

6. Planos de tierra

6.1 Parámetros del suelo

En un radiador vertical, tan importante como el propio monopolo, o incluso más, es la tierra o el suelo sobre el que se apoya, ya que es el medio en el que se completa el sistema o mecanismo de radiación. Aunque la teoría del estudio de campos de radiación minimiza este detalle, en el sentido de considerar la tierra perfectamente conductora y de superficie infinita y, por lo tanto, considerarla una constante, en realidad se trata de un medio natural y variado que dista mucho de esa supuesta idoneidad.

En cualquier medio físico, y el suelo lo es, se deben considerar tres parámetros que definen su característica electromagnética:

- la permeabilidad magnética, de valor μ
- la permitividad dieléctrica, de valor ϵ , y
- la conductividad, de valor σ .

De este modo, consideraremos que el medio al que nos referimos es el suelo.

La *permeabilidad magnética* es la capacidad que posee un medio para atraer y hacer pasar a su través un campo magnético. Es una medida que nos proporciona su capacidad de almacenar energía magnética y únicamente los medios de composición ferromagnética (que pueden ser atraídos por un imán) tienen esta capacidad. El resto no son capaces de almacenar esta energía y para ellos el valor de μ es de 1 H/m . Esta constante es intrínseca del medio y se denomina μ_r (constante relativa del medio). La constante absoluta se relaciona con la del vacío, cuyo valor es $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$. La constante absoluta de un medio es el producto de las dos constantes. De este modo, $\mu = \mu_r \times \mu_0$.

La *permitividad dieléctrica* es la capacidad de polarización que presenta un medio 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 m de lado de material del medio considerado y que se mediría en F/m . Al igual que hemos visto en la permeabilidad magnética, también debemos considerar tres valores: la constante relativa del medio ϵ_r , la constante relativa del vacío $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ y el valor absoluto $\epsilon = \epsilon_r \times \epsilon_0$.

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

Se mide en $mhos/m$ o S/m , 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 m de lado del medio considerado y se mediría en Ω/m . Los datos de referencia se suelen considerar a 20 °C.

6.2 Longitud de onda y velocidad de propagación

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

$$\lambda_s = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}},$$

siendo λ_s la longitud de onda de la frecuencia de una onda que se propaga en el suelo y λ_0 la longitud de onda de la misma frecuencia que se propaga en el vacío. Así, por ejemplo, una onda electromagnética de 7 MHz tiene una longitud de onda en el vacío

de $\lambda_0 = \frac{300}{7} = 42,85$ m, mientras que en una tierra media ($\epsilon_r = 15$) la longitud de onda valdrá $\lambda_s = \frac{42,85}{\sqrt{15}} = 11,06$ m.

El coeficiente reductor de λ_0 es $\frac{1}{\sqrt{15}} = 0,258$, por lo que la velocidad de propagación será $3 \times 10^8 \times 0,258 = 774 \times 10^5$ m/s.

A continuación se expone una tabla con los datos de diversos tipos de suelo:

	$\sigma(S/m)$	$\epsilon_r(F/m)$	λ_s/λ_0	$\epsilon = \epsilon_r \times \epsilon_0$	μ_r	$\mu_0(H/m)$
Agua salada	5	81	0,11	$7,17 \times 10^{-10}$	1	$4\pi \times 10^{-7}$
Agua dulce	0,001	80	0,11	$7,08 \times 10^{-10}$	1	$4\pi \times 10^{-7}$
Muy buena	0,03	20	0,22	$1,77 \times 10^{-10}$	1	$4\pi \times 10^{-7}$
Buena	0,01	15	0,26	$1,33 \times 10^{-10}$	1	$4\pi \times 10^{-7}$
Media	0,005	15	0,26	$1,33 \times 10^{-10}$	1	$4\pi \times 10^{-7}$
Pobre	0,002	13	0,27	$1,15 \times 10^{-10}$	1	$4\pi \times 10^{-7}$
Muy pobre	0,001	5	0,44	$4,43 \times 10^{-11}$	1	$4\pi \times 10^{-7}$
Paupérrima	0,001	3	0,57	$2,65 \times 10^{-11}$	1	$4\pi \times 10^{-7}$

Un dato a destacar es que estas constantes dependen de la frecuencia. Esta frecuencia será el condicionante que determinará la resistencia del suelo al comportarse este como un conductor (supuestamente un buen conductor), que ofrecerá un efecto piel a las corrientes creadas por el campo eléctrico aplicado.

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

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

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

6.3 Corrientes de conducción

Ahora veamos cómo afecta la presencia del suelo a la radiación de la antena vertical.

Sabemos que la proximidad de la antena al suelo hace que la capacidad entre los dos elementos sea suficientemente significativa como para que la intensidad correspondiente a una parte de la potencia radiada regrese a la base en forma de corrientes de conducción a través del suelo.

