

El mejor metal para una antena

Revisando la cuestión de cuál es el mejor metal para usar en un dipolo de alambre

«The Best Metal for an Antenna» QST 107(12) December 2023, 30-31



José Luis Giordano, CA4GIO
Radio Club de Chile, CE3AA

Me llamó la 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 Pete 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. 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 son relativamente caros, pesados, se deforman fácilmente, y se pandean cada vez más con el tiempo y las altas temperaturas. Parece lógico pensar en el aluminio como alternativa debido a sus buenas propiedades eléctricas y baja densidad ($\delta_{Al}=2.71 \text{ g/cm}^3$ versus $\delta_{Cu}=8.94 \text{ g/cm}^3$). 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 ($\sigma_{Al}=3.8 \times 10^7 \text{ S/m}$ versus $\sigma_{Cu}=6.0 \times 10^7 \text{ S/m}$).

Resistencia óhmica

Considere dos dipolos de media onda, 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 cables tengan la misma resistencia eléctrica. Teniendo en cuenta el efecto piel, la resistencia del alambre de cobre a una frecuencia f es:

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

donde μ_0 es la permeabilidad en el vacío (ver, por ejemplo, séptima edición de

Elements of Electromagnetics de Matthew Sadiku). Luego, como queremos que el dipolo hecho con aluminio a una dada frecuencia tenga la misma resistencia, debe verificarse que:

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

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 de cobre. Por lo tanto, si $d_{Cu}=1.627 \text{ mm}$ (#14 AWG), entonces $d_{Al}=2.050 \text{ mm}$ (un poco más pequeño que #12 AWG).

No es aconsejable hacer esto con metales de 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} .

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 (como expresa Lew McCoy, W1ICP, en Lew McCoy *On Antennas*) debe estar en utilizar irradiantes con el máximo tamaño posible. Por lo tanto, la discusión sobre cuál es el metal más adecuado continúa 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 del alambre de cobre es:

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

y debido a que ambos alambres tienen la

misma longitud:

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

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 la mitad que un dipolo de cobre que tenga similar resistencia óhmica.

Entonces, si se utiliza un alambre de CCS del mismo diámetro (d_{Cu}), suponiendo una densidad promedio $\delta_{CCS}=8 \text{ g/cm}^3$, como $8/8.94 \sim 0.9$, el dipolo de CCS pesaría solo 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 materiales. Estas propiedades se pueden ver, por ejemplo, en la novena edición de *Introducción a la Ciencia e Ingeniería* de Materiales de William D. Callister, Jr. y David G. Rethwisch.

■ «Un dipolo de aluminio pesa la mitad que un dipolo de cobre que tenga similar resistencia óhmica».

Pandeo del alambre

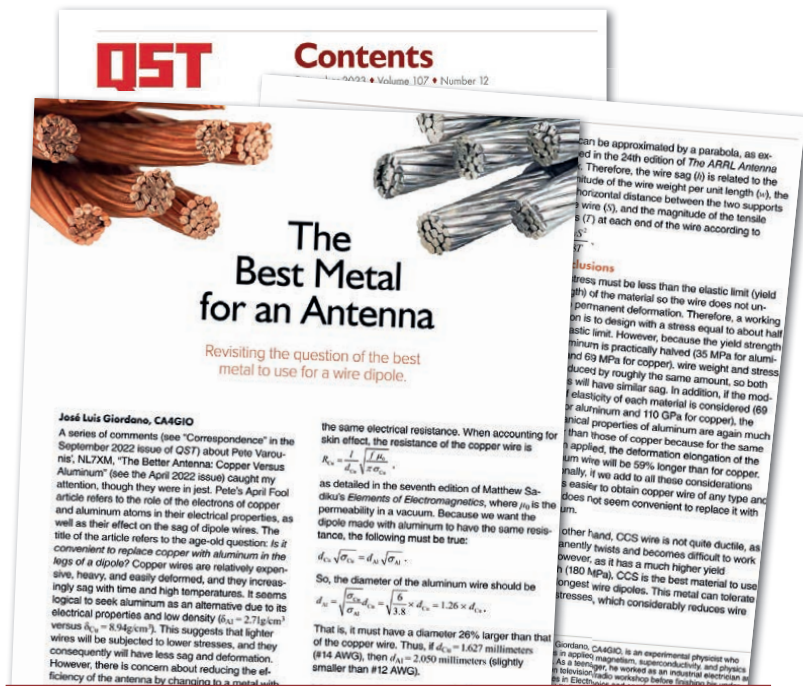
Debido a la masa, un dipolo de alambre suspendido de dos extremos se hunde en el centro formando una curva denominada catenaria que puede aproximarse mediante una parábola (como se explica por ejemplo, en la 24ª edición de *The ARRL Antenna Book*). Por lo tanto, el pandeo del alambre (h) está relacionado 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:

$$h = \frac{wS^2}{8T}$$

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. Por lo tanto, un criterio de trabajo es diseñar con una tensión igual a aproximadamente 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 de 59 % mayor que en el cobre. Además, si a todas estas consideraciones le sumamos que es mucho más fácil conseguir alambres de cobre de cualquier tipo y tamaño, no se ve ninguna conveniencia en sustituir cobre por aluminio.

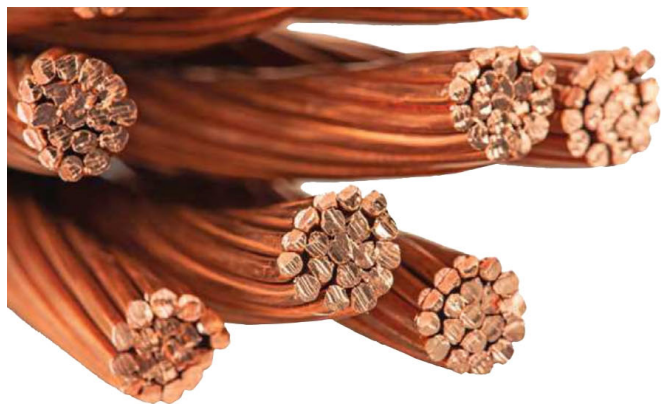
Considerando ahora un alambre de CCS, este material es poco dúctil y resulta más difícil trabajar con él. Sin embargo, como



tiene un límite elástico mucho mayor (180 MPa), el CCS es sin duda el mejor material para utilizar en los dipolos de alambre más

largos (bandas de 80 y 160 m). En efecto, al tolerar tensiones mayores, el pandeo del alambre se puede reducir considerablemente.●





The Best Metal for an Antenna

Revisiting the question of the best metal to use for a wire dipole.

José Luis Giordano, CA4GIO

A series of comments (see “Correspondence” in the September 2022 issue of *QST*) about Pete Varounis’, NL7XM, “The Better Antenna: Copper Versus Aluminum” (see the April 2022 issue) caught my attention, though they were in jest. Pete’s April Fool article refers to the role of the electrons of copper and aluminum atoms in their electrical properties, as well as their effect on the sag of dipole wires. The title of the article refers to the age-old question: *Is it convenient to replace copper with aluminum in the legs of a dipole?* Copper wires are relatively expensive, heavy, and easily deformed, and they increasingly sag with time and high temperatures. It seems logical to seek aluminum as an alternative due to its electrical properties and low density ($\delta_{\text{Al}} = 2.71\text{g/cm}^3$ versus $\delta_{\text{Cu}} = 8.94\text{g/cm}^3$). This suggests that lighter wires will be subjected to lower stresses, and they consequently will have less sag and deformation. However, there is concern about reducing the efficiency of the antenna by changing to a metal with a conductivity almost 37% lower ($\sigma_{\text{Al}} = 3.8 \times 10^7\text{ S/m}$ versus $\sigma_{\text{Cu}} = 6.0 \times 10^7\text{ S/m}$) than copper.

Ohmic Resistance

Consider two half-wave dipoles, each with a total length of l and fed at the center. One dipole is made of copper wire, with a diameter of d_{Cu} , and the other dipole is made of aluminum, with a diameter of d_{Al} . While trying to create antennas with similar efficiencies, the diameters are chosen so the wires have

the same electrical resistance. When accounting for skin effect, the resistance of the copper wire is

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

as detailed in the seventh edition of Matthew Sadiku’s *Elements of Electromagnetics*, where μ_0 is the permeability in a vacuum. Because we want the dipole made with aluminum to have the same resistance, the following must be true:

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

So, the diameter of the aluminum wire should be

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

That is, it must have a diameter 26% larger than that of the copper wire. Thus, if $d_{\text{Cu}} = 1.627$ millimeters (#14 AWG), then $d_{\text{Al}} = 2.050$ millimeters (slightly smaller than #12 AWG).

