

Melendez Esquivel, Mario

Teoría de Antenas

**Curso TI Virtual, Radio Club de Costa Rica
San José, Costa Rica. Junio 2001.**

p.p. 16

Keywords: radioaficionados, antenas, radiador isotrópico

© 2001

Este documento es propiedad intelectual de su autor, y no podrá ser empleado ni reproducido para fines comerciales sin autorización explícita escrita. Las opiniones y puntos de vista manifestados representan el resultado de una revisión bibliográfica, y deben ser tomados con las respectivas precauciones, de utilizarse este documento como material técnico de referencia. Las instituciones u organizaciones que aparezcan mencionadas en este trabajo tienen como involucramiento único en el mismo las consultas investigativas que se les puedan haber realizado.

ANTENAS

Una **antena** es un conductor de longitud definida que se coloca al final de la línea de transmisión, y que se encarga de transmitir al ambiente, o irradiar, la señal suministrada por el equipo.

De todos los elementos de una estación, la antena es el que posee el comportamiento menos predecible, esto debido a que interacciona fuertemente con todo lo que lo rodea. Mientras que con un equipo de radio o una línea de transmisión se puede decir con bastante certeza si funcionará o no en una estación dada, con una antena realmente no se tiene plena seguridad hasta que se pone a prueba. Una antena que posee un comportamiento excelente en una estación puede presentar un comportamiento pobre al trasladarse a otra, o puede suceder lo inverso: una antena que simplemente no trabaja en una estación puede trabajar perfectamente al trasladarse a otra.

Debido a esto, y a la necesidad de aprovechar al máximo la señal que emiten nuestros equipos, es importante el estudio de los principios básicos de las antenas, que nos darán una idea general de cómo se comportan, en qué condiciones sirve una antena dada, y en qué condiciones no sirven.

El radiador isotrópico:

Sería inútil hablar de antenas si no tenemos algo con que compararlas. Es por esto que se creó una antena imaginaria llamada **radiador isotrópico**.

El radiador isotrópico es una antena perfectamente omnidireccional¹, con cero decibeles de ganancia, que irradia la señal en forma de esfera perfectamente uniforme, con la misma intensidad en todas las direcciones.



Si de alguna forma pudiéramos construir un radiador isotrópico y observar la forma en que irradia, veríamos que la energía se propaga en forma de esfera perfecta, por igual en todas las direcciones.

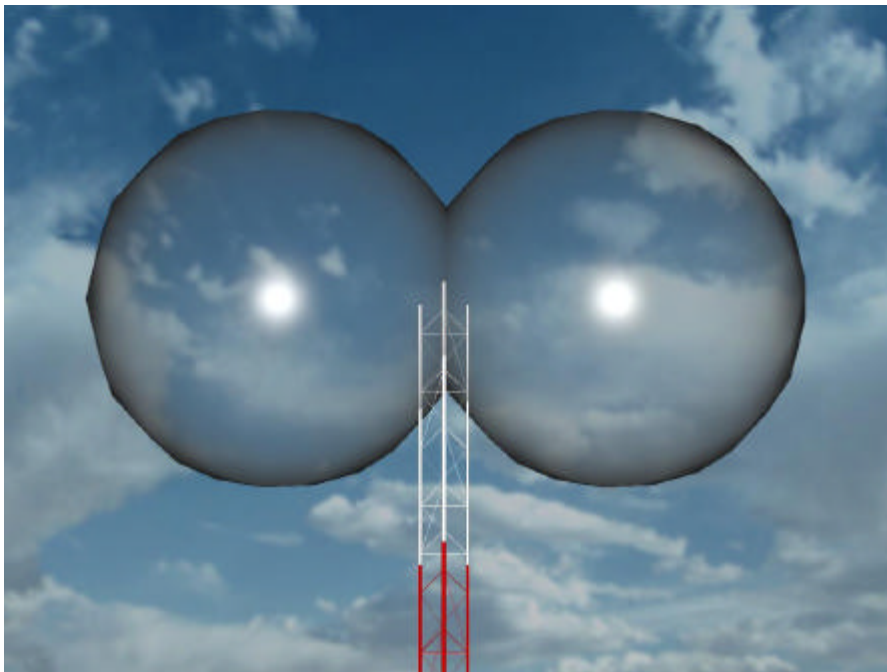
¹Omnidireccional significa que irradia en todas las direcciones por igual.

