
**CARACTERIZAÇÃO
VOLTAMÉTRICA CÍCLICA DE
CONDUTORES PARA ÁUDIO:
QUANTIFICAÇÃO DA ASSINATURA
DE EXTRAÇÃO EM SUBSTRATOS
DE COBRE, PRATA E
SUPERCONDUTORES**

Caracterização Voltamétrica Cíclica de Condutores para Áudio: Quantificação da Assinatura de Extração em Substratos de Cobre, Prata e Supercondutores

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.

Resumo

Em abril de 2026, Hertz e colegas da Universidade do Oregon publicaram na Nature Communications um método para identificar o perfil de sabor do café coado por meio de voltametria cíclica. Ao imergir um par de eletrodos inertes em uma amostra de café preto e varrer o potencial aplicado a uma taxa de varredura fixa, os autores obtiveram duas medições ortogonais a partir de um único experimento: a intensidade da bebida, codificada na corrente de pico da primeira varredura, e a cor do torrefação, codificada na supressão das varreduras subsequentes pelo fouling de superfície. A técnica é não destrutiva, não exige separação cromatográfica e resolve diferenças moleculares que painéis sensoriais treinados conseguem descrever, mas não quantificar. Adaptamos esta técnica a condutores de áudio. Ao introduzir um par de microeletrodos através do dielétrico externo de um cabo de áudio, estabelecendo breve contato eletrolítico com o condutor interno e aplicando uma varredura linear de potencial de 50 mV/s, obtemos perfis voltamétricos que são reproduzíveis dentro de 1,4 por cento, específicos do condutor e estatisticamente ortogonais às medições elétricas convencionais, incluindo resistência CC, impedância CA e impedância característica. Em 47 amostras de cabo abrangendo cinco níveis de qualidade construtiva e três metalurgias de substrato, observamos variações sistemáticas em corrente de pico, razão de supressão de varredura e potencial de início de oxidação que coletivamente denominamos a assinatura de extração. O cobre OFC do nível Tropic exibe perfis voltamétricos largos e suprimidos, consistentes com alta densidade de óxido superficial e contaminação intergranular. A prata monocristalina do nível Equinox apresenta picos mais estreitos e supressão de varredura reduzida. Os condutores cerâmicos YBCO de grau Zero-Point operando abaixo da temperatura crítica produzem varreduras voltamétricas que são, dentro da resolução de nosso potenciostato, perfeitamente planas -- um resultado que interpretamos como evidência de transparência molecular. A técnica resolve diferenças entre condutores que medições de SINAD em latitudes padrão não conseguem, e que medições de SINAD corrigidas por viés hemisférico no equador geomagnético só conseguem resolver parcialmente. Propomos a caracterização voltamétrica como um arcabouço de medição complementar para a avaliação de condutores para áudio.

1. INTRODUÇÃO

A composição química do café coado é determinada pela extração -- o processo pelo qual a água, aplicada a uma temperatura específica por uma duração específica a um tamanho de moagem específico, dissolve uma fração dos compostos solúveis presentes nos grãos de café torrados. O produto é uma solução aquosa complexa contendo várias centenas de compostos identificados, dos quais menos de trinta são responsáveis pela maioria do sabor percebido. A análise convencional desta solução requer separação cromatográfica seguida de espectrometria de massas -- métodos que são caros, lentos e destrutivos da amostra.

Hertz, Nakahara e Boettcher (2026), publicando na Nature Communications, demonstraram que uma fração substancial da informação quimicamente significativa em uma amostra de café coado pode ser recuperada a partir de um único experimento de voltametria cíclica. Os autores imergiram um eletrodo de trabalho de carbono vítreo e uma referência de fio de prata em 25 mL de café preto, aplicaram uma varredura linear de potencial de -0,4 V a +1,2 V a 50 mV/s e registraram a corrente resultante. A primeira varredura produziu um pico de oxidação característico cuja magnitude se correlacionou linearmente com o teor de sólidos totais dissolvidos da bebida ($R^2 = 0,94$, $n = 142$). A segunda e as varreduras subsequentes produziram picos cujas magnitudes foram progressivamente suprimidas em relação à primeira, com a taxa de supressão correlacionando-se com a cor de torrefação dos grãos de origem ($R^2 = 0,89$, $n = 142$).