Si quisiéramos representar lo afirmado anteriormente como un circuito eléctrico normal, el gráfico sería el de la figura 6.1.

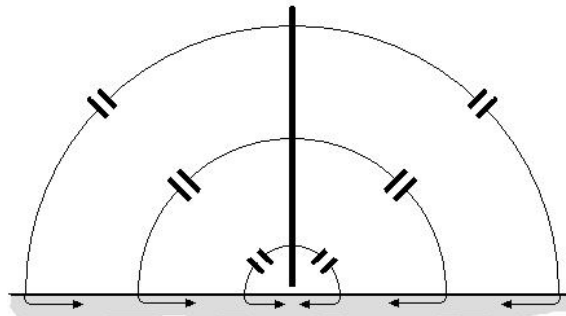


Fig. 6.1

En él se aprecia cómo en las cercanías de la antena se establece un flujo a través del espacio que rodea al radiador y llega hasta el suelo. Dicho flujo se convierte en una corriente de conducción que circula hacia la base de la antena y, a través del aislador de la base, regresa al radiador cerrando el circuito.

Esta resistencia del suelo disipa una potencia que es función de la intensidad que circula y se transforma en calor, por lo que no se radia.

Veamos qué dimensiones tiene ese *entorno cercano* en el que se produce este fenómeno.

En el estudio de los campos cercanos a la antena se puede determinar que este fenómeno ocurre en un entorno circular de un radio de $\frac{1}{2} \lambda$.

Esta aseveración es importante para considerar el mecanismo de radiación, ya que el origen de la radiación al espacio de una antena vertical no es el radiador propiamente dicho, sino una semiesfera de un radio $\frac{1}{2} \lambda$ en cuyo interior el campo electromagnético creado no sale al exterior, pudiéndose considerar a su vez a la semiesfera como el verdadero radiador que crea un campo electromagnético y que se desplaza por el espacio tal como conocemos.

Este mecanismo se representa de una manera gráfica en la figura 6.2.

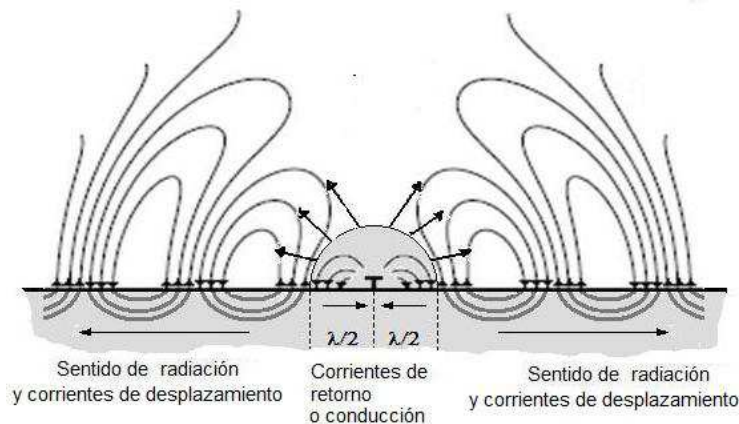


Fig. 6.2

Hay que tener en cuenta, como ya hemos visto antes, que la longitud de onda medida en el suelo es físicamente más corta que en el vacío, dado que queda afectada por la permitividad del suelo. Según la tabla expuesta con anterioridad, en un suelo medio la longitud de onda es 0,26 veces la del vacío.

El sentido de las corrientes en el suelo se puede observar en la figura 6.3.

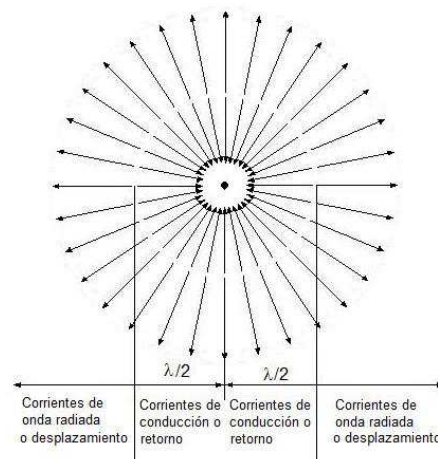


Fig. 6.3

Por otra parte, si el suelo fuese perfectamente conductor, el máximo de radiación sería tangente a la superficie del mismo y no penetraría en él. Al no ser así, dicho máximo de radiación sale del radiador con un cierto ángulo de elevación, que será mayor cuanto mayor es la resistencia del suelo y menor según la pérdida de potencia que se produce en el suelo.

La figura 6.4 representa el diagrama de radiación de una antena vertical a la que, suministrando la misma potencia, se coloca sobre un suelo perfectamente conductor y sobre un suelo resistivo.

