Análisis de antena para HF construída con alambre "San Martín"

Consideraciones acerca del efecto skin y el rendimiento de una antena.

Por: *Néstor Escala*

Buenos Aires, 5 de junio de 2010.

Introducción

Hace varios días, en el grupo Yahoo LU_CHAT y simultáneamente en Lineas-Antenas, el amigo Roberto Girado, LU7ETR, de la ciudad de Ayacucho, preguntó acerca de experiencias de construcción de antenas con alambre San Martín.

Muy interesante la pregunta, pues nos permitió pensar en dos aspectos principales a tener en cuenta: el efecto pelicular y el rendimiento de una antena.

Pero a partir de este tema, se puede recorrer una serie de temas que hacen a los parámetros de antena: directividad, ganancia, eficiencia, rendimiento, resistencia de radiación, resistencia de perdidas, el efecto skin, diversos materiales para construir una antena, el teorema de reciprocidad y la antena como receptora, la antena "gorda" o de Nadenenko, etc.

Para desarrollar el tema se parte de una hipótesis básica: la resistencia de radiación y la resistencia de pérdidas se encuentran ubicadas en el centro del dipolo de media onda, en un punto de máxima corriente.

Se trató de explicar estos temas de la forma más básica posible, pero utilizando algunas herramientas matemáticas que se consideran indispensables. Creemos que para seguir el desarrollo, solo son necesarios los conocimientos básicos que debe tener todo radioaficionado.

Por otra parte, se adjunta una planilla de cálculo excell en donde se pueden realizar en forma sencilla los cálculos implicados en este artículo.

El texto se hizo largo para poder abarcar todos los temas relacionados con el asunto principal, el rendimiento de una antena dependiente del material conductor con el cual está construída. Esperemos que sea útil y no abrumar o fatigar a quien se interne en la lectura.

La antena como máquina transformadora de energías.

Cuando hablamos de antenas en general los temas que surgen son los relacionados con la adaptación de impedancia con la línea de transmisión y la ganancia. Pero hay varios temas más, relacionados con su capacidad de irradiación y de los cuales casi nunca se habla.

Pensemos en la antena como un transductor, un elemento de circuito que hace de interfase entre una potencia eléctrica transportada por elementos conductores y la atmósfera o el vacío como medio de transmisión de esa misma potencia en forma de campos eléctricos y magnéticos variables.

Una antena en el sentido de transductor (elemento que convierte un tipo de energía en otra) puede compararse con un parlante. En el viejo parlante entra potencia eléctrica que por efecto de interacción entre el magnetismo generado por una bobinita móvil y el magnetismo permanente de un imán se convierte en ondas de sonido por el movimiento de un cono de cartón que mueve el aire circundante y de esta forma transporta el sonido. El parlante es una maquina, claramente, entra una potencia eléctrica que se convierte en una potencia sonora que se transmite por ondas.

Como en toda máquina, hay un numero adimensional (expresado en % o en tanto por uno – cero,coma).-) que nos muestra con que eficacia el transductor convierte la energía que entra en energía útil para un trabajo. Ese número es el rendimiento, que se define como la relación entre la potencia útil de salida y la potencia útil de salida:

Rendimiento (generalmente es la letra griega etha) = Potencia Salida / Potencia de Entrada.

Ninguna máquina tiene rendimiento de 100 %, es decir ninguna máquina transforma totalmente la potencia de entrada en potencia útil, siempre se pierde algo en el proceso de transformación.

Hay una ley fundamental en la naturaleza que es la ley de la conservación de la energía. La energía que entra debe ser igual a la energía que sale. Siempre en toda máquina de transformación de energía, la energía que sale es menor a la energía que entra. ¿Y la diferencia en donde esta? En energía que se desperdicia. Entonces, resumiendo, la energía que entra a la maquina se convierte en una parte de energía útil (la energía de audio en el caso del parlante) y en otra parte de energía de perdidas. En general, esa energía perdida es calor que se disipa.

Antes hablamos de potencia y ahora de energía. Recordemos que la potencia es la capacidad de transformar una energía en otra en determinado tiempo. A mas potencia, mas energía transformada en la unidad de tiempo. Por lo tanto, cuando hablamos de potencia estamos hablando de energía en cierta cantidad de tiempo.

Volvamos a la antena. También como todo transductor es una maquina sujeta a las leyes de la conservación de la energía. A una antena entra potencia eléctrica circulante por conductores y sale potencia en forma de energía electromagnética, en ondas que no necesitan un soporte material para viajar por el espacio, en campos magnéticos y eléctricos variables. Pero como todo transductor, la potencia de salida es menor a lo que entra. ¿Y en donde está la diferencia? En potencia de perdidas, en calor que también contribuye al calentamiento global, pues no podemos utilizarlo para nada. Es decir, la antena también tiene un rendimiento.

Muchas veces en un QSO se prueban dos antenas y quien hace la prueba pregunta a su corresponsal como lo escucha. La respuesta puede ser de este estilo: "con la antena 1 te escucho S8 y con la antena 2 te escucho S9". Entonces se suele decir: "la antena 2 rinde mejor que la 1". A veces, incluso, "la antena 2 gana más que la 1". Pero esto no es estrictamente cierto. Se habló de rendimiento (rinde) y de ganancia.

En el ejemplo del QSO, puede ser que la antena 1 sea exactamente igual a la antena 2, pero la antena 1 apuntaba su máxima radiación en forma distinta a la 2. Aquí hay un tema relacionado con la directividad, con la dirección de máxima radiación de una antena. Si las antenas son exactamente iguales, tienen la misma ganancia, pero por una cuestión de construcción o de montaje con distinto acimut, etc., la antena 2 irradia mejor hacia el corresponsal que la 1.

Dejemos entonces en claro un primer concepto. La directividad de una antena es la relación entre la máxima intensidad de radiación de una antena respecto a la intensidad de radiación de una fuente isotrópica para **IGUALES POTENCIAS IRRADIADAS**. Isotrópica es una fuente teórica que irradia exactamente igual en todas las direcciones, tanto en sentido horizontal como en el vertical, como en las infinitas direcciones intermedias.

Ahora bien, la otra posibilidad para la diferencia de señal puede ser esta:

La Antena 1 es también "geométricamente" parecida a la 2 y ambas apuntan en la misma dirección y sentido, por lo tanto no está implicada una cuestión de direccionamiento de la emisión. Pensemos, para facilitar el análisis que estamos hablando de dos yagis de 7 elementos para 430 MHz, una construida por el fabricante A y la otra por el fabricante B. Ambas tienen el mismo espaciado entre elementos, la misma cantidad de directores igualmente espaciados, etc., pero vimos que con la 2, se llega más "fuerte" que con la 1.

Tanto la 1 como la 2 tienen exactamente iguales alimentadores y la potencia entregada por el TX es exactamente la misma. ¿Qué está pasando? En este caso hay un problema de potencia irradiada. Vimos que en la primera opción, por la definición de directividad las potencias irradiadas eran iguales.

Entonces, separemos un poco las cosas. La directividad es una propiedad de las antenas que tiene que ver con la forma geométrica por donde circula la corriente de RF, con las condiciones de forma para que esa corriente eléctrica se transforme en campos electromagnéticos que se sumen o resten en determinadas direcciones, permitiendo que la dirección de radiación se

privilegie en esas direcciones y sentidos particulares. En este caso NO hay un tema de ganancia, solo hay un tema de direccionamiento de la radiación. Por lo tanto, si se dijo que la antena tenía más ganancia, se comete un error.

En el caso dos, estamos hablando de las antenas como transductores de energía, como transformadoras de energía. La antena como máquina que a partir de un movimiento de electrones (corriente eléctrica) genera campos variables en el aire o en el vacío. Y como toda máquina, la antena tiene un rendimiento, es decir, la potencia radiada de la antena 1 es distinta de la potencia radiada de la antena 2. En este caso, la antena 2 tiene más potencia que la 1, transforma más energía de movimiento de electrones en energía de campos que la antena 1. La antena 2 aquí sí "gana" mas, tiene más ganancia. Es decir a igual potencia de entrada y a igual directividad, hay más potencia de irradiación. Hay ganancia de la antena 2 respecto a la 1.

La antena 1 transformó más potencia de entrada en calor que la antena 2, por lo tanto, esta última, al gastar menos en su tarea de máquina, irradió más. La antena 2 tiene mejor rendimiento, por lo tanto tiene más ganancia. Ya que estamos, dejemos sentada la definición de ganancia de una antena:

La ganancia es la relación entre la intensidad de radiación máxima, respecto de la intensidad de radiación de una antena de referencia con IGUALES potencias de ENTRADA.

