



Universidade Federal do ABC
Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas
Trabalho de Graduação em Engenharia de Informação

Modelagem, simulação e implementação de um potenciostato portátil de baixo custo para aplicação ambiental

Vitória Costa Sombra

Santo André - SP, Novembro de 2025

Vitória Costa Sombra

Modelagem, simulação e implementação de um potenciostato portátil de baixo custo para aplicação ambiental

Trabalho de Graduação apresentado ao curso de Engenharia de Informação da Universidade Federal do ABC, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Informação.

Universidade Federal do ABC – UFABC

Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas

Programa de Graduação em Engenharia de Informação

Orientador: Katia Franklin Albertin Torres

Coorientador: Walter Silva Oliveira

Santo André - SP

Novembro de 2025

Vitória Costa Sombra

Modelagem, simulação e implementação de um potenciostato portátil de baixo custo para aplicação ambiental/ Vitória Costa Sombra. – Santo André - SP, Novembro de 2025-

59 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Katia Franklin Albertin Torres

Dissertação (Graduação) – Universidade Federal do ABC – UFABC

Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas

Programa de Graduação em Engenharia de Informação, Novembro de 2025.

1. potenciostato portátil. 2. metais pesados. 3. voltametria cíclica. 4. simulação eletrônica. 5. Arduino. 6. monitoramento ambiental. I. Katia Franklin Albertin Torres. II. Universidade Federal do ABC. III. Faculdade de Engenharia de Informação. IV. Modelagem, simulação e implementação de um potenciostato portátil de baixo custo para aplicação ambiental

CDU 02:141:005.7

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE INFORMAÇÃO

Ata de Defesa do Trabalho de Graduação em Engenharia de Informação da Universidade Federal do ABC

No dia **28 de novembro de 2025** reuniu-se a banca examinadora do trabalho apresentado como Trabalho de Graduação em Engenharia de Informação de **Vitória Costa Sombra**, intitulado: **“Modelagem, simulação e implementação de um potenciostato portátil de baixo custo para aplicação ambiental”**. Após a exposição oral, a aluna foi arguida pelos componentes da banca que se reuniram reservadamente, e decidiram atribuir o conceito final **A**.

Documento assinado digitalmente
 **KATIA FRANKLIN ALBERTIN TORRES**
Data: 01/12/2025 19:26:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientador
Profa. Dra. Katia Franklin Albertin Torres

Documento assinado digitalmente
 **DANIEL SCODELER RAIMUNDO**
Data: 01/12/2025 20:31:07-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Avaliador 1
Prof. Dr. Daniel Scodeler Raimundo

Documento assinado digitalmente
 **KENJI NOSE FILHO**
Data: 01/12/2025 22:00:12-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Avaliador 2
Prof. Dr. Kenji Nose Filho

*A Deus, que foi luz nos dias escuros, abrigo nas incertezas e o alicerce que me sustentou
até a realização deste propósito.*

Agradecimentos

Este Trabalho de Graduação foi desenvolvido com o apoio de diversas pessoas, tanto de forma direta quanto indireta, aos quais agradeço:

Aos meus pais, **Marlene e Elcias**, por acreditarem no poder da educação e investirem em mim desde sempre. Cada incentivo, renúncia e palavra de apoio foram essenciais para que eu chegasse até aqui.

Ao meu namorado, **Matheus**, por estar ao meu lado em todos os momentos. Obrigada por todo o suporte, paciência e ajuda durante a execução deste trabalho, sua crença constante em mim foi fundamental.

Aos meus **irmãos e amigos**, que são minha fonte constante de inspiração. Obrigada por me motivarem a seguir em frente, por acreditarem no meu potencial e por me lembrarem sempre de celebrar cada pequena vitória ao longo do caminho.

À minha orientadora, **professora Katia Franklin Albertin Torres**, e ao meu coorientador, **professor Walter Silva Oliveira**, pela paciência, dedicação e orientação cuidadosa que tornaram este projeto uma realidade. Agradeço também ao colega **João** que auxiliou nos experimentos com os potenciostatos comerciais com muita paciência e proatividade. Cada conselho, correção e incentivo contribuíram profundamente para o desenvolvimento deste trabalho e para o meu crescimento como estudante e profissional.

A todos os **professores e colegas presentes nesta graduação**, que, com seus ensinamentos, debates e amizade, tornaram essa jornada acadêmica muito mais rica e significativa.

Por fim, à **Universidade Federal do ABC (UFABC)**, por oferecer uma formação de excelência, pautada na integração entre ciência, tecnologia e sociedade. Agradeço por ter sido um espaço de descobertas, crescimento e oportunidades, onde pude me desenvolver não apenas como futura engenheira, mas também como cidadã crítica e consciente do meu papel no mundo.

Resumo

A contaminação ambiental por metais pesados representa um dos principais desafios da saúde pública e da sustentabilidade, exigindo métodos de monitoramento que conciliem precisão analítica e viabilidade econômica. Este trabalho apresenta o estudo, modelagem, simulação e validação experimental de um potenciostato portátil de baixo custo, baseado em microcontrolador, como alternativa aos equipamentos comerciais de alto custo utilizados em análises voltamétricas, com o objetivo de detectar e quantificar metais pesados no ambiente. O projeto foi estruturado a partir da compreensão teórica dos processos eletroquímicos, do funcionamento de potenciostatos comerciais e da simulação do circuito analógico em ambiente LTspice. Além das simulações, foi desenvolvido um protótipo físico capaz de realizar varreduras de voltametria cíclica, utilizando os mesmos eletrodos e solução de ferricianeto empregados nos ensaios realizados com os potenciostatos PGS-TAT302N e μ Stat 400 da Metrohm, possibilitando comparação direta entre os resultados. Os voltamogramas obtidos experimentalmente com o protótipo apresentaram coerência qualitativa com as formas de onda esperadas e com os dados comerciais, validando os princípios de controle de potencial e conversão corrente-tensão implementados. A análise comparativa de custos demonstrou que o protótipo proposto reduz em mais de 99% o investimento necessário em relação aos equipamentos comerciais, mantendo desempenho satisfatório para aplicações didáticas, portáteis e de monitoramento ambiental. O estudo evidencia ainda a relevância da Engenharia de Informação na integração entre hardware, software e instrumentação científica, reforçando o potencial de soluções acessíveis para a democratização das técnicas voltamétricas.

Palavras-chave: potenciostato portátil, metais pesados, voltametria cíclica, simulação eletrônica, Arduino, monitoramento ambiental.

Abstract

Environmental contamination by heavy metals represents one of the main challenges to public health and sustainability, demanding monitoring methods that combine analytical precision and economic feasibility. This work presents the study, modeling, simulation, and experimental validation of a low-cost portable potentiostat based on a microcontroller, as an alternative to high-cost commercial equipment used in voltammetric analyses, aiming to detect and quantify heavy metals in the environment. The project was structured from the theoretical understanding of electrochemical processes, the operation of commercial potentiostats, and the simulation of the analog circuit in the LTspice environment. In addition to simulations, a physical prototype capable of performing cyclic voltammetry scans was developed and tested using the same electrodes and ferricyanide solution applied in experiments conducted with Metrohm potentiostats PGSTAT302N and μ Stat 400, enabling direct comparison between systems. The voltammograms obtained with the prototype showed qualitative agreement with the expected electrochemical behavior and with commercial data, validating the implemented potential-control and current-to-voltage conversion stages. Cost comparison analysis demonstrated that the proposed system reduces investment by more than 99% compared to commercial equipment while maintaining satisfactory performance for educational use, portable applications, and environmental monitoring. This work also highlights the relevance of Information Engineering in integrating hardware, software, and scientific instrumentation, reinforcing the potential of accessible technologies for the democratization of voltammetric techniques.

Keywords: portable potentiostat, heavy metals, cyclic voltammetry, circuit simulation, Arduino, environmental monitoring.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Número estimado de crianças por continente com níveis de chumbo no sangue com valor igual ou superior a 5 $\mu\text{g}/\text{dL}$ em 2020.	2
Figura 2 – Um espectrômetro de absorção atômica com chama típico que inclui: 1. Sistema de introdução da amostra; 2. Queimador (chama) e seus suprimentos de gás: ar-acetileno ou óxido nitroso-acetileno; 3. Fonte de luz, geralmente uma lâmpada de cátodo oco (HCL); 4. Monocromador (componentes ópticos); 5. Detector óptico (tubo fotomultiplicador ou PMT); 6. Controle e análise por computador.	3
Figura 3 – Principais componentes de um instrumento de ICP-MS na ordem em que listados na explicação anterior.	4
Figura 4 – Potenciostato/Galvanostato de ponta Autolab PGSTAT302N comercializado pela Metrohm.	6
Figura 5 – Potenciostato portátil μStat 400 da Metrohm.	7
Figura 6 – Representação gráfica da voltametria por varredura linear: a) Variação do potencial em função do tempo; b) Variação da corrente em função do potencial.	10
Figura 7 – Representação gráfica da voltametria cíclica: a) Variação do potencial em função do tempo; b) Voltamograma resultante (I/E).	11
Figura 8 – Representação gráfica da análise de pulso diferencial. (a) Variação do potencial em função do tempo; (b) Resposta da corrente em função do potencial em que $I(1)$ é a corrente antes da aplicação do pulso e $I(2)$ a corrente medida ao final do pulso.	11
Figura 9 – Representação gráfica da voltametria de onda quadrada. (a) Evolução do potencial com o tempo; (b) Voltamograma resultante de I/E em que $I(1)$ é a corrente ao final do pulso direto e $I(2)$ a corrente medida ao final do pulso reverso.	12
Figura 10 – Voltamograma cíclico representando a variação da corrente em função do potencial.	14
Figura 11 – Circuito analógico do potenciostato, em evidência (A) amplificador somador; (B) célula eletroquímica e o contra amplificador; e (C) amplificador de transimpedância.	18
Figura 12 – Desenho esquemático completo do potenciostato.	20
Figura 13 – Eletrodo comercial de carbono impresso em serigrafia.	23
Figura 14 – Montagem experimental. (a) μStat 400; (b) PGSTAT302N.	24
Figura 15 – Voltamograma cíclico. (a) μStat 400; (b) PGSTAT302N.	25
Figura 16 – Circuito do potenciostato simulado no software <i>LTspice</i>	26

Figura 17 – Resposta temporal da tensão na modulação PWM com <i>duty cycle</i> de 25%.	27
Figura 18 – Caracterização da tensão na entrada do amplificador somador em função do tempo.	28
Figura 19 – Tensão de entrada na célula eletroquímica.	29
Figura 20 – Circuito utilizado para a simulação da célula eletroquímica.	30
Figura 21 – Corrente que passa através dos resistores da célula eletroquímica.	30
Figura 22 – Sinal de saída do potenciostato, resposta temporal completa.	31
Figura 23 – PWL para refletir perfil do potencial de varredura do experimento com potenciostato comercial.	32
Figura 24 – Tensão na modulação PWM com <i>duty cycle</i> de 50%.	33
Figura 25 – (a) Tensão digital gerada pelo PWM; (b) Tensão analógica resultante após o processamento pelo amplificador somador.	34
Figura 26 – (a) Corrente simulada na célula eletroquímica; (b) Tensão equivalente obtida após a conversão pelo amplificador de transimpedância.	35
Figura 27 – Esquemático completo do potenciostato com valores reais dos componentes utilizados no experimento.	36
Figura 28 – Montagem do protótipo proposto de um potenciostato portátil.	38
Figura 29 – (a) Sinal PWM e respostas digital e analógica para o potencial de aproximadamente 0 V; (b) Leitura correspondente obtida com o multímetro digital.	42
Figura 30 – (a) Sinal PWM e respostas digital e analógica para o potencial de aproximadamente $-0,4$ V, evidenciando a redução do valor médio; (b) Medição correspondente realizada com o multímetro digital.	43
Figura 31 – (a) Sinal PWM e respostas digital e analógica para o potencial de aproximadamente 0,7 V, mostrando o aumento do valor médio aplicado; (b) Leitura associada obtida com o multímetro digital.	44
Figura 32 – Voltamograma cíclico gerado a partir do protótipo.	45

Lista de tabelas

Tabela 1	–	Valores dos componentes utilizados no experimento do potenciostato .	20
Tabela 2	–	Limites de corrente e voltagem para o experimento conduzido	21
Tabela 3	–	Parâmetros utilizados para voltametria cíclica com potenciostato real .	22
Tabela 4	–	Relação entre a tensão definida na fonte PWL e a tensão convertida pelo amplificador somador.	31
Tabela 5	–	Lista de materiais para fabricação de uma unidade do potenciostato deste projeto.	37
Tabela 6	–	Comparativo entre os valores de tensão e tempo obtidos para os poten- ciostatos μ Stat 400 e PGSTAT302N.	48