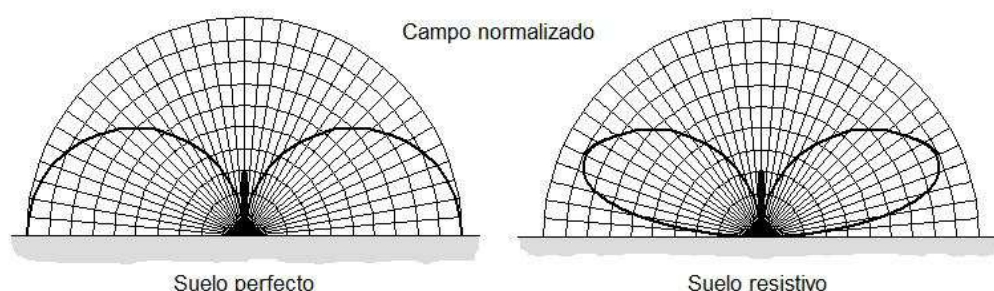


Fig. 6.4

6.4 Plano de tierra y suelo

Después de haber analizado la influencia que ejercen los distintos tipos de suelo en la radiación de una antena, debemos añadir algún elemento que minimice los efectos de la resistividad del suelo o, lo que viene a ser lo mismo, aumente en lo posible su conductividad.

En la región de ondas medias y largas los radiadores verticales empleados son casi siempre cortos respecto a la longitud de onda, por lo que su resistencia de radiación es siempre muy reducida y la resistencia del suelo suele ser varias veces mayor que la de radiación. Como consecuencia, la eficiencia de la antena es siempre muy baja.

Paliar este efecto supone sustituir el suelo natural por otro artificial que tenga una conductividad muy elevada y una permitividad nula, como es el caso de un material buen conductor. Los dos suelos deben coexistir, ya que el natural siempre estará presente.

Al suelo natural lo llamaremos simplemente *suelo* y a la resistencia que ofrece R_s .

Al suelo artificial lo llamaremos *plano de tierra* (GP) y a su resistencia R_g .

Su coexistencia y efecto presentan varias posibilidades:

GP aislado y muy alejado del suelo. Toda la intensidad de retorno circulará por él. El radio del plano de tierra debe ser resonante a la frecuencia de trabajo. Si el ángulo formado por el plano y la antena es mayor de 90° , la impedancia del punto de alimentación será mayor de los 36Ω teóricos. A este plano de tierra se le llama *contra-antena* o *contrapeso*.

- GP aislado junto al suelo. Habrá una intensidad I_g elevada que circulará por el plano de tierra y retornará a la antena, pero también habrá una cierta I_s que circulará por el suelo y retornará a la antena a través de la capacidad existente entre el plano de tierra y el suelo a la antena, ya que no habrá conexión eléctrica con ella.
- GP aislado sobre el suelo y conectado en paralelo con él. I_s e I_g se unirán en la base de la antena, sumándose vectorialmente. Puede que no estén en fase, dado que la velocidad de propagación de las dos ondas no es la misma (recordemos que al igual que la longitud de onda mencionada anteriormente, la velocidad de propagación también es función de la constante dieléctrica del medio). Lógicamente, cuanto mayor sea I_g , menor será I_s y mayor será la eficiencia de la antena.
- GP sin aislar y enterrado unos centímetros en el suelo. De esta manera lo que hacemos es mejorar la conductividad del suelo, confundiéndose I_s e I_g .

En estas últimas tres condiciones, el GP no necesita ser resonante, ya que de lo que se trata es de mejorar el conjunto del sistema para disminuir la resistencia que presenta el suelo a la corriente de retorno.

Sabemos que la potencia disipada en cualquier medio responde a $P = I^2 R$, así que cuanto mayor sea I para una R dada, mayor será esa potencia disipada. Por lo tanto, debemos procurar que la mayor parte de la intensidad total circule por el medio con menor resistencia.

Cuando concurren el suelo y el plano de tierra, sus impedancias y las intensidades que las recorren están en paralelo y el circuito equivalente sería el de la figura 6.5.

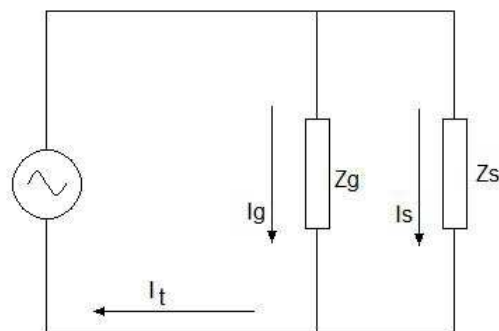


Fig. 6.5

En una antena vertical, la potencia disipada en el suelo es una potencia perdida que debemos minimizar disminuyendo la intensidad que por él circula.

La relación de las intensidades I_g e I_s será inversamente proporcional a las impedancias Z_s y Z_g , y podremos establecer lo siguiente: