

LA TIERRA (Otro artículo más)

Mucho se ha escrito sobre esta parte de un sistema de radiación principalmente de los formados por antenas verticales, y poco queda por decir.

Yo deseo contribuir con mi humilde aportación a abundar en algunos aspectos para tratar de conocer algo más sobre el comportamiento del suelo que nos rodea en presencia de un campo electromagnético.

Sabemos que el suelo es un material mal conductor y por lo tanto ofrece determinada resistencia al paso de corrientes eléctricas. Todo radioaficionado conoce que eliminar esta resistencia, conllevaría el conseguir un rendimiento de nuestra antena, muy próximo al 100%.

En esta situación, estaríamos en presencia de un plano perfectamente conductor y los datos de impedancia de entrada medidos en el radiador, así como los del diagrama de radiación, coincidirían prácticamente con los calculados mediante la formulación existente. Pero sabemos que esta situación es quimérica por lo que los esfuerzos del diseñador deben estar orientados a minimizar el valor de esta resistencia.

Ahora bien. La resistencia del suelo es un enemigo difícil de vencer debido a las variables de las que depende, como son la homogeneidad de su composición, su naturaleza, su humedad y la cantidad de sales minerales que lleven disueltas las moléculas de agua que contiene.

Todos estos aspectos, hacen del suelo un medio inconstante en su comportamiento y que debemos conocer.

Para determinar de la forma más aproximada posible este comportamiento, deberemos partir de condiciones ideales.

Hay dos valores importantes que determinan su comportamiento.

Son su constante dieléctrica relativa (**permitividad**) ϵ_r y su **conductividad** (inversa de su resistividad), σ .

En general, la constante dieléctrica denota la capacidad de polarización de un medio (en este caso, la tierra) ante la presencia de un campo eléctrico. También podemos definirla como la capacidad que presenta un condensador de placas paralelas de 1 m^2 de superficie, separadas por un cubo de 1 metro de lado de material del medio considerado y se mediría en Faradios/metro.

La **conductividad** es la capacidad de un medio para conducir corriente eléctrica. Este valor depende principalmente de la naturaleza geológica del medio, su porosidad, la cantidad de agua almacenada en sus poros y la naturaleza y cantidad de sales disueltas en la misma. Es por ello, un parámetro muy variable (tal

como comentábamos anteriormente) ya que es función de la temperatura, humedad ambiental y la capacidad del medio, de retener dicha humedad.

Se mide en mhos/metro o siemens/metro y es la inversa de la **resistividad** del medio que podemos definir como la resistencia que presenta entre dos caras opuestas, un cubo de 1 metro de lado del medio considerado y se mediría en ohmios/metro. Los datos de referencia se suelen considerar, a 20º centígrados.

Hay un tercer valor que es la **permeabilidad** magnética relativa, que cuando el suelo no tiene carácter ferro-magnético, lo que ocurre en la mayoría de los casos tiene un valor de 1. Se mide en Henrios/m

Cuando estos 3 valores se consideran con sus correspondientes al vacío, obtenemos **valores absolutos**.

$$\varepsilon = \varepsilon_r \times \varepsilon_0.$$

Siendo los valores del vacío:

Permitividad (constante dieléctrica) ε_0 - $8'854 \times 10^{-12}$ F/m

Permeabilidad μ_0 - $4\pi \times 10^{-7}$ Henrios/m

Dado que el vacío no es conductor, su conductividad no se considera.

Resumiendo esta teoría, nos debemos quedar en el conocimiento de que al suelo o tierra la definen principalmente, dos parámetros que aunque reciben el nombre de “constantes” ya hemos visto que “no lo son tanto” pero sí podemos considerar valores medios de esos parámetros como constantes.

Así podemos calificar a una tierra o suelo en función de esos parámetros como desde muy buena a muy pobre.

Veamos la siguiente tabla

	σ (S/m)	ε_r (F/m)
Agua salada	5	81
Agua dulce	0,001	80
Muy buena	0,03	20
Buena	0,01	15
Media	0,005	13

Pobre	0,002	13
Muy pobre	0,001	5
Paupérrima	0,001	3

En ella observamos los distintos valores de σ y ε_r para distintos tipos de suelo, desde el agua del mar como mejor "suelo", hasta un tipo de roca impermeable que no contiene nada de humedad, como tierra paupérrima.

