CURSO INTERACTIVO
Diploma
de
Operador
radioaficionado

TEMA 6 Antenas y líneas de transmisión

Temario ajustado al

HAREC

(Harmonized Amateur Radio Examination Certificate)

Certificado Armonizado del Examen de Radioaficionado

desarrollado por los miembros del Radioclub La Salle coordinados por Luis A. del Molino EA3OG

Publicado en PDF en 11 de Junio de 2011 por el Radioclub La Salle bajo la supervisión de Luis A. del Molino EA3OG amparado por una licencia *Creative Commons*



Reservados algunos derechos:

No se permite ni el uso comercial de la obra, ni la generación de obras derivadas, ni la utilización parcial del texto

Agradecimientos:

Numerosas ilustraciones han sido cedidas por la Editorial Marcombo (www.marcombo.com), procedentes de su libro: Radioafición y CB:

Enciclopedia Práctica en 60 lecciones

También hemos de agradecer la colaboración de Víctor Ballesteros en la realización de algunas de las ilustraciones, tarea en la que ha colaborado también Roger Galobardes.

Con tal de mejorar el texto y el contenido, os agradeceremos mucho que cualquier sugerencia de mejora o les errores que encontréis nos los comuniquéis a la dirección:

<radioclub@salle.url.edu>

TEMA 6: Antenas y líneas de transmisión

Una antena es un elemento conductor de dimensiones físicas comparables a la longitud de onda de una señal de radiofrecuencia, **el cual**, cuando está conectado adecuadamente a un generador de RF (un emisor), <u>convierte</u> casi toda la energía suministrada en <u>radiación electromagnética</u>, aparte de una pequeñísima parte que se pierde en la resistencia óhmica del conductor.

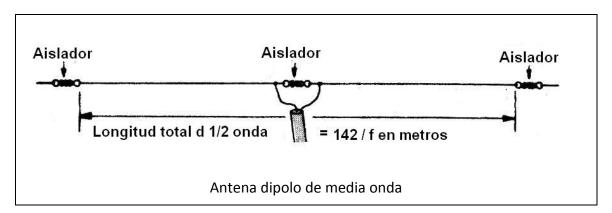
También realiza la conversión inversa; es decir, <u>captura la energía de las ondas electromagnéticas</u> que la rodean y las convierte en tensiones de RF que podemos trasladar luego a un receptor **por medio de una línea de transmisión**.

6.1 Tipos de antenas

En una gran división general, por una parte, tenemos las <u>antenas lineales</u> formadas por elementos <u>conductores metálicos resonantes</u> y, por otra parte, las <u>antenas de ranura</u> que consisten en <u>huecos resonantes</u> realizados en láminas metálicas y que podríamos definir como antenas que representan el negativo fotográfico de las antenas de elementos conductores, considerados estos como el positivo de una fotografía.

6.1.1 Antena de media onda alimentada en el centro

La antena fundamental o básica es un conductor horizontal con unas dimensiones físicas de media longitud de onda, pues con estas dimensiones de $\lambda/2$ se consigue que las tensiones y corrientes que se inducen en el cable sean máximas, puesto que se produce en la antena el fenómeno que llamamos <u>resonancia</u>. A esta antena, la llamamos <u>dipolo de media ond</u>a, porque la mayoría de las veces está partida en dos por la mitad, lo que le proporciona dos polos opuestos (dipolo).



La antena dipolo de media onda en posición horizontal, si se alimenta en el centro con una frecuencia \mathbf{fr} que corresponda a la mitad de la longitud de onda ($\mathbf{\lambda} = \mathbf{c} / \mathbf{fr}$) situado en el espacio libre, se comporta como una resistencia de 72 ohmios y se convierte en la carga ideal para un cable coaxial de 75 ohmios. Se comporta como una resistencia de 72 ohmios es en el espacio libre, pero en la práctica, sobre el suelo real, esta resistencia varía con la altura del dipolo sobre el suelo, entre unos 50 y 100 ohmios, de

forma que también se adapta bastante bien a cables coaxiales de 50 ohmios, que es la impedancia característica más utilizada en transmisión.

La radiación de una antena dipolo de media onda la podemos ver en:

http://www.youtube.com/watch?v=nYkj8RVi2hc

NOTA IMPORTANTE: Vemos en esta imagen que la antena no es un solo conductor continuo de media onda, sino que se ve partida por el centro, pero eso no es un problema para el dipolo. Los mismos electrones que salen de una rama, entran por la otra rama y a ambos lados del corte es como si los mismos electrones que salen por una rama pasaran a la otra, pues la misma cantidad que sale por un cable entra por el otro.

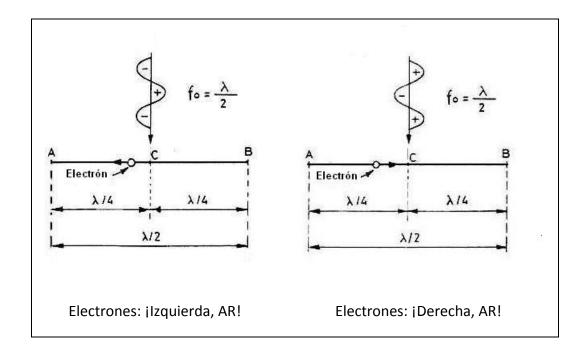
Aquí tienes otra simulación de una antena de 2λ de longitud

http://www.youtube.com/watch?v=AfNWn8 xeL0

6.1.1.b La resonancia: el viaje imaginario del electrón

Tenemos un <u>cable horizontal de ½ longitud de onda</u> en cuyo centro C se encuentra nuestro amigo, el electrón, perteneciente a un átomo cualquiera del cable de la antena. Llega en ese momento una onda electromagnética cuyo campo eléctrico paralelo hace que el electrón se desplace a la izquierda, pues es un campo negativo de repulsión.

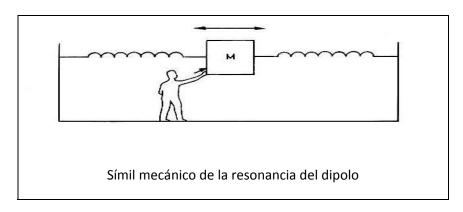
Nuestro electrón sale lanzado desde el centro C <u>hacia el extremo A</u> de la antena. Cuando llega al punto A, se le acaba el cable y no tiene más remedio que volver rebotado hacia el centro C. No tiene otra opción, pues en el extremo A ha encontrado muchos otros electrones que se han movido también hacia A, produciendo allí un aumento de tensión (repulsión) que lo devuelve repelido hacia el centro C.



En su viaje completo desde el punto C inicial hasta el extremo A y, posteriormente, de vuelta al centro C, el electrón ha recorrido la distancia $\mathbf{d} = \mathbf{CA} + \mathbf{AC} = \lambda/4 + \lambda/4 = \lambda/2$ o sea media longitud de onda.

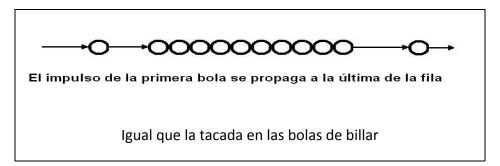
Pero <u>cuando llega de vuelta al centro C</u>, las cosas han cambiado allí. Los tiempos también han cambiado en la figura de la derecha. En el tiempo en que ha hecho este recorrido, la semionda negativa de la onda electromagnética ha sido <u>sustituida por la semionda positiva</u> y se encuentra una orden general de movimiento hacia el punto D. Toca moverse a derechas. La onda incidente ha cambiado de polaridad (180º) y envía el electrón hacia el extremo opuesto B. Allí vuelve a tropezar con una acumulación de electrones y no tiene más remedio que rebotar hacia el centro C. Y cuando llega de vuelta a C las cosas han vuelto a cambiar y tocan otra vez a izquierdas.

