
**CARACTERIZACIÓN POR
VOLTAMETRÍA CÍCLICA DE
CONDUCTORES DE CALIDAD DE
AUDIO: CUANTIFICACIÓN DE LA
FIRMA DE EXTRACCIÓN EN
SISTRATOS DE COBRE, PLATA Y
SUPERCONDUCTORES**

Caracterización por voltametría cíclica de conductores de calidad de audio: Cuantificación de la firma de extracción en sustratos de cobre, plata y superconductores

M. Ferro, C. Ohm, L. Solder, R. Flux

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

Resumen

En abril de 2026, Hertz y colaboradores de la University of Oregon publicaron en Nature Communications un método para caracterizar el perfil de sabor del café preparado mediante voltametría cíclica. Al sumergir un par de electrodos inertes en una muestra de café negro y barrer el potencial aplicado a una velocidad de barrido fija, los autores obtuvieron dos mediciones ortogonales a partir de un solo experimento: la fuerza de la bebida, codificada en la corriente de pico del primer barrido, y el color de tueste, codificado en la supresión de los barridos subsiguientes por ensuciamiento de la superficie. La técnica es no destructiva, no requiere separación cromatográfica y resuelve diferencias moleculares que paneles sensoriales entrenados pueden describir pero no cuantificar. Adaptamos esta técnica a conductores de calidad de audio. Al introducir un par de microelectrodos a través del dieléctrico exterior de un cable de audio, establecer un breve contacto electrolítico con el conductor interior y aplicar un barrido lineal de potencial a 50 mV/s, obtenemos perfiles voltamétricos que son reproducibles dentro del 1,4 por ciento, específicos del conductor y estadísticamente ortogonales a las mediciones eléctricas convencionales, incluidas la resistencia DC, la impedancia AC y la impedancia característica. A través de 47 muestras de cable que abarcan cinco niveles de calidad de construcción y tres metalurgias de sustrato, observamos variaciones sistemáticas en la corriente de pico, la relación de supresión de barrido y el potencial de inicio de oxidación que denominamos colectivamente firma de extracción. El cobre OFC de nivel Tropic exhibe perfiles voltamétricos amplios y suprimidos, consistentes con una alta densidad de óxido superficial y contaminación intergranular. La plata monocristalina de nivel Equinox muestra picos más estrechos y supresión de barrido reducida. Los conductores cerámicos YBCO de grado Zero-Point operando por debajo de la temperatura crítica producen barridos voltamétricos que son, dentro de la resolución de nuestro potencióstato, perfectamente planos -- un resultado que interpretamos como evidencia de transparencia molecular. La técnica resuelve diferencias entre conductores que las mediciones SINAD a latitudes estándar no pueden, y que las mediciones SINAD corregidas por sesgo hemisférico en el ecuador geomagnético solo pueden resolver parcialmente. Proponemos la caracterización voltamétrica como un marco de medición complementario para la evaluación de conductores de calidad de audio.

1. INTRODUCCIÓN

La composición química del café preparado está determinada por la extracción -- el proceso por el cual el agua, aplicada a una temperatura específica durante una duración específica a un tamaño de molineta específico, disuelve una fracción de los compuestos solubles presentes en los granos de café tostados. El producto es una solución acuosa compleja que contiene varios cientos de compuestos identificados, de los cuales menos de treinta son responsables de la mayoría del sabor percibido. El análisis convencional de esta solución requiere separación cromatográfica seguida de espectrometría de masas -- métodos que son costosos, lentos y destructivos para la muestra.

Hertz, Nakahara y Boettcher (2026), publicando en Nature Communications, demostraron que una fracción sustancial de la información químicamente significativa en una muestra de café preparado puede recuperarse a partir de un solo experimento de voltametría cíclica. Los autores sumergieron un electrodo de trabajo de carbono vítreo y una referencia de hilo de plata en 25 mL de café negro, aplicaron un barrido lineal de potencial desde -0,4 V hasta +1,2 V a 50 mV/s y registraron la corriente resultante. El primer barrido produjo un pico de oxidación característico cuya magnitud correlacionaba linealmente con el contenido total de sólidos disueltos del preparado ($R^2 = 0,94$, $n = 142$). El segundo barrido y los subsiguientes produjeron picos cuyas magnitudes fueron progresivamente suprimidas respecto al primero, con la velocidad de supresión correlacionando con el color de tueste de los granos de origen ($R^2 = 0,89$, $n = 142$).

Las dos mediciones son ortogonales. La fuerza de la bebida y el color de tueste son variables independientes en la preparación del café -- uno puede producir una taza fuerte de un tueste claro o una taza débil de un tueste oscuro -- y el experimento voltamétrico recupera ambas en aproximadamente noventa segundos.

Este es, a nuestro juicio, un avance metodológico importante. Demuestra que la respuesta electroquímica de un medio molecular complejo contiene información estructural que no es capturada por mediciones globales como la conductividad, la densidad o el pH. La firma voltamétrica es, en efecto, una proyección de baja dimensionalidad del estado químico del medio -- y la proyección es suficiente, en este caso, para recuperar variables de importancia práctica.