La **ganancia** de una antena es una medida de su tendencia a concentrar la señal en una dirección específica. Una antena con alta ganancia es altamente direccional, mientras que una antena con baja ganancia es omnidireccional. La unidad para medir la ganancia es el decibel (dB).

El **decibel**, en antenas, es una relación logarítmica entre voltajes, que se utiliza principalmente para medir ganancia. También el decibel aparece cuando hablamos de dispositivos de audio como medida de la amplificación que brinda un cierto componente. El decibel, dado que es una relación logarítmica puede tomar valores positivos o negativos.

El radiador isotrópico es una antena imaginaria, que no puede fabricarse porque cualquier antena, sin importar qué tan perfectamente esté construida, tiene una ganancia dada en alguna dirección. Esa ganancia puede ser de tan solo unas fracciones de dB, pero ahí está presente siempre.

Una antena casi perfecta que también se usa como punto de comparación es el **dipolo estándar** o dipolo ideal. El dipolo estándar es una antena dipolo construida bajo un control estricto de laboratorio, el cual garantiza que su construcción, sus materiales y su comportamiento son idénticos a un estándar establecido para antenas dipolo. Cuando se opera en condiciones controladas de laboratorio el dipolo estándar muestra una ganancia de 2.15 dB.



Un dipolo ideal posee 2.15 dB de ganancia en las direcciones perpendiculares a sus brazos. Su patrón de irradiación tiene una forma aproximada de figura 8 tridimensional, donde las puntas de los brazos son puntos “sordos” hacia donde la antena no irradia. Un dipolo real colocado a una altura apropiada de media longitud de onda o más sobre el suelo se comporta de manera similar al dipolo ideal.

Como dijimos anteriormente, tanto el radiador isotrópico como el dipolo estándar

son antenas de comparación. No tienen utilidad en estaciones reales, debido a lo difícil (o imposible) que resulta construirlas. Su utilidad es principalmente para comparación de otras antenas, principalmente en términos de ganancia. Así, siempre que hablamos de la ganancia de una antena la comparamos con la del dipolo estándar o radiador isotrópico, y medimos su ganancia en dBi (decibeles sobre radiador isotrópico) o dBd (decibeles sobre dipolo estándar).

Por ejemplo una antena que tiene 10 dBi posee 10 decibeles de ganancia por encima del radiador isotrópico: si pusiéramos a funcionar ambas antenas lado a lado, el radiador isotrópico exhibiría una ganancia de 0 dB, y la antena en cuestión 10 dB.

También podemos dar la medida en dBd. Si hablamos de 10 dBd estamos diciendo que la antena posee 10 dB de ganancia más que el dipolo ideal. O sea, poniendo ambas antenas lado a lado, el dipolo ideal daría una ganancia de 2.15 dB, mientras que nuestra antena daría 10 dB más, o sea, 12.15 dB.

Para convertir de dBi a dBd (y vice versa) empleamos la siguiente fórmula:

$$\text{dBi} = \text{dBd} - 2.15$$

En el mercado es común ver ganancias expresadas en dBi, principalmente por el efecto de "impacto" que tiene el ver un número más grande. Para un fabricante que busca vender antenas resulta muy cómodo el dBi, pero para un comprador que quiere saber cómo se comporta una antena tiene poca utilidad porque nos compara la antena a una antena no existente, que nunca ha existido y de cuyo funcionamiento no tenemos mayor idea. Para nosotros lo mejor sería expresar la ganancia en dBd, lo cual nos comparara la antena (aproximadamente) al dipolo que tenemos sobre el techo de la casa, dándonos una idea más realista de su funcionamiento. De ahí la utilidad de la fórmula anterior.