Lista de abreviaturas e siglas

UFABC	Universidade Federal do ABC
CDC	Centers for Disease Control and Prevention (EUA)
AAS	Atomic Absorption Spectroscopy (Espectroscopia de Absorção Atômica)
ICP-MS	Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (Espectrometria de Massas com Plasma Indutivamente Acoplado)
ICP-OES	Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Acoplado Indutivamente)
HCL	Hollow Cathode Lamp (Lâmpada de Cátodo Oco)
PMT	Photomultiplier Tube (Tubo Fotomultiplicador)
PWM	Pulse Width Modulation (Modulação por Largura de Pulso)
DAC	Digital-to-Analog Converter (Conversor Digital–Analógico)
ADC	Analog-to-Digital Converter (Conversor Analógico–Digital)
CE	Counter Electrode (Contraeletrodo)
ER	Eletrodo de Referência
ET	Eletrodo de Trabalho (às vezes “WE”, de <i>Working Electrode</i>)
VC	Voltametria Cíclica
DPV	Differential Pulse Voltammetry (Voltametria de Pulso Diferencial)
SWV	Square Wave Voltammetry (Voltametria de Onda Quadrada)
ASV	Anodic Stripping Voltammetry (Voltametria de Redissolução Anódica)
µStat 400	Potenciostato/Galvanostato portátil da Metrohm DropSens
PGSTAT302N	Potenciostato/Galvanostato Autolab (Metrohm)
LTspice	Software de simulação de circuitos SPICE

Lista de símbolos

V_0	Tensão de saída do amplificador somador (V)
V_{in}	Tensão de entrada (V)
V_{b1}	Tensão de bias/offset no somador (V)
R_2, R_3, R_4, R_6	Resistores do circuito (Ω)
i_{in}	Corrente de entrada no conversor corrente-tensão (A)
V_{cvc}	Tensão de saída do conversor corrente-tensão (V)
E_w	Largura da janela de potencial (V)
RC_t	Constante de tempo do filtro RC do DAC por PWM (s)
v_{max}	Taxa de varredura máxima (V s^{-1})
f_{PWM}	Frequência do sinal PWM (Hz)
D	<i>Duty cycle</i> do PWM (adimensional)
E_{cond}	Potencial na condição inicial (<i>conditioning</i>) (V)
t_{cond}	Tempo de condição inicial (s)
E_{begin}	Potencial inicial da varredura (V)
$E_{\text{vtx1}}, E_{\text{vtx2}}$	Vértices (limites) de potencial (V)
E_{step}	Incremento de potencial entre pontos (V)
S_{rate}	<i>Scan rate</i> (V s^{-1})
n_{scans}	Número de ciclos de varredura (—)

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Potenciostato	6
1.2	Voltametria	8
1.2.1	Voltametria Cíclica e Análise de Metais Pesados	13
1.3	Objetivos	15
2	METODOLOGIA	17
2.1	Projeto do Potenciostato	17
2.2	Caracterização do Desempenho de Potenciostatos Reais	21
2.3	Simulação	26
2.3.1	Parâmetros da literatura	26
2.3.1.1	Modulação por Largura de Pulso (PWM)	27
2.3.1.2	Controle de Potencial para Voltametria Cíclica	28
2.3.1.3	Célula Eletroquímica	29
2.3.1.4	Tensão de Saída para Interfaceamento com o Arduino	30
2.3.2	Parâmetros do experimento com potenciostatos reais	31
2.4	Protótipo do potenciostato baseado em um microcontrolador	36
2.4.1	Avaliação Experimental do Protótipo	39
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
3.1	Análise comparativa de custos	46
3.2	Simulação versus Bibliografia	46
3.3	Simulação versus Metrohm	47
3.4	Metrohm versus Protótipo	48
3.5	Síntese dos resultados e obstáculos superados	49
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
	REFERÊNCIAS	53
	APÊNDICES	56
	APÊNDICE A – CODIGO-FONTE DO MICROCONTROLADOR PARA VARREDURA DE POTENCIAL	57

APÊNDICE B – CODIGO PYTHON UTILIZADO PARA A AQUISIÇÃO DOS DADOS	59
---	----

1 Introdução

A contaminação do solo e da água por metais pesados é um problema atual de grande relevância, causando sérios riscos à saúde humana e impactos econômicos significativos. Atividades industriais, agrícolas e de mineração são uns dos responsáveis pela liberação desses metais no meio ambiente, com destaque para o chumbo (Pb), cádmio (Cd), mercúrio (Hg) e arsênio (As), que são altamente tóxicos e apresentam efeitos prejudiciais ao sistema nervoso central, fígado, rins, ossos, dentes e pele (TCHOUNWOU et al., 2012).

No Brasil, as principais fontes de contaminação estão relacionadas ao lixo urbano, indústria metalúrgica e agricultura. O lixo doméstico contém metais pesados, como cobre (Cu), chumbo (Pb) e zinco (Zn), que são liberados na atmosfera quando incinerados de forma inadequada. A indústria metalúrgica, por sua vez, produz anualmente uma grande quantidade de metais pesados, representando um risco para os ecossistemas aquáticos quando não tratados corretamente. A agricultura também contribui para a contaminação devido ao uso de fertilizantes e pesticidas contendo metais pesados, prejudicando a qualidade do solo, ar e água utilizados na produção de alimentos (MATTOS et al., 2009; TORRES, 2023).

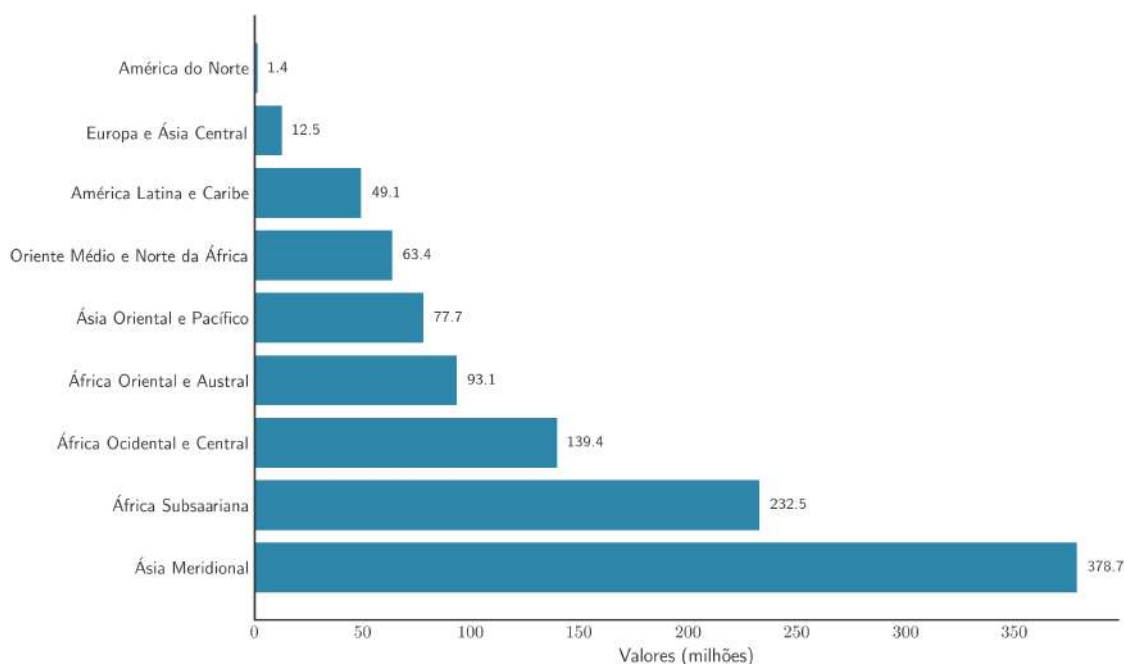
Crianças são particularmente vulneráveis à exposição ao chumbo, pois estão em estágios críticos de desenvolvimento. A absorção do chumbo em crianças é maior do que em adultos, resultando em maior retenção do metal no organismo. A exposição crônica ao chumbo pode causar danos ao sistema nervoso, afetando o desenvolvimento neurocognitivo, a função cognitiva, o comportamento e a saúde mental. Estudos também indicam associações entre exposição ao chumbo e problemas de aprendizado, déficits de atenção, redução do QI e distúrbios do desenvolvimento (MATTOS et al., 2009; TORRES, 2023).

Para proteger a saúde pública, são estabelecidos valores considerados aceitáveis para exposição ao chumbo. Um exemplo é o valor de referência atual do Center for Disease Control and Prevention (CDC) dos Estados Unidos, que estabelece que níveis de chumbo no sangue abaixo de 5 microgramas por decilitro ($\mu\text{g}/\text{dL}$) são desejáveis. No entanto, é importante ressaltar que não há um nível seguro de exposição ao chumbo. Estudos recentes têm indicado que até mesmo baixas concentrações de chumbo podem ter efeitos adversos na saúde, especialmente em crianças. Por esta razão o CDC agora considera como aceitável $3,5 \mu\text{g}/\text{dL}$ o nível de chumbo no sangue em crianças, deste modo, caso exames mostrem níveis entre $3,5$ e $5 \mu\text{g}/\text{dL}$ é possível mitigar efeitos na saúde, bem como, remover ou controlar as fontes de exposição (Centers for Disease Control and Prevention, 2021).

Várias fontes estão associadas à exposição ao chumbo, incluindo emissões indus-

triais, poeira doméstica, solo contaminado, água e alimentos. A proximidade de áreas industriais, obras de demolição, tráfego intenso e residências com pinturas em mau estado de conservação são fatores de risco importantes. Populações socioeconomicamente desfavorecidas geralmente estão mais expostas a essas fontes de contaminação, como pode ser observado na Figura 1 (MURPHY, 2021).

Figura 1 – Número estimado de crianças por continente com níveis de chumbo no sangue com valor igual ou superior a 5 µg/dL em 2020.



Fonte: Adaptado de UNICEF; McCarthy et al. (2020, apud Murphy (2021)).

A detecção e o monitoramento dos níveis de metais pesados na água são essenciais para garantir a segurança da população e a qualidade dos alimentos produzidos. Atualmente, técnicas analíticas como a Espectroscopia de Absorção Atômica (ASS) e a Espectrometria de Massas com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS) são utilizadas para a detecção desses metais, no entanto, são métodos de alto custo e exigem profissionais qualificados para operá-los. Diante disso, é necessário o desenvolvimento de técnicas mais acessíveis e de menor custo (TORRES, 2023).

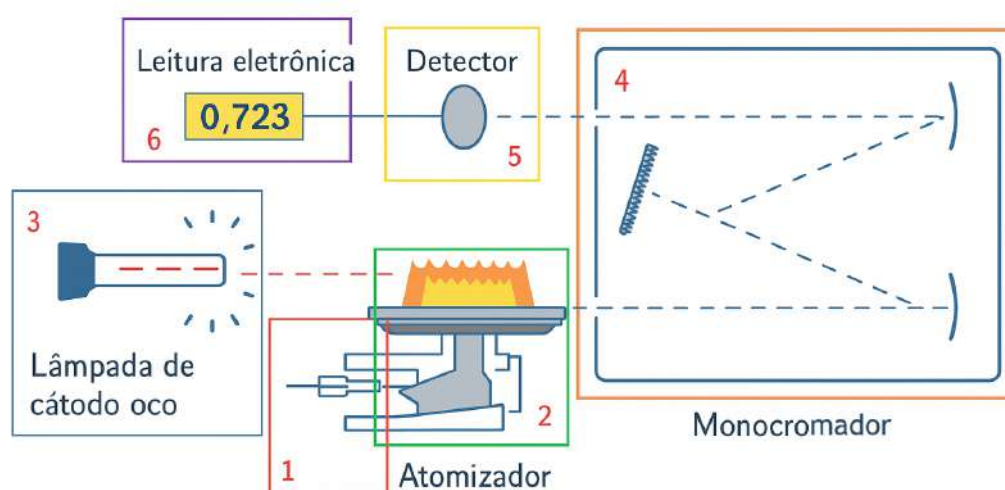
A espectroscopia de absorção atômica (AAS), desenvolvida em 1952 e que passou a ser comercializada na década de 1960, é uma técnica analítica utilizada para determinar a concentração de certos elementos em uma amostra. A técnica baseia-se no princípio de que átomos podem absorver luz em um comprimento de onda específico e único. Quando esse comprimento de onda é fornecido, a energia é absorvida pelo átomo, conduzindo os elétrons do estado fundamental para um estado excitado. A quantidade de luz absorvida é medida, permitindo o cálculo da concentração do elemento na amostra (Agilent Technologies, s.d.a).

Para realizar essa análise, é necessário um espectrômetro de absorção atômica

(AAS) cujos componentes estão ilustrados na Figura 2, seu funcionamento é dado da seguinte maneira:

1. Criação de átomos em estado fundamental: um calor (chama) é usado para criar um estado estável de átomos dissociados no estado fundamental.
2. Passagem da luz de comprimento de onda específico: a luz de um comprimento de onda específico é passada pela chama, correspondente à energia necessária para excitar os elétrons de um elemento específico.
3. Medição da absorção de luz: a quantidade de luz absorvida pelos átomos ao se moverem para o estado excitado é medida.
4. Cálculo da concentração: a absorvância medida é usada para calcular a concentração do elemento na solução, baseada em um gráfico de calibração.

Figura 2 – Um espectrômetro de absorção atômica com chama típico que inclui: 1. Sistema de introdução da amostra; 2. Queimador (chama) e seus suprimentos de gás: ar-acetileno ou óxido nitroso-acetileno; 3. Fonte de luz, geralmente uma lâmpada de cátodo oco (HCL); 4. Monocromador (componentes ópticos); 5. Detector óptico (tubo fotomultiplicador ou PMT); 6. Controle e análise por computador.



Fonte: Adaptado de Agilent. (apud Agilent Technologies (s.d.a)).

