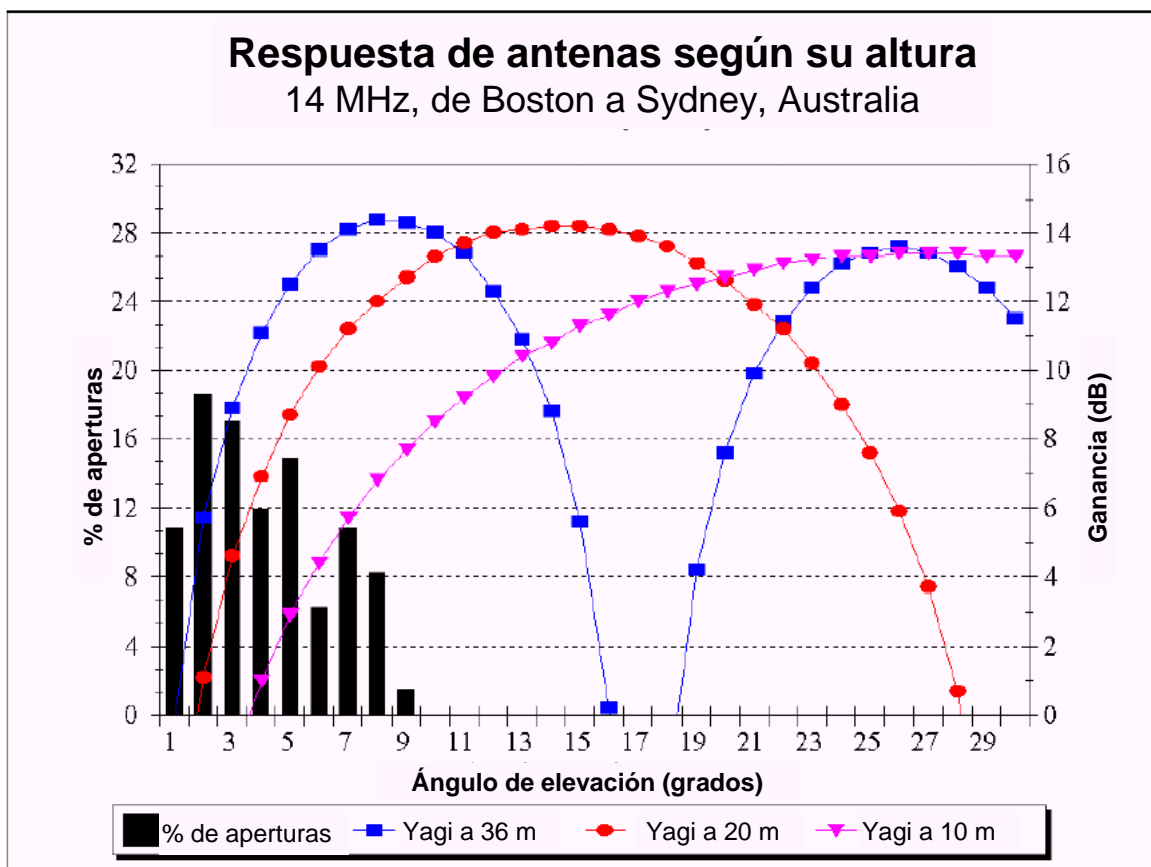


Figura 5- Respuestas en elevación para las mismas antenas de la figura 4, pero el camino desde Boston a Sydney, Australia. Nótese que los ángulos predominantes son muy bajos.