Así que nuestro electrón prosigue su viaje, rebotando de A a B y de B a A, incrementando cada vez más la corriente, gracias al refuerzo de la onda electromagnética que llega en fase con el movimiento de resonancia propio de los electrones en el cable.



Como se observa en la figura, nuestra antena de ½ onda se parece mucho a un columpio horizontal formado por dos muelles horizontales entre los cuales una masa M (el electrón) oscila de lado a lado, animada por los impulsos de un caballero (la onda electromagnética) que sincrónicamente lo agita impulsando sincrónicamente el columpio horizontal para alcanzar la máxima amplitud del balanceo.

NOTA IMPORTANTE: Siempre hay que tener en cuenta que, en la realidad, este viaje del electrón es imaginario, porque los electrones apenas se desplazan unos milímetros por el cable, y lo que realmente se desplaza <u>es el impulso de repulsión</u> que viaja de punta a punta del cable a casi la velocidad de la luz (a un 95% para ser más exactos), Se comporta exactamente igual que el golpe que se da a la primera bola de billar de una fila y que se propaga por todas ellas hasta la última bola que sale despedida..



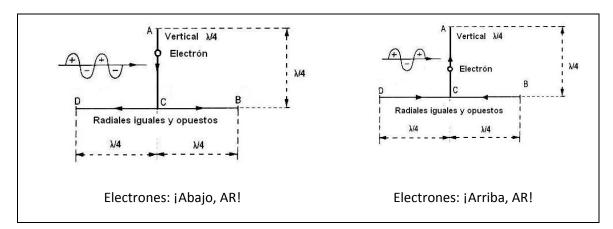
6.1.2 Antena vertical de $\lambda/4$ con plano de tierra artificial elevado (GP)

Vamos a poner ahora el dipolo vertical y a sustituir la rama inferior del dipolo por dos radiales iguales y opuestos de $\frac{1}{2}$ de longitud de onda, que quedarán horizontales precisamente debajo del radiante vertical de $\frac{1}{2}$ de onda. Los radiales elevados de $\frac{1}{2}$ de onda horizontales iguales y opuestos cancelan sus corrientes iguales y opuestas captadas y sólo contamos con la energía captada por el radiante de $\frac{1}{2}$ vertical.

Si llega una <u>onda electromagnética de polarización vertical</u> hasta un <u>dipolo vertical</u> en el que hemos sustituido uno de los brazos por dos radiales horizontales iguales y opuestos, la onda electromagnética no conseguirá mover los electrones de los radiales, porque éstos sólo pueden moverse perpendicularmente al campo eléctrico vertical que llega.

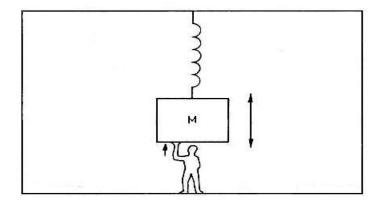
Sin embargo, a un electrón situado en el radiante vertical de $\lambda/4$, cuando le llega una semionda negativa, se ve impulsado hacia abajo, hacia el punto C. La onda negativa manda moverse a todos los electrones hacia abajo y le repulsión se propaga por los radiales desde C hacia las puntas B y D con movimientos iguales y opuestos. Al llegar los electrones a B y D, no pueden proseguir y rebotan hacia el centro, donde serán de

nuevo movidos por el campo eléctrico de la onda electromagnética captado solamente por el tramo vertical AC.



Cuando vuelven y llegan rebotados al centro C, habiendo recorrido L/4 + L/4 = L/2, la onda electromagnética ya ha cambiado de fase, pues ha pasado un semiperíodo y ahora la onda electromagnética tiene campo eléctrico positivo que representa mandarlos todos hacia arriba desde C hacia la punta A. Allí rebotan de nuevo y se establece también una resonancia porque la oscilación de los electrones oscilando entre la punta A del radiante y las puntas B y D de los radiales siempre estará en fase con la onda electromagnética si la frecuencia de la onda electromagnética se corresponde con la longitud física de $\lambda/2$.

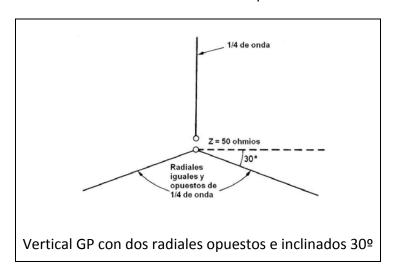
NOTA IMPORTANTE: Recordemos que en la práctica, los electrones no se desplazan realmente por toda la antena, sino sólo unos milímetros, pues es <u>el impulso</u> de repulsión el que se propaga a casi la velocidad de la luz por la antena desde la punta A a las puntas B y D. Se comporta exactamente igual que el impulso del golpe que se da a la primera bola de billar de una fila y que se propaga por todas ellas hasta la última bola que sale despedida.



Símil mecánico de la resonancia de una vertical

La antena vertical con radiales es equivalente a una masa M (el electrón) sujeta a un muelle vertical que cuelga de un techo y los radiales al suelo duro en el que se apoya el caballero que la impulsa (la onda electromagnética) hacia arriba sincrónicamente hasta alcanzar la máxima amplitud de movimiento posible.

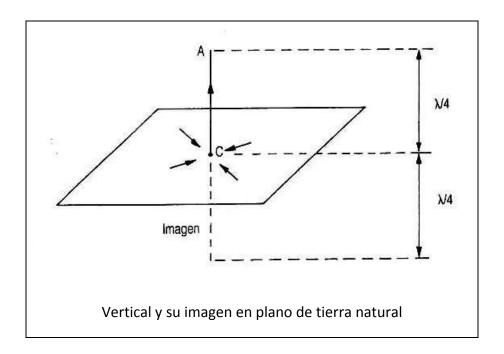
La impedancia de una antena vertical de $\lambda/4$ es la mitad de la del dipolo o sea de unos 37 ohmios, pero si los <u>dos radiales opuestos</u> de ¼ de onda los colocamos inclinados en lugar de estar horizontales, la impedancia de la antena sube hasta los 50 ohmios. Esta antena se llama Ground Plane o Antena Vertical con plano de tierra artificial.



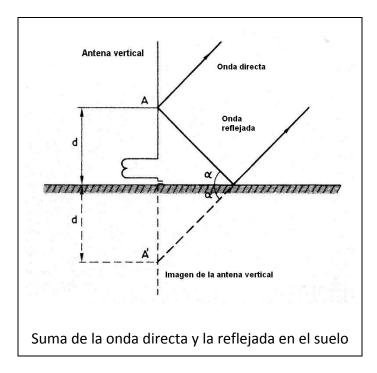
6.1.2b Antena vertical de ¼ de onda con plano de tierra natural

En lugar de dos radiales iguales y opuestos, podemos poner tres radiales iguales a 120º entre sí, o cuatro radiales a 90º y el resultado será exactamente el mismo.

Finalmente, podríamos también sustituir estos radiales por un <u>infinito número de radiales iguales y opuestos</u>. ¿Y cómo? Pues colocando un plano conductor debajo del radiante de ¼ de onda: <u>un plano de tierra natural</u>.