Estos valores se determinan mediante medidas en el terreno con los aparatos adecuados. Por ejemplo, un telurómetro nos marcará la resistividad de un terreno específico y la inversa de ese valor será la conductividad. En este punto, hay que tener en cuenta que este valor es fuertemente dependiente de la frecuencia.

De todas maneras, existen diversas publicaciones en revistas y libros en los que se describen métodos para determinar estos valores en zonas concretas de suelo.

Aún existen otros parámetros que conocemos cuando corresponden al vacío pero que en el suelo cambian considerablemente y hay que tenerlos en cuenta:

Son la longitud de onda, la velocidad de propagación y el filete de tierra por donde se propaga la corriente electromagnética.

En el suelo, como en cualquier otro medio, tanto la longitud de onda como la velocidad de propagación de una onda electromagnética, viene afectadas por su permitividad relativa ε_r de tal manera que:

$$\lambda_s = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_r}}$$

siendo λ_s la longitud de onda de la frecuencia de una onda, propagándose por el suelo y λ_0 la longitud de onda de la misma frecuencia propagándose en el vacío. Así, por ejemplo, una onda electromagnética de 7

MHz tiene una longitud de onda en el vacío, $\lambda_0 = \frac{300}{7} = 42'85$ mts. y en una tierra buena ($\varepsilon_r = 15$) la

longitud de onda, valdrá $\lambda_s = \frac{42'85}{\sqrt{15}} = 11'06$ mts.

El coeficiente reductor de λ_0 es $\frac{1}{\sqrt{15}} = 0'258$.

Esto significa que una longitud de onda sobre el suelo vale 42'85 mts. Pero que por debajo del nivel del suelo, la misma longitud de onda vale 11'06 mts.

La velocidad de propagación será $3 \times 10^8 \times 0'258 = 774 \times 10^5$ mts/seg.

Recordemos que 3×10^8 es la velocidad de la luz en el vacío

Este fenómeno es el mismo que conocemos para determinar una longitud física de un cable coaxial en función de su velocidad de propagación.

Un dato importante a considerar es el que estas constantes son función de la frecuencia. Esta frecuencia será el condicionante que determinará los parámetros del suelo al comportarse éste como un conductor (más o menos bueno), que ofrecerá un efecto piel al conducir las corrientes creadas por el campo eléctrico aplicado. Así y como orientación al lector de este efecto, midiendo σ y ϵ_r en un punto de suelo determinado a 1 MHz podemos encontrar valores de 0'0046 S/m y 81 F/m que se convierten en 0'015 S/m y 36 F/m a 8 MHz. Debemos tener en cuenta a la hora de utilizar los aparatos de medida, que deben ser capaces de realizar medidas a distintas frecuencias. Por ejemplo, un telurómetro normal utilizado para medir resistencias de tierras en instalaciones eléctricas no es viable para nuestros propósitos ya que la frecuencia que utilizan, o son los 50Hz de la red eléctrica o unos pocos de cientos de hercios. Siempre en muy baja frecuencia.

La profundidad de penetración en el suelo en función de la frecuencia del campo aplicado (filete conductor), viene determinada de una manera simplificada, por

$$\delta = \frac{1}{2\sqrt{F(\text{MHz}) \times \sigma}} \text{ metros}$$

Por ejemplo, y aplicando la fórmula para una frecuencia de 1'83 MHz y una tierra media ($\sigma = 0'005$ S/m) las corrientes en el suelo se desplazarán en un espesor de 5'23 mts (suponiendo que hasta esa profundidad, la tierra sea homogénea).

Si observamos la fórmula anterior, vemos que el espesor del filete, disminuye cuando aumenta la frecuencia o la conductividad del terreno.

Ya entiendo que para muchos lectores, tanta teoría y fórmulas resulta farragoso, pero considero que vale la pena emplear algo de tiempo en esto, para conocer al menos lo que podríamos llamar "las señas de identidad" de este medio que es el suelo o tierra.