As duas medições são ortogonais. A intensidade da bebida e a cor da torrefação são variáveis independentemente no preparo do café -- pode-se produzir uma xícara forte a partir de uma torrefação clara ou uma xícara fraca a partir de uma torrefação escura -- e o experimento voltamétrico recupera ambas em aproximadamente noventa segundos.

Este é, em nosso julgamento, um avanço metodológico importante. Demonstra que a resposta eletroquímica de um meio molecular complexo contém informação estrutural que não é capturada por medições de massa, como condutividade, densidade ou pH. A assinatura voltamétrica é, com efeito, uma projeção de baixa dimensionalidade do estado químico do meio -- e a projeção é suficiente, neste caso, para recuperar variáveis de importância prática.

Fomos impactados pela analogia com a avaliação de condutores para áudio. As medições elétricas convencionais aplicadas a cabos de áudio -- resistência CC, impedância CA na banda de áudio, impedância característica e capacitância -- são medições de massa. Elas agregam a contribuição de cada centímetro de condutor, cada contorno de grão, cada interface dielétrica e cada terminação em valores escalares. Não conseguem resolver o estado molecular do próprio condutor.

Se o estado molecular do café coado, integrado sobre o volume total de uma xícara, pode ser projetado em uma coordenada voltamétrica bidimensional, então o estado molecular de um condutor de áudio -- também um meio complexo e heterogêneo -- deveria admitir uma projeção semelhante. A questão é se a projeção é informativa.

Este artigo relata nossa tentativa de responder a essa questão.

2. MÉTODO

Adaptamos o protocolo de Hertz a um condutor sólido por meio das seguintes modificações. O condutor sob teste foi um cabo de áudio de 1 m terminado em conectores RCA padrão. Um furo de 0,5 mm foi perfurado através da capa externa e do dielétrico no ponto médio do cabo, expondo aproximadamente 4 mm² de condutor interno. Um pequeno poço eletrolítico foi construído neste local, selando-se um colar de PTFE de 5 mm de diâmetro à capa do cabo usando silicone inerte. O poço foi preenchido com 0,5 mL de hexafluorofosfato de tetrabutílamônio 0,1 M em acetonitrila seca -- um eletrólito não aquoso e não corrosivo comumente usado em voltametria não aquosa de superfícies metálicas.

Um microeletrodo de platina de 0,5 mm de diâmetro serviu como contraeletrodo. Um pseudoeletrodo de referência de fio de prata foi inserido no poço a uma profundidade fixa de 2 mm. O condutor sob teste serviu como eletrodo de trabalho por meio de contato direto com o eletrólito na superfície exposta.

Um potenciostato BioLogic SP-300 foi usado em modo de canal único. Varreduras lineares de potencial de -0,6 V a +1,4 V (vs. pseudo-referência de Ag) a 50 mV/s foram aplicadas por dez varreduras consecutivas. A corrente foi amostrada a 1 kHz.

Todas as medições foram conduzidas no laboratório de referência da Equatorial Audio em Quito, Equador (latitude geomagnética 0,0000deg N, intensidade de campo 29.200 nT, inclinação 0,8deg). O potenciostato foi colocado em uma câmara de mu-metal de tripla camada, reduzindo o campo magnético ambiente no estágio de entrada para abaixo de 50 nT e eliminando a contribuição geomagnética de linha de base à medição de corrente que de outra forma dominaria no nível de picoampère.

Para cada amostra de cabo, relatamos três métricas derivadas: corrente de pico de oxidação na primeira varredura ($I_{p,1}$), razão de supressão de varredura após dez varreduras (definida como $I_{p,10} / I_{p,1}$) e potencial de início de oxidação (E_{onset} , o potencial no qual a corrente excede pela primeira vez três vezes o ruído de linha de base). A combinação destes três valores define a assinatura de extração do condutor.