Resumiendo, la directividad se define a partir de iguales potencias de salida, en tanto la ganancia se define a igualdad de potencia de entrada, por lo tanto la ganancia tiene en cuenta tanto la directividad como el rendimiento. La ganancia da una visión integral de la antena.

Por eso en el primer caso del QSO, cuando se dijo que "la antena 2 rinde más que la 1" se usó la palabra rendimiento en una forma coloquial, general. Es solamente TECNICAMENTE correcto hablar de rendimiento de una antena cuando tenemos en cuenta las transformaciones de potencia entre la entrada y la salida.

Y porque la antena 2 tiene mejor rendimiento que la 1? Porque está mejor construida que la 1, tiene, quizás, mejores materiales.

Y aquí entramos de lleno en la consulta que se realizó en el grupo LU_CHAT.

El conductor de una antena

¿Cómo hacemos para calcular un dipolo de media onda? Conocemos la longitud de onda para la cual queremos que el dipolo funcione, dividimos por dos y restamos a esa longitud el 5 % por “efectos de puntas” (capacitancias en los extremos que nos alargan la antena).

Usamos la conocida formula de 142,5 / F, con F en MHz para obtener la longitud.

Si ese dipolo se instalara bastante aislado, a la frecuencia de cálculo, el dipolo es resonante, pero como se lo instala en un mástil (o en dos) a cierta distancia de la tierra y las construcciones, se agregan reactancias y capacitancias que modificando físicamente la longitud de construcción pueden anularse. Este es el proceso de “ajustar un dipolo”. Llegamos a un punto de “mínima ROE” y decimos, el dipolo “esta resonando”. No vamos a discutir si esto está bien, ni la teoría o la adaptación de impedancias. Vamos a “meternos” dentro de la antena para ver cómo funciona como transductor.

Como vimos en la formula de cálculo, solo se tiene en cuenta la frecuencia y en la instalación, la altura sobre tierra. Estos tres elementos (la longitud para cierta frecuencia y la altura de instalación) determinan un diagrama de directividad, conocidísimo por todos los radioaficionados, la clásica figuro de ocho, con la máxima radiación perpendicular al alambre si esta a ½ Lambda sobre tierra. Generalmente se supone que toda la potencia que entra en los bornes de conexión será radiada.

Pero no es así, como lo intuimos y lo comprobamos en el segundo caso de las dos antenas iguales, en ese imaginario QSO.

¿Cuando un dipolo es resonante? Un dipolo es resonante cuando esta cortado, en este caso, a media longitud de onda. Como cualquier circuito resonante, una antena es resonante a determinada frecuencia cuando sus reactancias capacitivas e inductivas se igualan (lo que intentamos hacer cuando cortamos o alargamos las longitudes de las dos ramas que forman nuestro dipolo). Para resonancia, entonces, XC = XL. Los valores de XC y XL determinan una impedancia, es decir una oposición al paso de la corriente eléctrica. En el caso de resonancia, esta oposición desaparece pues la reactancia capacitiva se anula con la reactancia inductiva. Pero sigue existiendo un tercer elemento que constituye todo circuito de corriente alterna, la resistencia.

En una antena resonante hay dos resistencias. Una que “no se ve”, pero que existe y es la que nos representa la capacidad de emisión de la antena. Es la resistencia de radiación. Es la resistencia que hace el trabajo del transductor de convertir corriente eléctrica (movimiento de electrones) en movimiento de campos eléctricos y magnéticos. La otra resistencia es la resistencia del material con la que está construida la antena.

Entonces tenemos un circuito serie:

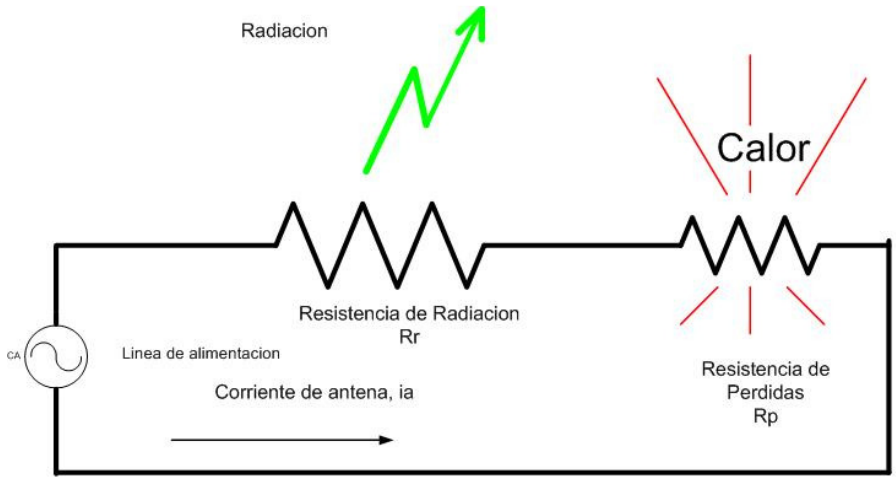


Figura 1 : Circuito equivalente de una antena resonante en la frecuencia f

La potencia que introducimos al circuito de la antena resonante por medio de la línea de alimentación hace circular una corriente eléctrica cuyo valor está determinado por la resistencia total del circuito.

La resistencia de radiación en un dipolo de media onda vale **siempre** 73 Ohms (aproximadamente) y no depende de la frecuencia. Es decir, en un dipolo para la banda de 160 metros y en un dipolo para la banda de 440 MHz (o cualquiera de las bandas de microondas), esa resistencia es **siempre igual si el dipolo está instalado a media longitud de onda sobre tierra (o superficie reflectante).**

Vemos en el circuito equivalente de la antena que además de la Resistencia de Radiación hay una Resistencia de Pérdidas. Toda corriente que circula por una resistencia real genera calor y por lo tanto desperdicia potencia. Esta es la resistencia que disminuye el rendimiento de la antena, pues es una resistencia por la que obligadamente tiene que circular la corriente de RF para llegar a la Resistencia de Radiación y sin embargo, no realiza ningún trabajo útil.

La resistencia de pérdidas es un valor físicamente distinto para cada antena y es la suma de:

1) Resistencia de los contactos de la línea de alimentación
2) Resistencia óhmica de aislación de los aisladores de puntas y de suspensión (el centro de dipolo o balun)
3) Resistencia del material con el que se construyó la antena.
4) Resistencias equivalentes debidas a la absorción de la tierra y estructuras cercanas a la antena.

Las resistencias 1 y 2 las podemos minimizar y las suponemos prácticamente igual a cero, por una buena aplicación de las reglas del arte y la buena tecnología (aisladores de puntas aletados que aumentan la resistencia de perdidas o evitan el efecto corona, tres o más aisladores cerámicos "huevo", buen material plástico aislante para el centro de dipolo y conexiones soldadas, etc.). La resistencias debidas a absorciones las vamos a suponer cero, pues es complicado cuantificarlas y además dependen de cada lugar particular de instalación de la antena. Cuanto mayor sea la distancia a comunicar, mayor espacio despejado es necesario, pues también "emite" la antena imagen bajo tierra.

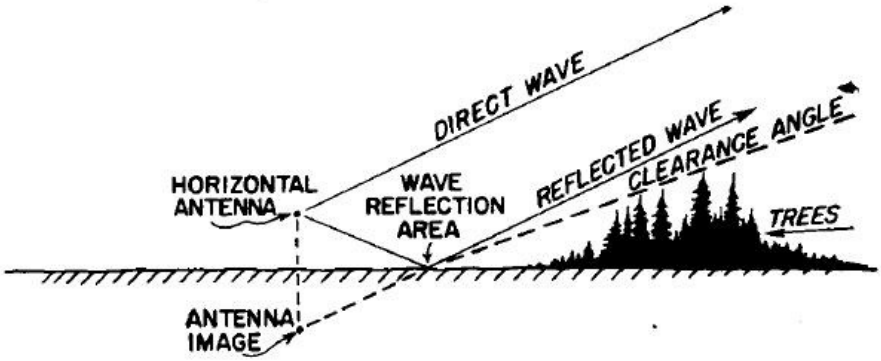


FIG. 3.13. Showing necessary cleared area for good wave reflection for a desired radiation angle.

Fuente: Edmund Laport. Radio Antenna Engineering, Mc Graw Hill, New York, 1952. pag. 228

Entonces, para este análisis suponemos que las resistencias equivalentes a estas absorciones, incluyendo las del suelo son cero.

Solo nos queda la resistencia del material de construcción de la antena.

Suponemos, en la práctica diaria, que la resistencia del conductor tiende a cero, por eso no la tenemos en cuenta. Y esto tiene algo de verdad si se trata de un dipolo de media onda de HF, construido con el famoso cable "7 x 0,80" (siete hilos de 0,80 mm2 de sección cada uno, formando un cable). Pero cuando cambiamos el material, distinta es la situación.