La ganancia de una antena posee un efecto de multiplicación de potencia. Esta multiplicación es causada por concentración de energía en un solo sentido: en vez de que la antena irradie la energía 360 grados, la irradia toda hacia su parte frontal. Cada 3 dB de ganancia que tenga una antena equivale a duplicar la potencia del transmisor.

Por ejemplo un transmisor conectado a una antena de 9 dBd, que transmita 100 W de potencia tendría un desempeño idéntico a un transmisor de 800W de potencia conectado a una antena dipolo ideal (0 dBd). Los primeros 3 dB de ganancia duplican nuestros 100 W, dando como resultado 200 W. Esos luego se duplican por los siguientes 3 dB, hasta 400 W y finalmente esos 400W se duplican hasta 800 W con los 3 dB de ganancia finales. En general:

$$P_s = P_0 \cdot 2^{\frac{G}{3}}$$

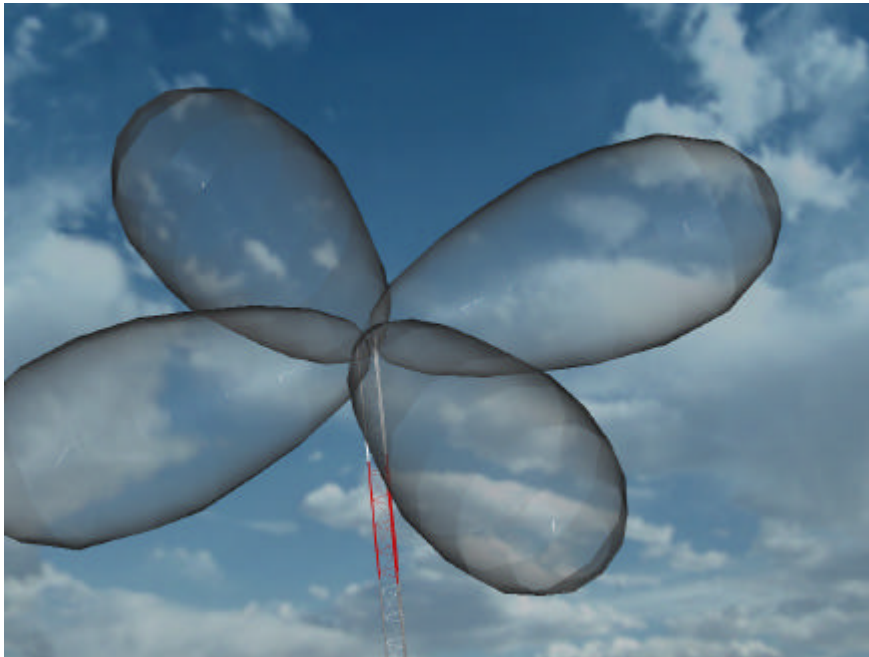
Donde P_s es la potencia "simulada" por la antena, P_0 es la potencia suministrada a la antena, y G es la ganancia en decibeles de la antena.

El gráfico superior nos muestra el llamado patrón azimutal, que sería la forma de irradiar de la antena si la estuviéramos observando desde arriba. El gráfico inferior nos muestra el patrón de irradiación vertical o en elevación, el cual nos muestra la forma de irradiar vista desde el lado. Los puntos donde la curva (la elipse) se aleja más del centro del gráfico son las direcciones que tienen mayor ganancia, mientras que los puntos donde la curva toca el centro son direcciones de cero irradiación.

Estos dos patrones son muy importantes a la hora de seleccionar una antena, el primero nos muestra qué tan direccional es la antena, y el segundo nos muestra qué tan bajo es su ángulo de irradiación.

Para trabajo de DX, buscamos antenas con alta direccionalidad azimutal, y bajo ángulo de irradiación vertical.

En términos generales, el patrón de irradiación de una antena es también su patrón de recepción. Cuando una antena emite, actúa como un lente, concentrando la señal en ciertas direcciones. Cuando una antena recibe, actúa como un embudo, concentrando la señal de solo ciertas direcciones.



