

¿Cuál es el mejor metal para una Antena de Alambre?

Por José Luis Giordano, CA4GIO.

Este breve artículo fue escrito cuando llamaron mi atención una serie de comentarios realizados en la sección "Correspondencia" de QST de septiembre 2022, sobre el artículo "The Better Antenna: Copper Versus Aluminum" ("La mejor antena: cobre versus aluminio") escrito en broma por Pete Varounis, NL7XM en la edición de abril de 2022. El artículo de Varounis para el April Fool's Day (Día de los Santos Inocentes) se refiere al rol de los electrones de los átomos de cobre y de aluminio en sus propiedades eléctricas, así como a su efecto sobre el pandeo de los cables de un dipolo. Dejando bromas de lado, el título hace referencia a una pregunta recurrente: ¿Es conveniente sustituir el cobre por aluminio en los brazos de un dipolo? Los alambres de cobre (Cu) son relativamente caros, pesados, se deforman fácilmente, y se pandean cada vez más con el transcurso del tiempo y las temperaturas del verano. Parece lógico pensar en el aluminio (Al) como alternativa debido a sus buenas propiedades eléctricas y bajísima densidad ($\delta_{Al}=2.71$ g/cm³ versus $\delta_{Cu}=8.94$ g/cm³). Esto sugiere que los alambres más livianos estarán sujetos a menores tensiones y, en consecuencia, tendrán menor pandeo y deformación. Sin embargo, existe preocupación por reducir la eficiencia de la antena al cambiar por un metal con una conductividad casi 37% menor ($\sigma_{Al}=3.8 \times 10^7$ S/m versus $\sigma_{Cu}=6.0 \times 10^7$ S/m). Vamos entonces, a considerar específicamente ambas cuestiones, eléctrica y mecánica.

RESISTENCIA ÓHMICA

Considere dos dipolos de media onda, horizontales, con la misma orientación y altura, cada uno con una longitud similar e igual a l y alimentados en el centro. Un dipolo está hecho de alambre de cobre, con un diámetro d_{Cu} , y el otro dipolo está hecho de aluminio, con un diámetro d_{Al} . Al intentar tener antenas con eficiencias similares, los diámetros se eligen de manera que los alambres de los brazos tengan la misma resistencia eléctrica. Teniendo en cuenta el efecto piel, la resistencia del alambre de cobre a una frecuencia f es[1]

$$R_{Cu} = \frac{l}{d_{Cu}} \sqrt{\frac{f \mu_0}{\pi \sigma_{Cu}}}$$

donde $\mu_0=4\pi \times 10^{-7}$ H/m es la permeabilidad en el vacío. Análogamente se expresa la resistencia del alambre de aluminio, R_{Al} . Luego, como queremos que el dipolo hecho con aluminio a una dada frecuencia tenga la misma resistencia, igualando $R_{Cu}=R_{Al}$ se ve que debe verificarse

$$d_{Cu} \sqrt{\sigma_{Cu}} = d_{Al} \sqrt{\sigma_{Al}}$$

Entonces, el diámetro del alambre de aluminio debe ser

$$d_{Al} = \sqrt{\frac{\sigma_{Cu}}{\sigma_{Al}}} d_{Cu} = \sqrt{\frac{6}{3.8}} \times d_{Cu} = 1.26 \times d_{Cu}$$

Es decir, el alambre de aluminio debe tener un diámetro 26% mayor que el alambre de cobre. Por lo tanto, si $d_{Cu}=1.627$ mm (#14 AWG), entonces $d_{Al}=2.050$ mm (un poco más pequeño que #12 AWG).

No es aconsejable hacer esto con metales de bastante menor conductividad, como el acero, porque requeriría un alambre muy grueso. Además, la permeabilidad magnética del acero también aumentaría la resistencia. Sin embargo, debido a la delgada profundidad de penetración, es posible utilizar alambres de acero revestido de cobre (Copper-Clad Steel, CCS) con diámetros similares a d_{Cu} . La película de cobre aporta la parte eléctrica, y el núcleo de acero la resistencia mecánica.

El parámetro más importante en el rendimiento de una antena es la eficiencia, donde la comparación relevante está en la resistencia de radiación. Esta resistencia virtual representa la conversión de la potencia eléctrica entregada a la antena en potencia radiada como ondas electromagnéticas, y depende fuertemente del tamaño de la antena. En vez de preocuparse por la conductividad, la preocupación del radioaficionado debe estar en utilizar irradiantes con el máximo tamaño posible.[2] Por lo tanto, teniendo ambos dipolos con el mismo tamaño y altura, ambos horizontales y con la misma resistencia, la discusión sobre cuál es el metal más adecuado continúa sólo en relación a las propiedades mecánicas del material de los irradiantes.