Apesar de sua confiabilidade e simplicidade operacional, a análise por AAS não consegue identificar múltiplos elementos simultaneamente, o que pode tornar o processo demorado e ineficiente para amostras contendo vários elementos. Além disso, o custo inicial de aquisição do equipamento é elevado, juntamente com os custos contínuos de manutenção e calibração, o que dificulta sua aquisição em laboratórios com orçamento limitado. A sensibilidade e os limites de detecção da AAS também são restritos, tornando-a menos

adequada para amostras com concentrações extremamente baixas de elementos ou em matrizes complexas (Buck Scientific, s.d.).

Do mesmo modo, a Espectrometria de Massas com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS) é uma técnica analítica usada para identificar e quantificar elementos em uma amostra. Utiliza um plasma de argônio (ICP) para ionizar a amostra e, em seguida, mede os íons gerados com um espectrômetro de massas (MS). Comparada à espectrometria de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES), a ICP-MS oferece limites de detecção muito mais baixos, tornando-a ideal para a análise de traços de elementos (Agilent Technologies, s.d.b).

Para a análise em questão, é necessário um espectrômetro de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS) com os principais componentes ilustrados na Figura 3, estes funcionam como listado a seguir:

1. Sistema de Introdução de Amostra: Forma uma névoa fina da amostra líquida.
2. Plasma (ICP): Ioniza os elementos na amostra.
3. Interface: Extrai os íons para o sistema de vácuo.
4. Lente Iônica: Foca os íons e separa-os dos sinais de fundo.
5. Célula de Colisão/Reação (CRC): Resolve íons analisados dos íons interferentes.
6. Espectrômetro de Massas (MS): Filtra os íons analisados por massa.
7. Detector de Multiplicador de Elétrons.
8. Processamento de Dados.

Figura 3 – Principais componentes de um instrumento de ICP-MS na ordem em que listados na explicação anterior.



Fonte: Adaptado de Agilent. (apud Agilent Technologies (s.d.b)).

Apesar de sua alta sensibilidade e capacidade de analisar múltiplos elementos rapidamente, a ICP-MS apresenta algumas desvantagens significativas. Primeiro, o equipamento é de alto custo, tanto em termos de investimento inicial quanto de manutenção

contínua. Além disso, operar e manter um ICP-MS exige técnicos altamente qualificados, aumentando ainda mais os custos operacionais. A ICP-MS também enfrenta problemas com interferências de massa, como interferências isobáricas e íons com carga dupla, que podem afetar a precisão dos resultados. Frequentemente, é necessário utilizar sistemas de triplo quadrupolo para separar essas interferências de maneira eficaz. Outro problema é a suscetibilidade a efeitos de memória e *carryover*¹, onde resíduos de análises anteriores podem afetar as leituras subsequentes devido à alta sensibilidade da técnica. Por fim, todos os componentes do laboratório, incluindo reagentes, água e vidraria, devem ser de alta pureza e extremamente limpos para evitar contaminação inadvertida das amostras. Essas complexidades tornam a ICP-MS uma técnica ainda menos acessível (MCMAHON, 2021).

Nesse contexto, as técnicas voltamétricas, como a voltametria cíclica, despontam como uma alternativa promissora. A voltametria cíclica é amplamente utilizada para obter informações qualitativas sobre os processos eletroquímicos, permitindo a identificação de compostos em solução. Essa técnica consiste em aplicar um potencial que é varrido linearmente no eletrodo de trabalho (sensor), alternando entre regiões catódicas e anódicas. Durante a varredura, a corrente gerada é registrada, fornecendo informações sobre a presença e concentração de elementos, por exemplo, de metais pesados (PACHECO et al., 2013).

Para o desenvolvimento de sensores de metais pesados, a utilização de nanomateriais como matriz sensorial (eletrodo de trabalho) tem se mostrado promissora. Os nanomateriais, como nanopartículas, nanofios e nanotubos, possuem uma grande área superficial, o que aumenta a capacidade de detecção eletroquímica de íons pesados. Essa abordagem permite a identificação rápida e eficiente de metais pesados em amostras de água, saliva, urina e sangue. Com isso, desenvolver sensores, portáteis, baseados em nanomaterias, tem se tornado bastante atrativo (TORRES, 2023).

Aliada a proposta dos sensores baseados em nanomateriais, portáteis, surge a necessidade do instrumento de leitura desses sensores. Diante dos desafios apresentados e da importância de um monitoramento eficiente da presença de metais pesados na água, propõe-se o desenvolvimento de um estudo, simulação e construção de um circuito que funcione como um potenciostato portátil capaz de verificar os níveis desses metais e gerar gráficos de voltametria cíclica para uma análise qualitativa mais precisa. Essa tecnologia proporcionará maior agilidade, acessibilidade e menor custo para o monitoramento e controle da contaminação por metais pesados, contribuindo para a proteção da saúde da população e a produção de alimentos seguros.

¹ Tradução: "arrastamento", contaminação de uma amostra por resíduos da análise anterior.

1.1 Potenciostato

Um potenciostato é um dispositivo essencial em técnicas eletroquímicas, cujo funcionamento consiste em controlar a diferença de potencial entre um eletrodo de trabalho e um eletrodo de referência, enquanto mede a corrente que flui entre o eletrodo de trabalho e um eletrodo auxiliar. Este equipamento é fundamental em análises químicas e bioquímicas, sendo amplamente utilizado em pesquisas de corrosão, no desenvolvimento de sensores e no estudo de reações redox. As reações redox correspondem a processos de oxidação e redução que envolvem a transferência de elétrons entre espécies químicas. Durante a oxidação, uma espécie perde elétrons, enquanto na redução outra espécie os recebe, e essa troca eletrônica produz correntes mensuráveis que refletem a atividade eletroquímica do sistema. Dessa forma, o controle preciso do potencial e a medição da corrente proporcionados pelo potenciostato são indispensáveis para a caracterização e a quantificação desses fenômenos.

Os potenciostatos comerciais, embora indispensáveis para análises eletroquímicas específicas, são inacessíveis em parâmetros críticos como custo elevado, dimensões excessivas, baixa customização, complexidade operacional e dificuldades de manutenção e suporte técnico. Como uma das referências de equipamento será utilizado o potenciostato Autolab PGSTAT302N da Metrohm ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Potenciostato/Galvanostato de ponta Autolab PGSTAT302N comercializado pela Metrohm.



Fonte: Metrohm AG (2025a).

Trata-se de um dispositivo eletrônico disponível na Universidade Federal do ABC, utilizado, por exemplo, para desempenhar a análise de espectroscopia de impedância eletroquímica, e o qual pretende-se utilizar para a verificação de precisão das análises realizadas pelo potenciostato portátil aqui construído. Por meio de um orçamento fornecido pela própria Metrohm (comunicação pessoal, jun. 2025), o custo desse equipamento é de R\$600.000,00.

O equipamento possui uma faixa de varredura de potencial que se estende de -10 a 10 V, com limite operacional de tensão aplicada de ± 30 V. Em relação à corrente, apresenta uma faixa de operação de ± 2 A, operando em nove escalas de corrente que cobrem de 10 nA a 1 A. O ajuste de sensibilidade do sistema (automático ou manual) garante precisão em diferentes níveis do sinal. É um instrumento sem integração analógica e com a possibilidade de coordenação multicanais, com dimensões 52 cm de largura, 16 cm de altura e 42 cm de profundidade (Metrohm AG, 2025a).

Como alternativa portátil para referenciar a simulação e a projeção aqui propostas, o modelo μ Stat 400 Bipotentiostat/Galvanostat da Metrohm (Figura 5) apresenta características intermediárias: opera com faixa de potencial de ± 4 V e corrente máxima de ± 40 mA, sendo alimentado por bateria de íon-lítio com comunicação via USB e wireless. Embora significativamente mais acessível que o Autolab PGSTAT302N, com custo aproximado de R\$80.000,00 (comunicação pessoal, jun. 2025), ainda representa um investimento considerável para muitas instituições (Metrohm AG, 2025b).

Figura 5 – Potenciostato portátil μ Stat 400 da Metrohm.



Fonte: Metrohm AG (2025b).

Após apresentar esses dois modelos de potenciostatos comerciais, constata-se que o primeiro apresenta dimensões consideráveis, que limitam sua portabilidade, e ambos possuem custo elevado, que dificultam sua aquisição por grupos de pesquisadores que possuem orçamento limitado. Com isso, a necessidade de alternativas mais acessíveis é a base em que o presente projeto foi estruturado.

Dessa forma, o potenciostato portátil desenvolvido neste trabalho utiliza uma plataforma baseada em Arduino e componentes de baixo custo, e surge com a proposta de aplicações em campo que demandam análises rápidas de metais pesados, mantendo uma precisão aceitável para fins de monitoramento ambiental. Embora não alcance a performance absoluta do Autolab em todos os parâmetros, seu design compacto, custo

consideravelmente menor e capacidade de fornecer dados qualitativos e semiquantitativos confiáveis o tornam uma ferramenta valiosa para situações em que a portabilidade, o custo-benefício e a simplicidade operacional são fatores determinantes.

1.2 Voltametria

A voltametria é uma técnica eletroquímica amplamente utilizada para a análise de espécies químicas em solução. Ela permite a determinação de informações eletroquímicas importantes, como potenciais de pico, correntes de pico e comportamento redox. Ao longo dos anos, a voltametria evoluiu significativamente, resultando em diferentes variantes e técnicas que são aplicadas em diversas áreas da química analítica e eletroquímica.

Os estudos sobre eletroquímica tiveram seu início no final do século XVIII na Itália, com as descobertas de Luigi Galvani e Alessandro Volta. Galvani observou que os músculos de um sapo se contraíam ao tocar com lâminas metálicas em suas terminações nervosas, o que levou à compreensão da corrente elétrica. Anos depois, Alessandro Volta descobriu que ao unir placas de zinco e prata por uma pasta e mergulhá-las em uma solução salina, um fluxo de energia era observado. No entanto, Volta inicialmente considerou que esse fluxo era resultado apenas do contato entre as placas metálicas, sem reconhecer o papel essencial da solução salina. Somente em 1834, Michael Faraday estabeleceu as leis estequiométricas da eletroquímica, elucidando o papel fundamental do eletrólito nos processos relacionados à pilha (PACHECO et al., 2013).

A partir desses avanços iniciais, as técnicas voltamétricas começaram a ser desenvolvidas para a análise e caracterização de espécies químicas em solução. A voltametria clássica, também conhecida como voltametria de corrente contínua ou polarografia, foi a primeira técnica voltamétrica desenvolvida. No entanto, essa técnica apresentava limitações em termos de sensibilidade e resolução. Para superar essas limitações, surgiram técnicas voltamétricas mais avançadas, como a voltametria de pulso diferencial (DPV) e a voltametria de onda quadrada (SWV) (PACHECO et al., 2013).

Essas técnicas permitiram melhorar a sensibilidade e a resolução da análise eletroquímica. No campo do controle de qualidade, a voltametria desempenha um papel crucial na análise de produtos farmacêuticos, alimentícios e químicos, permitindo a determinação precisa de compostos ativos, aditivos e contaminantes em diversas amostras (ROCHA; PEREIRA-FILHO; NÓBREGA, 2009). Além disso, a voltametria é amplamente utilizada em estudos ambientais para monitorar a presença de poluentes e metais pesados em corpos d'água, solos e atmosfera, contribuindo para a proteção do meio ambiente (KERAMARI; KARASTOGIANNI; GIROUSI, 2023). Na análise de combustíveis, a voltametria é essencial para detectar aditivos e contaminantes em gasolina, diesel e outros combustíveis, garantindo sua qualidade e segurança (SANTOS et al., 2012).

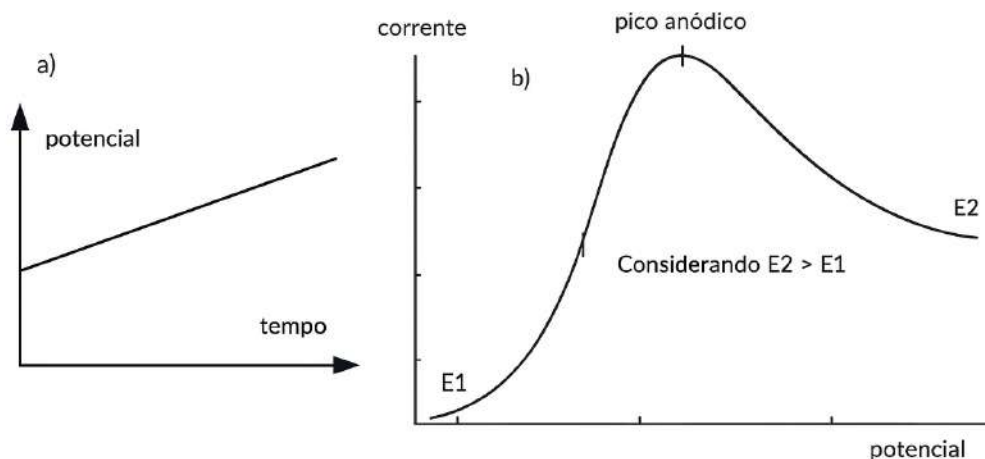
A versatilidade da voltametria é evidente em várias outras áreas, como eletrocatalise, estudos de reatividade eletroquímica, desenvolvimento de sensores e biossensores, entre outros. Sua utilização se estende desde laboratórios de pesquisa acadêmicos até a indústria, desempenhando um papel fundamental no desenvolvimento de novos materiais e processos. Com avanços contínuos em instrumentação, materiais e técnicas analíticas, a voltametria continua a evoluir, oferecendo perspectivas emocionantes para a detecção e caracterização de espécies químicas.