Los patrones de irradiación de las antenas son de muchos tipos, desde el simple patrón esférico del radiador isotrópico hasta patrones con lóbulos múltiples como el que se muestra en la figura. El patrón no solo depende de la antena, sino también de la altura sobre el suelo de la misma y de la presencia de otros objetos conductores cercanos.

Leyes prácticas de las antenas:

Existen muchos mitos cuando se trabaja con antenas, algunos basados en observaciones erróneas o subjetivas acerca del rendimiento. Es muy importante tener las siguientes tres reglas presentes siempre que se realice trabajo con antenas:

1. **No existen antenas mágicas.** A una antena se le suministra una cierta cantidad de energía, y la antena irradia siempre una cantidad igual o inferior de energía. No puede existir una antena que amplifique la cantidad de energía suministrada. Las antenas

- direccionales concentran la energía en una cierta dirección (similar a como lo hace un foco), pero la energía que están irradiando es la misma que se les suministró.
2. **Cualquier dispositivo** ajeno a un conductor simple que se introduzca en una antena **generará una pérdida**. Esto significa que las trampas, inductores, capacitores, etc. que se introduzcan en una antena se "comen" parte de la señal internamente. La antena más efectiva siempre es la antena pura, sin trampas ni bobinas, sin embargo para longitudes de onda mayores puede resultar un buen cambio el sacrificar un poco de energía para aumentar la cantidad de irradiación de la antena.
 3. **Los acopladores no son una solución "mágica" al ajuste:** como veremos, existen dispositivos (tuners, baluns, bobinas, etc.) en el mercado que sirven para "ajustar" una antena y hacerla irradiar en una banda donde normalmente no lo haría. La regla para uso de estos dispositivos es que estos dispositivos no ajustan realmente la antena, tan solo hacen que el transmisor crea que la antena se encuentra ajustada. Una antena no resonante en una cierta banda no resonará aunque se coloque un tuner de por medio y aunque un medidor de ajuste diga que si está resonando (si colocamos el medidor después del tuner, veremos una realidad muy distinta acerca del ajuste).

Impedancia, frecuencia resonante y ROE de una antena:

Existen dos características importantes de una antena que se deben tener presentes en todo momento, las cuales son su frecuencia resonante y su impedancia.

La **frecuencia resonante** es la frecuencia a la cual la antena se vuelve eléctricamente resonante, y en la cual existe una cancelación interna mínima de la señal de radio. A esta frecuencia resonante la antena irradia el 100% de la señal que se le proporciona. Normalmente la longitud de los elementos irradiantes coincide con las longitudes de onda resonantes para lograr este efecto, las cuales son los múltiplos impares de la media onda ($1/2$, $3/2$, $5/2$, etc.). Sin embargo dependiendo de la antena pueden usarse otras longitudes con similar éxito.

La **impedancia** de una antena es una especie de resistencia que posee toda antena, y de hecho todo sistema eléctrico, y que se deriva del efecto combinado de resistencia de los elementos, reactancias capacitivas y reactancias inductivas. La impedancia afecta la transferencia de energía entre las diferentes partes de un sistema de radio. En cuanto a impedancia, la regla general es que para lograr una máxima transferencia de energía a la antena, la impedancia de la antena debe ser igual a la impedancia de la línea de transmisión, la cual debe ser igual a la impedancia del equipo de radio.

La impedancia de nuestro equipo de radio y de la línea de transmisión coaxial es constante, y son por lo general 50 ohm. Por lo tanto para lograr una transferencia adecuada de energía debemos tener en nuestra antena una impedancia de 50 ohm. Esto resulta fácil en algunos casos, pero en otros resulta inusualmente difícil lograr el ajuste, y es necesario emplear sistemas de transformación de impedancias, que son dispositivos que convierten una impedancia a otra para acoplarla a nuestro radio.

El dispositivo acoplador más común es el **balún**, el cual es una especie de

transformador que convierte impedancias. También existen los **antenna tuners**, los cuales son acopladores variables, que pueden convertir todo un rango de impedancias a 50 ohm.