Si bien la resistencia es un valor totalmente independiente de la frecuencia, cuando consideramos la resistencia de un conductor eléctrico, con el aumento de la frecuencia aparece un efecto electromagnético que causa una reducción aparente de sección del conductor por el que circula esa corriente eléctrica alterna. Este efecto es llamado pelicular, de carga superficial o efecto Kelvin, en honor a su primer investigador, Lord Kelvin (1887). También es muy conocido por su nombre en inglés, "skin".

El efecto pelicular se produce por la autoinducción en el interior del conductor de campos magnéticos variables que generan corrientes inducidas variables. Estas corrientes autoinducidas se oponen a la corriente principal, causando un aumento de impedancia en el interior del conductor.

Puede verse fácilmente esto si suponemos que dentro del conductor hay una sección pequeña por la cual circula corriente. Esta corriente variable genera un campo magnético variable (como en todo conductor por el cual circula corriente variable) y en esa sección aparece una inductancia que se opone a la corriente que circula. Ahora bien, a medida que vamos considerando esas secciones diminutas de conductor hacia el exterior, las líneas de fuerza del campo pasan por el aire y no totalmente dentro del conductor, por lo que la inductancia de esas secciones es menor en la periferia que la inductancia en el centro del cable.

En definitiva, todo sucede como si la impedancia va disminuyendo hacia el exterior del conductor. Por lo tanto, la mayor parte de la corriente eléctrica se ve obligada a circular por las secciones periféricas del conductor.

Ese efecto pelicular se traduce en una disminución aparente de la sección utilizable del conductor. Siendo la conductividad constante, una disminución de sección verdadera de circulación de corriente es igual a un aumento de resistencia real del conductor a nivel macroscópico.

En la siguiente figura, se muestra la densidad de corriente medida en un electrodo para un horno de 1,25 m de diámetro, por lo que puede verse perfectamente como se distribuye la corriente.

CURVA DE DISTRIBUCION DE CORRIENTE EN UN ELECTRODO, POR EFECTO SKIN

Valores medidos

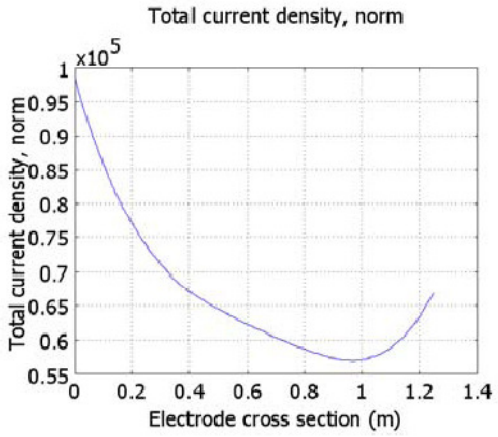


Figure 8. Absolute value of current density through the centre of an electrode

Fuente: www. cds.comsol.com/access/dl/papers/1521/Larsen.pdf

Para cuantificar el efecto skin hay que aplicar las ecuaciones de Maxwell al conductor, obteniendo una fórmula que nos permite conocer un coeficiente de penetración de la corriente hacia el interior del conductor. Esa fórmula es la siguiente:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}}$$

Con ella se obtiene un coeficiente denominado "profundidad de penetración", que en la práctica nos ayuda a predecir en que profundidad de un conductor, contando desde la superficie, se concentra el 63 % de la densidad de corriente eléctrica. Es decir, la mayor densidad de corriente aparece hacia las capas exteriores, circulando muy poca corriente en el interior del conductor.

En la formula intervienen la frecuencia angular de la corriente (2 x Pi x Frecuencia), la permeabilidad magnética del material y la conductividad del material. Vemos que cualquier aumento de estos valores, hace que la profundidad de penetración de la corriente disminuya.

La permeabilidad relativa al vacio de los materiales conductores eléctricos normales (cobre, aluminio, plata u oro –en el caso de las superficies conductoras de alta calidad para microondas- es prácticamente igual a UNO. En general los materiales conductores de la electricidad son diamagnéticos (rechazan el magnetismo, mu algo menor de 1) o son indiferentes (paramagnéticos, mu en los alrededores de 1). Consideramos para todos estos materiales, el valor de mu relativo al vacio = 1.

En tanto, los materiales ferromagnéticos, como el hierro, los ferrites, el níquel, etc., son altamente favorables al desarrollo de los campos magnéticos. Por lo tanto para los materiales ferromagnéticos que además son conductores es muy importante el efecto skin, pues tienen un valor de permeabilidad alto. Esto significa que la corriente circula por un pequeño filete exterior, siendo alto el valor de resistencia del conductor en corriente alterna respecto al valor de resistencia si ese mismo conductor transportara corriente continua.

En el siguiente vínculo web tenemos un calculador de la profundidad de penetración por efecto skin:

http://www.rfcafe.com/references/calculators/skin-depth-calculator.htm

Ejemplos:

1) Tenemos un conductor de cobre por el cual haremos circular una corriente de audio de 1700 Hz = 0.0017 MHz. Para el cobre, la resistividad es 1,7 Ohm por cm, la permeabilidad magnética relativa es 1. Utilizando el calculador, obtenemos una profundidad de 1591,5 micrones, es decir, la mayor parte de la corriente circula en más o menos 1,6 mm de espesor del conductor.
2) Vamos a la banda de 80 m, F = 3,7 MHz, circulando por el mismo cable. La profundidad es apenas de 34 micrones.
3) Vamos a UHF, 450 MHz, la profundidad no llega a 3,1 micrones.

En lugar de Cobre, veamos que pasa con un conductor de hierro, que tiene una permeabilidad magnética relativa de 200 y una resistividad de aproximadamente 9.66 micro-Ohms por cm

Para las mismas condiciones de frecuencia que el cobre de los ejemplos anteriores obtenemos:

1) Profundidad : 268 micrones
2) Profundidad : 5,750 micrones
3) Profundidad : 0,521 micrones

¡La resistencia aparente es altísima! pues la corriente circula apenas por un delgadísimo filete del hierro.

Para evitar ese problema de aumento de resistencia con la frecuencia, en RF se usa el alambre Litz. Quienes hayan reparado un receptor lo han visto, por ejemplo, en las bobinas de los trafos de FI. Este alambre puede estar constituido por unos 50 hilos de 2 decimas de diámetro, por ejemplo. Esto se hace para que la corriente se distribuya en una multitud de filetes delgadísimos, haciendo que la resistencia en tan altas frecuencias sea prácticamente la misma que en corriente continua (frecuencia cero). Existen alambres Litz de hasta 800 conductores.

Cuando el conductor es muy delgado, con un diámetro del orden de magnitud de la profundidad de penetración skin, la corriente ocupa toda la sección. Cuando el conductor es de gran sección, se desperdicia prácticamente la parte central.

Hay otro efecto, al que casi nunca se lo nombra. Se trata del **efecto de proximidad**. Cuando hay dos conductores paralelos que llevan corriente eléctrica las líneas de campo magnético de cada conductor atraviesan al conductor que esta próximo, por lo tanto se produce un efecto de aumento interno de inductancia traduciéndose en una aumento de la resistencia real. La siguiente es una curva tomada del Manual del Radio Ingeniero de Frederick Terman (1948, página 36. Aún en el siglo XXI puede ser considerado una biblia de las telecomunicaciones):

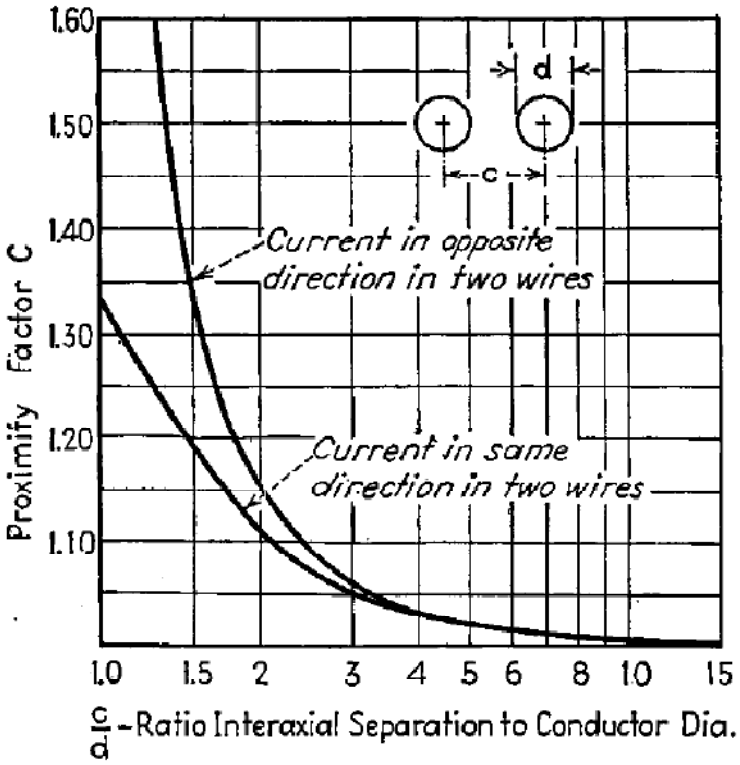


Fig. 6.—Proximity factor in parallel cylinders or tubes for very high frequencies.