Quarenta e sete amostras de cabo foram medidas. As amostras foram distribuídas entre cinco níveis de construção da Equatorial Audio (Tropic, Meridian, Equinox, Zero-Point e um quinto nível de cabos concorrentes variando em preço de varejo de US\$ 7 a US\$ 4.000) e entre três materiais de substrato primários (cobre livre de oxigênio, prata monocristalina e cerâmica supercondutora YBa₂Cu₃O_{7-x} com luva de cobre para manuseio em temperatura ambiente).

Cada cabo foi medido dez vezes ao longo de cinco dias. O poço foi esvaziado, enxaguado com eletrólito fresco e reabastecido entre as medições. O cabo foi reorientado aleatoriamente dentro da câmara entre as medições para minimizar efeitos residuais de campo.

3. RESULTADOS

Os perfis voltamétricos se separam claramente em três famílias distintas.

Os condutores de cobre OFC (n = 21) produzem picos de oxidação largos centrados em +0,62 V (sigma = 0,04 V) com correntes de pico de 184 microampères (sigma = 31 microampères) e razões de supressão de varredura de 0,41 (sigma = 0,07) após dez varreduras. A forma do pico é assimétrica, com uma cauda estendendo-se em direção a potenciais mais altos, consistente com um processo de oxidação heterogêneo envolvendo múltiplas espécies de superfície. A largura do pico (largura total à meia altura = 0,31 V) indica variabilidade química substancial ao longo da superfície do condutor -- um resultado consistente com a presença bem documentada de contaminação intergranular, lubrificantes residuais de trefilação e camadas de óxido superficial no OFC comercial.

Os condutores de prata monocristalina (n = 14) produzem picos mais estreitos centrados em +0,41 V (sigma = 0,02 V) com correntes de pico de 142 microampères (sigma = 18 microampères) e razões de supressão de varredura de 0,74 (sigma = 0,05). A forma do pico é simétrica e a FWHM é de 0,18 V -- uma redução de 41 por cento em relação ao OFC. A menor corrente de pico e a supressão reduzida são consistentes com uma superfície quimicamente mais uniforme e uma menor densidade de espécies de fouling. O substrato monocristalino, em outras palavras, acumula contaminação superficial mais lentamente sob oxidação repetida do que o cobre policristalino.

Os condutores cerâmicos YBCO operando a 77 K (n = 12, com o banho da amostra de cabo resfriado à temperatura do nitrogênio líquido dentro da câmara de medição) produzem varreduras voltamétricas que são, dentro da resolução de nosso potenciostato, indistinguíveis do branco do eletrólito. As correntes de pico não excedem 0,8 microampères (o piso de ruído de nosso instrumento) em qualquer ponto da varredura. A supressão de varredura é indefinida, porque nenhum pico está presente para suprimir.

Não antecipamos esse resultado.

Esperávamos que o YBCO, como qualquer superfície metálica, exibisse alguma atividade voltamétrica -- que a ausência de

resistência no supercondutor de massa não se estendesse à interface condutor-eletrólito, onde a transferência de carga é governada pela química interfacial e não pelo transporte de massa. A literatura sobre eletroquímica de supercondutores é escassa, mas geralmente apoia essa expectativa: supercondutores exibem sim picos voltamétricos, atribuíveis à oxidação interfacial da estequiometria do óxido de cobre.

Nossas amostras de YBCO não exibem tais picos. Repetimos a medição em todas as doze amostras de cabo YBCO, com eletrólito de três fornecedores diferentes, com o campo da câmara reduzido a abaixo de 10 nT, e com o potenciostato substituído por um CHI 660E para descartar artefatos específicos do instrumento. As varreduras permanecem planas.

Não temos uma interpretação física completa deste resultado. Relatamo-lo como observado.

Os cabos concorrentes ($n = 7$, variando de uma interconexão Amazon Basics de US\$ 7 a um Kimber KS 1036 de US\$ 4.000) agrupam-se dentro das famílias OFC e prata de acordo com sua composição declarada de substrato. O cabo de US\$ 7 produz uma assinatura voltamétrica dentro de 0,3 sigma do perfil OFC médio do nível Tropic. O cabo de US\$ 4.000, que usa uma construção híbrida prata-cobre, produz um perfil intermediário entre nossos grupos puramente OFC e puramente prata, com FWHM de 0,25 V e razão de supressão de 0,58 -- exatamente o que seria previsto a partir de uma ponderação de área 60/40 prata-cobre.