Una forma de medir el efecto combinado de resonancia e impedancia es mediante la **relación de ondas estacionarias** (ROE o SWR). La ROE es una relación logarítmica obtenida a partir de los voltajes en el cable coaxial, que nos indica el porcentaje de señal que se está reflejando de vuelta hacia el transmisor. En una antena apropiadamente ajustada, la ROE será de 1.1:1, y conforme va aumentando el desajuste se dan mayores ROE.

Para equipos en HF de potencia baja (100-150W) se ha determinado que una ROE de 1.5:1 o menos es perfectamente aceptable, e incluso una ROE hasta de 2:1 puede ser trabajada con algo de cuidado. Por encima de 2:1 la cantidad de energía reflejada se vuelve considerable, nuestra estación se vuelve ineficiente y además podemos provocar daños a nuestros equipos.

El dispositivo utilizado para medir la ROE se conoce como **medidor de ondas estacionarias** o medidor SWR.

Tipos de antenas:

Existen muchos tipos diferentes de antenas disponibles en el mercado. Cada antena tiene sus características propias de funcionamiento y sus requerimientos en cuanto a altura, alimentación, etc.

Una antena que irradia básicamente por igual en todas direcciones se llama **antena omnidireccional**. La antena que concentra la señal hacia una dirección específica se llama **antena direccional**.

Antenas verticales:

Las antenas verticales, también conocidas como *whips*, son antenas cuyo elemento irradiante se encuentra en posición vertical. Son antenas que ocupan relativamente poco espacio horizontal, lo cual las hace ideales para trabajo en condiciones confinadas, y además son las únicas antenas existentes que no requieren altura considerable sobre el suelo para dar un ángulo de irradiación bajo.

La antena vertical posee dos partes: la primera es un elemento irradiante vertical, el cual puede medir desde 0.25 hasta 0.63 longitudes de onda. La segunda parte es un elemento conductor por donde pueda retornar la corriente a la antena.

Esta segunda parte de la antena puede tomar muchas formas, la más comúnmente vista es un juego de tres o más alambres de un cuarto de longitud de onda. Estos alambres se colocan a una altura sobre el suelo que permita darles un ángulo de 45 grados aproximadamente (necesario para un ajuste apropiado de impedancia), y se conocen

como plano de tierra, o *counterpoise* en inglés.

Si la antena se coloca a muy baja altura, los alambres del plano de tierra pueden ir en posición horizontal sobre el suelo, lo cual funciona igual de bien que a 45 grados, pero puede hacer un poco más difícil el ajuste, debido a que la impedancia de la antena diferirá de los 50 ohm requeridos.

En terreno con muy buena conductividad (por ejemplo en la línea de marea de las playas) el plano de tierra puede ser sustituido por el mismo suelo utilizando una varilla copperwell. Esto da muy buenos resultados, debido a que proporciona un plano de tierra prácticamente infinito que minimiza las pérdidas en corriente de retorno hacia la antena.

Algo similar ocurre en los techos metálicos de viviendas, donde el plano de tierra puede ser sustituido por la lámina de techo utilizando tornillos apropiados para realizar el amarre.



Antena vertical de 10 metros fabricada utilizando el techo de la vivienda como plano de tierra. Los vientos de la antena son mecate no conductor, y el elemento irradiante es aluminio de 1 pulgada, el cual permite acoplar un tubo interno de 7/8" para uso en 15 metros.

La longitud del whip puede ir, como se dijo anteriormente, de 0.25 a 0.63 longitudes de onda, entre mayor sea más energía irradiará la antena. Las longitudes naturalmente resonantes de la longitud de onda son puntos ideales para ubicar la longitud, ya que aquí la ROE de la antena ajusta en un punto muy cercano a 1:1. Por encima de 0.63 longitudes no se recomienda fabricar antenas, dado que se vuelve difícil su ajuste debido a diferencias en impedancia que ocurren a causa de la longitud del whip.

La principal desventaja de la antena vertical resulta ser su patrón de irradiación omnidireccional, el cual no solo irradia energía hacia zonas inútiles del planeta donde no se ubican estaciones que queremos contactar, sino que también permite la entrada de ruido de direcciones ajenas a la de nuestro interés. Adicionalmente al ser vertical, la antena posee una polarización similar a la que posee naturalmente el ruido eléctrico, lo cual la hace más propensa a recibir este tipo de ruidos que una antena horizontal.