Bien. Ya hemos visto que esas señas de identidad como son la conductividad, la permitividad y el espesor del filete conductor, determinan la resistencia que se ha de sumar a la de radiación en la base de una

antena vertical y que deteriora el rendimiento de dicha antena ya que una parte, más o menos sustancial de la potencia radiada, se va a disipar en forma de calor en esa resistencia de tierra y no se va a aprovechar en una potencia radiada "efectiva" .

La potencia perdida en la tierra al ser disipada en su resistencia, es la debida a la "corriente de conducción" que retorna a la base de la antena desde los límites del círculo que, con un radio de media onda en el vacío, rodea a la antena.

Este fenómeno se puede ver gráficamente en la figura 1

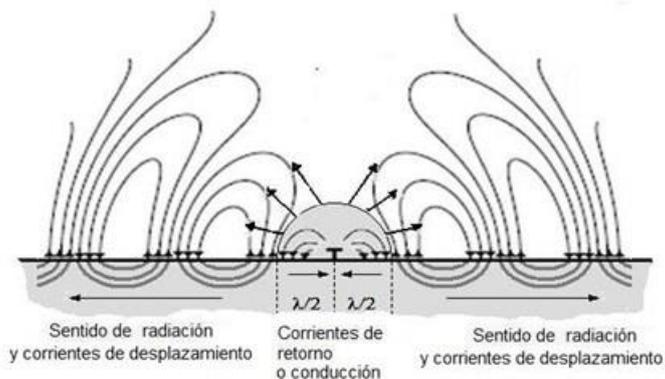


Figura 1

En ella podemos ver que el sistema radiante propiamente dicho, "comienza" en la superficie de esa esfera con un radio de media longitud de onda.

Ahora bien. El carácter variable de la resistencia del suelo, es un gran hándicap para la estabilidad del sistema y dificulta enormemente el diseño de los dispositivos de ajuste de impedancias. Es por eso que debemos añadir algún dispositivo que mantenga estable, en lo posible; esta resistencia al mismo tiempo que tratamos de minimizarla. Esto se consigue con un plano de tierra adicional conectado en la base de la antena según describimos a continuación.

El esquema eléctrico que corresponde al "circuito" de la base de una antena vertical, se muestra en la figura 2

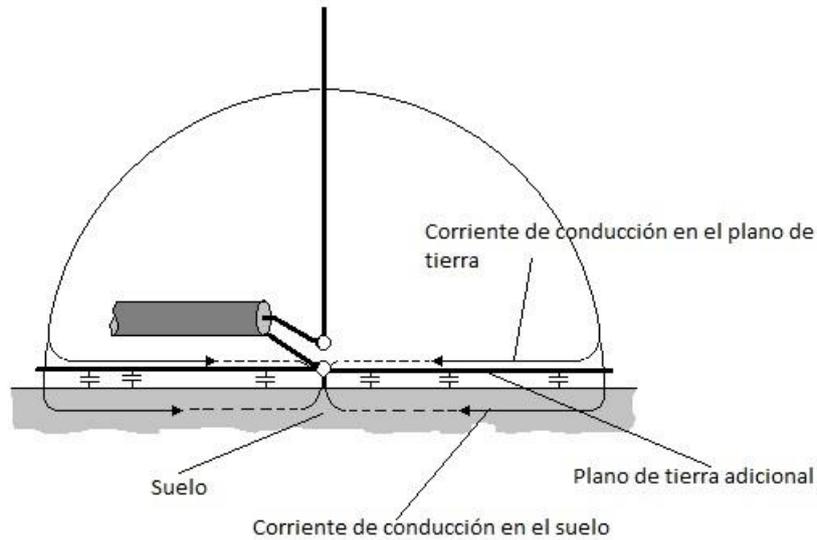


Figura 2

Este plano de tierra adicional que llamaremos en adelante GP por analogía con otras publicaciones (Ground Plane) es de carácter metálico y preferentemente de cobre o de otro metal que no tenga carácter magnético. Puede tener forma de malla o estar compuesto de un número determinado de hilos extendidos de forma radial. El número de hilos, su longitud y su forma de extenderse, varían en función de múltiples criterios como veremos más adelante.

