
**CONDUTIVIDADE COMPARATIVA E
FIDELIDADE DE SINAL DE
MATERIAIS CONDUTORES
CONVENCIONAIS E NÃO
CONVENCIONAIS: COBRE, PRATA,
LAMA, BANANA E NOVE OUTROS
SUBSTRATOS**

Condutividade Comparativa e Fidelidade de Sinal de Materiais Condutores Convencionais e Não Convencionais: Cobre, Prata, Lama, Banana e Nove Outros Substratos

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.

Resumo

Uma discussão no fórum diyaudio.com (thread #394187, "Cobre vs. Lama vs. Banana -- qual soa melhor?", 2024, 347 respostas) propôs uma comparação de transmissão de sinal de áudio através de fio de cobre, lama úmida e banana fresca. Construímos interconexões balanceadas de 1 metro usando 13 materiais condutores: cobre OFC, cobre OFC monocristalino, prata fina, alumínio, argila úmida (lama), banana fresca (*Musa acuminata*), barra de grafite, fio de aço, água do mar em tubo de silicone, fibra de carbono, grafite de lápis (grau HB), saliva humana em tubo de silicone e um controle de circuito aberto. Cobre e prata tiveram o melhor desempenho em todas as métricas convencionais. A lama, no entanto, exibiu uma propriedade anômala: seu perfil de atenuação dependente da frequência produz uma queda suave e monotonicamente decrescente acima de 20 kHz que se aproxima da característica de absorção do canal auditivo externo humano, e sua informação inter-amostral recuperável -- embora baixa em termos absolutos -- mostrou a maior estabilidade temporal de qualquer material testado, variando menos de 0,4% ao longo de 72 horas de medição contínua.

1. INTRODUÇÃO

Em março de 2024, um usuário no fórum diyaudio.com -- nickname "TubeGlowWorm" -- postou uma pergunta que, em sua formulação original, era: "Alguém realmente mediu se o cobre soa melhor que a lama? Ou estamos todos apenas assumindo?"

O thread que se seguiu acumulou 347 respostas ao longo de 11 dias. A questão, despida de sua moldura cômica, é legítima. Decidimos respondê-la.

Este artigo apresenta uma comparação controlada de 13 materiais condutores, variando dos convencionais (cobre OFC, prata fina) aos não convencionais (lama úmida, banana fresca, saliva humana). As medições são reais. A metodologia é a mesma utilizada em nosso trabalho revisado por pares sobre condutores convencionais. Não aplicamos humor ao protocolo experimental e pedimos ao leitor que estenda a mesma cortesia.

2. MATERIAIS E CONSTRUÇÃO DO CABO

Treze materiais condutores foram selecionados para abranger a gama de mecanismos de condutividade e tipos de materiais disponíveis. Os materiais incluíram:

1. Cobre OFC (7N). Resistividade: $1,68 \times 10^x \text{ Ohm}\cdot\text{m}$.
2. Cobre OFC monocristalino (6N, método Ohno Continuous Casting). Resistividade: $1,67$
3. Prata fina (4N). Resistividade: $1,59 \times 10^x \text{ Ohm}\cdot\text{m}$.
4. Alumínio (4N). Resistividade: $2,65 \times 10^x \text{ Ohm}\cdot\text{m}$.
5. Argila úmida ("lama"). Obtida das margens do Rio Machángara, Quito, no ponto onde cruza o equador. Resistividade CC: $18,4 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$.
6. Banana fresca (*Musa acuminata*, cultivar Cavendish). Resistividade CC: $2,1 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$.
7. Barra de grafite (sintética). Resistividade: $3,5 \times 10^u \text{ Ohm}\cdot\text{m}$.
8. Fio de aço (AISI 1008). Resistividade: $1,0 \times 10^w \text{ Ohm}\cdot\text{m}$.
9. Água do mar (costa do Pacífico em Esmeraldas, Equador). Resistividade: $0,20 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$.
10. Fibra de carbono (Toray T700). Resistividade: $1,6 \times 10^u \text{ Ohm}\cdot\text{m}$.
11. Grafite de lápis (Faber-Castell grau HB). Resistividade: $4,2 \times 10^t \text{ Ohm}\cdot\text{m}$.
12. Saliva humana (coletada de três voluntários de laboratório). Resistividade: $0,72 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$.
13. Circuito aberto (controle -- resistor de terminação de 1 MOhm).

3. PROTOCOLO DE MEDIÇÃO

Cada cabo foi inserido em uma cadeia de sinal padronizada: saída do gerador Audio Precision AKM AK5578 (768 kHz, 32 bits). As seguintes medições foram realizadas: resistência CC, resposta em frequência (20 Hz a 200 kHz), distorção harmônica total + ruído (1 kHz, 2 Vrms), resposta ao impulso e informação inter-amostral (protocolo Tanaka, 2025).

Todas as medições foram realizadas no laboratório de referência de Quito a $23,0 \pm 0,1 \text{ degC}$, $47 \pm 1\% \text{ UR}$, com o cabo sob teste dentro de um invólucro blindado contra RF.

4. RESULTADOS: MÉTRICAS CONVENCIONAIS

Resistência CC (por condutor, comprimento de 1 metro):

Prata: 0,020 Ohm. Cobre (OFC): 0,021 Ohm. Cobre (SC-OFC): 0,021 Ohm. Alumínio: 0,034 Ohm. Aço: 0,127 Ohm. Fibra de carbono: 0,141 Ohm. Barra de grafite: 1,24 Ohm. Grafite de lápis: 13,4 Ohm. Água do mar: 706 Ohm. Saliva: 2.540 Ohm. Banana: 74.200 Ohm. Lama: 650.000 Ohm. Circuito aberto: > 10 MOhm.

A resposta em frequência da lama foi -0,2 dB a 20 Hz, -3,1 dB a 1 kHz, -18,7 dB a 10 kHz, -47,3 dB a 50 kHz e abaixo do piso de ruído acima de 78 kHz. Isso é, por qualquer padrão, uma resposta em frequência pobre para um condutor de áudio.

THD+N a 1 kHz, 2 Vrms: Prata: -118,4 dB. Cobre (OFC): -117,9 dB. Lama: -58,3 dB. Circuito aberto: -44,1 dB.

Por toda métrica convencional -- resistência, resposta em frequência, distorção -- o ranking é claro. Prata e cobre são efetivamente empatados. Tudo o mais é progressivamente pior.

O experimento poderia terminar aqui. O cobre ganha. O thread do diyaudio está respondido.

Ele não termina aqui.

5. RESULTADOS: PROPRIEDADES ANÔMALAS DA LAMA

Durante as medições de resposta em frequência, notamos que a curva de queda da lama tinha uma forma incomumente suave. Por curiosidade, comparamos o perfil de atenuação da lama com a função de transferência de pressão do canal auditivo externo humano, conforme medido por Hammershoi e Moller (1996).

Quando a curva de atenuação da lama é sobreposta à inversa da função de transferência do canal auditivo -- isto é, a atenuação necessária para cancelar o ganho ressonante do canal auditivo -- as duas curvas coincidem dentro de +/- 1,2 dB de 500 Hz a 15 kHz. A lama naturalmente atenua as frequências que o canal auditivo amplifica e passa as frequências que o canal auditivo não modifica.

Isso é uma coincidência. Afirmamos isso claramente. O mecanismo físico de condução iônica em argila úmida não tem relação causal com a anatomia do canal auditivo humano.

No entanto, a consequência prática é real: um sinal que passou por um condutor de lama foi pré-equalizado, pela resposta em frequência inerente do condutor, de uma forma que compensa parcialmente a coloração ressonante do canal auditivo. O sinal que chega ao tímpano tem uma resposta em frequência efetiva mais plana do que o sinal que entrou no cabo.

6. RESULTADOS: ESTABILIDADE TEMPORAL

O cabo de banana degradou rapidamente. Em 6 horas após a fabricação, a resistência CC havia aumentado 14%. Em 48 horas, o cabo estava funcionalmente em circuito aberto. Banana não é um material condutor viável para qualquer aplicação que exija estabilidade temporal maior que aproximadamente 12 horas.

A lama foi a surpresa. A resistência CC da lama diminuiu 3,1% nas primeiras 12 horas e depois se estabilizou. A ISI do cobre variou 2,8% (coeficiente de variação) ao longo de 72 horas. A ISI da lama variou 0,4% -- sete vezes mais estável que o cobre.

A magnitude da ISI era, claro, muito menor para a lama (0,003 bits por amostra vs. 0,289 do cobre). A lama preserva quase nenhuma informação inter-amostral em termos absolutos. Mas o pouco que preserva, preserva com notável consistência.

O mecanismo para essa estabilidade é a insensibilidade do condutor iônico aos fatores que causam deriva em condutores metálicos. A condução iônica em uma matriz de argila úmida depende da mobilidade de íons na fase aquosa, que é tamponada pela capacidade de troca catiônica da argila -- um equilíbrio eletroquímico autorregulante que resiste a perturbações.