Antenas horizontales:

La gran mayoría de antenas direccionales en bandas de radioaficionados resultan ser antenas horizontales. Una antena horizontal es una antena cuyo plano de dirección se encuentre en posición horizontal respecto al suelo.

Las antenas horizontales deben ubicarse como mínimo a media longitud de onda sobre el suelo para asegurar su funcionamiento óptimo, idealmente ubicándolas a una longitud de onda sobre el suelo. Por debajo de la media longitud se producen interacciones entre el suelo y la antena, las cuales le restan eficiencia y direccionalidad, y aumentan su ángulo de irradiación..

Yagi:

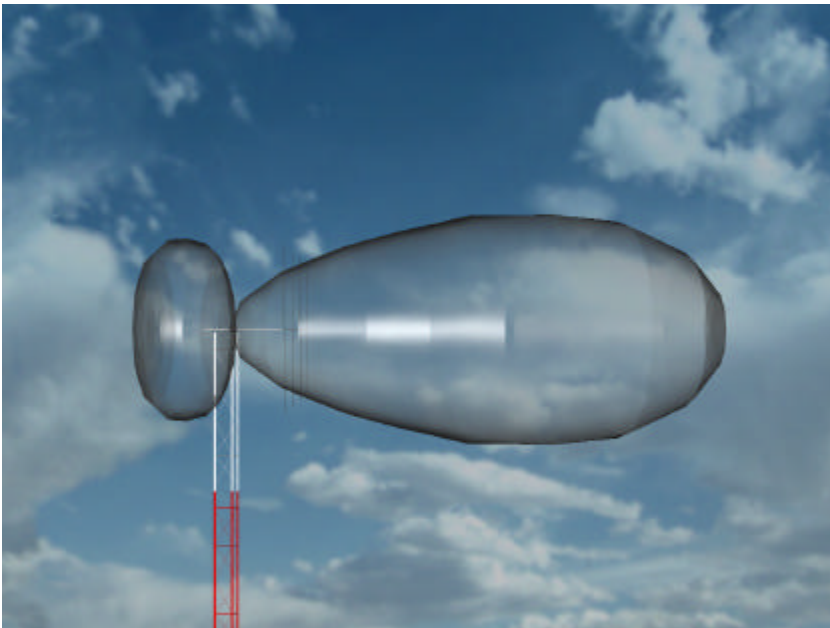
La antena yagi es una de las antenas direccionales más comúnmente utilizadas en bandas de radioaficionados. Su nombre se deriva del apellido del científico japonés que la diseñó originalmente.

La yagi consiste en un elemento tipo dipolo que irradia la señal. Detrás de este elemento se ubica uno más largo que refleja la señal hacia el frente, y es conocido como reflector. Por delante del elemento irradiante también se pueden ubicar elementos ligeramente más cortos, que se conocen como directores y sirven para darle mayor direccionalidad a la señal reflejada.



Las yagis son fabricadas para longitudes que van desde los 80m hasta los 70 centímetros o menos. En longitudes muy cortas son especialmente populares las yagis con gran cantidad de directores, especialmente para trabajo de satélites y comunicaciones espaciales.

La yagi puede tener una ganancia que va desde valores muy bajos hasta valores superiores a los 10 dBi, dependiendo de la cantidad de reflectores y directores que posea.



Una yagi irradia idealmente como se muestra en la figura: concentrando la mayor parte de la energía hacia el frente, y permitiendo una fuga mínima en las otras direcciones. En la realidad el patrón es ligeramente más complejo, y existe además de la fuga hacia atrás una fuga de energía hacia arriba, que es lo que llega a formar la onda espacial.

Loops:

Los loops son antenas cerradas, generalmente fabricadas con alambre, que tienen una longitud completa de onda. Existen muchas configuraciones de loops, siendo las más populares el loop cuadrangular (o cúbico) y el loop triangular (o delta).