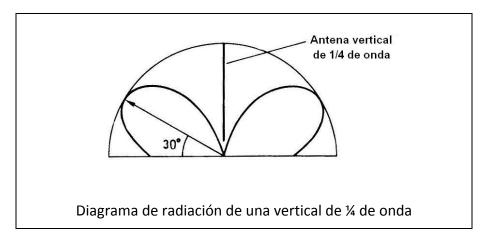


La tierra, suponiendo que sea buena conductora, tiene la ventaja de que actúa como un <u>espejo electromagnético</u> y provoca que el comportamiento global sea como si se hubiese otro radiante vertical de $\lambda/4$ "debajo del suelo", lo que podríamos llamar una "imagen" virtual del radiante de $\lambda/4$.



La antena vertical con un radiante de $\lambda/4$ radia de forma perfectamente omnidireccional y con un bajo ángulo de radiación, mientras que el dipolo horizontal no radia en dirección a las puntas del dipolo, sino preferentemente en dirección

perpendicular al mismo, y su ángulo de radiación vertical depende de la altura sobre el suelo, aunque siempre tiene una ganancia ligeramente superior a la vertical, debido a su mayor longitud física radiante de media onda.



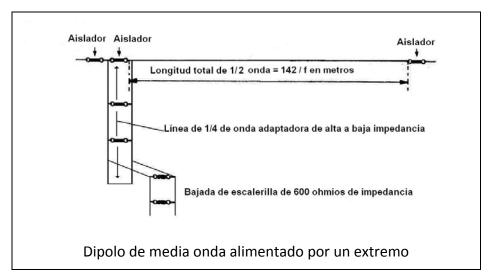
Por otra parte, lo más habitual es que_el suelo debajo de una antena de $\lambda/4$ vertical <u>no sea un conductor perfecto</u> y eso hace que la reflexión sea menor que la teórica y que la radiación real de la vertical también sea inferior. Esto se puede compensar con la colocación de un buen número de <u>radiales simétricos enterrados</u> que mejoran la conductividad del suelo y la reflexión de la RF, pero recordemos que, aunque llevan radiofrecuencia, no radian por sí solos, pues su radiación se cancela al radiar en conjunto en direcciones opuestas.

La impedancia de una antena vertical de $\lambda/4$ es la mitad de la del dipolo o sea de unos 37 ohmios, por lo que se adapta bastante bien a un cable coaxial de 50 ohmios, con una ROE muy moderada.

6.1.3 Antena de media onda alimentada en un extremo

Podemos alimentar un dipolo resonante de media onda en cualquier punto cuya impedancia nos convenga, pero debemos tener en cuenta que, <u>en el centro</u> del dipolo de media onda, se encuentra el <u>punto de alimentación de mínima impedancia resistiva</u> por ser máxima la corriente y mínima la tensión, mientras que si nos movemos hacia cualquiera de <u>los dos extremos</u>, en ellos la tensión es máxima y la corriente mínima (prácticamente nula), por lo que <u>la impedancia resistiva es muy elevada</u> y difícil de adaptar a un emisor y a una línea de transmisión de 50 ohmios.

Por tanto, si la queremos alimentar el dipolo de medio onda por un extremo, debemos tener en cuenta la impedancia muy elevada en cada extremo y buscar un sistema de adaptación que nos convierta la baja impedancia de 50 ohmios de un cable coaxial a la impedancia muy elevada de la antena en ese punto.

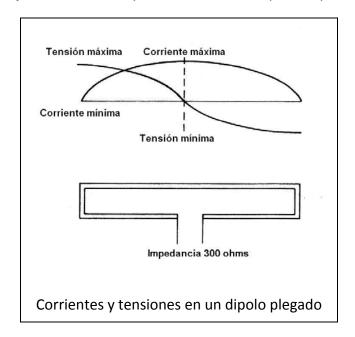


Esto puede conseguirse, por ejemplo, <u>buscando un punto intermedio</u> apropiado en <u>una línea resonante de $\lambda/4$ </u>, en cuyo extremo cortocircuitado la impedancia es nula, mientras que en el extremo abierto, conectado por ese extremo a la antena, la impedancia es muy elevada.

También puede conseguirse una buena adaptación mediante un <u>circuito resonante L-C</u> colocado en el extremo de la antena, de cuya bobina sacaríamos una toma en un punto con baja impedancia. Esta antena recibe el nombre de End-Zepp, pues fue diseñada para precisamente para colgar de los dirigibles o Zeppelines.

6.1.4 Dipolo plegado

Este es un dipolo de media onda <u>de doble conductor</u> que tiene la ventaja (o desventaja) de que tiene una impedancia de alimentación en el centro de alrededor de 300 ohmios y eso permite que sea alimentada por una línea de transmisión formada por una cinta de dos cables paralelos de 300 ohmios de impedancia característica, pero tiene la gran ventaja de tener un mayor ancho de banda que el dipolo de media onda.

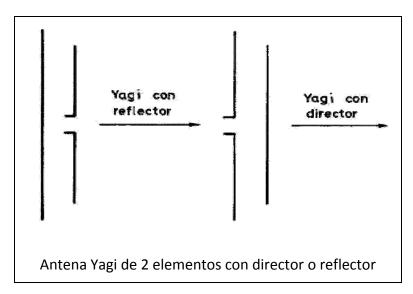


El dipolo horizontal no radia en dirección a las puntas del dipolo, sino preferentemente en dirección perpendicular al mismo, y su ángulo de radiación vertical depende de la altura sobre el suelo, aunque siempre tiene una ganancia ligeramente superior a la vertical, debido a su mayor longitud física radiante de media onda.

6.1.5 Antena directiva con elementos parásitos (Yagi)

Una antena directiva concentra la radiación en una determinada dirección del espacio, lo que comparativamente es exactamente equivalente a aumentar la potencia de emisión en esa dirección, en detrimento de la potencia radiada en las demás direcciones del espacio.

Hay muchos modos de concentrar la radiación de una antena en una determinada dirección del espacio, en detrimento de las demás direcciones y uno de los más efectivos es la antena directiva Yagi-Uda.



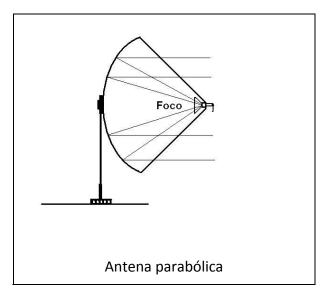
La antena Yagi consigue mejorar la escasa directividad de un dipolo por medio de los llamados elementos parásitos, consistentes en un elemento llamado <u>reflector</u>, ligeramente más largo que la media onda del dipolo resonante y colocado detrás del dipolo, y varios elementos ligeramente más cortos que el dipolo colocados delante y llamados <u>directores</u>.

El reflector cancela la radiación del dipolo en su dirección hacia atrás y los directores concentran la energía hacia delante, en la dirección perpendicular a la que están colocados.

Independientemente del número de sus directores, se puede afirmar que una Yagi bien diseñada tiene una ganancia aproximadamente proporcional a su longitud.

6.1.6 Antenas de apertura (reflector parabólico, bocina)

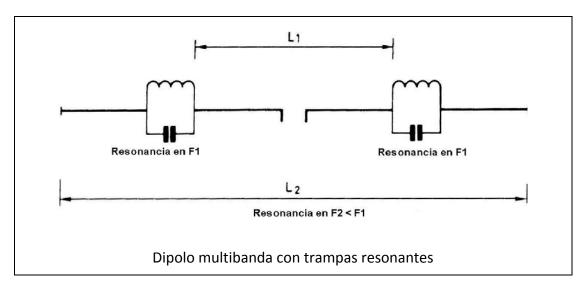
La <u>antena parabólica</u> consiste en un reflector parabólico de un material buen conductor que no reflejará la luz como un espejo, pero sí que refleja las ondas de radiofrecuencia hacia el foco del reflector parabólico, donde se coloca una antena directiva dirigida hacia el reflector.