Por ejemplo, para dos conductores de 1 mm de diámetro, espaciados 1 mm, llevando corriente en el mismo sentido, el aumento de resistencia es de 1,35.

Resumiendo, si tenemos dos conductores de cobre de 40 metros de largo, de 1 mm de diámetro y separados 1 diámetro, tendremos las siguientes resistencias si opera a 3,75 MHz:

En corriente continua: Rcc = 0,88 Ohms

En 3,75 MHz Rca = 6,43 Ohms (si está aislado de otros conductores)

En 3,75 MHz con el otro conductor a 1mm R proximidad= Rca *1,35 = 8,68 Ohms

Es decir, tenemos un aumento de resistencia de ¡casi 10 veces! Respecto a la resistencia en cc. Por supuesto, estos efectos no pueden despreciarse a cualquier frecuencia desde HF hacia arriba.

Ahora que conocemos el efecto skin y el de proximidad, volvamos a la antena resonante de media onda.

El rendimiento de una antena y la ganancia

Si por una disminución efectiva de la sección del conductor de la antena aumenta la resistencia de pérdidas, vemos que según sea el tamaño y la calidad eléctrica (conductividad y permeabilidad magnética) del material utilizado para hacer la antena, tenemos dos efectos:

1) Disminución del rendimiento de la antena, por lo tanto de la ganancia, tal como la definimos.
2) Disminución del Q de la antena, puesto que el Q de cualquier circuito resonante está definido por la relación R / X del circuito resonante. Recordemos que del Q depende el ancho de banda de la antena. Esto lo podemos considerar positivo para una radioaficionado al posibilitar un mayor spread de frecuencias, aunque este ancho de banda se consigue en base a una baja del rendimiento y, por lo tanto, de disminución de potencia efectivamente radiada.

Para la misma longitud de alambre y mismo diámetro de alambre, instalado a igual altura de una superficie reflectante, la inductancia es la misma, no importa cual sea el material conductor. Por lo tanto, el Q solo varía por la variación de resistencia. Siendo la resistencia de radiación de igual valor, la única variable es la resistencia de pérdidas.

El Q (o factor de mérito) de una antena o de cualquier circuito resonante, se calcula como la relación entre la reactancia inductiva y la resistencia total por donde circula la corriente (la resistencia de radiación mas la resistencia de pérdidas)

$$Q = XL / R$$

Vemos que si aumenta R, Q disminuye.

El ancho de banda (BW) es:

BW = F / Q, en donde F es la frecuencia de resonancia. Y si Q disminuye, BW aumenta.

El Q de una antena puede estimarse obteniendo la impedancia característica de la antena

($\mathbf{Z_0}$). Corresponde hacer la aclaración que esta impedancia característica NO ES la Impedancia de antena, la Impedancia que ve la línea de transmisión. Es solo un artificio matemático que iguala una antena a una línea de transmisión para poder calcular así otros parámetros. Aclaramos esto, pues algunas veces hemos leído en algunos textos o artículos frases del estilo “la impedancia característica del coaxil debe ser similar a la impedancia característica de la antena para obtener mínima ROE”.

La impedancia de antena, es igual a la suma de la resistencia de radiación mas las resistencias de pérdidas cuando el dipolo de media onda es resonante y cuando esta fuera de resonancia, la impedancia esta compuesta por la reactancia inductiva (cuando la frecuencia está por arriba de la frecuencia de resonancia) o capacitiva (cuando la frecuencia está por abajo de la frecuencia de resonancia) mas la suma vectorial de las resistencias.

Volvamos la impedancia característica, obtenida por un método debido a Schelkunoff en 1943.

La impedancia característica de un dipolo es:

Z_0 = 120 x [LOGNatural (L / a) – 1]

En donde, L es la longitud del dipolo de media onda y a el radio del alambre de construcción

Conociendo la impedancia característica se puede calcular directamente el Q del dipolo:

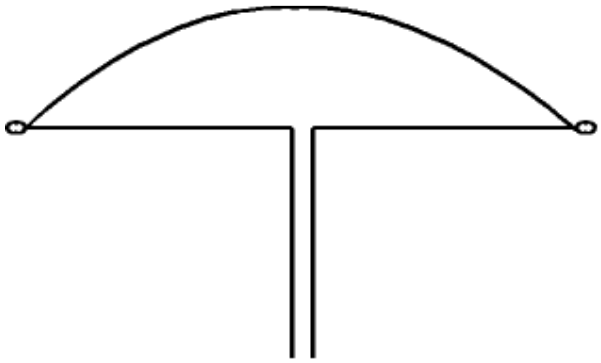
Q = (Pi x Z_0) / (4 x Rantena), en donde R antena = R radiación + R perdidas.

Es interesante, desde el punto de vista histórico, mencionar que Sergei Schelkunoff, nacido en Rusia, pero criado en USA desde muy chico, es quien desarrolló la teoría del cable coaxil, línea de transmisión que hizo dar un salto cualitativo a la s telecomunicaciones.

Volviendo a la R de pérdidas, la propiedad de aumentar el ancho de banda de una antena por el aumento de la resistencia de pérdidas se utiliza en un diseño de un dipolo plegado para HF con una resistencia agregada en el centro, en la rama superior. El dipolo plegado, como se sabe, tiene unas 4 veces la resistencia de radiación respecto a un dipolo de media onda, por lo que un aumento de resistencia de pérdidas no compromete excesivamente el rendimiento. Pero se trata de una antena de compromiso entre el ancho de banda y el rendimiento, por tanto, la ganancia respecto a la isotrópica.

Comencemos a analizar el rendimiento de la antena, que matemáticamente se define como la relación entre la potencia radiada y la potencia de entrada.

Antes, explicitaremos la hipótesis principal de estos ejercicios: la Resistencia de radiación y la resistencia de pérdidas, se suponen insertadas en el punto de máxima corriente de la antena dipolo (el centro), que la suponemos cosenoidal, según muestra la siguiente figura:



La resistencia de pérdidas la hacemos igual a la resistencia del alambre, como ya vimos en el cálculo anterior de rendimiento. Vale la aclaración, porque en cada sección de la antena, distinta es la resistencia de radiación y la resistencia de pérdidas, dado que la corriente de excitación de la antena varái en forma aproximada a como se muestra en la figura.

Vamos a hacer una aclaración semántica, de modo de tener los términos bien definidos. En rigor, en el siguiente análisis nos estamos refiriendo a la "EFICIENCIA de RADIACIÖN" de la antena. Esta terminología la adoptó la IEEE en 1983 cuando definió las características de una antena. El rendimiento de una antena según está definido por la IEEE en ese año, incluye las pérdidas debidas a la desadaptación de impedancia entre la línea y la antena. Vamos a seguir utilizando la palabra rendimiento, dado que hicimos una analogía antena = máquina, y en toda máquina se habla de rendimiento, que incluso en esta época tecnológica es un término prácticamente de sentido común. Pero corresponde aclarar que strictu sensu, cuando en este paper hablamos de rendimiento de una antena nos estamos refiriendo exclusivamente a la EFICIENCIA de RADIACION.

En cualquier circuito eléctrico, la potencia se calcula como el producto entre el cuadrado de la corriente y la resistencia por la que atraviesa. La corriente que circula por la antena resonante depende de la resistencia total de la antena. Como el circuito equivalente de una antena resonante es un circuito serie (ver figura 1), la resistencia total es la suma de la Resistencia de Radiación mas la Resistencia de Perdidas.

La corriente es la misma en las dos resistencias, como en todo circuito serie, por lo tanto, el rendimiento es la relación entre la Resistencia de Radiación y la Resistencia Total de la antena.

La Resistencia de Radiación es siempre igual a 73 Ohms en un dipolo instalado a media Lambda de tierra y nada podemos hacer para subirla mientras el dipolo este instalado en ese lugar. Entonces es decisivo para mantener un rendimiento elevado disminuir al máximo la Resistencia de Pérdidas.