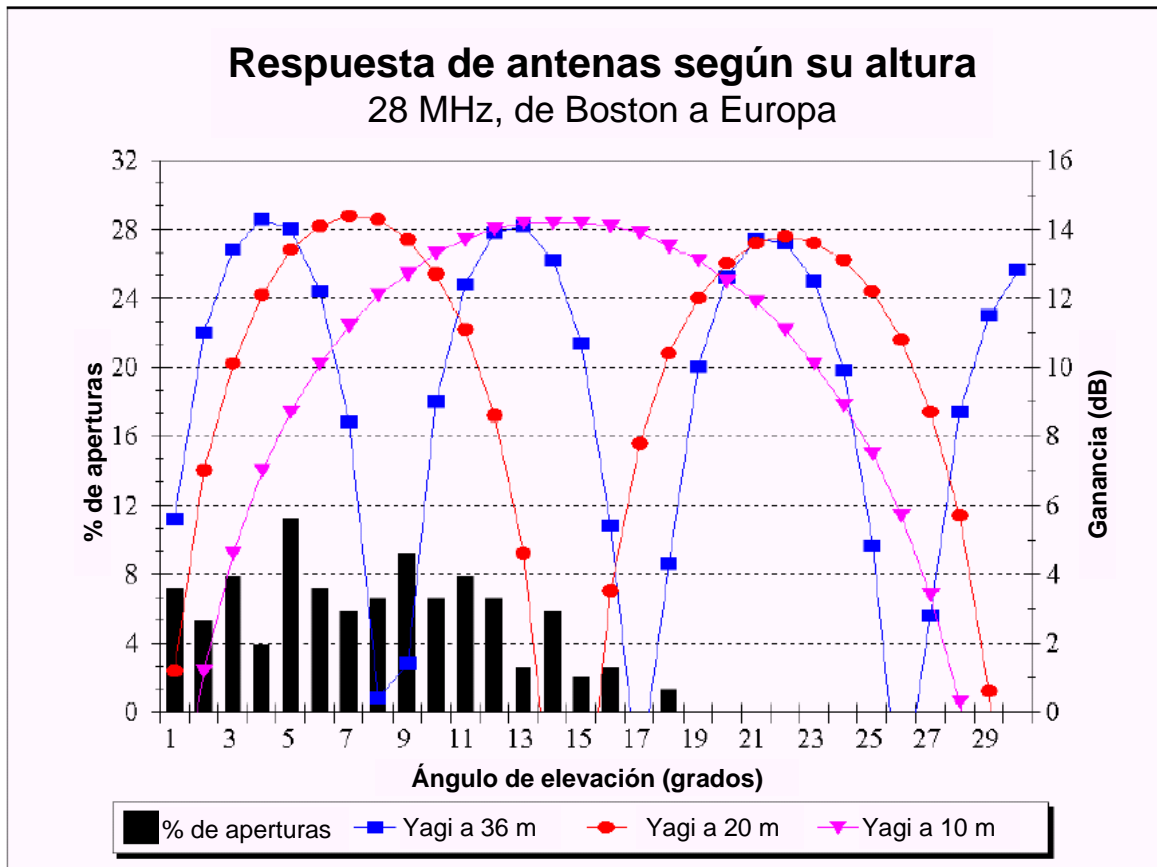


Figura 6- Ángulos de elevación comparados con la respuesta de las antenas para el camino de Boston a Europa. La antena a 20 metros es probablemente la mejor opción para este camino.

Durante periodos de baja a moderada actividad de manchas solares (alrededor del 50% de los 11 años del ciclo solar), la banda de 14 MHz se cierra al atardecer. Un radioaficionado que desee continuar la comunicación debe cambiar a una frecuencia más baja. La siguiente banda más ampliamente utilizadas tras la de 14 MHz es la banda de 7MHz. La figura 7 ilustra el caso de otra ubicación transmisora, en esta ocasión de San Francisco, California al continente Europeo. Ahora el rango de ángulos de elevación necesarios es de alrededor de 1° a 16°, con un máximo de mayor probabilidad estadística del 16% a 3° de elevación. Para este bajo ángulo de elevación, una antena de 7 MHz deberá estar muy alta para ser efectiva. Incluso la antena a 36 metros es escasamente adecuada para el máximo en el ángulo de 3°. La antena a 60 metros mostrada sería muy superior que la de 36 metros. Además, la antena a 10 metros es tremendamente deficiente respecto a las otras antenas para este camino y proporcionaría muchas menos posibilidades, tanto en recepción como en transmisión.