7. RESULTADOS: AÇO E O PROBLEMA DO CONDUTOR MAGNÉTICO

O aço foi incluído na matriz de teste como o único condutor ferromagnético. Sua distorção foi a mais alta entre os condutores metálicos: -98,7 dB THD+N. O espectro de distorção foi dominado pelos 3º, 5º e 7º harmônicos -- distorção de ordem ímpar característica de uma não linearidade simétrica. Este é o laço de histerese B-H dos domínios ferromagnéticos do fio de aço.

O algoritmo de recuperação de ISI produziu resultados anômalos para o cabo de aço: ISI aparente de -0,002 bits por amostra -- um valor negativo, que é fisicamente impossível e indica um erro sistemático nas suposições do modelo do algoritmo. O cabo de aço não apenas falha em preservar informação inter-amostral; ele introduz correlações espúrias que o algoritmo interpreta erroneamente como informação negativa.

8. DISCUSSÃO

O thread do diyaudio perguntou se o cobre soa melhor que a lama. A resposta, por toda métrica convencional de áudio, é sim. O cobre tem resistência menor por um fator de 31 milhões. Nenhuma pessoa racional escolheria lama em vez de cobre para transmissão de sinal de áudio.

O thread não perguntou se a lama tem propriedades interessantes que o cobre não possui. Ela tem. Duas.

Primeiro, a resposta em frequência da lama, embora objetivamente pobre, coincide em aproximar a inversa da função de transferência do canal auditivo humano. Segundo, a informação inter-amstral da lama -- evanescentemente pequena em magnitude absoluta -- é mais temporalmente estável que a do cobre, por um fator de sete.

Nenhuma das propriedades torna a lama um condutor prático. Ambas as propriedades são reais, mensuráveis e -- até onde sabemos -- não relatadas anteriormente.

Para aqueles que participaram do thread do diyaudio: cobre é a escolha correta para cabos de áudio. Mas se você alguma vez se perguntou se a lama sob seus pés está fazendo algo interessante com sinais elétricos -- está. Mais interessante do que você provavelmente esperava.

9. CONCLUSÃO

Construímos cabos de interconexão de áudio com 13 materiais e medimos suas propriedades elétricas e de integridade de sinal usando instrumentação de nível laboratorial.

Cobre e prata permanecem os materiais condutores ideais por todas as métricas de áudio padrão. Alumínio é aceitável. Aço introduz distorção magnética mensurável. Os condutores iônicos -- água do mar, saliva, banana e lama -- são inadequados para uso em áudio por critérios convencionais.

A lama, no entanto, exibiu duas propriedades anômalas: uma resposta em frequência que coincidentemente aproxima a inversa da característica ressonante do canal auditivo humano, e uma estabilidade temporal de preservação de informação inter-amstral sete vezes maior que a do cobre.

Essas descobertas não mudam a prática de projeto de cabos de áudio. Podem mudar a forma como pensamos sobre o que um condutor faz com um sinal.

O thread do diyaudio está arquivado. Os dados são permanentes.

REFERÊNCIAS

- [1] TubeGlowWorm et al., "Cobre vs. Lama vs. Banana -- qual soa melhor?", diyaudio.com, thread #394187, março 2024, 347 respostas.
- [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 a incompletude da reconstrução de Nyquist-Shannon," J. Equatorial Audio Sci., vol. 6, no. 1, 2025.
- [4] M. Ferro et al., "Dependência da cadeia de sinal na informação inter-amstral recuperável," J. Equatorial Audio Sci., vol. 6, no. 2, 2025.
- [5] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "Viés hemisférico na orientação de grão do cobre," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [6] D. Hammershoi and H. Moller, "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 -- Determinação da imissão sonora de fontes sonoras colocadas próximo ao ouvido -- Parte 1: Técnica usando microfone no ouvido real.
- [8] P. Wada, "Allophane and imogolite," in Minerals in Soil Environments, J. B. Dixon and S. B. Weed, eds., SSSA, 1989, pp. 1051-1087.
- [9] R. M. Cornell and 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, Equipamento de sistema de som -- Parte 12: Aplicação de conectores para uso em radiodifusão e similar.
- [13] B. D. Cullity and C. D. Graham, Introduction to Magnetic Materials, 2nd ed., IEEE/Wiley, 2009.
- [14] International Annealed Copper Standard (IACS), ASTM B193-16, Método de teste padrão para resistividade de materiais condutores elétricos.