Nótese que si el mismo dipolo se instala a una altura en la cual la Resistencia de Radiación es sensiblemente menor a 70 Ohms, el rendimiento será menor para la misma resistencia de pérdidas. Primer regla practica, entonces, cuanto mas bajo instalemos un dipolo, procuremos conseguir el mayor rendimiento disminuyendo la resistencia de pérdidas.

En el siguiente gráfico, vemos la relación entre Resistencia de Radiación y Altura de instalación de la antena.

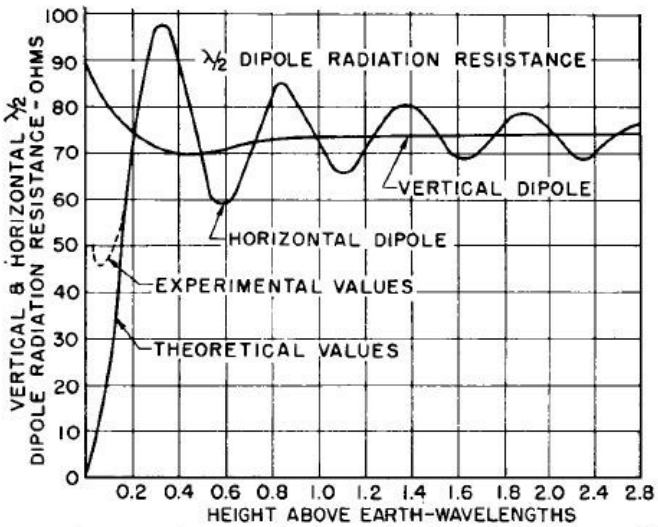


FIG. 3.18. Radiation resistance of horizontal and vertical half-wave dipole antennas. (*After Carter.*)

Fuente: Edmund Laport. Radio Antenna Engineering. New York, Mc Graw Hill, 1952. pag 238

Aplicando las Ecuaciones de Maxwell a un dipolo de media onda podemos obtener el valor de la Resistencia de Perdidas del dipolo:

$$R_{perdidas} = \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}}\frac{L}{2\pi a}$$

En esta fórmula está incluido el aumento de resistencia por efecto skin (en la expresión matemática están la conductividad, la permeabilidad magnética y la frecuencia) que produce aumento de resistencia. También en el cálculo interviene el volumen de la antena, mostrado por L, la longitud del dipolo de media onda y “a” el radio del conductor de la antena (teniendo el volumen de material y la conductividad, obtenemos la resistencia real al incluirse en la fórmula el efecto skin)

Para hacer cuentas fáciles, se adjunta una planilla de cálculos excell, en la cual podemos ver fácilmente cual es el valor de la resistencia de perdida según modifiquemos la frecuencia, la conductividad, la permeabilidad y el radio del conductor del conductor de la antena.

Apliquemos la formula a un dipolo de media onda para 80 metros construido con el típico cable desnudo de “7 x 0,80” usando las facilidades de la planilla de cálculo adjunta.

En esa planilla, anotamos en las casillas correspondientes, la frecuencia de operación (3,7 MHz), el diámetro del alambre de antena y los parámetros mu y conductividad del material. En la misma planilla hay una tabla con los valores usuales.

6,48 Ohms es la resistencia en la banda de 80 metros (3.7 MHz) de un alambre de cobre de media longitud de onda de sección 0,80 mm2, es decir, 1mm de diámetro.

Para el cable de siete hilos obtenemos una resistencia total de 0,93 Ohms. Este valor se obtiene de dividir el valor de 6,48 Ohms por siete, que son los alambres puestos en paralelo en el cable 7 x 0,80. Ahora bien, debemos incorporar el efecto de proximidad. Utilizamos un coeficiente bajo, pues dado que los conductores son de pequeño diámetro cortan pocas líneas de fuerza magnética. Lo estimamos en 1,2 obteniendo una resistencia total de aproximadamente 1,2 Ohm.

La resistencia total en un dipolo de media onda instalado a media Lambda sobre el suelo entonces será de

73,4 Ohm + 1,2 Ohm = 74,6 Ohm.

Aquí vemos porque los coaxiles RG11 y RG59 tienen 75 Ohms. Son los Ohms necesarios para que la ROE sea prácticamente 1:1 cuando alimentan un dipolo de media onda instalado a media longitud de onda sobre el suelo..

El dipolo realizado con el mismo cable y cortado para 28,900 MHz tendrá como resistencia de perdida 0,33 Ohm. Si bien el efecto skin aumenta, el volumen de cable puesto en juego para la banda de 10 metros es mucho menor que el volumen de material para 80 metros (5 metros de cable frente a 40 metros de cable, para la misma sección).

La antena de 80 metros calculada tiene un rendimiento de aproximadamente 98,40%, es decir que de 100 W que aplicamos en bornes de antena (al considerar en bornes de antena, según la definición de ganancia dada, ya descontamos lo que perdimos por atenuación de la línea, incluyendo lo perdido por ROE mayor a 1:1), 98,4 W son convertidos en radiación y 1,6 W en calor. Una máquina realmente muy buena. Las máquinas eléctricas estáticas casi siempre tienen un alto rendimiento cuando están bien diseñadas y no utilizan frecuencias muy altas. Los ecologistas felices, desde el punto de vista del calentamiento global generamos poco calor desperdiciado.

Un dipolo de media onda, instalado como V invertida, tiene unos 50 Ohms de resistencia de radiación, por lo tanto, a igual resistencia de pérdidas, menor es el rendimiento. Esta V invertida, tiene aproximadamente 1% menos de rendimiento que el dipolo de media onda horizontal. En la práctica, podemos despreciar esta diferencia de rendimiento.

Volviendo a la definición de ganancia de antena, sabemos que un dipolo de media onda tiene 2,21 dB de ganancia respecto a un radiador isotrópico. No se dice nada del rendimiento. Es claro, según vimos, estamos en una diferencia de 1,6 %, (o lo que es lo mismo de 0,07 dB) lo

cual es normal dentro de los cálculos técnicos para estas longitudes de onda. Distinto es el caso de las antenas de microondas, en donde, por ejemplo, una parábola típica tiene un rendimiento del orden de 48 a 55 %, por lo cual este valor de rendimiento se debe aplicar a la directividad para obtener el valor de ganancia.

Ahora bien, vayamos al viejo conocido en el ambiente rural, el alambre San Martin.

La antena con alambre San Martín

Para quienes son netamente urbanos, veamos primero que es un alambre San Martin.

Es un alambre actualmente producido por Acindar, típico para usos rurales, especialmente para el alambrado de corrales por su gran resistencia a la tracción (soporta fácilmente la embestida de un novillo). Está constituido por una aleación de hierro al carbono (acero) que para que no disminuya su sección rápidamente por oxidación está recubierto galvánicamente por una capa de Zinc.

El alambre San Martin tiene una sección elíptica (oval) de calibres 17 / 15, es decir de diámetro mayor 3 mm por diámetro menor de 2,40 mm, galvanizado por electrodeposición, con una capa de Zinc equivalente de entre 120 y 200 g de Zinc por metro cuadrado de superficie de alambre.

La denominación San Martin se convirtió en normal, así como a todas las bebidas colas las llamamos “coca”, por lo que en general, a todos los alambres blandos galvanizados rurales se los llama San Martin genéricamente. Pero en esta discusión de rendimientos, nos referiremos al producto denominado San Martin por Acindar, de modo de tener claros los valores volumétricos y de material.

Cuando una corriente alterna circula por un alambre San Martin, se encontrará con la resistencia ofrecida por el Zinc de la capa externa y la de la aleación de hierro del alma del alambre.

Según vimos, por la alta permeabilidad magnética del hierro habrá una gran expulsión de electrones del interior del alma de hierro hacia el zinc, siendo entonces mayor la densidad de corriente en el zinc que en el hierro.

La capa de zinc es bastante delgada. Con la cantidad de Zn especificada, sabemos que la capa puede variar entre 15 y 20 micrones de zinc. Valores típicos para una galvanización electrolítica. Es importante saber que en toda galvanización no se produce una transición drástica entre el zinc y el acero, produciéndose una zona de aleación hierro – zinc, que podríamos decir que es de un 20 % de esa capa de Zn, es decir unos 4 micrones.

Entonces, tenemos tres conductividades, la del Zinc (Zn), la de la aleación Zinc – Hierro - Carbono (Zn – Fe – C) y la del Acero (Fe-C), lo cual nos ocasiona un problema para hacer cálculos exactos, pues es muy difícil conocer cual es la conductividad de esa capa de transición, a menos que encontremos en un laboratorio una forma de medirla. Vamos a

despreciar esta capa intermedia y pensemos que el alambre San Martín es solo bicapa, Pronto veremos por que podemos despreciarla.