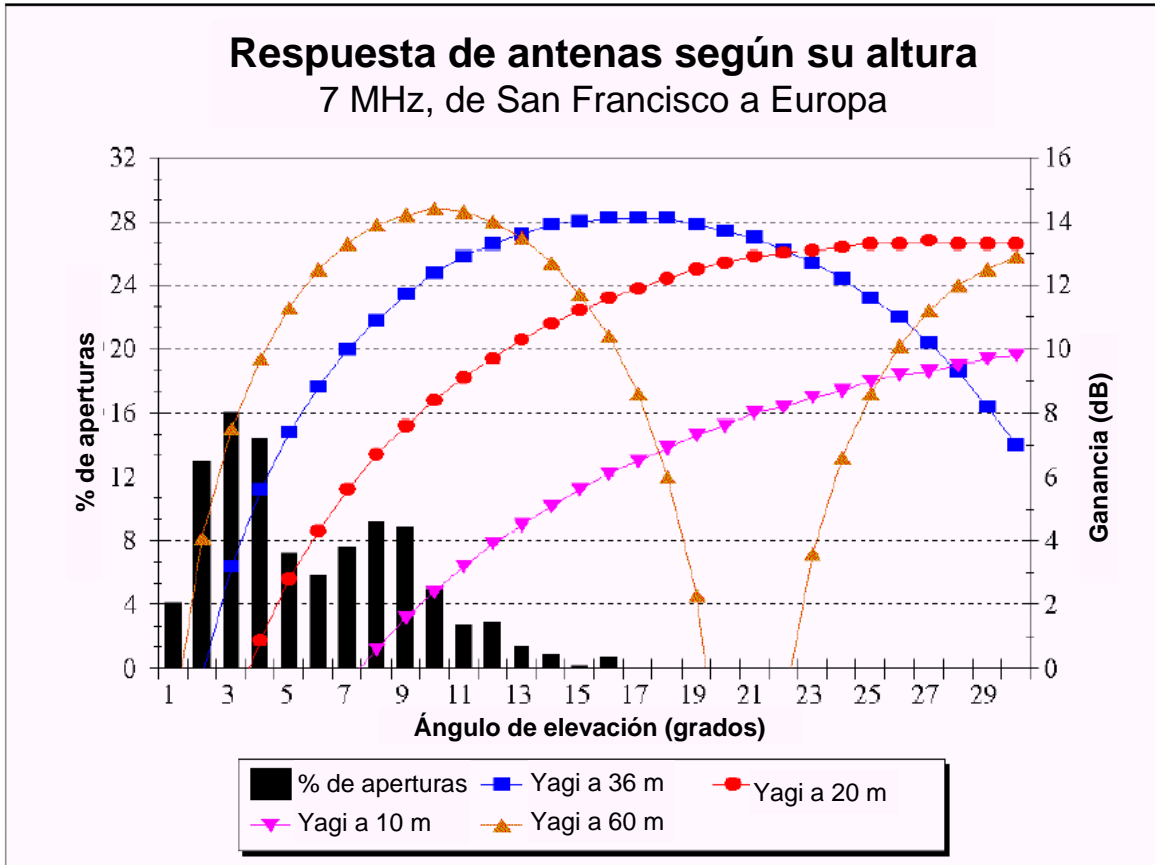


Figura 7- Comparación de las respuestas de antenas para otro camino de propagación: de San Francisco a Europa en 7 MHz. Aquí, incluso una antena a 36 metros de altura es escasamente adecuada para los muy bajos ángulos de elevación requeridos para este camino tan largo. De hecho, la antena a 60 metros es de lejos la mejor opción.

¿Qué ocurre si el suelo no es plano?

En la discusión precedente, los patrones de radiación fueron calculados para antenas situadas sobre suelo plano. Las cosas se complican mucho más cuando se tiene en cuenta el suelo real que rodea a una torre y antena. En los últimos años, se han desarrollado sofisticados modelos computerizados que permiten calcular el efecto del suelo local sobre los patrones de elevación en instalaciones de HF en el mundo real –y cada situación del mundo real es, en efecto, diferente-.

Para simplificar, considérese primero una antena en lo alto de una colina con una pendiente hacia abajo constante. El efecto general es hacer disminuir el ángulo de radiación efectiva una cantidad igual a la pendiente de la colina. Por ejemplo, si la pendiente es de -3° durante una distancia considerable desde la torre y el ángulo de elevación para suelo plano es de 10° (debido a la altura de la antena), entonces el resultado neto será un ángulo de $10^\circ - 3^\circ = 7^\circ$. Sin embargo, si el terreno local es desigual, con altos y bajos en la dirección deseada, la respuesta puede modificarse considerablemente. La **figura 8** muestra el complicado perfil del terreno en dirección a Japón para Jan Carman, K5MA. Jan vive en una de las colinas más elevadas de West Falmouth, Massachussets. A 150 metros de su torre hay una pequeña colina con un depósito de agua en su cima y después el terreno cae rápidamente, de manera que a una distancia de 1000 metros de la base de la torre, la cota alcanza el nivel del mar.