Como a usabilidade da voltametria se estende a muitas áreas, existem diferentes tipos desta técnica, cada um com suas características e aplicações distintas, que são selecionadas com base nos objetivos da análise e nas propriedades das espécies químicas de interesse. Inicialmente, será apresentada a Voltametria/Polarografia Clássica ou de Corrente Contínua, que atualmente é considerada uma técnica limitada por não ser capaz de determinar espécies com concentrações abaixo de 10^{-4} a 10^{-5} mol L⁻¹, sendo que, hoje em dia, a necessidade de especificidade para análise de amostras seria em torno de 10^{-12} mol L⁻¹. Quando um potencial é aplicado a um microeletrodo, ocorre o carregamento e descarregamento da dupla camada elétrica, resultando em uma corrente capacitiva. Além disso, há uma corrente faradaica devido a impurezas no eletrólito e ao oxigênio dissolvido. A corrente capacitiva é a principal componente da corrente de fundo, limitando a sensibilidade da técnica. A polarografia clássica apresenta um baixo limite de detecção devido à dificuldade em distinguir a corrente faradaica da corrente de fundo quando a concentração da substância a ser determinada atinge níveis baixos (PACHECO et al., 2013).

A fim de melhorar a sensibilidade da técnica a partir da melhor discriminação dessas correntes, veio a Voltametria de Varredura Linear ou Cronoamperometria de Varredura de Potencial Linear, neste caso o potencial aplicado ao eletrodo de trabalho varia linearmente com o tempo, vide Figura 6(a), aqui a velocidade de varredura pode ser relativamente alta, mas ainda sim a técnica possui baixa sensibilidade, cerca de 10^{-6} mol L⁻¹. Na resposta de corrente (Figura 6(b)), a espécie começa a oxidar/reduzir quando o potencial se aproxima de E_1 , a corrente cresce rapidamente até um *pico* e, em seguida, decai porque o fluxo de moléculas chega ao eletrodo mais devagar do que é consumido. Assim, o pico marca a transição para regime controlado por difusão durante a varredura $E_1 \rightarrow E_2$ (SCHOLZ, 2015).

Em contrapartida, a Voltametria Cíclica é uma das técnicas mais utilizadas para adquirir informações qualitativas sobre os processos eletroquímicos. É uma técnica eficaz que rapidamente fornece informações sobre a termodinâmica de processos redox, a cinética de reações de transferência de elétrons heterogêneas e reações químicas acopladas a processos adsorptivos. Esta técnica é altamente sensível, capaz de detectar analitos em concentrações muito baixas. Eletrodos de carbono vítreo modificados podem detectar

Figura 6 – Representação gráfica da voltametria por varredura linear: a) Variação do potencial em função do tempo; b) Variação da corrente em função do potencial.



Fonte: Adaptado de Pacheco et al. (2013).

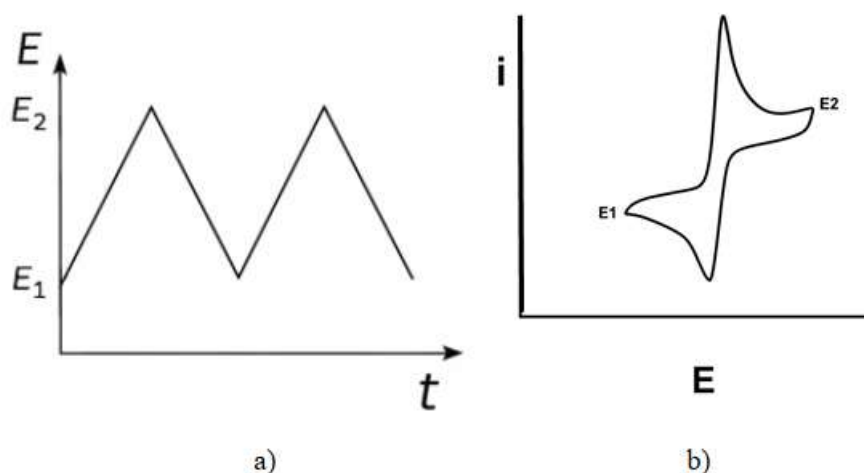
concentrações de até $10^{-7} \text{ mol L}^{-1}$ (CARVALHO; GOUVEIA-CARIDADE; BRETT, 2010), e quando modificados com nanotubos de carbono, a sensibilidade pode atingir $10^{-9} \text{ mol L}^{-1}$ (KRAJEWSKA; RADECKI; RADECKA, 2008). Esses eletrodos são utilizados em várias aplicações, como a detecção de explosivos e pesticidas, devido à sua alta precisão.

Neste experimento voltamétrico, o potencial é inicialmente aplicado em um valor onde não ocorre redução. À medida que o potencial é varrido para valores mais negativos, ocorre a redução do composto, gerando um pico de corrente proporcional à sua concentração (Figura 7(b)). Quando o potencial atinge um valor onde a redução cessa, ele é varrido de volta ao valor inicial, como demonstrado na Figura 7(a). Em reações reversíveis, os produtos gerados na varredura direta são oxidados na varredura inversa, resultando em um pico simétrico. O voltamograma gerado depende do mecanismo redox do composto, tornando a voltametria cíclica uma ferramenta valiosa para estudos mecanísticos (PACHECO et al., 2013; SCHOLZ, 2015).

Posteriormente, a fim de sincronizar os pulsos aplicados e reduzir assim a contribuição capacitiva, que, diferente das outras voltametrias abordadas, aqui se extingue mais rapidamente que a componente faradáica, ocasionando, deste modo, em uma redução do ruído que interfere na análise das amostras surgiram as Técnicas de Pulso: Voltametria de pulso diferencial e Voltametria de onda quadrada.

Na voltametria de pulso diferencial, pulsos de amplitude fixos sobrepostos a uma rampa de potencial crescente são aplicados ao eletrodo de trabalho (Figura 8(a)). Há a medição da corrente duas vezes, uma antes da aplicação do pulso e outra ao final do

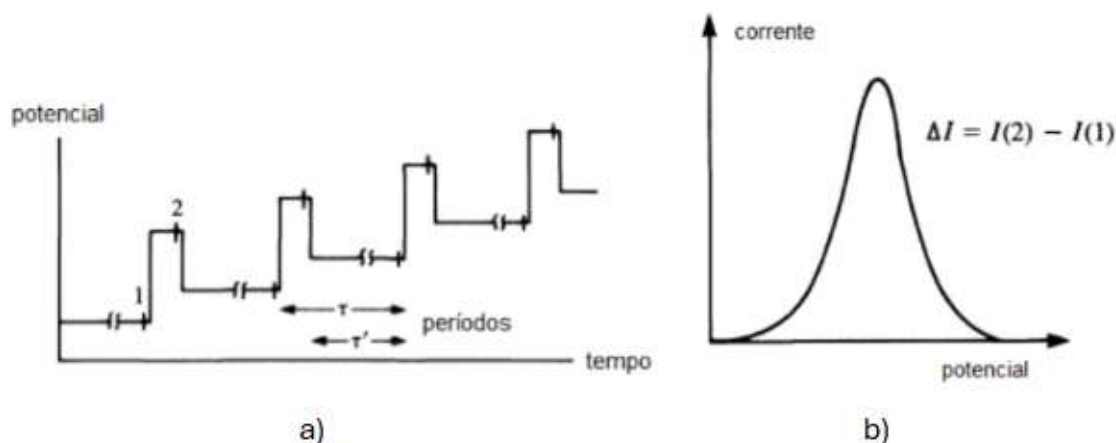
Figura 7 – Representação gráfica da voltametria cíclica: a) Variação do potencial em função do tempo; b) Voltamograma resultante (I/E).



Fonte: Adaptado de Pacheco et al. (2013).

pulso. A primeira corrente é instrumentalmente subtraída da segunda, e a diferença das correntes é plotada versus o potencial aplicado, como pode ser observado na Figura 8(b) (PACHECO et al., 2013; SCHOLZ, 2015).

Figura 8 – Representação gráfica da análise de pulso diferencial. (a) Variação do potencial em função do tempo; (b) Resposta da corrente em função do potencial em que $I(1)$ é a corrente antes da aplicação do pulso e $I(2)$ a corrente medida ao final do pulso.



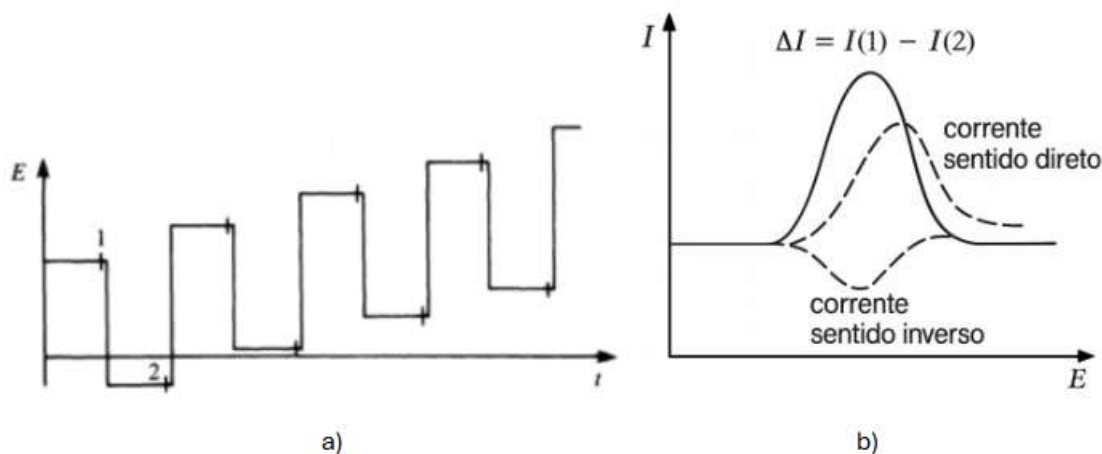
Fonte: Adaptado de Pacheco et al. (2013).

À medida que se aplica o pulso, ocorre um acréscimo da contribuição da corrente capacitiva e da corrente faradáica, entretanto há a diminuição exponencial da primeira, enquanto a segunda diminui de forma linear, assim, dependendo do momento a ser realizada a segunda leitura, faz-se a medida da corrente total a um valor em que a contribuição da

corrente capacitiva pode ser desconsiderada. Esta correção de correntes, possibilitada pelo modo de pulso diferencial, permite um limite de sensibilidade na detecção da ordem de $10^{-8} \text{ mol L}^{-1}$ (PACHECO et al., 2013).

Por outro lado, a voltametria de onda quadrada, como instrui o nome, consiste na sobreposição de uma onda quadrada simétrica de amplitude conhecida a uma rampa de potencial na forma de escada com amplitude, largura e período conhecidos (Figura 9(a)), tal sobreposição é aplicada ao eletrodo de trabalho. Nesta técnica, a corrente é amostrada duas vezes: uma ao final do pulso direto, que coincide com a direção da varredura, e outra ao final do pulso reverso, que ocorre no meio do "degrau" da onda, em direção oposta à varredura, como ilustra a Figura 9(b). Esta dupla amostragem minimiza a contribuição da corrente capacitiva, resultando em um voltamograma que representa a diferença entre essas duas correntes em função do potencial aplicado. A sensibilidade dessa técnica é comparável à da voltametria de pulso diferencial, mas com a vantagem de uma aquisição de dados mais rápida. Frequências de 1 a 100 ciclos por segundo permitem varreduras de potencial extremamente rápidas, de 100 a 1000 mV/s , reduzindo o tempo de análise de minutos para segundos, sem perda de resolução dos picos (PACHECO et al., 2013; SCHOLZ, 2015).

Figura 9 – Representação gráfica da voltametria de onda quadrada. (a) Evolução do potencial com o tempo; (b) Voltamograma resultante de I/E em que $I(1)$ é a corrente ao final do pulso direto e $I(2)$ a corrente medida ao final do pulso reverso.



Fonte: Adaptado de Pacheco et al. (2013).

Por fim, temos a Voltametria de Redissolução e Voltametria Adsorbtiva de Redissolução. Na Voltametria de Redissolução o analito é pré-concentrado no eletrodo de trabalho por meio de uma reação eletroquímica antes da varredura de potencial e aquisição do sinal. Essa etapa de pré-concentração, realizada sob um potencial controlado e condições hidrodinâmicas reprodutíveis, aumenta significativamente a magnitude da corrente medida e reduz os limites de detecção. Após a pré-concentração, uma varredura de potencial

dissolve o analito de volta na solução. A voltametria de redissolução tem duas variantes: catódica e anódica, sendo a anódica (ASV) mais utilizada para a análise de íons metálicos através da deposição catódica. Estudos mostram que a ASV pode detectar metais como chumbo, cádmio, zinco e cobre em concentrações de até $10^{-10} \text{ mol L}^{-1}$ usando eletrodos de mercúrio comuns ou de filme. Com o uso de eletrodos modificados com nanopartículas de ouro ou platina, a sensibilidade pode atingir níveis ainda mais baixos, na faixa de $10^{-12} \text{ mol L}^{-1}$ (PACHECO et al., 2013; Elsevier, s.d.).