El otro problema es por una cuestión de forma. La fórmula, se resolvió con las ecuaciones de Maxwell para una área circular, pero vimos que el alambre san martin es elíptico. Para resolver este asunto rápidamente y no tener que aplicar las ecuaciones de campos a la elipse, tomamos como diámetro de cálculo el de un círculo cuya sección es igual al área del alambre san martin. Esto nos da un diámetro equivalente de 2,683 mm. Esta hipótesis es muy aceptable, pues Terman, en el manual citado anteriormente utiliza directamente el perímetro de cualquier figura para calcular el efecto skin, siempre y cuando esa figura no tenga cambios bruscos de curvatura.

Entonces, calculemos cual es la profundidad de penetración por efecto skin en un conductor constituido por una aleación de Fe-C. Obtenemos aproximadamente 7 micrones usando el calculador web o el que está inserto en la planilla de cálculo, para una frecuencia de 3,7 MHz.

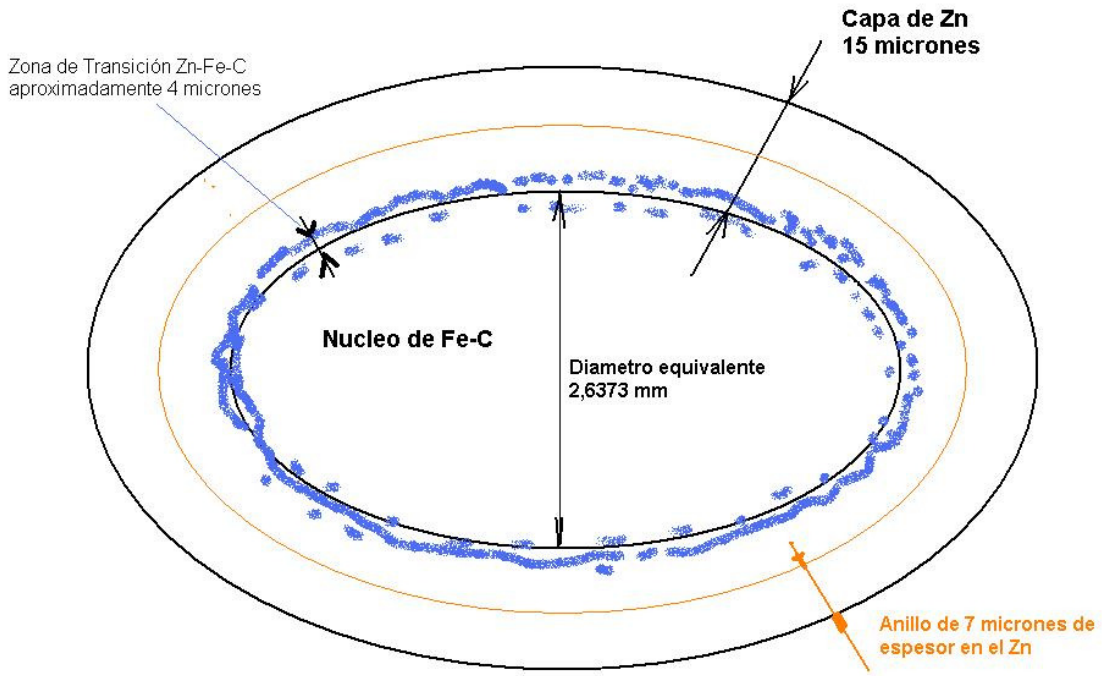
Si hacemos una aproximación, vemos que la antena está constituida por un tubo de Zn de 15 micrones (tomamos el valor medio de la capa de Zn según especificación) y por un cilindro de Fe-C de diámetro 2,6673 mm (2,683 mm – 15 micras o micrones) y una zona de transición de unas 4 micras de espesor.

La corriente que circula por el Fe, al tener este un valor alto de permeabilidad y por lo tanto alta inductancia, como vimos por efecto skin expulsa la mayor parte de corriente hacia la faja de Zn, circulando por un espesor de 7 micrones aproximadamente el 63% de la corriente total de la antena.

El 37% restante de la corriente circula por las aleaciones de Fe-C y de Fe-C-Zn. Hay una clara situación de anisotropía, por lo cual es muy difícil calcular la resistencia de este conductor no habitual en HF.

Si todo el conductor fuese de Zn, la penetración de la corriente sería de 64 micrones. Dada la existencia del núcleo de Fe-C, aceptaremos que la corriente circula por la faja de 7 micrones exterior y dentro de la zona de efecto skin.

En la siguiente figura se muestra el modelo:



Esquema de un alambre San Martin usado como antena en 80 m (el dibujo no esta en escala)

Realizaremos varias suposiciones que nos permitirán llegar a un valor de resistencia aproximado del alambre San Martín. Téngase en cuenta que hay varias hipótesis posibles de cálculo, elegimos una por sencillez, que nos dará una aproximación, aunque descartando que sea la solución exacta.

Como vimos, el 63% de la corriente que está confinada por el magnetismo producido por la circulación de corriente en el Fe circula en una faja angosta de Zn, en la cual se encontrará con una resistencia que es igual a la de cc, pues el efecto skin ya la confinó en esos 7 micrones.

El valor de resistencia, con la típica formula, será de:

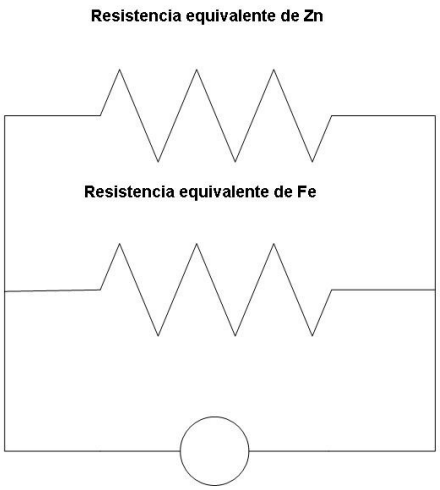
Resistencia Zn = (1 / Sigma Zn) * L / sección del Zn

La sección de la faja de Zn se calcula como : 7 micrones x 8,5 mm = 0.0595 mm2, siendo 8,5 mm el perímetro del alambre san martín.

Para el dipolo de 3,7 MHz, obtenemos 42,15 Ohms aproximadamente. Es una resistencia muy alta, comparada con la Resistencia de radiación (73,4 Ohms).

El resto de la corriente (37% del total) circula por dos secciones: una de 8 micrones de Zn y otra constituía por el núcleo de Fe-C. La capa de 8 micrones de Zn, tiene una subacpa de 4 micrones de Zn-Fe-C, con una conductividad más baja que la del Zn y más alta que la del hierro. Esta hipótesis de variación lineal de densidades de corriente hace abstracción de la realidad, en donde la variación es hiperbólica, pero dado el bajo valor del diámetro, la excentricidad entre la curva hiperbólica y la recta puede ser despreciada.

Simplificando el modelo, entonces, tenemos dos secciones de alambre de antena: un tubo de Zn, de 7 micrones de espesor y un cilindro de Fe-C de 2,66 mm de diámetro que están en paralelo, cada uno de estos tramos tiene su resistencia y están en paralelo, según el sencillo circuito equivalente:



Este circuito está alimentado por una fuente de cc, dado que los efectos de la corriente de RF en el alambre ya fueron calculados.

Veamos un poco la distribución de corriente en un dipolo de media onda. Esta es máxima en el centro y mínima en los extremos, aproximándose a un semiperiodo de la función matemática coseno. Dada esta distribución, podemos suponer que en cc, la corriente de antena será constante en toda la longitud y equivalente a un 35% de la I máxima. Para el cálculo, el valor no importa, lo que nos interesa es que es constante en todo el alambre, por lo tanto, en toda la resistencia.

Aplicando las leyes de Kirchoff, obtenemos finalmente que la relación

Resistencia en el Fe / Resistencia en el Zn = 0,37 / 0,63, de lo lo cual obtenemos que la resistencia en el Fe es de 24,75 Ohms.

Resolviendo el paralelo, encontramos que la resistencia del alambre de antena es equivalente a 15,59 Ohms.

Resumiendo, nos encontramos con un dipolo de media onda para 3,7 MHz instalado a media Lambda del suelo, con una resistencia de radiación de 73,4 Ohms, en serie con una resistencia de pérdidas de 15,59 Ohms.

Calculando el rendimiento de esta antena (73,4 / (73,4 + 15,59) obtenemos 82,5 %, es decir estamos perdiendo aproximadamente 16 % de rendimiento respecto a la antena tradicional construida con el típico cable de 7x0,80 (rendimiento de 98,4% según vimos).

¿Cuánto nos perjudica esa pérdida de rendimiento en un QSO?

Hagamos una cuenta rápida. Si alimentamos con 100 W una antena de 7 x 0,80, irradiamos 98,7 Watts. Si esa misma potencia la aplicamos a la antena de alambre San Martin, irradiamos aproximadamente 82,71 W. Estamos perdiendo unos 16 W de potencia radiada. Es mucho.

El problema de un circuito ionosferico es su variabilidad. Por ejemplo, durante el día, las capas bajas absorben potencia, por lo que tener 16 W menos de potencia radiada puede ser causa de perder la oportunidad de QSO. Durante la noche esos 16 W pueden no ser importantes en ciertas condiciones.

Pero hay que considerar que las capas altas de la ionosfera (capa F) no actúa siempre como un espejo que refleja. Esta capa dispersa y refracta y es impredecible como lo hace. Cuando difracta, se puede perder mucha potencia, por lo cual los 16 W menos pueden contar. Cuando refracta, hay absorción, pero el la onda de comunicación se curva hacia tierra, por lo que la falta de 16 W puede ser inadvertida.

Por otra parte cuando se hacen comunicados de dos o tres saltos, con reflexión en la superficie del planeta, en algunos casos hay mucha absorción y en otros casos hay minima absorción. Por lo tanto, cuando hay mucha absorción, los 16 W menos son trascendentales para que no se establezca el contacto.

Hay fading lento, hay fading largo y hay fading selectivo. En este último las refracciones, dispersiones o reflexiones actúan de distinta manera incluso en la banda estrecha de audio de un BLU, por lo que en la frecuencia central se puede propagar sin problemas y a 2 kHz de diferencia, la diferencia de potencia puede ser suficiente para que por instantes se pierda información, deformándose la señal modulada recibida.

En el siguiente gráfico se muestra el comportamiento de un link ionosférico con una alta necesidad de relación señal a ruido S/N (15 dB). Se observa que en el periodo T1, el fading mantiene a la señal siempre por encima de la relación S/N requerida. En el periodo T2 hay gran parte del tiempo en el cual la señal esta bajo la S/N requerida, convirtiendo en inestable el circuito. En el periodo T3, la mayor parte del tiempo la señal está bajo la S/N requerida.

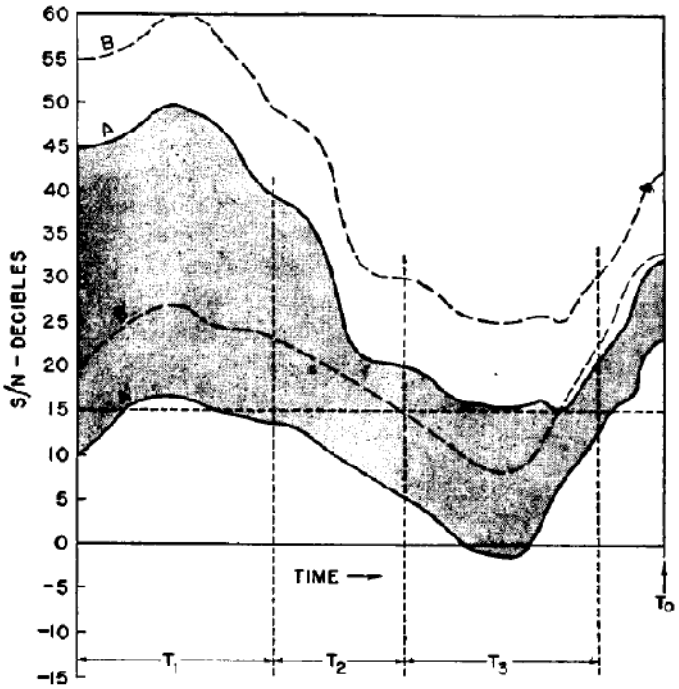


FIG. 3.11. Illustration of communication reliability.

En los periodos T2 y T3 lo único que puede hacerse es aumentarse la potencia, por lo tanto, una antena con bajo rendimiento exigirá una mayor potencia en el conector de salida del TX. En este caso, esos 16 W pueden ser muy importantes.

Téngase en cuenta que los modernos receptores y los anchos de banda de un SSB requieren mucho menos de 15 dB de relación a ruido, lo cual quiere decir que con menor potencia se puede establecer un link. Pero al mismo tiempo, dado que se trabaja con menor potencia por mejor calidad de receptor, una variación que pueden ser de pocos dB (3,75 dB en el caso del ejemplo) pueden ser cruciales para un buen QSO. Considérese que se puede llegar a trabajar con hasta unos 6dB de relación señal ruido, con un buen receptor y un operador muy entrenado, por lo que la diferencia de 3 db en potencia por disminución de rendimiento de antena, puede hacer una gran diferencia en los momentos de fading.

Cuando se esté operando con un TX en QRP, la diferencia en rendimiento de antena realmente puede ser importante por lo visto mas arriba.

Ahora bien, si la estación es usada solamente para comunicaciones de corta distancia en prácticas operativas, realmente, la disminución de rendimiento de antena no hace gran diferencia en la calidad de un QSO.

Pero debemos hacer algunas consideraciones económicas:

1) Si se opera a baterías, se está desperdiciando potencia, por lo tanto autonomía de la estación.
2) Se esta exigiendo en 15 % aproximadamente de más a las etapas de potencia del TX, es decir, se genera potencia que no es utilizada para comunicar, solo para “calentar la antena”
3) Se esta realizando un gasto superfluo de energía eléctrica, que parece mínimo, pero si se multiplica por cierta cantidad de gastos superfluos de energía parecidos a nivel global, la contribución al calentamiento global es significativa.

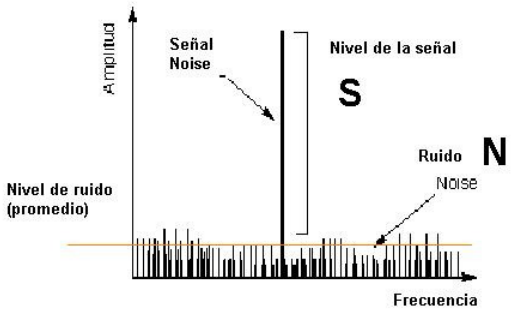
A largo plazo, seguramente habrá más pérdidas, pues al irse degradando la capa de Zn por oxidación, toda la corriente circulara por el hierro, que tiene menor conductividad que el Zn, por lo tanto, disminuirá aun más el rendimiento de la antena. En promedio, un alambre San Martin perderá toda la capa de Zn en unos 6 años, considerando la pérdida normal de Zn por efectos ambientales en el medio de la Pampa Húmeda (unos 20 gramos de Zn / m2 por año)

Como conclusión, podemos decir que desde el punto de vista del rendimiento, no es conveniente el uso de alambre san martín para un dipolo de media onda en 80 metros. Ahora bien, si consideramos una estación de radio en la cual no prima el DX o no se opera con potencias inferiores a unos 50 W y se hacen comunicados a media distancia, otras consideraciones pueden superponerse a la del rendimiento (fundamentalmente, hurto del alambre. Otra, quizás, el necesario aumento de la resistencia mecánica para antenas largas).

Hasta ahora, todas las consideraciones que hicimos las realizamos para una antena transmisora. ¿Pero que sucede en la misma antena como receptora?. En principio, todo es igual, pues por el teorema de reciprocidad una antena transmisora se comporta exactamente igual a una antena receptora. Pero en realidad hay una diferencia.

Todo receptor de radio, como todo equipo electrónico, genera internamente ruido por el movimiento térmico de los electrones en su paso por las distintas etapas. Cuanto mejor calidad tenga el receptor, menos ruido interno generará.

Por otra parte, en los bornes de entrada del receptor están presentes el nivel de señal útil mas el ruido externo (ruido cósmico, ruido de chispas, efecto corona, etc.). La siguiente figura nos muestra esto:



Relación (S + N) / N

A la salida del receptor (el parlante) aparecerán la señal útil demodulada más los ruidos externos amplificados y los ruidos internos propios del aparato.

Una especificación típica de un recptor SSB para aficionados es sensibilidad 0,5 microVolts para una relación Señal / Ruido de 10 dB. Esto significa que en el parlante la señal útil de información transmitida mas la suma del ruido aparecerá con un nivel de 10 dB sobre el ruido para señal es cero, cuando en la entrada hay una señal de 0,5 microVolts que se desarrolla sobre la impedancia de 50 Ohms de entrada del receptor.