Las <u>guías de onda</u> son conductos metálicos de sección rectangular por los que circula la radiofrecuencia y pueden terminar en antenas con forma de bocina con una geometría en su extremo abierto que no puede ser cualquiera, sino que debe tener una forma de bocina para que se adapte la impedancia entre la guía y el aire.

6.1.7 Dipolo multibanda con trampas

Las trampas son circuitos resonantes LC colocados simétricamente a ambos lados del dipolo y su función es limitar la longitud de la antena para que sea resonante en media longitud de onda a una longitud de onda más corta o, lo que es lo mismo, a otra frecuencia de resonancia más elevada que la correspondiente a la longitud total.



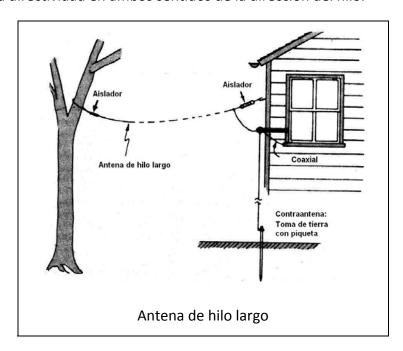
Para conseguir una antena multibanda, las trampas pueden ser múltiples, colocadas a pares, aunque hay que tener en cuenta que las reactancias de las bobinas y los condensadores, en las frecuencias en que no son resonantes, pueden alargar y acortar

la antena respectivamente en las frecuencias más bajas y habrá que tenerlas en cuenta.

Las trampas tienen el inconveniente de que disminuyen el ancho de banda de la antena.

6.1.8.1 Antenas de hilo largo y Beverage

Una <u>antena de hilo largo horizontal</u>, si tiene una longitud de varias longitudes de onda, presenta una ganancia en la dirección del hilo recto, pero en ambos sentidos. Es decir, presenta una directividad en ambos sentidos de la dirección del hilo.

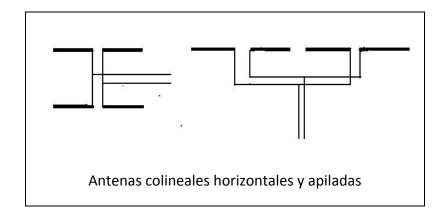


En cambio <u>la antena Beverage</u> es una antena de hilo largo horizontal <u>terminada en una carga resistiva de 600 ohmios</u> que absorbe la energía no radiada que llega a su extremo, de forma que no se refleje esa energía hacia atrás y su directividad sea unidireccional en dirección a la resistencia.

6.1.8.2 Antenas colineales horizontales

Las <u>antenas colineales</u> son <u>antenas directivas</u> formadas por varias antenas dipolos de media onda horizontales que están alineadas, como su nombre indica, una a continuación de la otra, pero que están alimentadas con la misma fase para que las corrientes pulsen a la vez en el mismo sentido, dando siempre ganancia hacia la perpendicular de la línea que forman las antenas. La ganancia aumenta en casi 3 dB cada vez que se dobla el número de antenas colineales añadidas.

Para conseguir que estén alimentadas con la misma fase, es suficiente con que tengan la misma longitud de línea de alimentación y las conexiones de cada una estén colocadas de la misma forma.



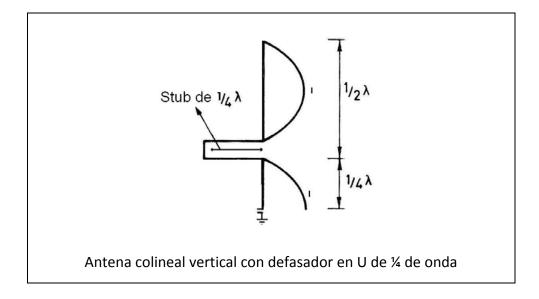
También pueden colocarse <u>dipolos</u> de media onda <u>apilados</u> uno encima de otro, pero en ese caso hay que respetar por lo menos una distancia entre ellos de media longitud de onda.

Finalmente pueden agruparse en filas y columnas formando lo que se llama una antena de cortina.

6.1.8.3 Antenas colineales verticales

Las antenas colineales verticales consisten en un tramo vertical de cuarto de onda a la que se le ha añadido media onda encima, pero conectadas con una U que actúa como inversora de fase de 180º (stub), al ser una línea resonante de un cuarto de longitud de onda, de forma que las corrientes en ambas secciones vuelven a estar en fase y radian simultáneamente.

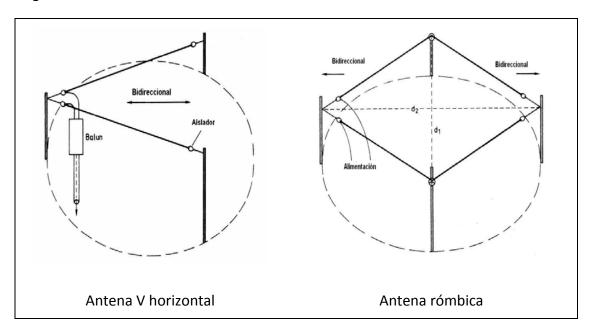
Al ser una antena vertical y disponer de mayor longitud radiante, concentra su radiación en un ángulo más estrecho en el plano vertical y no deja de ser también omnidireccional como todas las antenas verticales.



También se pueden añadir tramos colineales de media onda invirtiendo la fase de la antena, por medio de los defasadores en U, intercalados entre cada tramo.

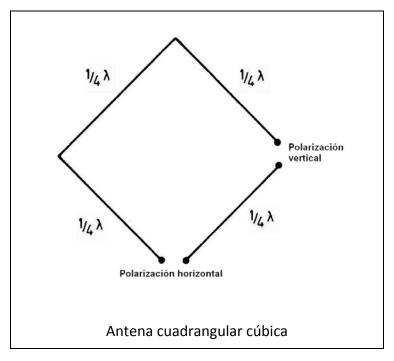
6.1.8.4 Antenas rómbicas

Las antenas rómbicas consisten en unas antenas en forma de rombo horizontal que es alimentado por uno de los vértices más agudo. Si terminan en un circuito abierto, son bidireccionales, pero si terminan en una carga resistiva en el vértice opuesto para evitar la reflexión se consigue que sean <u>unidireccionales</u> en la dirección de la mayor diagonal del rombo.



6.1.8.5 Antenas de cuadro

Una antena de cuadro puede describirse como <u>dos dipolos de media onda superpuestos</u>, cuyos extremos están unidos formando un cuadrado y alimentada por el centro de uno de ellos. También puede montarse en forma de rombo y alimentarlo por una de las esquinas. Tienen una con una impedancia que se encuentra alrededor de los 100 ohmios.

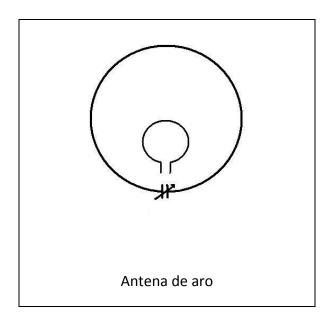


Su polarización depende del punto de alimentación de la antena. Si se realiza por un lateral, nos proporcionará polarización vertical y se se alimenta por la parte inferior, nos proporcionará polarización horizontal.

6.1.8.6 Antenas de aro

La antena de aro es un círculo completo de gran diámetro, colocado en un plano vertical que puede ser giratorio y que se sintoniza con una capacidad en serie hasta conseguir la resonancia y se alimenta por un aro más pequeño acoplado inductivamente.

Tiene la ventaja que puede utilizarse para eliminar interferencias al presentar un nulo muy acusado en la dirección del plano del aro y es fácil de construir sobre un eje giratorio.