It isn’t convenient to use metals with lower conductivity, such as steel, because it would require a thick wire. The magnetic permeability of the steel also increases the resistance. However, due to skin

“An aluminum dipole with the same ohmic resistance would be half the weight of a copper dipole.”

depth, it is possible to use copper-clad steel (CCS) wires with diameters similar to d_{Cu} .

The most important parameter in antenna performance is efficiency, where the relevant comparison is radiation resistance. This resistance represents the conversion of the electrical power delivered to the antenna into electromagnetic wave radiation, and it is strongly dependent on antenna size. Per Lew McCoy's, W1ICP, *Lew McCoy on Antennas*, for instance, the radio amateur's concern should be with using the maximum possible size rather than with the conductivity of the material. The discussion about the most suitable metal is relevant in relation to the mechanical properties of the dipole's materials.

Wire Weight

Compare the weight of a dipole made with #14 AWG copper wire and another dipole with #12 AWG aluminum wire of equal length (l). The mass is

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

Because both wires are the same length,

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

Therefore,

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

An aluminum dipole with the same ohmic resistance would be half the weight of a copper dipole.

If a CCS wire of the same diameter (d_{Cu}) is used, assuming an average density, $\delta_{CCS} = 8 \text{ g/cm}^3$ as $(8/8.94) \sim 0.9$, the CCS dipole would weigh only 10% less than the copper dipole. So, the biggest difference between copper and CCS is in the elastic properties. The properties of copper, aluminum, and steel are explored, for instance, in the ninth edition of *Materials Science and Engineering* by William D. Callister, Jr., and David G. Rethwisch.

Wire Sag

Due to mass, a wire dipole suspended from two ends sags in the center, forming a catenary curve

that can be approximated by a parabola, as explained in the 24th edition of *The ARRL Antenna Book*. Therefore, the wire sag (h) is related to the magnitude of the wire weight per unit length (w), the total horizontal distance between the two supports of the wire (S), and the magnitude of the tensile stress (T) at each end of the wire according to

$$h = \frac{wS^2}{8T}.$$

Conclusions

The stress must be less than the elastic limit (yield strength) of the material so the wire does not undergo permanent deformation. Therefore, a working criterion is to design with a stress equal to about half the elastic limit. However, because the yield strength of aluminum is practically halved (35 MPa for aluminum and 69 MPa for copper), wire weight and stress are reduced by roughly the same amount, so both dipoles will have similar sag. In addition, if the modulus of elasticity of each material is considered (69 GPa for aluminum and 110 GPa for copper), the mechanical properties of aluminum are again much poorer than those of copper because for the same tension applied, the deformation elongation of the aluminum wire will be 59% longer than for copper. Additionally, if we add to all these considerations that it is easier to obtain copper wire of any type and size, it does not seem convenient to replace it with aluminum.

On the other hand, CCS wire is not quite ductile, as it permanently twists and becomes difficult to work with. However, as it has a much higher yield strength (180 MPa), CCS is the best material to use for the longest wire dipoles. This metal can tolerate higher stresses, which considerably reduces wire sag.

José Luis Giordano, CA4GIO, is an experimental physicist who specializes in applied magnetism, superconductivity, and physics education. As a teenager, he worked as an industrial electrician and ran his own television/radio workshop before finishing his undergrad studies in Electronics and earning his Master of Science degree and PhD in Physics. José has worked at the Balseiro Institute and Bariloche Atomic Center in Argentina, the University of Zaragoza in Spain, and the University of Talca in Chile. Now retired from academic life, José lives in Chile and obtained his first and second amateur radio licenses in 2021. He currently collaborates in online classes held by the Radio Club de Chile, and he is especially interested in HF antennas, noise reduction, and transmission line transformers. You can reach José at jlgiordano@hotmail.com.

For updates to this article, see the **QST Feedback** page at www.arrl.org/feedback.