A voltametria adsortiva de redissolução é uma técnica que permite a deposição do analito no eletrodo de trabalho, melhorando o limite de detecção, mesmo quando o analito não reage eletroliticamente com o material do eletrodo. Baseia-se na capacidade de compostos orgânicos e inorgânicos de se adsorverem na superfície do eletrodo, que pode ser um eletrodo comum ou quimicamente modificado. A modificação pode ocorrer por eletrodeposição de filmes metálicos ou óxidos, ou através de ligações com agentes de intercrossamento como glutaraldeído e epícloridrina, fixando substratos de interesse na superfície do eletrodo (PACHECO et al., 2013; Elsevier, s.d.).

A acumulação do analito na superfície do eletrodo, não baseada em processos faradaicos, ocorre por ligações covalentes, troca iônica e ligações eletrostáticas. A eficácia da adsorção depende de vários fatores, como solvente, material do eletrodo, força iônica, pH, transporte de massa, potencial e temperatura. O processo deve ser reprodutível e sem passivação do eletrodo. No caso de eletrodos de mercúrio, a formação de um filme pode causar perda de linearidade em altas concentrações, o que pode ser mitigado com tempos de acumulação menores, menores velocidades de agitação ou diluição das soluções (PACHECO et al., 2013; Elsevier, s.d.).

1.2.1 Voltametria Cíclica e Análise de Metais Pesados

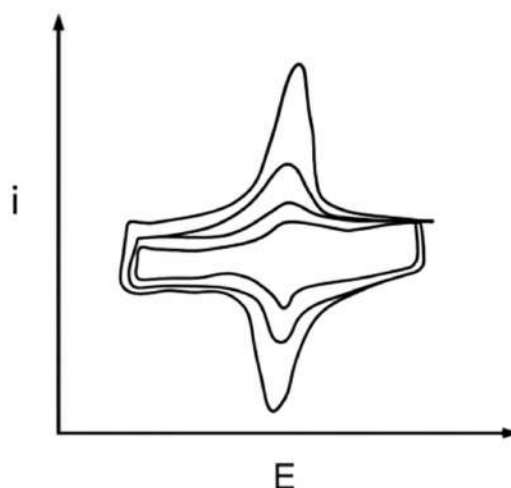
A voltametria é uma técnica eletroquímica amplamente utilizada para analisar espécies químicas em solução, permitindo reunir informações qualitativas e quantitativas sobre essas espécies por meio do registro de curvas de corrente em função do potencial aplicadas em uma cela eletroquímica. Essa cela deve conter, no mínimo, dois eletrodos: um eletrodo de trabalho, em formato de microeletrodo, e um eletrodo de referência, que possui uma superfície relativamente grande. Devido à diferença nas áreas dos eletrodos, o microeletrodo assume o valor do potencial aplicado a ele, ou seja, ele se polariza, enquanto o eletrodo de maior tamanho mantém seu potencial constante. Dessa forma, o potencial é varrido entre os eletrodos a uma velocidade constante, enquanto o potencial e a corrente resultante são registrados simultaneamente. O gráfico resultante, que relaciona corrente e potencial, é chamado de voltamograma (ALEIXO, 2018).

A voltametria cíclica é uma técnica particularmente eficaz para adquirir informações qualitativas sobre processos eletroquímicos, permitindo a rápida obtenção de dados sobre

a termodinâmica dos processos redox, a cinética das reações heterogêneas de transferência de elétrons e sobre as reações químicas acopladas a processos adsorptivos na interface eletrodo-solução. Durante um experimento de voltametria cíclica, o potencial aplicado ao eletrodo de trabalho começa em um valor onde nenhuma reação redox significativa ocorre. Conforme o potencial é varrido para valores mais negativos, as espécies eletroativas na solução começam a ser reduzidas, gerando um pico de corrente proporcional à concentração dessas espécies. Em contrapartida, é pelo pico de tensão que podemos identificar qual o elemento presente na solução, cada elemento quando submetido a este experimento tem seu pico de tensão em um valor conhecido. Quando o potencial atinge um ponto em que a redução cessa, ele é revertido, e o potencial é varrido de volta para o valor inicial. Se a reação for reversível, os produtos gerados durante a varredura direta podem ser oxidados durante a varredura inversa, resultando em um pico de corrente simétrico ao da redução (PACHECO et al., 2013; ALEIXO, 2018).

O voltamograma resultante depende diretamente do tipo de mecanismo redox que a espécie eletroativa sofre no eletrodo, um exemplo pode ser observado na Figura 10. As reações que ocorrem no eletrodo são determinadas principalmente por dois fatores: a transferência difusional de massa do analito em solução para a superfície do eletrodo e a transferência heterogênea de carga entre o analito e o eletrodo. Em alguns casos, reações químicas podem estar acopladas a esses processos, influenciando os resultados obtidos (PACHECO et al., 2013; ALEIXO, 2018).

Figura 10 – Voltamograma cíclico representando a variação da corrente em função do potencial.



Fonte: Adaptado de Aleixo (2018).

O eletrodo polarizado atua como um catalisador, onde a velocidade de varredura do potencial influencia diretamente as componentes da corrente elétrica observada nos processos de oxidação e redução. No entanto, as constantes de velocidade nos sentidos

de oxidação e redução não variam indefinidamente, sendo limitadas pelo transporte de massa da espécie redox da solução para a interface com o eletrodo. Quando todas as espécies disponíveis atingem a interface eletrodo-solução, a corrente faradaica atinge seu valor máximo, conhecida como corrente limitada por difusão. Nesse contexto, estudar os efeitos da velocidade de varredura sobre a corrente e os parâmetros para sistemas reversíveis torna a voltametria cíclica uma técnica vantajosa para o estudo mecanístico de reações eletroquímicas, mesmo considerando a corrente capacitiva que pode estar presente (ALEIXO, 2018).

Correlacionando a técnica ao potenciostato portátil em projeção, a voltametria cíclica seria realizada de forma automática pelo microcontrolador do Arduino, este é responsável por regular os parâmetros e pela aquisição de dados. O código implementado controlaria a variação do potencial no eletrodo de trabalho utilizando a função *analogWrite()*, que ajusta o potencial de maneira controlada. Deste modo, seria implementada a varredura do potencial em ambas as direções, conforme descrito na teoria da voltametria cíclica, e registraria a corrente correspondente a cada valor de potencial.

A partir do código no Arduino também é possível definir diferentes taxas de varredura, especificadas na matriz *vevals*[], e calcular o tempo de atraso entre cada passo de potencial com base nessas taxas. A corrente seria medida pelo Arduino através de um conversor analógico-digital (ADC), e os valores de corrente e potencial seriam enviados para o monitor serial para análise. Dessa forma, é automatizado o processo de voltametria cíclica, replicando o que seria feito manualmente em um laboratório, mas com a vantagem de permitir uma variação precisa e repetível do potencial, além da coleta de dados em tempo real.

Portanto, nesse contexto, a voltametria cíclica pode ser realizada de forma automática e controlada, proporcionando um método eficiente para estudar os processos redox em um sistema eletroquímico com três eletrodos e três amplificadores. A implementação no Arduino permite explorar as características eletroquímicas dos compostos em estudo de maneira precisa e confiável, alinhando-se com os princípios teóricos da voltametria cíclica. Isso resulta em uma alternativa prática e versátil, possibilitando a identificação da concentração de metais pesados em solução sem a necessidade de equipamentos caros ou especialização específica para o manuseio e controle da técnica.

1.3 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é estudar, modelar, simular e testar um potenciostato portátil de baixo custo, baseado em microcontrolador, empregando metodologia voltamétrica para a identificação qualitativa de metais pesados em solução. Pretende-se compreender o funcionamento dos circuitos envolvidos, avaliar sua implementação ele-

trônica por meio de simulações e verificar experimentalmente a capacidade do protótipo desenvolvido em reproduzir um voltamograma cíclico compatível com dispositivos comerciais. Este desenvolvimento foi orientado pelos princípios apresentados em (MELONI, 2016), cuja abordagem serviu como base conceitual para a estruturação do protótipo e das etapas de validação. Além disso, busca-se analisar a viabilidade da proposta como alternativa acessível para aplicações didáticas e de monitoramento ambiental.

Com o intuito de alcançar o objetivo geral, o projeto foi estruturado em etapas complementares, cada uma com um objetivo específico:

- a) **Revisão teórica:** reunir fundamentos sobre contaminação ambiental por metais pesados, métodos de detecção eletroquímica e princípios de funcionamento de técnicas voltamétricas e de potenciostatos comerciais.
- b) **Projeto do circuito:** modelar eletronicamente os estágios essenciais do potenciostato (amplificador somador, controlador de potencial e amplificador de transimpedância) definindo componentes, parâmetros de operação e arquitetura do protótipo.
- c) **Caracterização experimental de referência:** realizar testes utilizando potenciostatos comerciais (PGSTAT302N e μ Stat 400 da Metrohm) com a mesma solução eletroquímica empregada posteriormente no protótipo, estabelecendo parâmetros de comparação.
- d) **Simulação computacional:** reproduzir, pelo LTspice, o comportamento dos estágios eletrônicos do potenciostato, avaliando a estabilidade do controle de potencial, a resposta do amplificador de transimpedância e a interação com a célula eletroquímica.
- e) **Desenvolvimento do protótipo físico:** implementar o circuito projetado utilizando um microcontrolador Arduino, realizar a programação da varredura de potencial e integrar os estágios analógicos para geração e leitura dos sinais eletroquímicos.
- f) **Testes de funcionamento:** executar varreduras voltamétricas com o protótipo desenvolvido, registrar os dados, processá-los e obter o voltamograma correspondente, verificando a coerência do sinal e a estabilidade operacional do sistema.
- g) **Análise comparativa:** comparar os voltamogramas obtidos por simulação, pelos potenciostatos comerciais e pelo protótipo, investigando semelhanças, limitações e fontes de discrepância entre os métodos.
- h) **Proposição de aprimoramentos:** identificar limitações de hardware, software e instrumentação presentes no protótipo e sugerir melhorias para versões futuras, com foco em robustez, precisão e aplicabilidade prática.

2 Metodologia

A metodologia adotada neste trabalho foi estruturada em etapas sequenciais que compreenderam desde o estudo teórico até a validação experimental do sistema proposto. Inicialmente, realizou-se a modelagem do circuito analógico do potenciostato, composto por um amplificador somador, um controlador de potencial e um amplificador de transimpedância, definindo-se sua arquitetura e os componentes eletrônicos necessários. Em seguida, foram conduzidas medições experimentais com potenciostatos comerciais (PGSTAT302N e μ Stat 400) para estabelecer parâmetros de referência e caracterizar o comportamento eletroquímico esperado. Paralelamente, o circuito projetado foi simulado no software LTspice, permitindo avaliar o desempenho da modulação PWM, do controle de potencial e da resposta da célula eletroquímica. Por fim, desenvolveu-se um protótipo baseado em microcontrolador, sobre o qual foram realizados testes de funcionamento e aquisição de dados, possibilitando comparar as respostas obtidas com aquelas simuladas e com os resultados experimentais dos equipamentos comerciais.

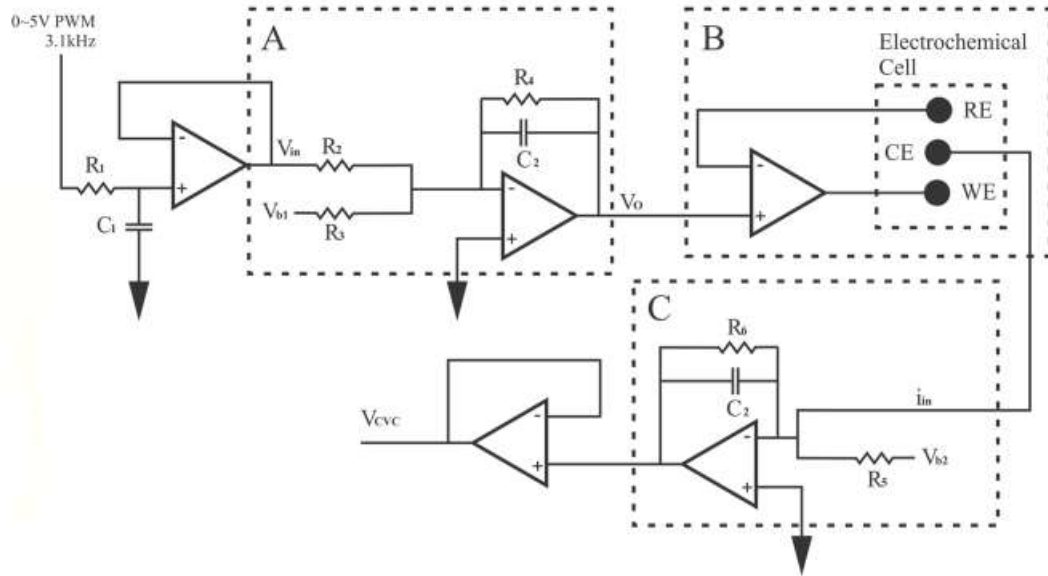
2.1 Projeto do Potenciostato

O circuito é constituído por três amplificadores principais que regem o sistema do potenciostato (Figura 11).