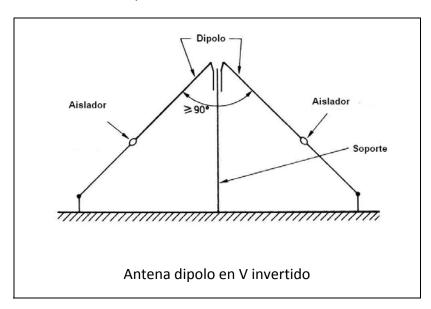


Tiene el inconveniente de que normalmente se realiza de dimensiones reducidas y su área de captura es más pequeña, con lo que exige la utilización de e preamplificadores de gran ganancia y se utilizan preferentemente en recepción.

6.1.8.7 Dipolo en V invertida

Una antena en V invertida no es más que un dipolo de media onda sujeta a un mástil o soporte en el centro que sostiene la antena, de forma que los extremos del dipolo descienden hacia ambos lados y se sujetan con cuerdas y aisladores muy fácilmente.

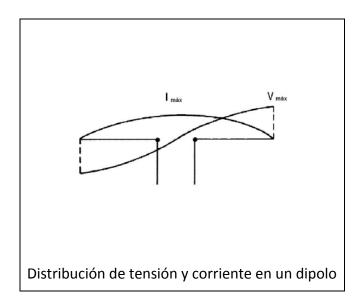
Tiene por una parte la ventaja de que es más omnidireccional que el dipolo horizontal, pues radia hacia las puntas con polarización vertical, y también que al disminuir el ángulo de la Vsu impedancia desciende cada vez más y se acerca enseguida a los 50 ohmios, mucho más adecuada para un cable coaxial de transmisión.



6.2 Características de las antenas

6.2.1 Distribución de tensión y corriente

Si el dipolo es resonante, la tensión de RF es máxima en las puntas y mínima en el centro, mientras que la corriente es máxima en el centro y mínima (prácticamente nula) en los extremos, lo que implica que "en resonancia" la impedancia sea resistiva en cualquier punto del dipolo, pero no es constante a lo largo del mismo, sino que es máxima en las puntas (2000-3000 ohmios) y mínima en el centro (alrededor de 75 ohmios).



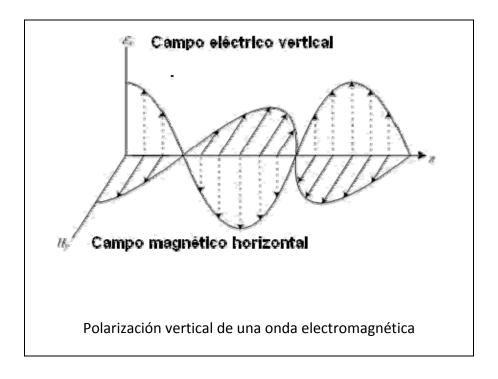
6.2.2 Impedancia en el punto de alimentación

Porque la impedancia en el centro es mínima y puramente resistiva en la resonancia y oscila entre 50 y 100 ohmios (72 en el espacio libre), según la altura sobre el suelo a la que se coloque, y se adapta muy bien a líneas de transmisión de 50 y 75 ohmios de impedancia característica, por lo que absorbe muy bien toda la energía que recibe por medio de la línea de alimentación, si es de cable coaxial, y la antena la radia íntegramente.

Eso no impide que pueda alimentarse en cualquier otro punto fuera del centro, como por ejemplo, en la antena Windom en que se conecta la bajada al 16% y al 33% del extremo, puntos en los que se encuentran impedancias entre 500 y 300 ohmios y que pueden adaptarse a un cable coaxial de 50 ohmios por medio de balunes elevadores de impedancia de relaciones 1/9 y 1/6 respectivamente. Al mismo tiempo, los balunes actúan de simetrizadores e impiden la circulación de corrientes por el exterior de la malla de la línea coaxial de bajada.

6.2.3 Polarización

La polarización de una antena depende de si el campo eléctrico radiado vibra en el plano horizontal o en un plano vertical, y eso depende a su vez de la <u>posición de los elementos radiantes</u> de la antena emisora. Si están colocados horizontalmente, la antena radia con polarización horizontal y si están colocados verticalmente radia con polarización vertical, como en la ilustración que sigue a continuación.



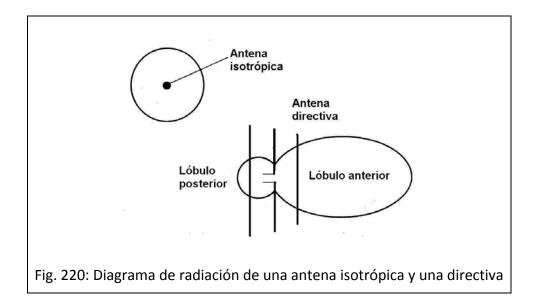
Para emitir con <u>polarización circular</u> deben utilizarse dos <u>antenas cruzadas</u> colocadas perpendicularmente una de la otra y alimentadas con un defasador de 90º.

En el siguiente vídeo podrás contemplar el avance de una onda electromagnética de polarización vertical (E):

http://www.youtube.com/watch?v=4CtnUETLIFs

6.2.4 Directividad, rendimiento y ganancia de una antena

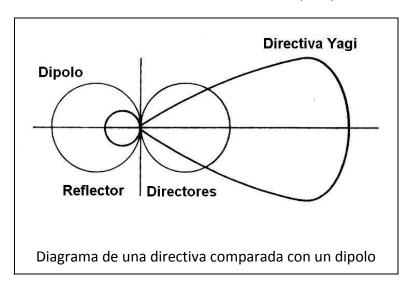
La ganancia en directividad de una antena se define por comparación entre el valor de la potencia aplicada a una antena en la dirección de su máxima radiación y el valor de la potencia que deberíamos aplicar a una antena isotrópica ideal que radiara el mismo valor del campo eléctrico en esa misma dirección. Esta comparación se mide en dBi y se le añade el subíndice i para indicar que es en referencia a una antena isotrópica ideal, que es una antena virtual inexistente, puesto que no existe una antena real que pueda reducirse físicamente a un punto.



Precisemos que la <u>antena isotrópica ideal</u> sería una antena puntual (sí, un punto), colocada como si fuera el centro de una esfera, y que radiara por igual en todas las direcciones posibles del espacio. De esa forma, en cualquier punto de una esfera de cualquier radio, mediríamos exactamente la misma intensidad de campo eléctrico.

¿Cómo se puede medir la ganancia de una antena en dBi si no existe la antena isotrópica ideal?

<u>En la práctica</u>, como no disponemos de antenas isotrópicas ideales para realizar las comparaciones de las antenas directivas, las mediciones se realizan comparando con un <u>dipolo de media onda horizontal</u>, cuya ganancia en la dirección de máxima radiación, que es la perpendicular al cable o elemento radiante, se conoce muy bien calculada matemáticamente en relación a la antena isotrópica y vale 2,17 dBi.



De modo que, una vez medida la ganancia de una antena en dBd, ya sabremos que:

G en dBi = G en dBd (ganancia medida sobre el dipolo) + 2,17 dBi (ganancia isotrópica del dipolo)

6.2.5 Área de captura

El área de captura de una antena en recepción se mide en "longitudes de onda cuadradas" y se utiliza la expresión:

A = G/4, donde A sería el área de captura medida en longitudes de onda cuadradas y G la ganancia numérica de la antena sobre la antena isotrópica y no en dBi.