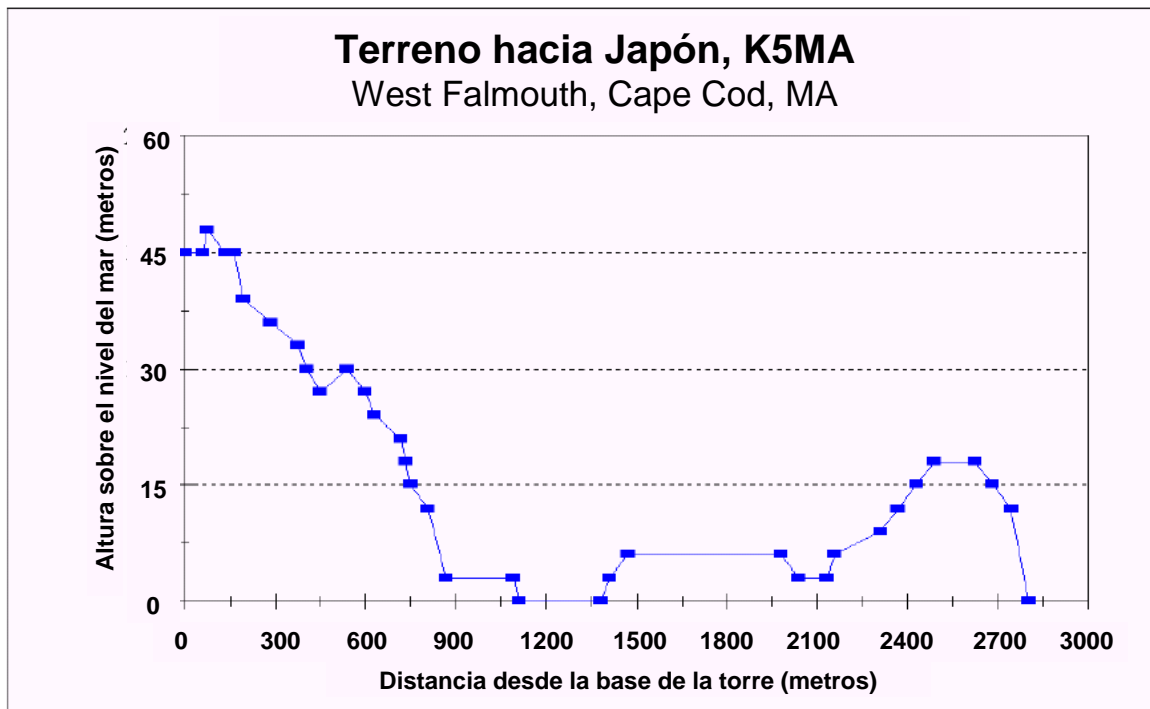


Figura 8- Perfil del terreno con dirección a Japón desde la ubicación de K5MA, Jan Carman, en West Falmouth, Massachussets

La figura 9 muestra las respuestas calculadas por ordenador para el camino hacia Japón desde esta ubicación, usando Yagis a 36 y a 20 metros de altura y superpuestas con la respuesta de una Yagi a 36 metros de altura sobre suelo plano. Sobre este terreno en concreto, el patrón de elevación de la antena a 20 metros es incluso mejor que el de la antena a 36 metros para ángulos por debajo de tres grados, pero ¡no es así para ángulos intermedios! Las respuestas para cada altura varían alrededor del patrón calculado para suelo plano, y todo ello debido a las complejas refracciones y difracciones ocasionadas por el terreno.

Para un ángulo de elevación de 5° , la situación se invierte y la ganancia resulta ahora mayor para la antena de 36 metros que para la de 20 metros. Se necesitarían dos antenas para cubrir adecuadamente todos los ángulos. Para evitar cualquier interacción eléctrica entre antenas similares en una misma torre, sería preferible el uso de dos torres. Comparado con la situación de suelo plano, la respuesta de las antenas en el mundo real puede ser muy complicada debido a la interacción con el terreno circundante.