O primeiro deles é o amplificador somador que, basicamente ajusta a tensão de saída com base na soma ponderada das entradas, e torna mais preciso o controle do potencial aplicado ao eletrodo. Ele atua como um conversor de sinal digital para analógico, pois é preciso converter o pulso quadrado dado pela modulação PMW em uma rampa de potencial que será aplicada no controlador de potencial para a realização da voltametria cíclica. Uma possibilidade seria utilizar um filtro RC, entretanto, os voltamogramas poderiam ficar mal definidos caso o potencial utilizado fosse menor que os limites mínimos e máximos do equipamento (MELONI, 2016).

Além do problema de resolução, a maioria das placas Arduino possui um sinal PWM de baixa frequência, variando de 400 Hz a 960 Hz, o que resulta em uma constante de tempo elevada para o filtro RC. Essas frequências são determinadas por um divisor inteiro do clock interno da placa, permitindo que sejam alteradas através da modificação do valor do divisor, alcançando assim frequências de até 3,1 kHz, mais adequadas para a aplicação proposta. O amplificador somador, que converte o sinal PWM em tensão analógica, produz uma saída de 1 V quando a entrada é 0 V (ou nível PWM 0), 0 V quando a entrada é 2,5 V (ou nível PWM 127), e -1 V quando a entrada atinge 5 V (ou nível PWM 255). Essa relação entre os níveis de entrada e saída demonstra a linearidade e a

Figura 11 – Circuito analógico do potenciostato, em evidência (A) amplificador somador; (B) célula eletroquímica e o contra amplificador; e (C) amplificador de transimpedância.



Fonte: Meloni (2016).

funcionalidade do circuito como um DAC baseado em PWM (MELONI, 2016).

A voltagem PWM do Arduino é de 5 V e a conversão digital para analógica só pode prover voltagens de 0 a 5 V. Portanto o amplificador somador é necessário em um experimento com voltametria cíclica já que há o interesse em variar o potencial entre valores negativos e positivos. Por regular a tensão a uma faixa desejada, é possível que haja o comprometimento à resolução do potencial ou à largura da janela de potencial. Todavia a última pode ser resolvida variando os valores de V_{b1} , R_2 , R_3 e R_4 na Figura 11A. Aplicando a lei de Ohm e a lei de Kirchhoff na entrada inversora do amplificador somador, é simples perceber que a relação entre V_0 , V_{in} , V_{b1} , R_2 , R_3 e R_4 é dada por (MELONI, 2016):

$$V_0 = -R_4 \left(\frac{V_{in}}{R_3} + \frac{V_{b1}}{R_2} \right) \quad (2.1)$$

onde V_0 é a tensão de saída do amplificador somador aplicada ao eletrodo de trabalho (V), V_{in} corresponde ao sinal proveniente do filtro RC que suaviza o PWM gerado pelo microcontrolador, V_{b1} é a tensão de polarização responsável por deslocar o nível de referência do circuito (V), R_2 e R_3 são os resistores que definem as ponderações de cada entrada no somador inversor (Ω), e R_4 é o resistor de realimentação que determina o ganho do estágio (Ω).

Outra conjectura de importância no circuito é o amplificador controlador de potencial, como parte deles temos o eletrodo de referência, que fornece um potencial de referência

preciso, confiável e constante para que o potenciostato mantenha o potencial do eletrodo de trabalho a um valor desejado. O contra eletrodo é adicionado ao sistema para isolar o eletrodo de referência da reação de transferência de carga, fornecendo ou retirando corrente do sistema para garantir que ela flua de modo uniforme entre o eletrodo de trabalho e o circuito externo, minimizando a polarização e impacto nas medições de potencial. No eletrodo de trabalho é onde ocorre a reação química de interesse, fornecendo a superfície em que a reação química é catalisada ou onde a corrente é medida, deste modo, o potencial aqui aplicado é utilizado para estudar as reações eletroquímicas e é ajustado pelo potenciostato. Nesse contexto, o amplificador em questão possui a função de medir e ajustar o potencial aplicado ao eletrodo de trabalho para controlar a reação eletroquímica, amplifica a diferença de potencial aplicada entre o eletrodo de trabalho e o de referência para que o potencial desejado seja mantido precisamente (MELONI, 2016; CORDOVA-HUAMAN; JAUJA-CCANA; ROSA-TORO, 2021).

Para completar o sistema temos o amplificador de transimpedância, ele converte a corrente que flui através da célula eletroquímica em um potencial que o microcontrolador possa ler, neste caso, atuando como um conversor de sinal analógico para digital. Em busca de evitar danos ao microcontrolador, os amplificadores operacionais são alimentados com +6,5 V (Figura 12), isso significa que uma sobrecarga na leitura da corrente apenas resultará em um amplificador saturado, mas não causará danos ao equipamento. O limite da corrente é dado pelo resistor R_6 ilustrado na Figura 12, este que está conectado ao ciclo de *feedback* do amplificador de transimpedância, dito isso, pode-se assumir o limite da corrente como uma relação entre a tensão de saída do conversor corrente-voltagem em questão (V_{cvc}) e o resistor R_6 (MELONI, 2016):

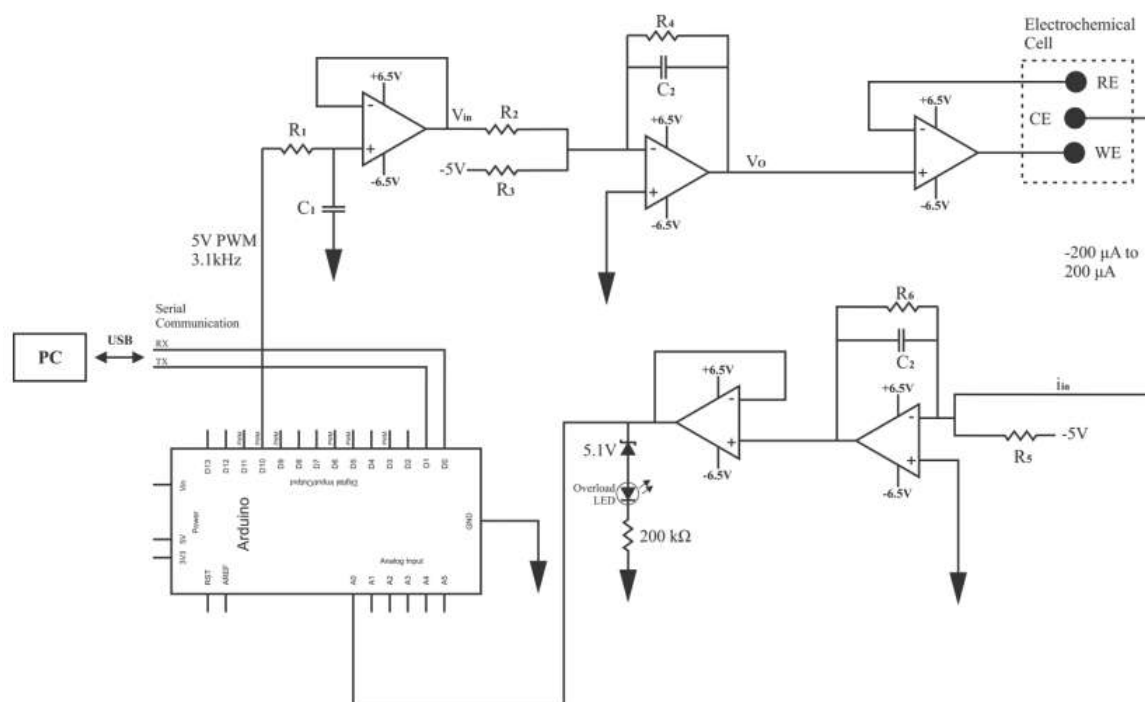
$$V_{cvc} = i_{in} \cdot R_6 \quad (2.2)$$

onde V_{cvc} é a tensão de saída do conversor corrente-tensão (em volts), i_{in} é a corrente proveniente da célula eletroquímica (em ampères) e R_6 é o resistor de realimentação do amplificador de transimpedância (em Ω).

O potenciostato foi projetado para utilizar toda a faixa dinâmica de leitura de potencial do microcontrolador (0 a 5 V). Como a placa Arduino Uno não é capaz de ler potenciais negativos, foi implementado um potencial de *bias* de 2,5 V na entrada inversora do amplificador, garantindo que uma corrente nula ($0 \mu A$) no conversor corrente-tensão resulte em uma saída de 2,5 V, ponto médio da escala do ADC. Essa configuração permite a medição de correntes tanto positivas quanto negativas: para uma corrente de $-200 \mu A$, a saída é 0 V (nível ADC 0); para $0 \mu A$, a saída é 2,5 V (nível ADC 511, correspondente à metade da resolução de 10 bits); e para $+200 \mu A$, a saída atinge 5 V (nível ADC 1023). Dessa forma, o sistema opera com uma relação linear de $25 \text{ mV}/\mu A$, cobrindo adequadamente os limites de corrente e tensão necessários para os experimentos descritos no manuscrito base

(MELONI, 2016).

Figura 12 – Desenho esquemático completo do potenciostato.



Fonte: Meloni (2016).

Os valores para os componentes na imagem acima são dados na Tabela 1, estes valores foram os utilizados neste experimento eletroquímico.

Tabela 1 – Valores dos componentes utilizados no experimento do potenciostato

Componente (Figura 12)	Valor
R_1	10 k Ω
R_2	510 Ω
R_3	1 k Ω
R_4	200 Ω
R_5	24 k Ω
R_6	12 k Ω
C_1	470 nF
C_2	100 nF

Fonte:

Meloni (2016).

No circuito proposto faz-se o uso do amplificador operacional LM324, estes são alimentados por uma fonte positiva e uma negativa, simetricamente, em relação ao terra.

Dito isso, o fornecimento de $\pm 6,5$ V aos amplificadores (Figura 11), é projetado para permitir uma saída de ± 5 V no amplificador operacional, levando em conta a queda de voltagem dada em torno de $1,5$ V. Este mecanismo junto ao diodo Zener de $5,1$ V, que está conectado entre a saída do conversor analógico-digital e o terra, não são estritamente necessários, mas sim uma proteção para evitar danos ao microcontrolador (MELONI, 2016; CORDOVA-HUAMAN; JAUJA-CCANA; ROSA-TORO, 2021).

Por fim, a taxa de varredura para este dispositivo depende do tempo de subida do filtro RC utilizado no conversor digital-analógico, como também, da janela e resolução de potencial do circuito. Estes parâmetros foram posicionados estrategicamente de modo que haja configuração experimental flexível. Sendo assim, a taxa de varredura máxima é dada por (MELONI, 2016):

$$v_{\max} = \left(\frac{E_w}{256 \cdot RC_t} \right) \quad (2.3)$$

Onde:

- $v_{\max}$ é a taxa de varredura máxima ($V \cdot s^{-1}$),
- E_w é a largura da janela de potencial do conversor digital-analógico (V),
- RC_t é o tempo de subida do filtro RC do conversor digital-analógico (s).

Os parâmetros finais propostos para o experimento são dados pela Tabela 2 (MELONI, 2016).

Tabela 2 – Limites de corrente e voltagem para o experimento conduzido

Parâmetro	Mínimo	Máximo
Potencial (V)	-1	1
Corrente (μA)	-200	200
Limite de voltagem (V)	-5	5
Taxa de varredura ($V \cdot s^{-1}$)	—	0,780

Fonte:

Meloni (2016).

2.2 Caracterização do Desempenho de Potenciostatos Reais

Conforme descrito na Seção 1.1, este estudo utilizou como referência dois modelos de potenciostatos comerciais, PGSTAT302N e μ Stat 400, ambos fabricados pela Metrohm. As

configurações iniciais de cada experimento, apresentadas na Tabela 3, foram definidas por meio dos respectivos softwares de controle: DropView 3.0, para o μ Stat 400, e Nova 2.1.7, para o PGSTAT302N.

Tabela 3 – Parâmetros utilizados para voltametria cíclica com potenciostato real

Parâmetro	Unidade	Descrição	Valor
Econd	V	Tensão aplicada durante a condição inicial do experimento, antes do início da varredura.	0
tcond	s	Tempo de duração da condição inicial (<i>conditioning time</i>).	5
Ebegin	V	Potencial inicial da varredura, correspondente ao ponto onde a reação eletroquímica se inicia.	-0,4
Evtx1	V	Limite superior de potencial alcançado na varredura (vértice positivo).	0,7
Evtx2	V	Limite inferior de potencial alcançado na varredura (vértice negativo).	-0,4
Estep	V	Incremento de potencial entre pontos consecutivos de medição durante a varredura.	0,02
Srate	V/s	Taxa de varredura (<i>scan rate</i>), ou velocidade de variação do potencial ao longo do tempo.	0,1
nscans	—	Número total de ciclos completos de varredura realizados no experimento.	5

Fonte:

Elaboração própria (2025).

Utilizou-se uma solução padrão de FeKCl 5 mM, comumente empregada em caracterizações eletroquímicas, aplicada sobre o eletrodo comercial de carbono da Metrohm (Figura 13), assegurando a padronização das condições experimentais.