Ahora bien, si la antena tiene menos rendimiento, la señal que pondrá en la entrada del receptor será inferior, como vimos en el ejemplo, en 80 metros tenemos una señal de casi 8 dB menos, que aparece sobre el ruido en el parlante. En un QSO crítico, con baja propagación y alto ruido, esta diferencia puede hacer ininteligible al corresponsal, pues el ruido externo y el interno son iguales, para menor señal de entrada.

En este caso, analizado desde la recepción, pueden se importante el 15% menos de rendimiento de la antena por aumento de resistencia de perdidas.

Aún mas, en toda resistencia se genera ruido, por lo tanto la relación S + N / N es peor, dado que estrictamente no aparece el mismo ruido, sino que este es mayor por el aumento de resistencia de la antena. Si bien este efecto hasta 30 MHz no es importante, si lo es en frecuencias más altas. Por eso, en UHF y microondas se utilizan superficies plateadas para disminuir las resistencias.

Veamos una curiosidad, que aparentemente desafía el sentido común.

Frecuencia (MHz)	Profundidad de Penetración (microns)	Resistencia Alambre San Martín (Ohms)	Rendimiento Dipolo 1/2 Lambda
3,7	7.0	15.6	82.5%
7,1	5.0	10.7	87.3%
14.2	3.8	7.6	90.6%
28.9	2.6	5.3	93.3%

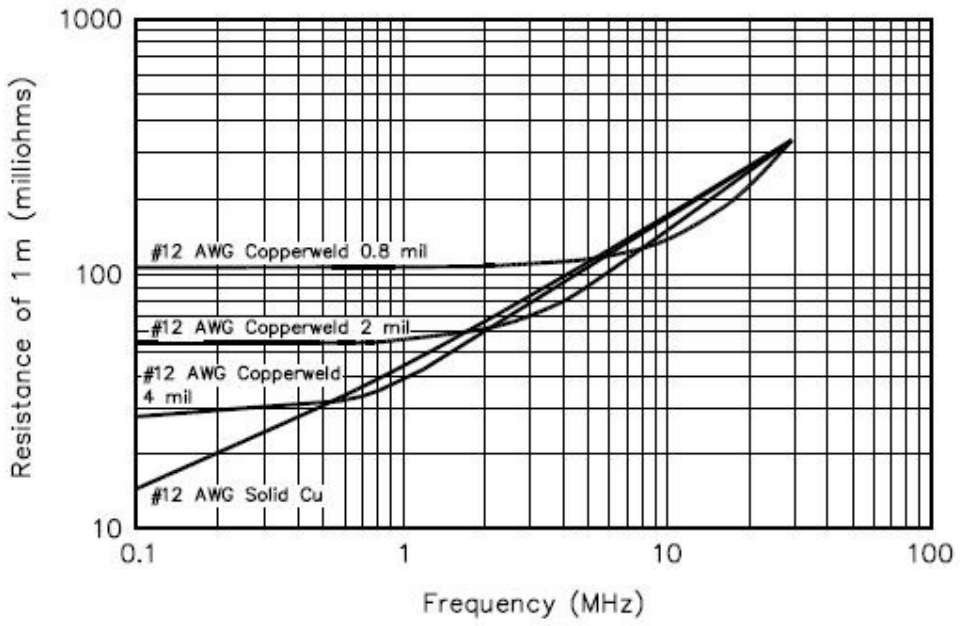
El sentido común hubiera dicho que con el aumento de frecuencia, el efecto Kelvin debe disminuir el rendimiento. Pero sucede lo contrario. ¿Por qué?

Vemos que la profundidad de penetración disminuye, es correcto, cuanto más alta la frecuencia, más superficial es la corriente. Pero hay menos longitud de alambre en juego, por lo tanto, es menor la resistencia, por lo que el efecto se compensa.

Además, recordemos que la capa de Zn (con el alambre nuevo, como estamos considerando) es de unos 15 micrones. Hay dos reglas prácticas y con este ejemplo vemos que se cumplen.

Cuando el conductor considerado tiene aproximadamente hasta 2 veces de espesor que el coeficiente profundidad de penetración, el efecto skin puede ser despreciado. Y la segunda es que en transmisión de energía eléctrica, normalmente se considera un conductor que tenga al menos 5 veces la profundidad de penetración del efecto skin. Vemos que estas dos reglas se cumplen para las dos bandas más altas de la tabla.

Estas cuentas también nos muestran porque se utiliza el alambre copperweld para altas frecuencias. Está constituído por un alambre de acero recubierto en cobre, el cual tiene un espesor de aproximadamente el 20% del total del diámetro. De esta forma se combina la alta resistencia mecánica del acero con la alta conductividad del cobre. En la figura siguiente, se muestra la resistencia en función de la frecuencia para un alambre de cobre y varios alambres copperweld.



Fuente; Rudy Severns (N6LF). "Conductors for HF Antennas", ARRL QEX Magazine, November/December 2000

Para la banda de 80 metros hay una posibilidad para no perder rendimiento con una antena de alambre San Martín. Se pueden poner en paralelo varios alambres, disminuyendo de esta forma la resistencia de pérdidas. Este es el llamado “dipolo gordo” (“fat dipole”), muy utilizado por los rusos que lo denominan dipolo de Nadenenko o Nadenenko-Ajzenberg.

El paralelo se debe hacer con separadores, formando con los alambres una especie de jaula larga (cage, en ingles), de la longitud del dipolo. De esta forma, al agregar alambres en paralelo, se disminuye la resistencia de perdidas, pero al aumentarse la relación de diámetro del dipolo respecto a la longitud, disminuye el Q sin bajar el rendimiento y aumentándose el ancho de banda (disminuye la inductancia del dipolo).

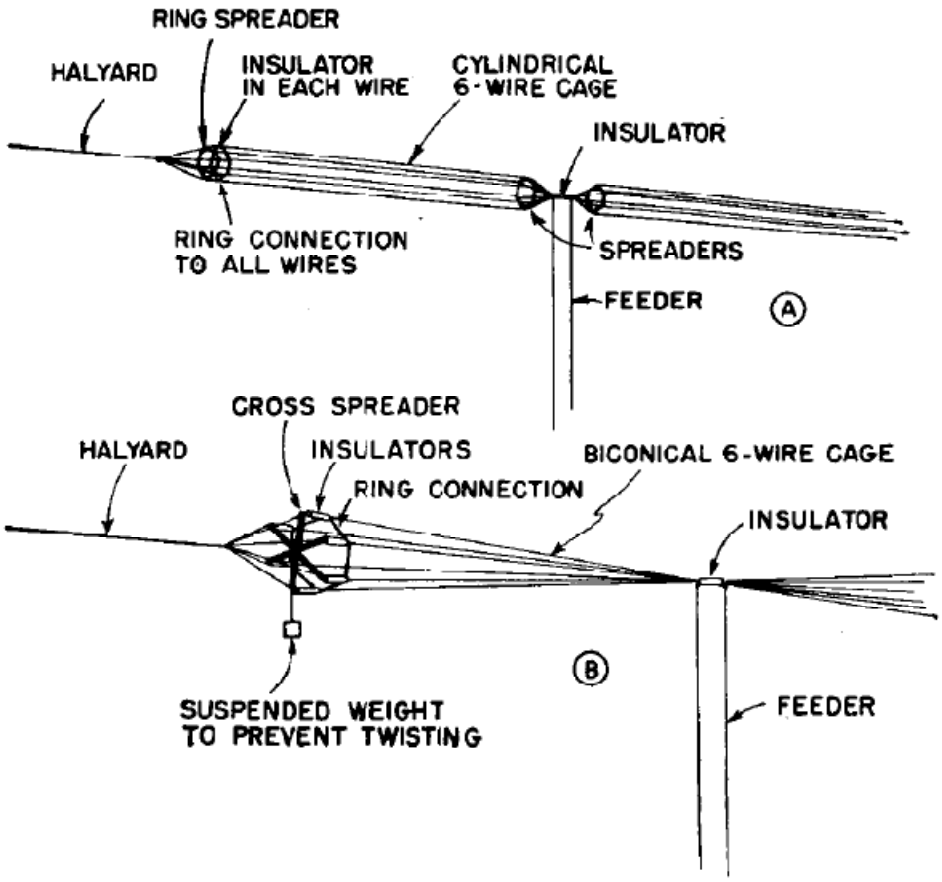


FIG. 3.27. Constructions for cylindrical and biconical cage antennas.

Fuente; Edmund Laport. Radio Antenna Engineering. Mc Graw Hill. New York, 1952. Pag. 252

El cálculo de este dipolo se realiza teniendo en cuenta la relación diámetro / longitud de la jaula. Pero este cálculo, excede el tenor de este escrito dedicado al dipolo de alambre San Martín y sus desventajas o ventajas.