PESO DEL ALAMBRE

Comparemos el peso de un dipolo hecho con alambre de cobre #14 AWG y otro dipolo con alambre de aluminio #12 AWG de similar longitud (l). La masa (= volumen \times densidad) del alambre de cobre es

$$m_{Cu} = l \frac{\pi}{4} (d_{Cu})^2 \delta_{Cu}$$

y análogamente para la masa m_{Al} del alambre de aluminio. Luego, debido a que ambos alambres tienen la misma longitud, debe cumplirse

$$\frac{m_{Cu}}{(d_{Cu})^2 \delta_{Cu}} = \frac{m_{Al}}{(d_{Al})^2 \delta_{Al}}$$

Entonces,

$$m_{Al} = \frac{\delta_{Al}}{\delta_{Cu}} \left(\frac{d_{Al}}{d_{Cu}} \right)^2 m_{Cu} = \frac{2.7}{8.94} \left(\frac{2.052}{1.627} \right)^2 m_{Cu} = 0.480 \times m_{Cu}$$

Es decir, un dipolo de aluminio pesa aproximadamente la mitad que un dipolo de cobre que tenga similar longitud y resistencia óhmica.

Análogamente, si se utiliza un alambre de CCS del mismo diámetro ($d_{CCS} = d_{Cu}$), como $\delta_{CCS} = 8 \text{ g/cm}^3$

$$m_{CCS} = \frac{\delta_{CCS}}{\delta_{Cu}} \left(\frac{d_{CCS}}{d_{Cu}} \right)^2 m_{Cu} = \frac{8}{8.94} m_{Cu} \sim 0.9 \times m_{Cu}$$

(es decir, el dipolo de CCS pesaría sólo un 10% menos que el dipolo de cobre. Entonces, la mayor diferencia entre el dipolo de cobre y el dipolo de CCS está en las propiedades elásticas de los respectivos materiales.

Pandeo del alambre

Debido a la masa, un dipolo de alambre suspendido de dos extremos se hunde en el centro formando una curva denominada catenaria que puede aproximarse mediante una parábola (Fig. 1).[3]

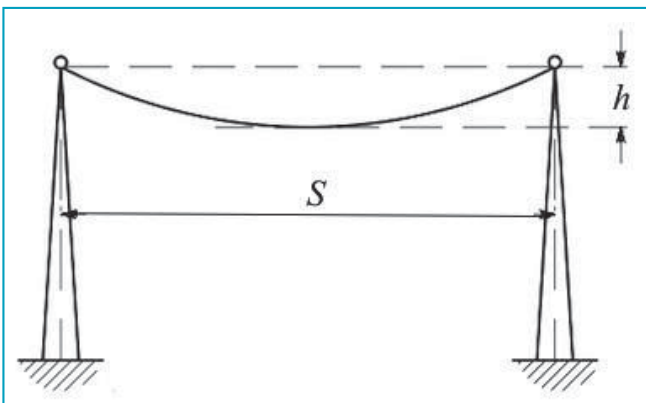


Figura 1: Esquema del pandeo de un alambre sujeto en los extremos.

Por lo tanto, el pandeo del alambre (h) está relacionado con la magnitud del peso del alambre por unidad de longitud (w), la distancia horizontal total entre los dos soportes del alambre (S) y la magnitud de la tensión de tracción (T) en cada extremo del cable según $h = (wS^2)/8T$

Entonces, como los dos dipolos tendrán la misma separación S , el pandeo h dependerá sólo de la relación w/T .

CONCLUSIONES

La tensión debe ser menor que el límite elástico convencional del material (Yield Strength, en inglés) para que el alambre no sufra una deformación permanente.[4] Por lo tanto, un criterio de trabajo es diseñar con una tensión que sea aproximadamente igual a la mitad del límite elástico. Sin embargo, debido a que el límite elástico del aluminio es prácticamente la mitad (35 MPa para el aluminio y 69 MPa para el cobre), resulta que al usar aluminio, el peso y la tensión del alambre se reducirían aproximadamente en la misma cantidad, es decir que w/T será similar y entonces ambos dipolos tendrán un pandeo h similar. Además, si se considera el módulo de elasticidad de cada material (Young's modulus, 69 GPa para aluminio y 110 GPa para cobre), se observa que el efecto de las propiedades mecánicas del aluminio es mucho peor, porque para la misma tensión aplicada, la deformación del alambre de aluminio será un 59 % mayor que en el cobre (pues $110/69 \approx 1.59$). Además, si a todas estas consideraciones agregamos que es mucho más fácil conseguir alambres de cobre de diversos tipos y diámetros, no se ve ninguna conveniencia en sustituir el cobre por aluminio.

Considerando ahora un alambre de CCS, este material es poco dúctil y resulta más difícil trabajar con él. Sin embargo, como el acero tiene un límite elástico mucho mayor (180 MPa; 2.6 veces superior que para el aluminio), puede tolerar tensiones bastante mayores. Específicamente, usando que $w_{CCS} \sim 0.9 w_{Cu}$, la relación w/T para el CCS será sólo un 35% respecto de la relación para el cobre (i.e., un pandeo 65% menor). Entonces, el CCS es sin duda el mejor material para utilizar en los dipolos de alambre más largos (bandas de 80 y 160 m).

Referencias

- [1] M.N.O. Sadiku, Elements of Electromagnetics 7th Ed. (New York: Oxford University Press, 2018)
- [2] L. McCoy, W1ICP, Lew McCoy On Antennas 2nd Pr. (Hicksville, N.Y.: CQ Communications, Inc., 1997)
- [3] H. W. Silver, NOAX (Ed.), The ARRL Antenna Book for Radio Communications 24th Ed. (Newington, CT: ARRL, 2022), p.25.4.
- [4] W. D. Callister, Jr. & D. G. Rethwisch, Materials Science and Engineering. An Introduction 9th Ed. (Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons, 2014)