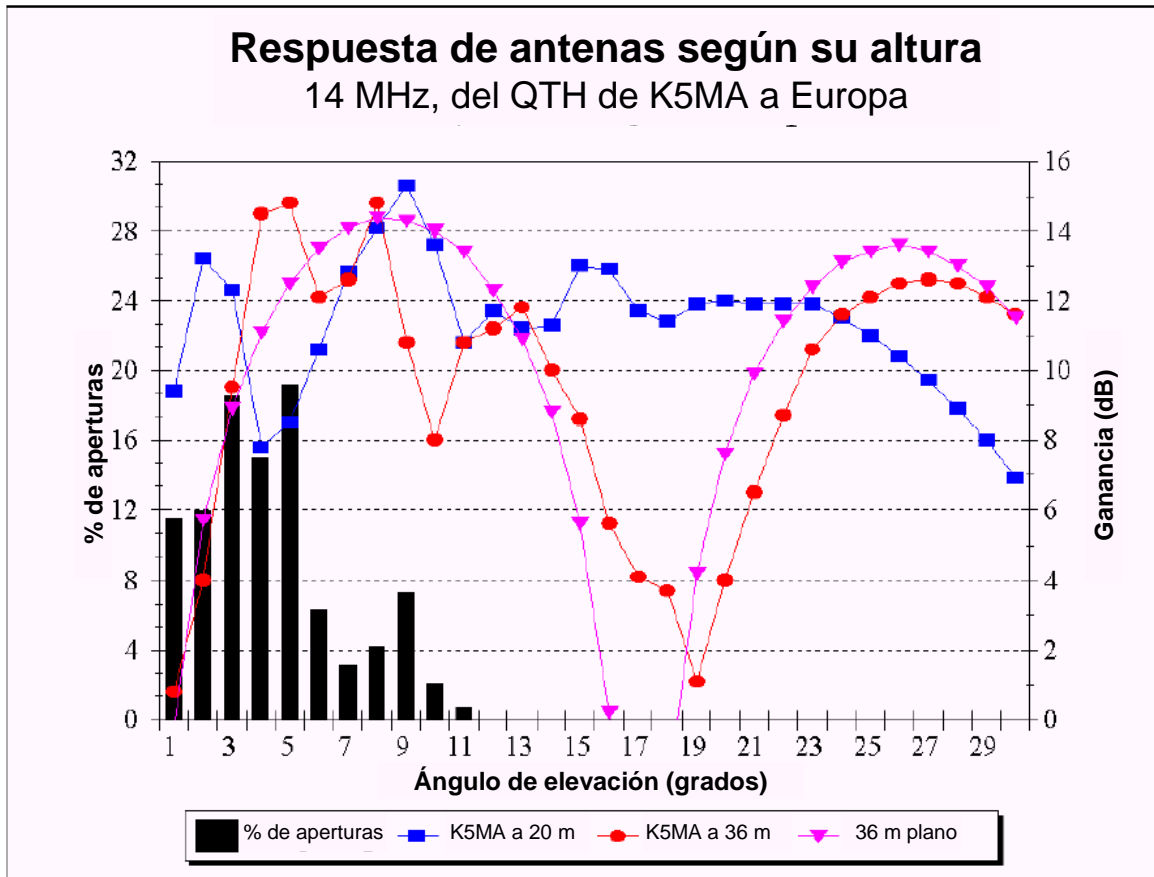


Figura 9- Cálculo de las respuestas en elevación de yagis a 36 y 20 metros en dirección a Japón desde la ubicación de K5MA en Cape Cod. La respuesta en elevación de la antena en el mundo real ha quedado notablemente alterada por el terreno circundante.