En la práctica esta medida no se utiliza para nada, pero pongamos un ejemplo: <u>Una antena Yagi de 6 dBd</u> sobre dipolo, lo que sería una ganancia de 6 dBd + 2,17 dB = 8,17 dBi, equivalentes a un factor de ganancia de 6,56 veces, tendría un área de captura de A = 6,56/4 = 1,64 longitudes de onda cuadradas.

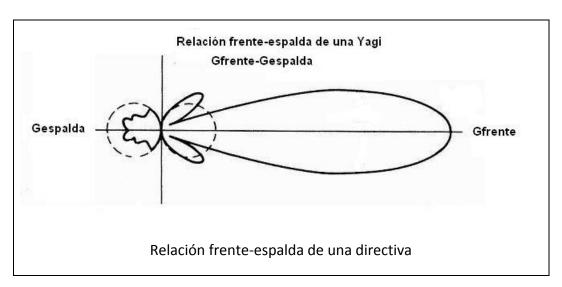
6.2.6 Potencia radiada (PER, PIRE)

La PER o <u>Potencia Efectiva Radiada</u> sería la potencia efectiva radiada por un emisor y antena en una dirección, <u>comparada con la que radiaría un dipolo</u> en la misma dirección.

En cambio la PIRE o <u>Potencia Isotrópica Efectiva Radiada</u> es la potencia que tendríamos que aplicar <u>a una antena isotrópica ideal</u> para que radiara la misma potencia que nuestro emisor y antena en esa dirección.

6.2.7 Relación frente-espalda

Algunas veces nos interesa conocer la capacidad que tiene una antena para rechazar señales que llegan por la dirección opuesta a la que apunta, algo que no tiene nada que ver con la ganancia hacia delante de una antena en relación a un dipolo. Dicho sea de paso, recordemos que un dipolo recibe exactamente lo mismo por delante que por detrás.

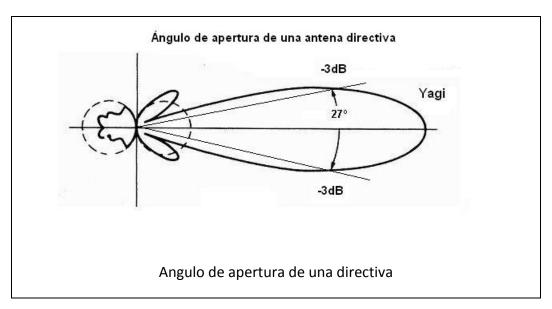


Realmente lo que hacemos para obtener la radiación frente/espalda (Front-to-Back) de una antena directiva es medir en dB la diferencia que existe entre la potencia radiada

en la dirección de la máxima radiación de una antena directiva (**Gfrente**) y la potencia radiada en dirección justamente opuesta (**Gespalda**). Lo medimos en transmisión, aunque se podría medir también en recepción, comparando los niveles con lo que se recibe una señal por los dos lados.

6.2.8 Ángulo de apertura de una antena.

La <u>apertura</u> de una antena es el ángulo cubierto a ambos lados de la dirección principal de radiación en un plano horizontal, entre cuyas direcciones la radiación de la antena disminuye ya 3 dB respecto a la radiación máxima del lóbulo de radiación. Se supone que contra más estrecho es el ángulo de apertura, más directiva es una antena y mayor ganancia tiene en la dirección principal y a la inversa.



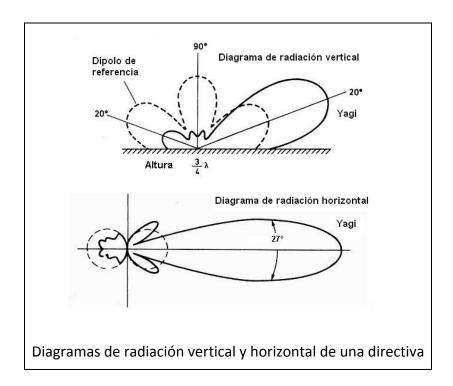
Otro factor importante que nos interesa conocer de una antena es el <u>ángulo de</u> elevación que forma la dirección de máxima radiación con el suelo.

En las antenas verticales, el ángulo de elevación con el que se radia la máxima potencia es siempre muy bajo, aunque depende bastante de la conductividad del suelo en las proximidades de la antena.

6.2.8-b Diagrama de radiación horizontal y vertical

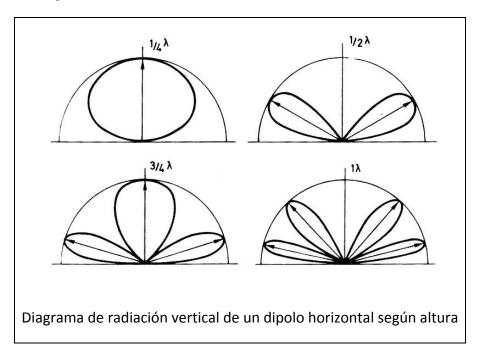
En la práctica de toda antena nos interesa determinar lo que llamamos el <u>diagrama de</u> <u>radiación</u>, por lo que dibujamos en dos planos (el diagrama de radiación horizontal y el diagrama de radiación vertical) los lóbulos de radiación de una antena. Esto nos permitirá calcular tanto el ángulo de apertura como el ángulo de elevación de la radiación máxima. De esta forma, podremos estimar si una antena es más o menos apropiada para el DX, o sea para las comunicaciones a larga distancia en esa banda.

En el diagrama de radiación vertical, veremos el ángulo de elevación de la máxima radiación de la antena, mientras que en el diagrama de radiación hotizontal veremos el ángulo de apertura.



6.2.8-c Angulo de elevación vertical de una antena horizontal

Sin embargo, tenemos el problema de que <u>el ángulo de elevación de la radiación máxima</u> de una antena horizontal <u>depende de la altura sobre el suelo</u> a la que está colocada. Normalmente se recomienda preferentemente una altura de $\frac{1}{4}\lambda$, aunque se acepta que sea al menos de $\frac{1}{4}\lambda$ 2 sobre el suelo, porque por debajo de esta altura la antena radia principalmente hacia ángulos elevados de radiación que no se reflejan bien en la ionosfera, porque inciden en ella demasiado verticalmente y no alcanzaríamos grandes distancia de comunicación.

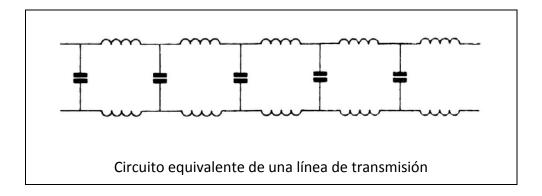


6.3 Líneas de transmisión

Las líneas de alimentación son las que nos sirven para llevar la energía de RF del transmisor hasta la antena y viceversa, para trasportar la energía captada por la antena hasta el receptor. Nos interesa siempre que realice esta función de transporte con las mínimas pérdidas posibles.

Como todo circuito eléctrico, una línea de transmisión forma un circuito cerrado con el transmisor y la antena, de forma que necesita dos conductores para conducir la energía proporcionada por el movimiento de los electrones. No existen líneas de transmisión de un solo cable conductor, aunque en algunas veces aparentemente eso parece, puesto que en esos casos efectuamos el retorno por la Tierra que actúa de conductor de cierre.

Las líneas de transmisión, al constar de dos conductores, tienen una inductancia propia L cada uno y una capacidad propia C entre los dos por unidad de longitud y <u>una impedancia Z característica</u> que depende de sus dimensiones. Este último parámetro es muy importante como veremos a continuación.



Podemos clasificar las líneas de transmisión en tres grandes clases: <u>las simétricas</u> formadas por dos cables paralelos y <u>las asimétricas</u>, es decir las que están constituidas por cables coaxiales, que constan de un conductor central interior y otro exterior concéntrico que lo envuelve totalmente como un cilindro, pero que generalmente es de malla de cobre. Y finalmente <u>las guías de onda</u> que son conductores huecos de sección rectangular.