Un radioaficionado estadounidense Rudy Severns N6LF ha dedicado años y muchos esfuerzos en realizar múltiples medidas con las más diversas combinaciones de GP y la tierra que ha condensado en una colección de gráficas que son muy explícitas. Recomiendo al lector que esté interesado en profundizar en este tema, que visite su página WEB www.antennasbyn6lf.com (en inglés).

Hay 3 formas de extender un GP a elegir por el diseñador en función de las condiciones del entorno.

Radiales extendidos sobre la superficie del suelo.-

Estos radiales pueden estar conectados a tierra en la base de la antena, o aislados de tierra.

Su cercanía al suelo al cual estará conectado en paralelo, modificará la velocidad de propagación de la onda electromagnética del hilo del radial por lo que se modificará su longitud física (metros) para una longitud eléctrica dada en λ .

Las corrientes de retorno circularán en gran parte, por el plano de tierra dado su carácter conductor hacia la base de la antena pero también habrá una cantidad de corriente que circulará por el suelo. De esta manera, en la base de la antena, se sumarán ambas corrientes, teniendo en cuenta que dado que las velocidades de propagación de los dos medios (radiales y suelo) son diferentes, también serán diferentes las fases de esta corrientes al llegar a la base de la antena por lo que la suma de ellas será algo compleja.

También hay que considerar la existencia de una capacidad distribuida entre los radiales y el suelo, que producirán una circulación de corriente añadida entre los radiales y el suelo a través de esta capacidad antes de llegar a la base de la antena

Radiales no conectados a tierra en la base de la antena.-

Es un plano de tierra "flotante", el mecanismo de circulación de corrientes en el suelo se hará a través de las capacidades aludidas anteriormente. Las corrientes del suelo se sumarán a la del GP por inducción en la base de la antena

En la figura 2 se muestra de una manera simple, este mecanismo.

Plano de tierra constituido por un conjunto de hilos metálicos desnudos extendidos radialmente e insertados a unos centímetros dentro del suelo.-

Lo que ocurre, es que mejora la conductividad del suelo, se alarga la longitud de onda y su velocidad de propagación, aumentando la cantidad de corriente de retorno que por él circula.

Escoger un número óptimo de radiales y su longitud, no es un ejercicio de precisión sino más bien, producto de la experiencia en la instalación ya que depende del espacio disponible y de la característica eléctrica del terreno.

Han habido diversos investigadores que han tratado de especificar tanto el número como la longitud óptima de una forma categórica, comparando diversas combinaciones. Así, vamos a relatar algunas de ellas

El Handbook de Antenas de la ARRL muestra la siguiente configuración, considerando la ideal y tomada como patrón, a la formada por 120 radiales de $\lambda/2$ y comparando el resto, con este "patrón".

Número de radiales	Longitud (λ)	Total de hilo (λ)	Pérdida en dB (vs. 120 rad)
15	0.1	1.5	3
24	0.125	3.125	2
36	0.15	5.4	1.5
60	0.2	12	1
90	0.25	22.5	0.5
120	0.4	48	0

La pérdida en dB se refiere a valores del campo eléctrico medidos en un campo lejano

En Junio de 1985, Brian Edward, N2MF, publicó en la revista QST el cálculo de la “configuración óptima” mediante el programa de cálculo NEC. Estos datos dan el menor número de radiales para una longitud dada.

Los datos están reproducidos por ON4UN en su libro “Low Band Dxing”

Número de radiales	Longitud (λ)	Total de hilo (λ)
4	0.1	0.4
12	0.15	1.8
24	0.25	6
48	0.35	16.8
96	0.45	43.2
120	0.5	60

La “configuración óptima”, varía entre los distintos cálculos, los cuales tienden a coincidir cuando se contemplan un gran número de radiales.

Existe una teoría que contempla que un simple radial, “recoge” la corriente del suelo sobre el que discurre, en una franja de entre $0'02$ y $0'05 \lambda$, dependiendo de la conductividad del suelo.

