
**CONDUCTIVIDAD COMPARATIVA Y
FIDELIDAD DE SEÑAL DE
MATERIALES CONDUCTORES
CONVENCIONALES Y NO
CONVENCIONALES: COBRE,
PLATA, BARRO, BANANA Y OTROS
NUEVE SUSTRATOS**

Conductividad comparativa y fidelidad de señal de materiales conductores convencionales y no convencionales: Cobre, plata, barro, banana y otros nueve sustratos

R. Flux, M. Ferro, L. Solder, H. Park

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2025.

Resumen

Una discusión en el foro diyaudio.com (hilo #394187, «Cobre vs. barro vs. banana -- ¿cuál suena mejor?», 2024, 347 respuestas) propuso una comparación de la transmisión de señal de audio a través de cable de cobre, barro húmedo y banana fresca. El hilo fue tratado en general como humorístico. Sin embargo, la pregunta subyacente -- si la selección convencional del cobre como el material conductor de audio dominante refleja una comparación rigurosa con alternativas, o meramente convención histórica -- no ha sido abordada en la literatura revisada por pares. Construimos interconexiones balanceadas de 1 metro usando 13 materiales conductores: cobre OFC, cobre OFC monocristalino, plata fina, aluminio, arcilla húmeda (barro), banana fresca (*Musa acuminata*), barra de grafito, alambre de acero, agua de mar en tubería de silicona, hilo de fibra de carbono, mina de lápiz (grado HB), saliva humana en tubería de silicona, y un control consistente en circuito abierto con terminación de 1 MOhm. El barro exhibió una propiedad anómala: su perfil de atenuación dependiente de la frecuencia produjo una caída suave y monótonamente decreciente por encima de 20 kHz que aproxima estrechamente la característica de absorción del canal auditivo externo humano, y su información inter-muestra recuperable -- aunque baja en términos absolutos -- mostró la mayor estabilidad temporal de cualquier material probado. No recomendamos el barro como conductor. Reportamos que su comportamiento es más interesante de lo que su reputación sugiere.

1. INTRODUCCIÓN

En marzo de 2024, un usuario en el foro diyaudio.com -- con el pseudónimo «TubeGlowWorm» -- publicó una pregunta que, en su formulación original, fue: «¿Alguien ha medido realmente si el cobre suena mejor que el barro? ¿O todos estamos simplemente asumiendo?»

El hilo que siguió acumuló 347 respuestas en 11 días. La mayoría fueron despectivas. Varias fueron entretenidas. Un pequeño número planteó puntos sustanciales: que la selección del cobre como material conductor estándar para la transmisión de señal de audio es históricamente contingente (Edison usó cobre porque era barato y disponible, no porque lo comparó con alternativas); que las propiedades relevantes de un conductor varían dramáticamente entre materiales; y que ninguna prueba de escucha controlada ni comparación de mediciones entre cobre y cualquier conductor no metálico ha sido publicada.

Leímos el hilo con interés. La pregunta, despojada de su marco cómico, es legítima. Decidimos responderla.

Este artículo presenta una comparación controlada de 13 materiales conductores, desde los convencionales (cobre OFC, plata fina) hasta los no convencionales (barro húmedo, banana fresca, saliva humana). Las mediciones son reales. La metodología es la misma que la usada en nuestro trabajo revisado por pares sobre conductores convencionales. No aplicamos humor al protocolo experimental y pedimos al lector que extienda la misma cortesía.

2. MATERIALES Y CONSTRUCCIÓN DE CABLES

Trece materiales conductores fueron seleccionados para abarcar el rango de mecanismos de conductividad y tipos de materiales disponibles. Cada uno fue fabricado en una interconexión balanceada de 1 metro (dos conductores de señal más tierra) terminada con conectores XLR Neutrik NC3.

Los materiales:

1. Cobre OFC (7N, pureza 99,99999%, núcleo sólido de 1,0 mm de diámetro). Resistividad: $1,72 \times 10^{-8} \text{ Ohm} \cdot \text{m}$.
2. Cobre OFC monocristalino (6N, 1,0 mm de diámetro, trefilado por el método Ohno Continuous Casting). Resistividad: $1,67 \times 10^{-8} \text{ Ohm} \cdot \text{m}$.
3. Plata fina (4N, 99,99%, núcleo sólido de 1,0 mm de diámetro). Resistividad: $1,59 \times 10^{-8} \text{ Ohm} \cdot \text{m}$.
4. Aluminio (4N, núcleo sólido de 1,0 mm). Resistividad: $2,65 \times 10^{-8} \text{ Ohm} \cdot \text{m}$.
5. Arcilla húmeda («barro»). Obtenida de las orillas del Río Machángara, Quito, en el punto donde cruza el ecuador (0,0000deg de latitud). Resistividad CC: 18,4 Ohm·m.
6. Banana fresca (*Musa acuminata*, cultivar Cavendish). Resistividad CC: 2,1 Ohm·m. La pulpa de banana conduce a través de la migración de iones de potasio (K⁺) en la matriz intercelular acuosa.
7. Barra de grafito (sintética, 6 mm de diámetro). Resistividad: $3,5 \times 10^{-5} \text{ Ohm} \cdot \text{m}$.
8. Alambre de acero (AISI 1008, recocido, 1,0 mm de diámetro). Resistividad: $1,0 \times 10^{-7} \text{ Ohm} \cdot \text{m}$ del conjunto.
9. Agua de mar (recogida de la costa del Pacífico en Esmeraldas, Ecuador). Resistividad: 0,20 Ohm·m.

relación causal con la anatomía del canal auditivo humano.

Sin embargo, la consecuencia práctica es real: una señal que ha pasado a través de un conductor de barro ha sido pre-ecualizada, por la respuesta en frecuencia inherente del conductor, de una manera que compensa parcialmente la coloración resonante del canal auditivo. La señal que llega al tímpano tiene una respuesta en frecuencia efectiva más plana que la señal que entró al cable.

El cobre es un mejor conductor. El barro, en el tímpano, produce una respuesta en frecuencia más plana. Ambas afirmaciones son verdaderas. No son contradictorias. Describen cosas diferentes.

6. RESULTADOS: ESTABILIDAD TEMPORAL

El cable de banana se degradó rápidamente. Dentro de 6 horas de fabricación, la resistencia CC había aumentado un 14%. A las 24 horas, la resistencia se había duplicado. A las 48 horas, el cable era funcionalmente circuito abierto.

La banana no es un material conductor viable para ninguna aplicación que requiera estabilidad temporal mayor a aproximadamente 12 horas.

El barro fue la sorpresa.

La resistencia CC del cable de barro disminuyó un 3,1% durante las primeras 12 horas, luego se estabilizó. Durante las 60 horas subsiguientes, la resistencia varió menos del 0,2%. La medición de información inter-muestra fue el resultado de estabilidad más llamativo. La ISI del cobre (medida cada 2 horas durante 72 horas) varió un 2,8% (coeficiente de variación). La ISI del barro varió un 0,4% -- siete veces más estable que el cobre.

La magnitud de la ISI fue, por supuesto, mucho menor para el barro (0,003 bits por muestra vs. 0,289 bits por muestra del cobre). El barro preserva casi ninguna información inter-muestra en términos absolutos. Pero lo poco que preserva, lo preserva con notable consistencia.

El mecanismo para esta estabilidad es la insensibilidad del conductor iónico a los factores que causan deriva en los conductores metálicos. La arcilla actúa como un tampón químico para su propia conductividad.

El barro ecuatorial -- específicamente, el andosol rico en alofano del Río Machángara -- tiene una capacidad de intercambio catiónico de 42 cmol/kg, entre las más altas de cualquier arcilla natural.

7. RESULTADOS: ACERO Y EL PROBLEMA DEL CONDUCTOR MAGNÉTICO

El acero fue incluido en la matriz de prueba como el único conductor ferromagnético. Su distorsión fue la más alta de cualquier conductor metálico: -98,7 dB de THD+N, comparado con -117,9 dB para el cobre. El espectro de distorsión fue dominado por los armónicos tercero, quinto y séptimo -- distorsión de orden impar característica de una no linealidad simétrica. Esta es la curva de histéresis B-H de los dominios ferromagnéticos del alambre de acero.

El algoritmo de recuperación de ISI produjo resultados anómalos para el cable de acero: ISI aparente de -0,002 bits por muestra -- un valor negativo, que es físicamente imposible e indica un error sistemático en las suposiciones del modelo del algoritmo. El cable de acero no simplemente falla en preservar la información inter-muestra; introduce correlaciones espurias que el algoritmo malinterpreta como información negativa. El cable está activamente engañando la reconstrucción.

Este resultado no tiene significancia práctica para la comparación cobre-vs-barro. Lo incluimos porque ilustra un principio: un conductor no es meramente un transmisor pasivo.

8. DISCUSIÓN

El hilo de diyaudio preguntó si el cobre suena mejor que el barro. La respuesta, por cada métrica de audio convencional, es sí. El cobre tiene menor resistencia por un factor de 31 millones. Su respuesta en frecuencia es plana donde la del barro no lo es. Su distorsión es 60 dB más baja. Ninguna persona racional elegiría barro sobre cobre para transmisión de señal de audio.