6.3.1 Línea de conductores paralelos simétrica

Toda línea de transmisión debe tener dos conductores, uno de ida y el otro de vuelta y la idea más simple es colocar los <u>dos conductores paralelos</u> de forma simétrica con separadores de plástico a cada medio metro, de forma que se puede afirmar que el dieléctrico que separa los dos cables es prácticamente el aire, por lo que forma una línea de transmisión que no tiene prácticamente pérdidas y que puede llegar a tener una impedancia característica de unos 600 ohmios.

Si se fabrica con unos espaciadores muy distanciados y el dieléctrico que los separa es prácticamente sólo el aire, <u>la impedancia característica</u> de la línea viene dada por la fórmula: $Z_0 = 276 \times log (d/r)$ siendo d la distancia de separación entre conductores paralelos y r el radio de los dos conductores.

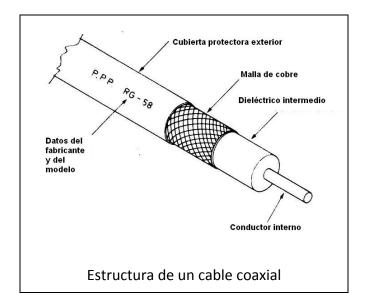
La línea de cables paralelos tiene el inconveniente de que tiene que instalarse en toda su longitud bien alejada de estructuras y elementos metálicos conductores, pues afectan a su impedancia característica y pueden producir pérdidas de importancia por absorción en esos elementos y perturbaciones en su impedancia característica.

En la práctica, para hacerlos más manejable y fáciles de instalar, se fabrican cables paralelos que se mantienen separados por medio de <u>cintas de polietileno y materiales plásticos</u> con impedancias características de 240 y 300 ohmios y, si son con cinta perforada, pueden incluso encontrarse cables de hasta 450 ohmios de impedancia. Sin embargo, el separador de plástico aumenta las pérdidas de la línea y la hace sensible a la lluvia.

6.3.2 Cables coaxiales

El cable coaxial está formado por un conductor interior y una malla externa, separados por un dieléctrico intermedio concéntrico, y tiene la gran ventaja sobre los cables paralelos de que es <u>mucho más manejable y fácil de instalar</u>, especialmente porque no se ve afectado por los elementos metálicos vecinos junto a los que pasa.

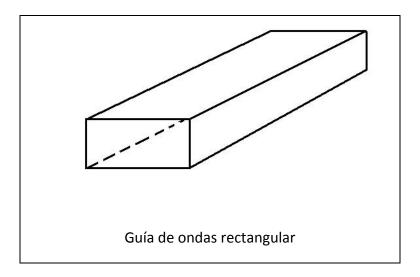
Además, tiene una estructura ideal para no verse afectado por la humedad exterior, ya que consta de un conductor interno por el que viaja la señal, y vuelve por el otro conductor que es una malla conductora, que es la que lleva la corriente de retorno. Esta malla metálica realiza <u>una función adicional de apantallamiento</u> que es el que lo hace insensible a elementos metálicos vecinos junto a los que pasa y facilita su instalación.



El único inconveniente del cable coaxial es que el dieléctrico que separa el vivo de la malla introduce pérdidas superiores a las de los cables realizados con líneas paralelas y estas pérdidas aumentan con la frecuencia, con lo que llega un momento en que para frecuencias muy elevadas ya no es práctico utilizarlos y hay que recurrir a las guías de onda..

6.3.3 Guía de onda

Para las frecuencias más elevadas, en lugar de utilizar cables coaxiales, para conseguir menores pérdidas, se emplean las llamadas guías de onda, que son conductos metálicos huecos de sección rectangular, los cuales tienen una **frecuencia de corte** por debajo de la cual es imposible la transmisión de ondas electromagnéticas. Esta frecuencia está directamente relacionada con la geometría de la guía, por lo que sólo son físicamente realizables para frecuencias superiores a 1 GHz, en las que la longitud de onda son inferiores a 30 cm.



6.3.4 Impedancia característica (Zo)

<u>La impedancia característica</u> de una línea de transmisión es <u>el valor de una resistencia</u> que se podría colocar como carga final en cualquier punto de la línea y por la que desaparecería toda la energía entregada como si fuera una <u>línea de longitud infinita</u>, sin que se pudiera averiguar desde el transmisor la longitud que tendría la línea, pues aparentemente no devolvería ninguna energía reflejada hacia atrás.

Línea de longitud infinita	Línea de cualquier longitud	
Impedancia característica Zo	R = Zo	
	Idéntica a una línea infinita	
Línea de transmisión infinita	Línea de transmisión Zo = R	

Por consiguiente, si nosotros colocamos al final de nuestra línea, en lugar de esa resistencia característica, <u>una antena que tenga esa misma impedancia resistiva que la característica del cable</u>, conseguiremos que toda la energía llegue a la antena y sea radiada, puesto que desaparecerá en ella como si la entregáramos a una línea infinita..

Esta condición para transportar toda la energía es válida tanto para cables coaxiales de 50 y 75 ohmios, como para líneas de cables paralelos, que tienen impedancias características más elevadas, como por ejemplo 240, 300 y 600 ohmios.

6.3.5 Factor de velocidad

La radiofrecuencia se propaga por todos los conductores <u>a una menor velocidad que</u> <u>en el espacio libre</u> y, en general, por los cables de las antenas circula con un 5% menos de velocidad y, por tanto, las longitudes de onda debemos multiplicarlas por un <u>factor</u> <u>de velocidad</u> de 0,95 para calcular las antenas de media onda.

Si en lugar de ser el espacio libre, la radiofrecuencia circula por línea de transmisión formada por conductores entre los cuales hay un dieléctrico que los separa, como en una cinta paralela o un cable coaxial, esta velocidad de propagación es aún menor y debemos aplicar el factor corrector de velocidad correspondiente.

Cada fabricante nos informa del factor de velocidad de su cable, pero como norma general los cables coaxiales de dieléctrico sólido tienen un factor de velocidad de 0,66, y los de espuma de polietileno (foam) de 0,80.

Tipo de línea	Denominación más corriente o marca	Impedancia característica $Z_{_0}\left(\Omega ight)$	Factor de velocidad V
Coaxial con dieléctrico de polietileno	RG-58 RG-58a RG-58A/U	52	0,66
	RG59 RG59A RG59A/U	75	0,66
	RG-8 RG-8A RG-8A/U RG-213	52	0,66
	RG-11	75	0,66
	RG-17	52	0,66
Coaxial con dieléctrico de espuma	RG-58	52	0,79
	RG-59	75	0,79
	RG-8	52	0,80
Coaxial con dieléctrico de aire	«POPE» «BAMBOO»	75	0,82
Linea plana de hilos desnudos	1 275 1	Variable	0,97
Línea plana deTV con dieléctrico continuo		200-300	0.82

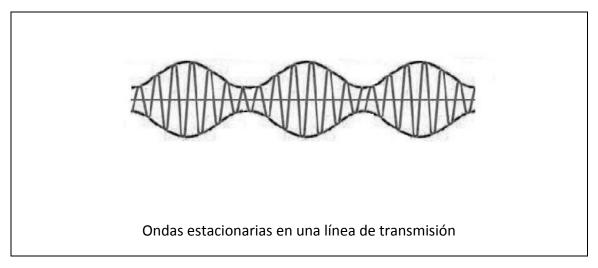
Si en lugar de ser el espacio libre, la radiofrecuencia circula por línea de transmisión formada por conductores entre los cuales hay un dieléctrico que los separa, como en una cinta paralela o un cable coaxial, esta velocidad de propagación es aún menor y debemos aplicar el factor corrector de velocidad correspondiente.