Após a definição das configurações iniciais e da solução utilizada, procedeu-se à montagem experimental dos sistemas com cada potenciostato. O objetivo desta etapa foi reproduzir as condições operacionais de medição, garantindo a equivalência entre os dois equipamentos. As Figuras 14(a) e 14(b) apresentam as montagens realizadas com os modelos μ Stat 400 e PGSTAT302N, respectivamente.

Concluída a etapa de preparo e padronização das condições experimentais, os voltamogramas foram gerados automaticamente pelos softwares correspondentes a cada

Figura 13 – Eletrodo comercial de carbono impresso em serigrafia.



Fonte: Metrohm.

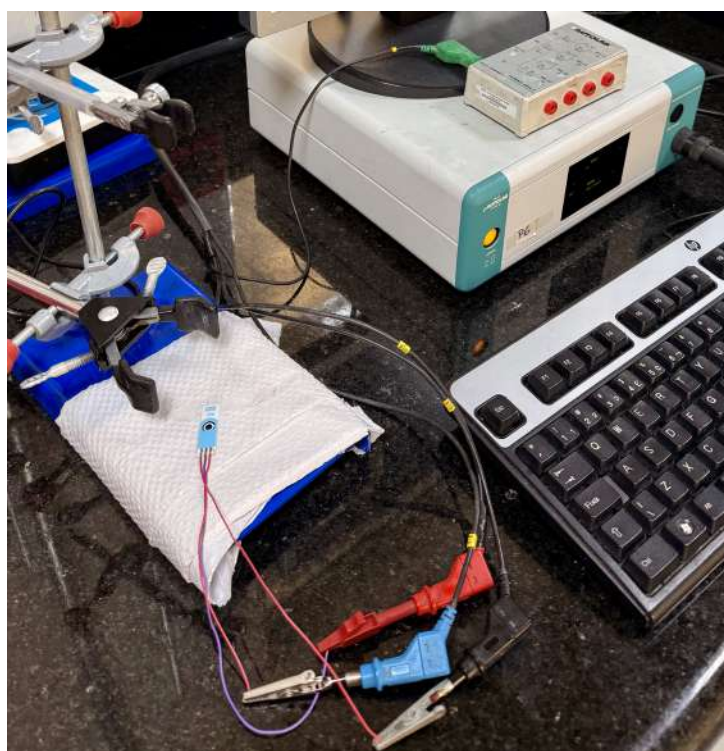
potenciostato. Ambos os programas exibem a resposta corrente-potencial em tempo real, permitindo a visualização do comportamento eletroquímico durante a varredura. Os voltamogramas obtidos, no formato característico de pato da voltametria cíclica, foram exportados digitalmente para posterior análise comparativa, conforme ilustrado nas Figuras 15(a) e 15(b).

Figura 14 – Montagem experimental. (a) μ Stat 400; (b) PGSTAT302N.

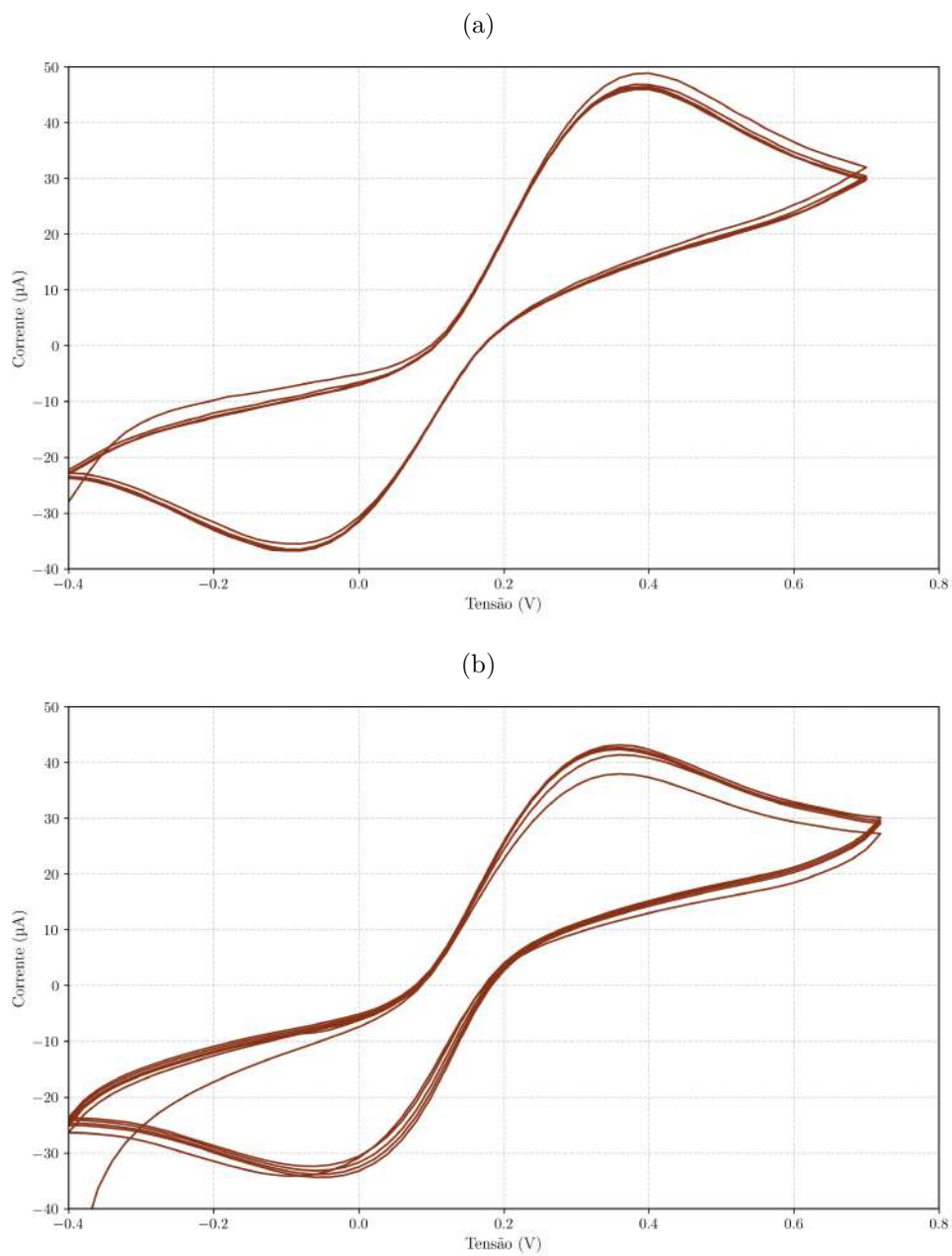
(a)



(b)



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 15 – Voltamograma cíclico. (a) μ Stat 400; (b) PGSTAT302N.

Fonte: Autoria própria (2025).

2.3 Simulação

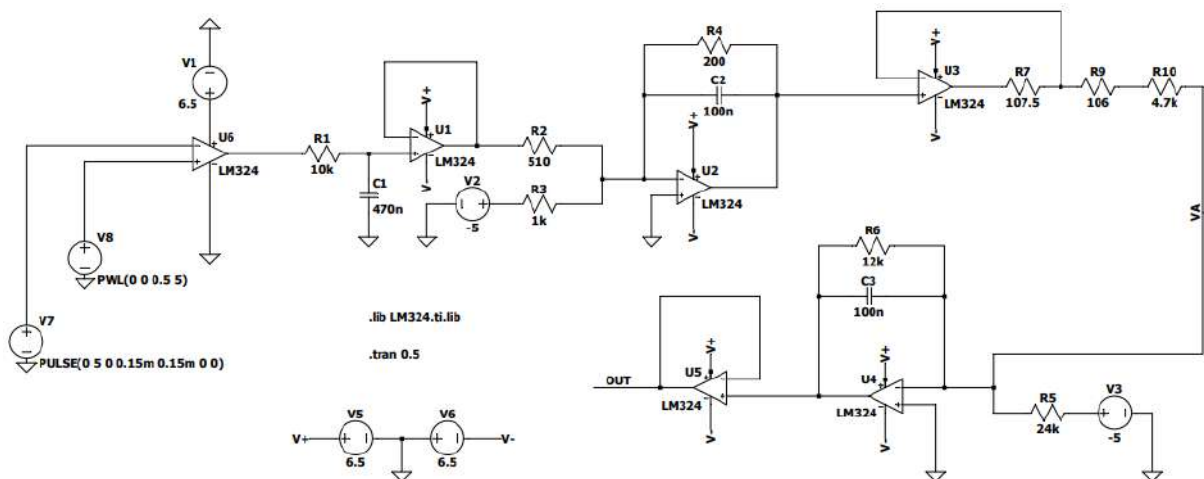
Para compreender a evolução dos testes físicos com um potenciostato, é fundamental estabelecer padrões de resultados. No circuito físico, a voltametria cíclica é realizada automaticamente pelo Arduino, utilizando a técnica de modulação por largura de pulso (PWM). Essa abordagem permite gerar sinais analógicos a partir de saídas digitais, simulando variáveis analógicas por meio de pulsos digitais em alta frequência. Durante a operação, o código controla a varredura do potencial no eletrodo de trabalho em ciclos, medindo a corrente resultante ao longo do processo.

O protótipo incorpora múltiplos amplificadores, o que pode dificultar o diagnóstico de problemas diretamente no hardware, além de representar um risco para os componentes e comprometer o progresso do projeto. Para mitigar esses desafios e permitir uma análise mais detalhada, optou-se por utilizar o software *LTspice*, que possibilita a simulação do comportamento esperado em cada etapa do circuito de forma isolada. Essa abordagem facilita a identificação de falhas e contribui para o desenvolvimento de um protótipo mais confiável e eficiente.

2.3.1 Parâmetros da literatura

O circuito do potenciostato foi construído na simulação com base em (MELONI, 2016), trata-se uma análise transiente com período de 0,5 segundos. Para os amplificadores operacionais utilizou-se a biblioteca do LM324, que condiz com o modelo da bibliografia. A versão final construída no *LTspice* é dada na Figura 16.

Figura 16 – Circuito do potenciostato simulado no software *LTspice*.



Fonte: Autoria própria (2025).

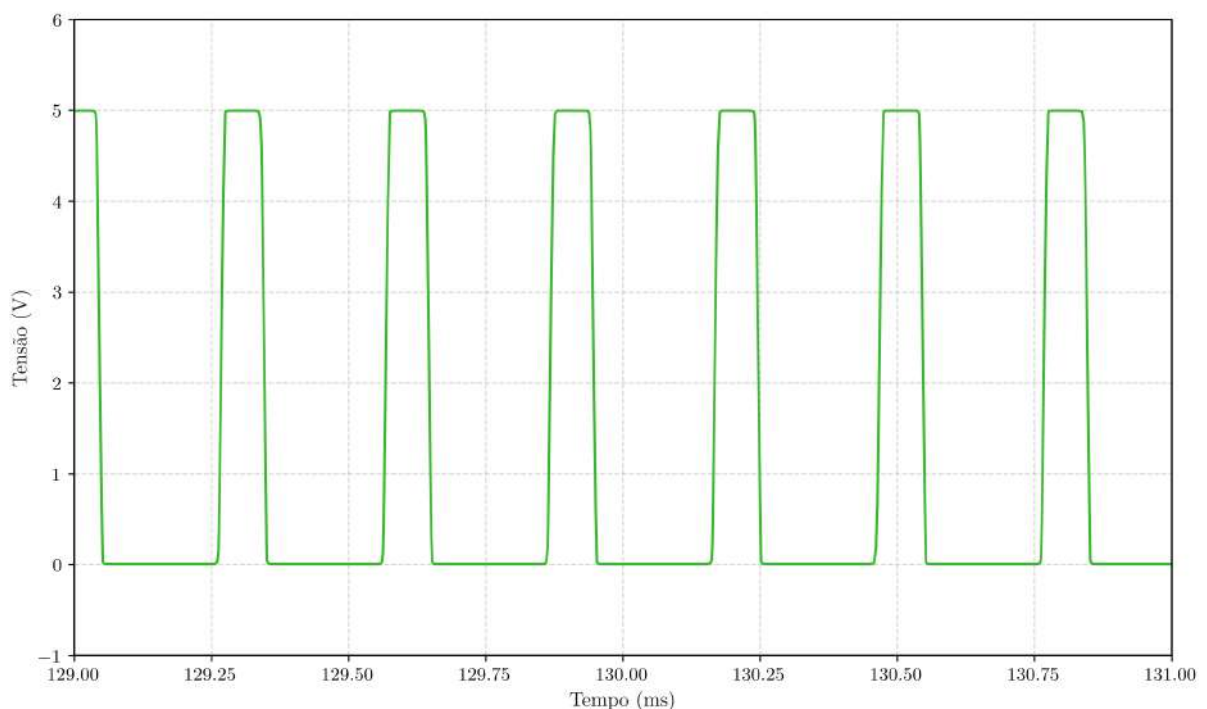
2.3.1.1 Modulação por Largura de Pulso (PWM)

A modulação PWM constitui uma técnica eficiente para geração de sinais analógicos a partir de saídas digitais. Em um circuito físico, o Arduino emprega essa técnica para gerar uma onda quadrada com amplitude alternando entre os níveis lógicos HIGH (+5 V) e LOW (0 V). O parâmetro fundamental dessa modulação é o *duty cycle*, definido como a razão entre o tempo em estado HIGH e o período total do sinal.