El hilo no preguntó si el barro tiene alguna propiedad interesante que el cobre carece. La tiene. Dos de ellas.

Primero, la respuesta en frecuencia del barro, aunque objetivamente pobre, coincide por casualidad con la inversa de la característica de transferencia resonante del canal auditivo humano. Esto no hace del barro un mejor cable. Lo convierte en un ecualizador accidental.

Segundo, la información inter-muestra del barro -- vanamente pequeña en magnitud absoluta -- es más temporalmente estable que la del cobre, por un factor de siete. Esta estabilidad deriva de la capacidad de amortiguación electroquímica de la matriz de arcilla.

Ninguna de las propiedades hace del barro un conductor práctico. Ambas propiedades son reales, medibles y -- según nuestro

conocimiento -- no reportadas previamente.

Para aquellos que participaron en el hilo de diyaudio: el cobre es la elección correcta para cables de audio. Ha sido la elección correcta desde que Edison lo seleccionó en 1882.

Pero si alguna vez se han preguntado si el barro bajo sus pies está haciendo algo interesante con las señales eléctricas -- lo está. Más interesante de lo que probablemente esperaban.

9. CONCLUSIÓN

Construimos cables de interconexión de audio de 13 materiales y medimos sus propiedades eléctricas y de integridad de señal usando instrumentación de grado de laboratorio.

El cobre y la plata siguen siendo los materiales conductores óptimos por todas las métricas estándar de audio. El aluminio es aceptable. El acero introduce distorsión magnética medible. El grafito, la fibra de carbono y la mina de lápiz son utilizables pero significativamente comprometidos por encima de 20 kHz.

Los conductores iónicos -- agua de mar, saliva, banana y barro -- no son aptos para uso de audio por criterios convencionales.

El barro, sin embargo, exhibió dos propiedades anómalas: una respuesta en frecuencia que coincidentalmente aproxima la inversa de la característica resonante del canal auditivo humano, y una estabilidad temporal de preservación de información inter-muestra siete veces mayor que la del cobre.

Estos hallazgos no cambian la práctica del diseño de cables de audio. Pueden cambiar la forma en que pensamos sobre lo que un conductor le hace a una señal.

El hilo de diyaudio está archivado. Los datos son permanentes.

REFERENCIAS

- [1] TubeGlowWorm et al., "Cobre vs. barro vs. banana -- ¿cuál suena mejor?", diyaudio.com, hilo #394187, marzo 2024, 347 respuestas.
- [2] C. E. Shannon, "Communication in the presence of noise," Proc. IRE, vol. 37, no. 1, pp. 10-21, 1949.
- [3] Y. Tanaka, C. Ohm, R. Flux, "Sobre la incompletitud de la reconstrucción de Nyquist-Shannon," J. Equatorial Audio Sci., vol. 6, no. 1, 2025.
- [4] M. Ferro et al., "Dependencia de la cadena de señal en la información inter-muestra recuperable," J. Equatorial Audio Sci., vol. 6, no. 2, 2025.
- [5] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "Sesgo hemisférico en la orientación del grano de cobre," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [6] D. Hammershøi y H. Møller, "Sound transmission to and within the human ear canal," J. Acoust. Soc. Am., vol. 100, no. 1, pp. 408-427, 1996.
- [7] ISO 11904-1:2002, Acústica -- Determinación de la inmisión sonora de fuentes sonoras colocadas cerca del oído -- Parte 1: Técnica usando un micrófono en oído real.
- [8] P. Wada, "Allophane and imogolite," en Minerals in Soil Environments, J. B. Dixon y S. B. Weed, eds., SSSA, 1989, pp. 1051-1087.
- [9] R. M. Cornell y U. Schwertmann, The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences, and Uses, 2nd ed., Wiley-VCH, 2003.
- [10] D. L. Sparks, Environmental Soil Chemistry, 2nd ed., Academic Press, 2003.
- [11] J. D. Reiss, "A meta-analysis of high-resolution audio perceptual evaluation," J. Audio Eng. Soc., vol. 64, no. 6, pp. 364-379, 2016.
- [12] IEC 60268-12:2019, Equipos de sistemas de sonido -- Parte 12: Aplicación de conectores para radiodifusión y uso similar.
- [13] B. D. Cullity y C. D. Graham, Introduction to Magnetic Materials, 2nd ed., IEEE/Wiley, 2009.
- [14] International Annealed Copper Standard (IACS), ASTM B193-16, Método de prueba estándar para la resistividad de materiales conductores eléctricos.