Según esto, se puede calcular otra “configuración óptima” ya que si por ejemplo, en un suelo buen conductor, la separación entre radiales debe ser como máximo de $0'02\lambda$ en el borde del círculo formado por el plano de tierra, el radio de este círculo en longitudes de onda y por lo tanto, la longitud de los radiales en función del número de ellos, es:

$$r = n \frac{0'02}{2\pi}$$

Simplificando el concepto, la relación número/longitud, vendrá dada por

$$\frac{r}{n} = 3'183 \times 10^{-3}$$

("r" en longitudes de onda)

Podemos construir las siguientes tablas de configuración óptima.

Para una separación máxima de $0'02 \lambda$ en el borde del plano, correspondiente a una buena conductividad del suelo:

Número de radiales	Longitud (λ)	Total de hilo (λ)
12	0.04	0.48
15	0.05	0.75
24	0.08	1.92
36	0.12	4.3
48	0.15	7.2
60	0.19	11.4
90	0.29	26.1
96	0.31	29.8
120	0.38	45.6

Si el suelo tiene una pobre conductividad, consideraremos la máxima separación de los radiales de $0'05 \lambda$ y repitiendo los cálculos, la tabla será :

Número de radiales	Longitud (λ)	Total de hilo (λ)
12	0.1	1.2
15	0.12	1.8
24	0.19	4.6
36	0.29	10.4
48	0.38	18.24
60	0.48	28.8

90	0.72	64.8
96	0.76	72.96
120	0.96	115.2

Usando un valor medio de separación máxima de $0'025 \lambda$ obtenemos la tabla

Número de radiales	Longitud (λ)	Total de hilo (λ)
12	0.05	0.6
15	0.06	0.9
24	0.1	2.4
36	0.15	5.4
48	0.19	9.2
60	0.24	14.3
90	0.36	32.4
96	0.38	36.5
120	0.48	57.6

Como se puede ver, hay un amplio rango de configuraciones "óptimas" por lo que deberemos usar las tablas como una guía y recordar ante todo, que la longitud de los radiales las determina en primer lugar, el espacio de suelo disponible; en segundo lugar, la naturaleza del suelo y por último se trataría de tender los radiales lo más juntos posible, tratando de optimizar la cantidad de hilo extendido para lo cual existen varios métodos.

La configuración óptima también se puede considerar bajo el punto de vista de la resistencia de tierra introducida por el sistema radial.

Aunque no especifica la naturaleza del suelo y suponiendo que las distintas medidas se han hecho sobre el mismo tipo de suelo, ON4UN también especifica en su libro "Low Band DXing" la resistencia estimada para diversas configuraciones.

Resistencia de tierra en función del número de radiales y su longitud					
	Numero de radiales				
Longitud de radiales (λ)	2	15	30	60	120
0'15	29	15	15	12	12
0'2	28	15	13	9'1	9'1
0'25	28	15	12	8	7
0'3	28	14	11	7	5
0'35	28	14	9'8	5'6	2'8
0'4	27	13	7	5	0'1

En esta tabla se puede ver claramente como una primera aproximación la inutilidad de alargar un pequeño número de radiales o aumentar el número de ellos cuando son cortos.

Por ejemplo: 15 radiales de 0'15 λ presentan una resistencia de 15 ohm. Alargándolos hasta 0'4 λ , la resistencia presentada es de 13 ohmios por lo que solamente ganamos 2 ohm, y sin embargo hemos empleado 2'7 veces más de hilo.

Por otra parte, si en vez de 15 radiales, tendemos 120, sólo habremos ganado 3 ohm y habremos empleado 8 veces más de hilo.

A la vista de estos datos, el lector puede profundizar en otras conclusiones.

Existe un tópico general que afirma que cuando sólo se pueden tender unos pocos radiales, es mejor que sean cortos en vez de largos, o lo que es lo mismo, no se gana nada alargándolos.

De todas formas deberemos reflexionar ante cualquier publicación de un sistema de tierra "óptimo", ya que hemos visto la cantidad de variables que componen un sistema de tierra, que lo hacen único para cada lugar.