Cada fabricante nos informa del factor de velocidad de su cable, pero como norma general los cables coaxiales de dieléctrico sólido tienen un factor de velocidad de 0,66, y los de espuma de polietileno (foam) de 0,80.

6.3.6 Relación de ondas estacionarias (ROE)

Si una línea (independientemente de su longitud) termina en una resistencia (la de la antena) de un valor que <u>NO sea exactamente igual a la de su impedancia característica</u>, **no se comportará como una línea infinita** y devuelve reflejada hacia atrás parte de la energía transportada, de forma que entre la onda directa y la reflejada que circulan simultáneamente, al sumarse ambas se producirán máximos y mínimos, es decir una <u>onda estacionaria</u>.

Esta onda estacionaria hace aparecer en la línea unos máximos de tensión de radiofrecuencia superiores a los previstos cuando está perfectamente adaptada que pueden llegar al doble de la tensión de funcionamiento en la adaptación perfecta. Esto puede producir daños en los amplificadores finales de un transmisor si no está prevista esta circunstancia.



Se llama relación de ondas estacionarias (ROE) al valor relativo entre los máximos y mínimos de tensión y ese valor concuerda con la relación entre la resistencia característica de la línea y la que encuentra al final.

ROE = Zt/Zo = Vmax/Vmin = Imax /Imin

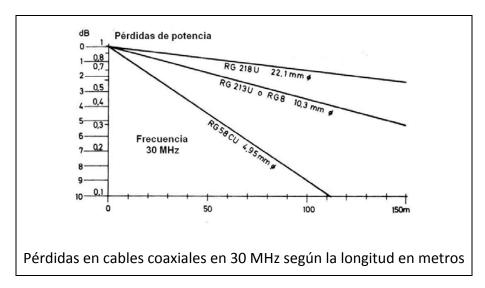
Para poner un ejemplo, cuando la ROE es 2, eso representa que la radiofrecuencia reflejada por la antena es del 10% y si la ROE = 3, esto representa una potencia reflejada del 25% aproximadamente.

Podéis ver un ejemplo dinámico de la formación de ondas estacionarias en el vídeo:

http://www.youtube.com/watch?v=yCZ1zFPvrIc

6.3.7 Pérdidas en las líneas de transmisión

Si el dieléctrico de una línea de transmisión fuera el aire, las únicas pérdidas que se producirían serían las óhmicas del conductor, aunque recordemos que éstas siempre son incrementadas por el efecto pelicular o skin.



La presencia de <u>un dieléctrico</u> de polietileno entre los dos conductores <u>hace que</u> <u>aumenten mucho las pérdidas</u> en las líneas coaxiales, pero disminuyen bastante si cambiamos el polietileno sólido por espuma de polietileno que tiene una mayor proporción de aire en su interior.

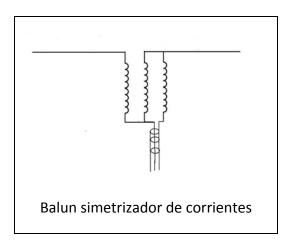
Podemos conocer las pérdidas en un cable mediante los datos de atenuación del fabricante que acostumbra a darlos por cada 100 pies o por cada 100 metros y eso para cada frecuencia, ya sea mediante una tabla o un gráfico.

6.4 Balunes y acopladores de antena

6.4.1 Balunes

Un balun (del inglés *Balance/unbalance*) sirve para dos cosas:

<u>La primera</u> función del balún es para <u>equilibrar las corrientes</u> proporcionadas a las antenas por líneas de transmisión coaxiales asimétricas a las antenas de todo tipo, tanto simétricas (dipolos) como asimétricas (Windom y End-Zepp), y evitar así que circule una corriente independiente de RF por la parte exterior de la malla del coaxial, desde donde se radiaría como si formara parte de la antena. El balun se encarga de igualar las corrientes en ambas ramas de la antena.



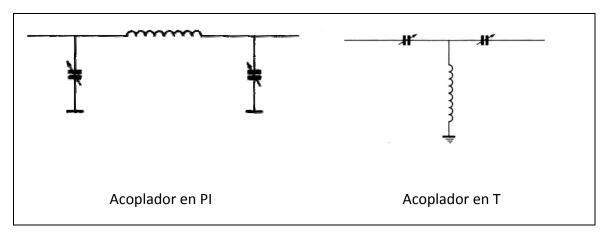
<u>La segunda</u> función de un balun es actuar como <u>transformador de impedancias</u> y conseguir **la adaptación correcta** de las antenas a las líneas de transmisión, cuando su impedancia en el punto de alimentación escogido es muy diferente del de la línea. Se fabrican balunes con relaciones de transformación de 4:1 6:1 y hasta 9:1 para adaptar impedancias de 200, 300 y 450 ohmios a líneas de 50 ohmios.

Actualmente se consigue también impedir la corriente independiente que intenta circular por el exterior de la malla del coaxial por medio de <u>anillos de ferrita</u> colocados sobre el coaxial y que actúan como choques contra la RF que intenta pasar por el exterior de la malla.

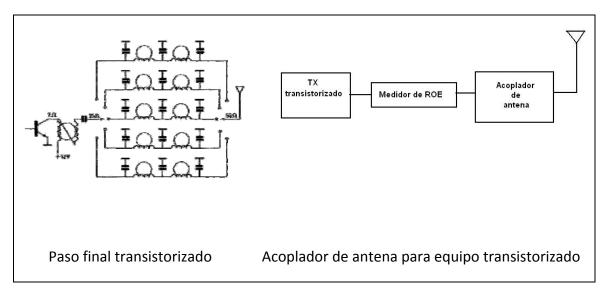
6.4.2 Acopladores de antena

Si la antena no es exactamente resonante o, aunque resuene, si la impedancia resistiva que presenta a la línea de transmisión no es exactamente igual a su impedancia característica, se producirán ondas estacionarias en la línea de transmisión y la impedancia reflejada al transmisor no serán los 50 ohmios que éste espera encontrar.

El acoplador de antena <u>realiza una transformación de la impedancia</u> resistiva al valor adecuado de 50 ohmios que necesita el transmisor y, si hace falta, también proporciona una reactancia conjugada a la reactancia reflejada por la antena, de forma que cancele cualquier reactancia presente en bornes del acoplador y devuelva la energía reflejada por la antena.



Si la ROE presente en la línea es superior a 2:1, probablemente <u>el emisor con el paso final transistorizado</u> reducirá automáticamente su salida. En ese caso, será muy conveniente utilizar un <u>acoplador o adaptador de impedancias</u> o sintonizador de antena que cancele cualquier reactancia y transforme la impedancia anormal en los 50 ohmios resistivos deseados.



<u>El ajuste de un acoplador</u> se realiza utilizando un medidor de ROE, moviendo los mandos hasta reducir al mínimo posible la energía reflejada por la antena y aproximar la ROE a un valor de 1:1 todo lo posible, pero actualmente ya existen <u>acopladores automáticos</u> capaces de buscar la mejor adaptación y encontrarla en breves segundos y también muchos equipos transistorizados ya los incorporan en su interior.

Los <u>amplificadores lineales con válvula</u>s no necesitan normalmente un acoplador externo porque ya equipan un adaptador de antena interior que consiste en circuito adaptador en PI imprescindible para adaptar la alta impedancia de salida de las válvulas (Z > 1000 ohmios) a la baja impedancia de los cables coaxiales de 50 ohmios.