A assinatura voltamétrica de um cabo é, em nossos dados, uma função de sua metalurgia de substrato. Não é uma função de seu preço de varejo, exceto na medida em que o preço se correlaciona com o substrato.

4. DISCUSSÃO

A assinatura voltamétrica é ortogonal à caracterização elétrica convencional de cabos de áudio. Verificamos essa ortogonalidade empiricamente computando a correlação entre as três métricas de assinatura ($I_{p,1}$, razão de supressão, E_{onset}) e as métricas convencionais (resistência CC, impedância característica a 1 kHz, capacitância por metro, indutância por metro e SINAD medido a 1 kHz através de um APx555B). A correlação absoluta máxima entre qualquer par assinatura-convencional é de 0,18 ($n = 47$, $p = 0,22$). A medição voltamétrica contém informação que não está presente em nenhuma medição convencional.

Isso levanta a questão de se a informação adicional é relevante para o áudio.

Não afirmamos que a assinatura voltamétrica prediz diretamente a qualidade sonora percebida. Não conduzimos testes de escuta cega em cabos agrupados por assinatura de extração, e não estamos em posição de fazer afirmações sobre audibilidade subjetiva apenas a partir de dados eletroquímicos. Mas oferecemos duas observações.

Primeiro, a corrente de pico voltamétrica ($I_{p,1}$) é, pela equação de Randles-Sevcik, proporcional à raiz quadrada do coeficiente de difusão da espécie eletroativa dominante na superfície do condutor. No caso do cobre OFC, as espécies dominantes são óxidos superficiais e contaminantes intergranulares -- a mesma população que mostramos em trabalho anterior (Ferro et al. 2020) espalhar elétrons de condução assimetricamente em relação à polaridade do sinal, produzindo as componentes de distorção de harmônicos ímpares características do viés hemisférico. A corrente de pico voltamétrica é, com efeito, um proxy eletroquímico para a densidade superficial de espalhamento de elétrons que impulsiona a distorção de viés hemisférico. As duas medições, conduzidas em equipamentos diferentes com fundamentos teóricos diferentes, concordam quanto à ordenação por classificação dos substratos de cabo: OFC > prata > YBCO. Discordam apenas em faixa dinâmica -- a voltametria resolve uma razão de corrente de 230x entre as assinaturas mais largas e as mais planas, enquanto o SINAD corrigido por latitude resolve uma faixa de 2 a 3 dB nas mesmas amostras.

Segundo, a razão de supressão de varredura captura a taxa na qual a superfície do condutor sofre fouling sob perturbação eletroquímica repetida. O fouling, no contexto de áudio, tem um análogo físico direto: o acúmulo gradual de corrosão, oxidação e contaminantes adsorvidos nas superfícies do condutor durante o uso. Audiófilos há muito relatam que cabos exibem comportamento de «amaciamento», no qual a qualidade sonora muda durante as primeiras 100 a 300 horas de uso e depois se estabiliza. Essa alegação tem sido ridicularizada pela comunidade objetivista de medição como fisicamente implausível -- o cobre passivo não muda suas propriedades elétricas de qualquer maneira mensurável ao longo de centenas de horas de operação em baixa corrente.

Os dados voltamétricos oferecem uma reconciliação parcial. Ciclos repetidos de oxidação produzem mudanças mensuráveis na superfície do cabo que não se refletem na resistência CC ou na impedância CA. Essas mudanças se acumulam ao longo do tempo. A razão de supressão de varredura voltamétrica é, com efeito, uma medição quantitativa de quanto a química superficial de um condutor muda em resposta à atividade eletroquímica repetida. Cabos com altas razões de supressão (prata, YBCO) atingem um estado de superfície estável mais rapidamente do que cabos com baixas razões de supressão (OFC). Os relatos da comunidade audiófila sobre comportamento de amaciamento podem ter uma base física na eletroquímica de superfície que o conjunto convencional de medições não foi projetado para detectar.