Vuelvo a incidir sobre el trabajo de Rudy Severns N6LF aludido anteriormente por la cantidad de datos y conclusiones a las que llega después de muchos años de experiencias en este campo.

La última composición de un plano de tierra a la que me referiré, es al plano de tierra elevado (contra-antena o contrapeso).

Esta disposición se emplea principalmente en radiadores para altas frecuencias, normalmente a partir de 30 MHz., que se sitúan en puntos altos, muy alejados del suelo por lo que la disposición de los radiales enterrados, resulta impracticable aunque dada las ventajas que presentan los radiales elevados, también se están empleando en ocasiones, en frecuencias más bajas, incluso en OM.

Una contra-antena es un conjunto de radiales (4 o más) de al menos $\lambda/4$ en el vacío, espaciados regularmente alrededor de la base de un radiador vertical, con el que normalmente forman un ángulo de 90° conectados al conductor exterior (malla) del cable coaxial que lo alimenta y aislados del suelo. Deben ser resonantes a la frecuencia de funcionamiento, lo que físicamente representa algo más de $0'25 \lambda$. Dado que cuando el sistema está en resonancia, la impedancia en la base debe ser de $36'5 \Omega$, el ajuste a los 50Ω normalizados se consigue inclinando los radiales hacia abajo, formando un ángulo con el radiador vertical, mayor de 90° y si la impedancia de entrada es mayor de 50Ω , se pueden inclinar hacia arriba en un ángulo menor de 90° . Es importante que los radiales sean exactamente iguales, repartidos uniformemente en el plano y en principio, su número debe ser par. Esto es debido a que cada radial capta una determinada cantidad de radiación que al igual que en plano de tierra que hemos visto anteriormente, se convierte en una corriente de retorno en dicho radial que tiene sentido opuesto a la corriente de su pareja de línea, por lo que su radiación conjunta se anula.

Se han realizado pruebas experimentales en las que se ha visto la ventaja de un sistema de radiales elevados ya que 4 de estos radiales, se comportan igual que lo harían un gran número de radiales enterrados, en medidas realizadas en el campo lejano. Se ha demostrado experimentalmente y mediante programas de cálculo que los 4 radiales elevados equivalen incluso hasta 120 radiales enterrados. En cuanto a la relación longitud de radiales/altura sobre el suelo, éste tiene poca influencia sobre la misma ya que en 1800 Khz., por ejemplo, sólo son necesarios 4 metros de altura, para que la longitud de los radiales, ya no consideren la presencia del suelo. Lógicamente, con mayores frecuencias, más insignificante es la altura.

Hemos visto que para conseguir un diagrama de radiación uniforme y simétrico, es necesario que las corrientes en los radiales sean iguales, pero en ocasiones, el lugar de instalación de la antena no permite esta igualdad, si queremos conservar su longitud a $0'25\lambda$.

La solución es igualar dicha longitud a la del radiador más corto y llevar a resonancia el conjunto, mediante la inclusión de la correspondiente inducción. Por último, hay que tener en cuenta que la radiación de la contra-antena existe, aunque sus campos cercanos se anulan, pero si la línea coaxial de alimentación

discurre paralela al plano y cercana a ella, captará parte de la radiación que se traducirá en una descompensación en la radiación entre el conjunto de los radiales, deformándose el diagrama de radiación y por otra parte, creándose una corriente indeseada en la malla exterior del cable coaxial.

Esto se evita, procurando que el cable coaxial acceda al punto de alimentación perpendicular a los radiales, o enterrado si discurre a lo largo del suelo, o con aros de ferrita insertadas a partir del punto de alimentación, o enrollando el cable para formar una bobina de forma que suponga un choque a las corrientes inducidas en el exterior de la malla del cable.

Armando García EA5ND (ex EA5BWL)

Bibliografía y Consultas.-

ON4UN Low Band Dxing ARRL 4ª Ed.

EA5BWL Antenas Verticales para Bajas Frecuencias. Edit. Marcombo 1ª Ed.

Radio Handbook ARRL Ed. 1986

www.antennasbyn6lf.com

QST, Junio 1985