Aunque pueda parecer que el loop forma un cortocircuito entre las dos terminales del equipo de radio, en realidad lo que ocurre es que la corriente al encontrarse un

conductor resonante empieza a irradiar, dando el funcionamiento a la antena.

Cuando el loop se ubica en posición vertical, la irradiación ocurre con mayor direccionalidad en un plano perpendicular al del alambre.

Los loops son ideales para trabajar bandas de mayor longitud, y pueden resultar especialmente útiles en 160 y 80 metros cuando no se tiene suficiente terreno para colocar una antena dipolo o un alambre largo de un cuarto de longitud de onda.

Contrario a la creencia popular, los loops y sus antenas derivadas tienen el mismo requisito de altura de media longitud de onda sobre el suelo que tiene cualquier otra antena horizontal. En los loops el efecto de una altura baja es ligeramente menos pronunciado sin embargo.

Para una frecuencia dada, entre un loop triangular y un loop cuadrangular, el loop cuadrangular es superior debido a que encierra mayor área. En general entre mayor área encierre un loop, más efectivo será. El loop ideal sería circular, sin embargo este resulta bastante difícil (o imposible) de construir con alambre.

Cuadracúbicas o cuadrangular cúbica:

La antena cuadracúbica (cubical quad) es una antena derivada de la antena loop. En general consiste de un loop irradiante, con loops reflectores por detrás y loops directores al frente. Es, en cierta forma, una antena yagi fabricada a partir de loops.



Una ventaja que tiene la cuadracúbica es que ocupa menos espacio que una antena yagi, y generalmente se fabrica con un único elemento irradiante y elemento reflector. Su ganancia es similar a la de una yagi, y se puede fabricar en tipo multibanda sin afectar considerablemente sus dimensiones.

Adicionalmente la antena cuadracúbica tiene la ventaja de absorber menos ruido que otras antenas, debido precisamente al circuito cerrado que forma su elemento irradiante/receptor.

El dipolo de media onda:

La antena más simple de fabricar, y la más popular entre radioaficionados principiantes resulta ser el **dipolo de media onda**.

El dipolo de media onda es una antena formada por dos brazos de un cuarto de longitud de onda (dando la longitud total de media onda), los cuales pueden colocarse en posición horizontal o inclinados hacia abajo (estas posiciones le dan los nombres "dipolo de tendadero" y "V invertida" respectivamente).

Los brazos se encuentran aislados uno del otro por algún material no conductor. Si la antena se fabrica usando tubería de aluminio este material suele ser tubería de PVC o madera, mientras que en antenas fabricadas con alambre conductor se utilizan mucho los aisladores cerámicos o de plástico.

La longitud total que debe tener un dipolo de media onda se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$l = \frac{300}{f} \cdot 0.475$$

Donde l está en metros y f en MHz. Si queremos la longitud de cada brazo, debemos dividir el resultado anterior por 2.

La fórmula anterior resulta ser precisamente la fórmula básica de longitud de onda, modificada por un factor de 0.475. Este factor de 0.475 está compuesto de dos números:

$$\frac{0.95}{2}$$

La explicación del número 2 es simplemente que el dipolo mide media longitud de onda de largo. La ecuación de longitud nos da la longitud completa de onda, y debemos dividirla entre dos para obtener la media onda.

El 0.95 es un factor que se introduce para corregir un efecto eléctrico que se produce en el dipolo, conocido como **efecto de puntas**. El efecto de puntas es un efecto que hace que para la señal de radio, el alambre sea más largo de lo que realmente es, por lo general en un valor que anda alrededor de 5%. El 0.95 busca precisamente restar ese 5% de exceso a la longitud calculada y dar la longitud resonante correcta.