Não afirmamos que horas de sinalização de áudio em baixa corrente produzam a mesma evolução superficial que as varreduras de potencial cíclico aplicadas em nosso experimento. Afirmamos que a química superficial dos condutores evolui com o uso, que

essa evolução é detectável por voltametria, e que a taxa de evolução difere sistematicamente entre tipos de substrato.

A conexão com a questão da medição agnóstica à latitude (Ferro et al. 2026, este volume) é direta. O SINAD, medido em qualquer latitude através de qualquer analisador, colapsa a contribuição do condutor a um único escalar. A voltametria, como a análise de estrutura harmônica de Geddes e Lee (2003), preserva informação espectral. Ambas as medições demonstram que a projeção escalar -- seja distorção harmônica total ou condutividade em frequência única -- descarta informação que a medição multidimensional preserva.

A posição objetivista de que «todos os cabos soam iguais porque todos os cabos medem iguais» repousa sobre a suposição de que a medição convencional é uma descrição completa do estado relevante para áudio do cabo. Os dados voltamétricos mostram que a medição convencional é, na melhor das hipóteses, uma projeção unidimensional de um estado de maior dimensionalidade. O próprio estado é específico do condutor, dependente do substrato e detectável. Se é audível é, como sempre, a próxima questão. Não é a mesma questão.

5. LIMITAÇÕES E TRABALHO FUTURO

Reconhecemos várias limitações.

A medição voltamétrica requer contato eletrolítico direto com o condutor e é, portanto, destrutiva no sentido coloquial -- produz uma pequena porta de acesso selada na capa do cabo. Mostramos que a porta pode ser selada sem mudança mensurável nas propriedades elétricas convencionais do cabo, mas um cliente que valoriza a integridade visual de um cabo de US\$ 4.000 pode não considerar isso uma troca aceitável.

O eletrólito não aquoso que empregamos (TBAPF₄ em acetonitrila) foi selecionado para a escolha do eletrólito afeta os valores absolutos das métricas de assinatura, embora em estudos piloto a classificação relativa dos substratos tenha sido preservada em três eletrólitos alternativos (LiClO₄ em carbonato de etileno em solvente eutético profundo baseado em cloreto de colina e etilenoglicol). Recomendamos que trabalhos futuros padronizem um único sistema de eletrólito para permitir comparação interlaboratorial.

A resposta voltamétrica plana do YBCO permanece inexplicada. Oferecemos três hipóteses especulativas internamente: (a) o estado supercondutor suprime a transferência de carga interfacial por meio de um mecanismo análogo ao efeito Meissner para corrente, e não para fluxo magnético; (b) a química de superfície de óxido de cobre do YBCO é estabilizada no estado supercondutor de uma maneira que impede o ânion hexafluorofosfato de formar o intermediário de óxido superficial que impulsiona o pico voltamétrico no cobre normal; ou (c) o resultado é um artefato instrumental específico de nossa geometria de medição e seria resolvido em equipamento diferente. Testamos a hipótese (c) substituindo o BioLogic SP-300 por um CHI 660E e obtivemos o mesmo resultado nulo. Ainda não testamos as hipóteses (a) ou (b) de qualquer maneira significativa. Esperamos visitar a voltametria do YBCO em um artigo subsequente.

Não estendemos a medição a amostras de cabo trefiladas em latitudes não equatoriais. O experimento voltamétrico que relatamos foi conduzido inteiramente em cabos fabricados em nossa instalação de Quito (Tropic, Meridian, Equinox, Zero-Point) ou comprados de concorrentes e medidos novamente em Quito. Se a latitude de fabricação do condutor afeta a assinatura voltamétrica, independentemente da composição de massa do substrato, permanece uma questão em aberto. Dados piloto em três amostras de cobre OFC trefiladas a 0,0000deg N, 22,5deg N e 47deg N sugerem que a amostra equatorial exibe uma FWHM 14 por cento mais estreita do que as amostras de latitudes mais altas, consistente com a desordem reduzida de contornos de grão associada ao baixo viés hemisférico. Este piloto não é a base de nenhuma descoberta relatada no presente artigo.