La figura 10 muestra la situación desde la misma ubicación en Cape Cod, pero ahora para 7 MHz. De nuevo, resulta evidente que la antena a 36 metros es superior en al menos 3 dB (equivalente a doblar la potencia) frente a la antena a 20 metros para ángulos estadísticos de elevación de 6°. Sin embargo, para ese mismo ángulo, la respuesta en el mundo real de la antena de 36 metros está todavía 2 dB por encima de una antena similar sobre suelo plano. En esta frecuencia, el terreno circundante ha ayudado a aumentar la ganancia para ángulos medios respecto a una antena similar a 36 metros sobre suelo plano. La ganancia es incluso superior para ángulos inferiores, digamos de 1°, para los cuales despegan la mayor parte de las señales, estadísticamente hablando. Situando la antena todavía más arriba, digamos a 45 metros, mejorará la situación en esta ubicación, como también lo haría el situar una Yagi adicional a 20 metros y alimentando ambas antenas en fase.

Aunque la discusión precedente está en términos de antena transmisora, los mismos principios aplican cuando se usa la antena para recepción. Un antena elevada recibirá señales de bajo ángulo de elevación más eficientemente que una antena más baja. De hecho, los radioaficionados conocen muy bien el dicho "si no puedes escucharles, no puedes hablar con ellos". Las estaciones con torres elevadas normalmente escuchan mucho mejor que sus homólogos con instalaciones más bajas.

La situación llega a ser incluso más difícil para la siguiente banda de radioaficionado de 3,5 MHz, en la que obtener alturas óptimas para comunicaciones a larga distancia es un asunto realmente heroico.

Entre los radioaficionados dedicados a trabajar largas distancias en 3,5 MHz es frecuente encontrar torres de más de 36 metros.

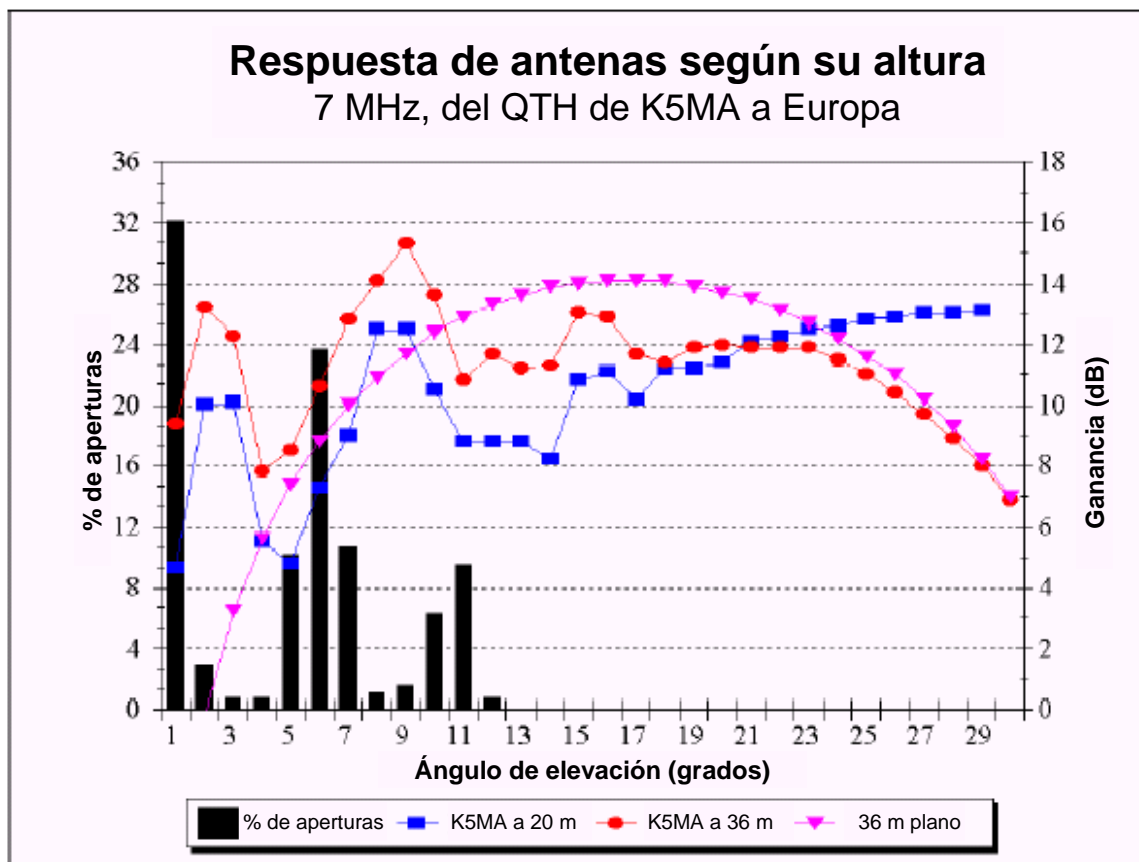


Figura 10- Respuesta en elevación para 7 MHz desde la ubicación de K5MA hacia Japón. La antena a 36 metros de altura es claramente superior a la de 20 metros.