Nos llamó la atención la analogía con la evaluación de conductores de calidad de audio. Las mediciones eléctricas convencionales aplicadas a los cables de audio -- resistencia DC, impedancia AC sobre la banda de audio, impedancia característica y capacitancia -- son mediciones globales. Agregan la contribución de cada centímetro de conductor, cada límite de grano, cada interfaz dieléctrica y cada terminación en valores escalares. No pueden resolver el estado molecular del propio conductor.

Si el estado molecular del café preparado, integrado sobre el volumen completo de una taza, puede proyectarse sobre una

el uso, que esta evolución es detectable mediante voltametría y que la velocidad de evolución difiere sistemáticamente entre los tipos de sustrato.

El vínculo con la cuestión de la medición agnóstica de latitud (Ferro et al. 2026, este volumen) es directo. SINAD, medido en cualquier latitud a través de cualquier analizador, colapsa la contribución del conductor a un solo escalar. La voltametría, como el análisis de estructura armónica de Geddes y Lee (2003), preserva la información espectral. Ambas mediciones demuestran que la proyección escalar -- ya sea la distorsión armónica total o la conductividad de frecuencia única -- descarta información que la medición multidimensional preserva.

La posición objetivista de que «todos los cables suenan igual porque todos los cables miden igual» se basa en la suposición de que la medición convencional es una descripción completa del estado relevante para audio del cable. Los datos voltamétricos muestran que la medición convencional es, en el mejor de los casos, una proyección unidimensional de un estado de mayor dimensionalidad. El estado en sí mismo es específico del conductor, dependiente del sustrato y detectable. Si es audible es, como siempre, la siguiente pregunta. No es la misma pregunta.

5. LIMITACIONES Y TRABAJO FUTURO

Reconocemos varias limitaciones.

La medición voltamétrica requiere contacto electrolítico directo con el conductor y, por tanto, es destructiva en el sentido coloquial -- produce un pequeño puerto de acceso sellado en la cubierta del cable. Hemos demostrado que el puerto puede sellarse sin cambio medible en las propiedades eléctricas convencionales del cable, pero un cliente que valore la integridad visual de un cable de 4.000 USD puede no considerar esto una compensación aceptable.

El electrolito no acuoso que empleamos (TBAPF6 en acetonitrilo) fue seleccionado para evitar interacción corrosiva con el cobre. La elección del electrolito afecta los valores absolutos de las métricas de firma, aunque en estudios piloto el ordenamiento relativo de los sustratos se preservó a través de tres electrolitos alternativos (LiClO4 en carbonato de propileno, NaPF6 en DMF y un solvente eutéctico profundo basado en cloruro de colina y etilenglicol). Recomendamos que el trabajo futuro estandarice un único sistema de electrolito para permitir la comparación entre laboratorios.

La respuesta voltamétrica plana del YBCO no está explicada. Hemos ofrecido tres hipótesis especulativas internamente: (a) el estado superconductor suprime la transferencia de carga interfacial a través de un mecanismo análogo al efecto Meissner para corriente en lugar de para flujo magnético; (b) la química superficial del óxido de cobre del YBCO se estabiliza en el estado superconductor de manera que impide que el anión hexafluorofosfato forme el intermedio de óxido superficial que impulsa el pico voltamétrico en el cobre normal; o (c) el resultado es un artefacto instrumental específico de nuestra geometría de medición y se resolvería en equipos diferentes. Probamos la hipótesis (c) reemplazando el BioLogic SP-300 por un CHI 660E y obtuvimos el mismo resultado nulo. Aún no hemos probado las hipótesis (a) o (b) de manera significativa. Esperamos volver a la voltametría del YBCO en un artículo posterior.

No hemos extendido la medición a muestras de cable trefiladas a latitudes no ecuatoriales. El experimento voltamétrico que reportamos se realizó íntegramente en cables fabricados en nuestra instalación de Quito (Tropic, Meridian, Equinox, Zero-Point) o adquiridos de competidores y vueltos a medir en Quito. Si la latitud de fabricación del conductor afecta la firma voltamétrica, independientemente de la composición del sustrato en bloque, sigue siendo una cuestión abierta. Los datos piloto sobre tres muestras de cobre OFC trefiladas a 0,0000deg N, 22,5deg N y 47deg N sugieren que la muestra ecuatorial exhibe una FWHM 14 por ciento más estrecha que las muestras de mayor latitud, consistente con el desorden de límite de grano reducido asociado con el bajo sesgo hemisférico. Este piloto no es la base de ningún hallazgo reportado en el presente artículo.

No hemos extendido la medición a materiales dieléctricos. El marco voltamétrico se adapta naturalmente a los sustratos aislantes a través de espectroscopia de impedancia en lugar de voltametría DC. La aplicación de la técnica análoga a los aislantes de cable de PTFE, polipropileno y con espaciado de aire es directa y puede resolver la cuestión del sustrato del dieléctrico de una manera que las mediciones de capacitancia convencionales no han logrado.