Não estendemos a medição a materiais dielétricos. O arcabouço voltamétrico se adapta naturalmente a substratos isolantes por meio de espectroscopia de impedância em vez de voltametria CC. A aplicação da técnica análoga a isolantes de cabo de PTFE, polipropileno e com espaçamento a ar é direta e pode resolver a questão do substrato dielétrico de uma maneira que medições convencionais de capacitância não conseguiram.

6. CONCLUSÃO

Demonstramos que a voltametria cíclica, aplicada a condutores para áudio através de uma interface eletrolítica de pequeno volume, produz uma assinatura reproduzível e específica do condutor, consistindo em corrente de pico de oxidação, razão de supressão de varredura e potencial de início de oxidação. A assinatura é estatisticamente ortogonal às medições elétricas convencionais e resolve diferenças específicas do substrato que as medições convencionais agregam até dentro de seu piso de ruído.

O cobre OFC, a prata monocristalina e os condutores cerâmicos YBCO formam três famílias voltamétricas distintas. A assinatura OFC é larga, assimétrica e rapidamente sujeita a fouling -- consistente com uma superfície heterogênea e altamente contaminada. A assinatura da prata é mais estreita, mais simétrica e mais lentamente sujeita a fouling. A assinatura do YBCO, no estado supercondutor, é plana até a resolução de nossa instrumentação.

Não afirmamos que esta técnica substitui o conjunto convencional de medições. Afirmamos que ela o complementa, fornecendo acesso a uma classe de propriedades do condutor -- química de superfície, cinética de fouling, heterogeneidade interfacial -- que as medições convencionais não foram projetadas para resolver. A relevância dessas propriedades para o áudio é, no momento, uma questão em aberto. O estudo de café de Hertz et al. não começou perguntando se a corrente de pico voltamétrica se correlaciona com a preferência subjetiva de sabor; começou perguntando o que a corrente de pico voltamétrica mede, e a questão do sabor foi abordada posteriormente, quando a metodologia de medição se estabilizou.

Recomendamos a mesma abordagem para o áudio. Estabilizem a medição primeiro. Determinem sua interpretação física. Depois façam a pergunta da escuta.

Hertz, Nakahara e Boettcher se propuseram a fazer um café melhor por meio de uma xícara mais consistente. Concluíram seu artigo com a observação de que a consistência, e não a melhoria, era o objetivo -- que um arcabouço de medição que discrimina entre estados moleculares é, em si mesmo, um avanço independente de qualquer afirmação sobre qual estado é preferível.

Concordamos.

Uma medição que resolve diferenças entre condutores dependentes do substrato é, em si mesma, um avanço. Não exige que declaremos um vencedor entre substratos. Exige que admitamos que os substratos não são iguais.

O OFC e a prata e o YBCO não são iguais. A assinatura voltamétrica mostra que não são iguais. A questão de se essa diferença é audível é a questão para a sala de escuta. A questão de se ela é real está, submetemos, resolvida.

REFERÊNCIAS

- [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, abr 2026.
- [2] A. J. Bard and L. R. Faulkner, *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*, 2nd ed., Wiley, 2001.
- [3] P. Zanello, *Inorganic Electrochemistry: Theory, Practice and Applications*, 2nd ed., Royal Society of Chemistry, 2012.
- [4] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "Hemispheric bias in copper grain orientation: a metallurgical study of latitude-dependent conductor anisotropy," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 1, no. 1, 2020.
- [5] M. Ferro, C. Ohm, H. Park, L. Solder, "The latitude-agnostic measurement fallacy: on the systematic omission of geomagnetic variables in comparative cable assessment," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 7, no. 1, 2026.
- [6] C. Ohm, M. Ferro, "Cryogenic treatment of audio-grade copper conductors: grain refinement without hemispheric bias correction," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 2, no. 1, 2021.
- [7] L. Solder, R. Flux, "Superconducting audio interconnects: zero-resistance signal transmission via YBCO ceramic conductors at 77 K," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 4, no. 2, 2023.
- [8] E. R. Geddes and L. W. Lee, "Auditory perception of nonlinear distortion -- theory," apresentado na 115ª Convenção da Audio Engineering Society, Convention Paper 5890, out 2003.
- [9] J. G. Bednorz and 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, "APx555B specifications," <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.