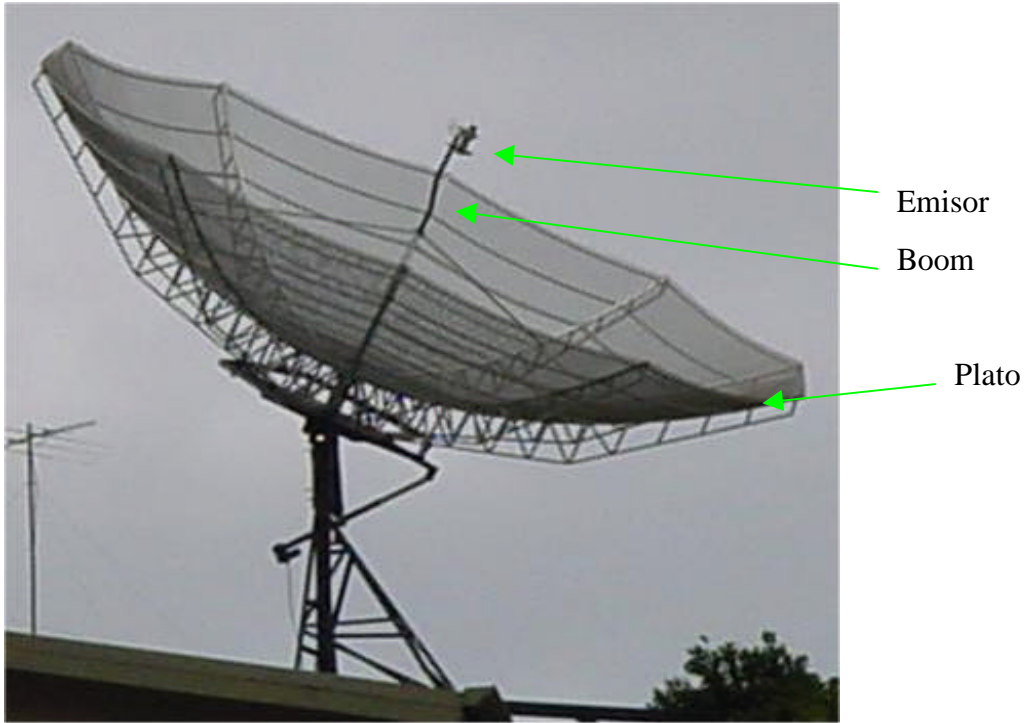
Puede ser o no necesario incluir el factor 0.95 a la hora de fabricar una antena dipolo, dependiendo de las condiciones y ubicación que se le den a la antena. Lo mejor es, a la hora de calcular la longitud de los brazos, cortarlos a una longitud no corregida, y posteriormente recortarlos si fuera necesario para lograr la resonancia deseada. Es preferible a fabricar una antena "eléctricamente correcta" y encontrarse luego con que está demasiado corta, y sin forma de alargarla para lograr el ajuste.

El dipolo, como antena horizontal, debe ubicarse a media longitud de onda sobre el suelo, u óptimamente a una longitud completa de onda. Normalmente su impedancia es lo suficientemente cercana a 50 ohm para no tener que emplear sistemas de acople de impedancia.

Antenas parabólicas:

Un tercer tipo de antena, que puede clasificarse aparte de las verticales y las horizontales, son las antenas parabólicas. Las antenas parabólicas son antenas que poseen forma de parábola (curva circular) y que se utilizan en situaciones donde se requiere una muy alta direccionalidad de la señal.

Las antenas parabólicas constan de dos partes: un plato curvo, que actúa como reflector para direccionar la señal, y un emisor que por lo general se ubica a una distancia sobre el plato. El emisor envía la señal hacia el plato, en donde se refleja y se direcciona hacia su destino.



Por lo general las antenas parabólicas se fabrican para bandas de 70cm hacia abajo, en donde los equipos de alta potencia son bastante caros y resulta más viable utilizar alta ganancia con baja potencia que la situación inversa. Además, para que una antena parabólica sea efectiva el tamaño del reflector utilizado debe ser muy semejante o superior a la longitud de onda utilizada, lo cual hace las antenas parabólicas demasiado grandes para emplearse en bandas de mayor longitud.

Las antenas parabólicas se utilizan mucho en comunicaciones satelitales y enlaces de alta frecuencia para telecomunicaciones. Reciben poco uso por parte de radioaficionados, debido a su alto costo y requerimientos funcionales en cuanto a rotores, mecanismos de control, etc.