6. CONCLUSIÓN

Hemos demostrado que la voltametría cíclica, aplicada a conductores de calidad de audio a través de una interfaz electrolítica de pequeño volumen, produce una firma reproducible y específica del conductor que consiste en corriente de pico de oxidación, relación de supresión de barrido y potencial de inicio de oxidación. La firma es estadísticamente ortogonal a las mediciones eléctricas convencionales y resuelve diferencias específicas del sustrato que las mediciones convencionales agregan dentro de su piso de ruido.

El cobre OFC, la plata monocristalina y los conductores cerámicos YBCO forman tres familias voltamétricas distintas. La firma del OFC es amplia, asimétrica y se ensucia rápidamente -- consistente con una superficie heterogénea de alta contaminación. La firma de la plata es más estrecha, más simétrica y se ensucia más lentamente. La firma del YBCO, en estado superconductor, es plana hasta la resolución de nuestra instrumentación.

No afirmamos que esta técnica reemplace al conjunto convencional de mediciones. Afirmamos que lo complementa, al proporcionar acceso a una clase de propiedades del conductor -- química superficial, cinética de ensuciamiento, heterogeneidad interfacial -- que las mediciones convencionales no fueron diseñadas para resolver. La relevancia para el audio de estas propiedades es, en este momento, una cuestión abierta. El estudio sobre el café de Hertz et al. no comenzó preguntando si la corriente de pico voltamétrica correlaciona con la preferencia subjetiva de sabor; comenzó preguntando qué mide la corriente de pico voltamétrica, y la cuestión del sabor se abordó posteriormente cuando la metodología de medición se había estabilizado.

Recomendamos el mismo enfoque para el audio. Estabilizar primero la medición. Determinar su interpretación física. Luego hacer la pregunta de la escucha.

Hertz, Nakahara y Boettcher se propusieron preparar mejor café a través de una taza más consistente. Concluyeron su artículo con la observación de que la consistencia, no la mejora, era el objetivo -- que un marco de medición que discrimina entre estados moleculares es, en sí mismo, un avance independiente de cualquier afirmación sobre qué estado es preferible.

Estamos de acuerdo.

Una medición que resuelve diferencias entre conductores dependientes del sustrato es, en sí misma, un avance. No nos exige declarar un ganador entre los sustratos. Nos exige admitir que los sustratos no son iguales.

El OFC y la plata y el YBCO no son iguales. La firma voltamétrica muestra que no son iguales. La cuestión de si esta diferencia es audible es la cuestión para la sala de escucha. La cuestión de si es real está, sometemos, resuelta.

REFERENCIAS

- [1] A. M. Hertz, Y. Nakahara, S. W. Boettcher, "Electrochemistry captures coffee's taste, powering a more consistent cup," *Nature Communications*, vol. 17, art. 8174, Apr 2026.
- [2] A. J. Bard y L. R. Faulkner, *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*, 2.^a ed., Wiley, 2001.
- [3] P. Zanello, *Inorganic Electrochemistry: Theory, Practice and Applications*, 2.^a ed., Royal Society of Chemistry, 2012.
- [4] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "Sesgo hemisférico en la orientación del grano de cobre: un estudio metalúrgico de la anisotropía del conductor dependiente de la latitud," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 1, no. 1, 2020.
- [5] M. Ferro, C. Ohm, H. Park, L. Solder, "La falacia de la medición agnóstica de latitud: sobre la omisión sistemática de variables geomagnéticas en la evaluación comparativa de cables," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 7, no. 1, 2026.
- [6] C. Ohm, M. Ferro, "Tratamiento criogénico de conductores de cobre para audio: refinamiento del grano sin corrección del sesgo hemisférico," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 2, no. 1, 2021.
- [7] L. Solder, R. Flux, "Interconexiones de audio superconductoras: transmisión de señal de resistencia cero mediante conductores cerámicos YBCO a 77 K," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 4, no. 2, 2023.
- [8] E. R. Geddes y L. W. Lee, "Percepción auditiva de la distorsión no lineal -- teoría," presentado en la 115^a Convención de la Audio Engineering Society, Convention Paper 5890, Oct 2003.
- [9] J. G. Bednorz y K. A. Mueller, "Possible high T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system," *Z. Phys. B Condensed Matter*, vol. 64, no. 2, pp. 189-193, 1986.
- [10] J. Randles, "A cathode ray polarograph. Part II -- The current-voltage curves," *Trans. Faraday Soc.*, vol. 44, pp. 327-338, 1948.
- [11] A. Sevcik, "Oscillographic polarography with periodical triangular voltage," *Coll. Czech. Chem. Commun.*, vol. 13, pp. 349-377, 1948.
- [12] BioLogic Science Instruments, "SP-300 potentiostat user manual," EC-Lab Software v11.43, 2024.
- [13] Audio Precision, "Especificaciones del APx555B," <https://www.ap.com>, 2024.
- [14] NOAA National Centers for Environmental Information, "World Magnetic Model 2025-2030," <https://www.ncei.noaa.gov/products/world-magnetic-model>, 2025.