Sin embargo, las bandas de 3,5 y 7 MHz no siempre son usadas estrictamente para comunicaciones de larga distancia. Ambas bandas son fundamentales para proporcionar comunicaciones de ámbito local, tales como las que podrían requerirse en caso de una emergencia local. Por ejemplo, terremotos, tornados y huracanes han interrumpido muy a menudo las comunicaciones locales puesto que las líneas telefónicas y de electricidad quedan cortadas y los repetidores de VHF/UHF de la policía o bomberos están sin servicio. Los radioaficionados a menudo utilizan las bandas de 3,5 y 7 MHz para proporcionar comunicaciones más allá de la zona afectada por el desastre, quizás hasta el próximo condado o hasta la próxima área metropolitana. Por ejemplo, un terremoto en San Francisco podría hacer que radioaficionados, con fuentes de alimentación de emergencia, proporcionaran comunicaciones a otros radioaficionados en Oakland cruzando la bahía de San Francisco, o incluso a puntos tan lejanos como Los Ángeles o Sacramento. Estos lugares serían aquellos en los que las líneas eléctricas y de teléfono seguirían intactas, mientras que la mayor parte de líneas eléctricas y telefónicas de San Francisco habrían quedado cortadas. Del mismo modo, un huracán que destruya selectivamente determinados pueblos en Cape Cod podría hacer que radioaficionados en los mismos utilicen 3,5 ó 7 MHz para contactar a sus homólogos en Boston o en Nueva York.

Sin embargo, para que los mensajes de emergencia puedan ser cursados, los radioaficionados deben contar con antenas efectivas. La mayor parte de tales comunicaciones de emergencia relativamente locales requieren antenas de altura moderada, normalmente de menos de 30 metros.

Altura de antenas e interferencias

Numerosos reglamentos federales cubren el tema de interferencias en aparatos electrónicos domésticos. Sin embargo, es un desafortunado hecho real que muchos dispositivos electrónicos domésticos (tales como equipos de música, televisores, teléfonos y reproductores de video) no cumplen los estándares reglamentarios. Simplemente están diseñados de manera inadecuada para soportar energía de RF en sus inmediaciones. Por tanto, una estación de radioaficionado perfectamente legal puede causar interferencias en el video o en el televisor de un vecino debido a los atajos de reducción de costes en el diseño y en la fabricación de estos aparatos domésticos no homologados. Desgraciadamente, es difícil explicarle a un iracundo vecino que su equipo de música de 1.000 dólares recién estrenado está recibiendo las transmisiones perfectamente limpias y legales de un radioaficionado próximo.

El potencial de interferencia en un aparato receptor es función de la potencia del transmisor, la frecuencia del transmisor, la frecuencia del receptor, y lo más importante de todo, de la proximidad del transmisor respecto al potencial receptor. La intensidad de campo transmitida decrece con la inversa del cuadrado de la distancia. Esto significa que duplicando la altura de una antena de 10 a 20 metros se reducirá el potencial de interferencia en un 75%. ¡Para prevenir interferencias, cuanto más alto, mejor!

Conclusiones

Debe quedar claro que diseñar científicamente sistemas de comunicaciones es una tarea enormemente compleja. La principal complicación aparece por la incertidumbre del medio mismo, la ionosfera terrestre. Sin embargo, el terreno circundante puede complicar el análisis todavía más.

Los principales puntos de este documento pueden resumirse brevemente:

El ángulo de radiación es el factor clave para determinar la distancia de comunicaciones efectivas más allá del horizonte. La altura de las antenas es la principal variable bajo control para una estación, puesto que la altura de la antena afecta directamente al ángulo de radiación.

En general, situando un sistema de antenas de radioaficionado lo más elevado posible, se mejora la capacidad de comunicación y se reduce el potencial de interferencias en el vecindario.