Já no *LTspice*, a PWM foi feita com uma combinação de **PWL** e **PULSE**. **PWL** (*Piecewise Linear*) e **PULSE** são formas de definir sinais temporais para fontes de tensão/corrente: **PWL** descreve uma forma de onda por pontos (pares “tempo, valor”), conectando-os por segmentos de reta. Assim, **PWL(0 0 0.5 5)** inicia em 0 V no tempo zero, sobe linearmente a 5 V em 0.5 s, sendo ótimo para rampas, degraus e perfis de varredura. Já **PULSE** gera um pulso com flancos programáveis, na sintaxe **PULSE(V1 V2 TD TR TF PW PER)**. Neste caso, **PULSE(0 5 0 0.15m 0.15m 0 0)** começa em 0 V, após um atraso de 0 s sobe a 5 V em 0,15 ms, desce em 0,15 ms para 0 V e repete a cada *PER* (como aqui *PER* = 0, é um único pulso em formato triangular). Em resumo, **PWL** é para estruturar a tensão eficaz ao longo do tempo e **PULSE** para pulsos periódicos ou rampas simples definidas por tempos de subida/descida.

Conforme ilustrado na Figura 17, adotou-se um *duty cycle* de 25% para esta aplicação, o que implica que o sinal permanece ativo por um quarto de cada período.

Figura 17 – Resposta temporal da tensão na modulação PWM com *duty cycle* de 25%.



Fonte: Autoria própria (2025).

O período do sinal PWM, correspondente ao tempo para completar um ciclo completo (HIGH + LOW), foi ajustado para aproximadamente 0,3 ms. A frequência resultante (f_{PWM}), calculada através da equação 2.4

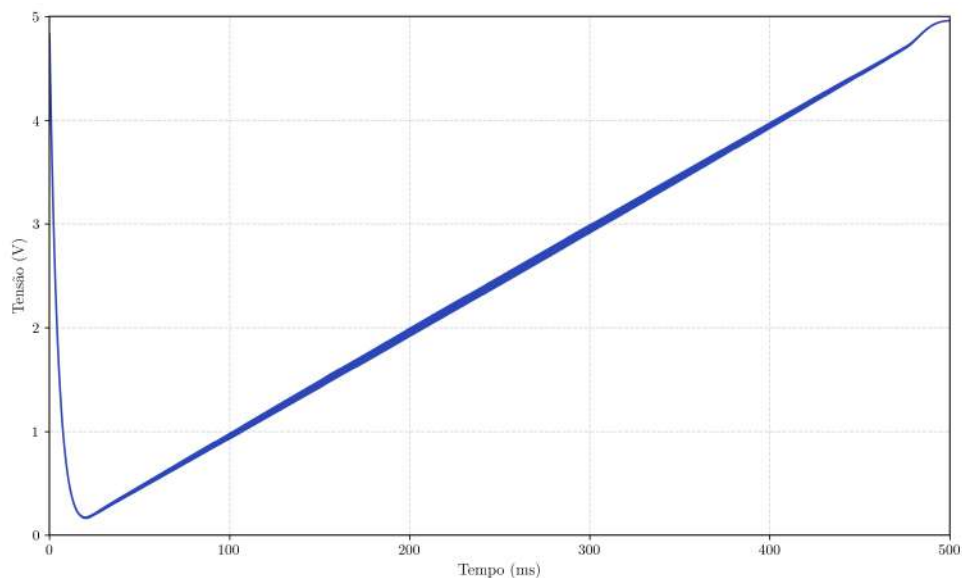
$$f_{PWM} = \frac{1}{\text{Período}} = \frac{1}{0,3 \times 10^{-3}\text{s}} \approx 3,33 \text{ kHz} \quad (2.4)$$

demonstra-se adequada para aplicações eletroquímicas, onde a rápida comutação entre estados (em escalas de kHz) permite a estabilização eficiente da tensão média de saída. A seleção criteriosa do *duty cycle* e da frequência possibilita o controle preciso da energia entregue ao sistema eletroquímico, assegurando condições operacionais estáveis para as medições potenciostáticas.

2.3.1.2 Controle de Potencial para Voltametria Cíclica

A voltametria cíclica requer um amplificador capaz de controlar o potencial aplicado ao conjunto da célula eletroquímica. Neste sistema, um amplificador somador (Seção 2.1) atua como um conversor digital-analógico, responsável por gerar a rampa de potencial necessária para a varredura. Conforme ilustrado na Figura 18, o sinal quadrado inicial é atenuado para adequar os limites de tensão e corrente do sistema, em conjunto com o amplificador de transimpedância. O amplificador somador permite a variação do potencial entre valores positivos e negativos, o que não seria viável utilizando apenas a tensão de saída do Arduino (MELONI, 2016).

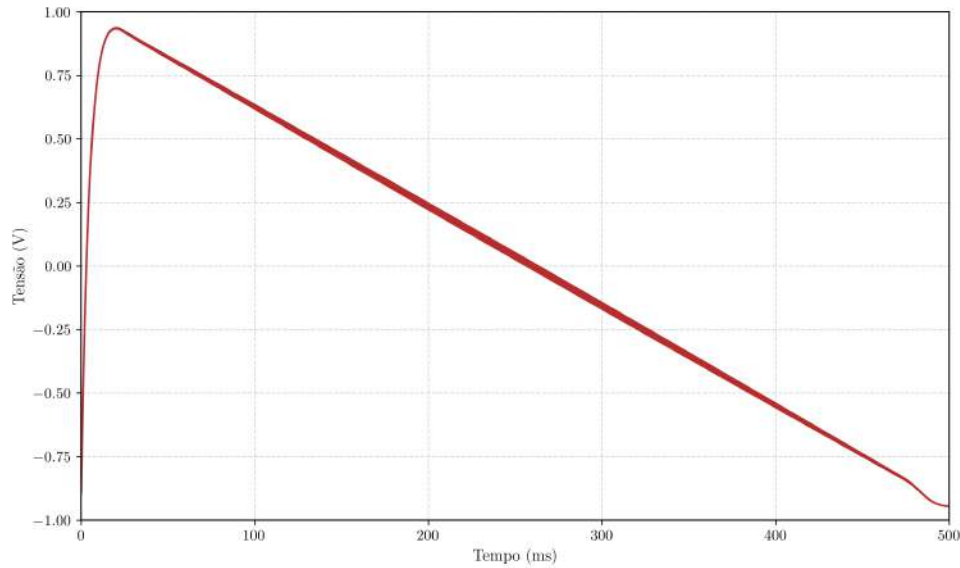
Figura 18 – Caracterização da tensão na entrada do amplificador somador em função do tempo.



Fonte: Autoria própria (2025).

O processamento realizado pelo amplificador ajusta a rampa para que ela corresponda à janela de potencial efetivamente utilizada no experimento e aplicada à célula eletroquímica (Figura 19).

Figura 19 – Tensão de entrada na célula eletroquímica.



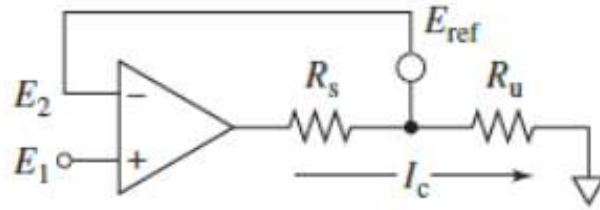
Fonte: Autoria própria (2025).

2.3.1.3 Célula Eletroquímica

A simulação deste conjunto está representada na Figura 20, em que define-se R_s como a resistência entre o contraeletrodo (CE) e o eletrodo de referência (ER), enquanto R_u é a resistência não compensada da célula, isto é, entre o eletrodo de referência e o eletrodo de trabalho. Os potenciais E_1 e E_2 correspondem às entradas não inversora e inversora do amplificador operacional, respectivamente. Como as entradas do *op-amp* apresentam impedância extremamente alta, não circula corrente pela malha de realimentação na entrada inversora, por isso, a diferença de potencial entre o ER e essa entrada é simplesmente E_{ref} . Na configuração não inversora, o amplificador atua para tornar $E_1 \approx E_2$, fornecendo a corrente da célula (I_c) necessária para sustentar essa condição. Observando o caminho entre a entrada inversora e o nó comum na saída, obtém-se $E_1 = E_{\text{ref}} + I_c \cdot R_u$, adotando $E_c = I_c \cdot R_u$, e sendo E_{ref} e E_1 constantes, conclui-se que E_c também deve permanecer constante. Assim, variações em R_s ou R_u são automaticamente compensadas por ajustes na tensão de saída do amplificador, preservando o controle do potencial entre o eletrodo de trabalho e o de referência (REYNOSO, 2021).

Em função de estabelecer valores reais para as resistências da célula, mediu-se a resistência entre o contra eletrodo e o eletrodo de referência, bem como entre o eletrodo de referência e o eletrodo de trabalho. Para tanto, utilizou-se um multímetro e um eletrodo comercial da Metrohm (Figura 13). Os valores obtidos para CE-ER e ER-ET

Figura 20 – Circuito utilizado para a simulação da célula eletroquímica.

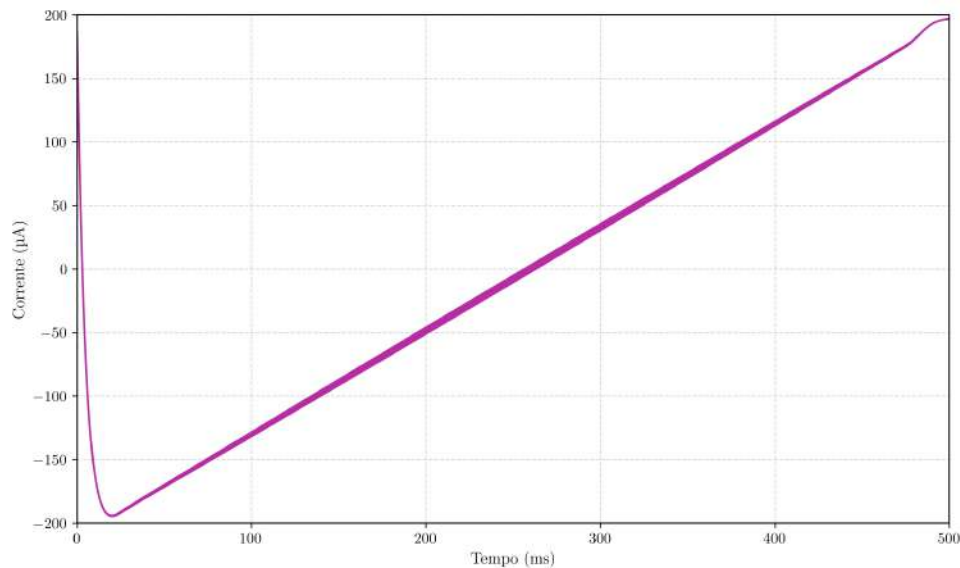


Fonte: Reynoso (2021).

foram de $107,5\Omega$ e 106Ω , respectivamente, mas por conta da alta impedância, discutida anteriormente neste tópico, é necessário adicionar mais uma resistência em série que represente a resistência da solução e da transferência de carga da reação, neste caso, adicionou-se um resistor de $4,7k\Omega$.

A corrente eletroquímica, mostrada na Figura 21, segue a variação esperada conforme registrado na Figura 12. Esta será convertida em sinal de tensão pelo amplificador de transimpedância na etapa seguinte.

Figura 21 – Corrente que passa através dos resistores da célula eletroquímica.

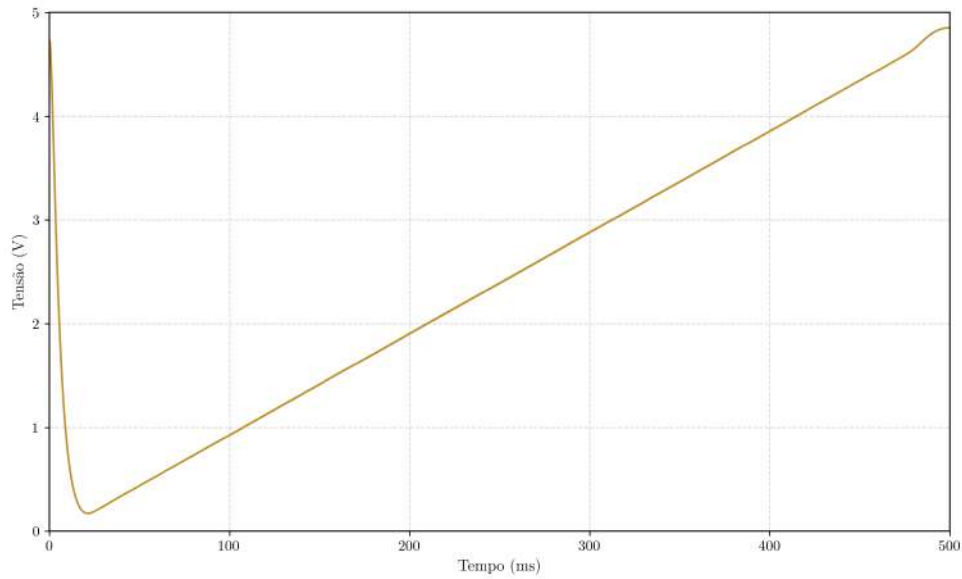


Fonte: Autoria própria (2025).

2.3.1.4 Tensão de Saída para Interfaceamento com o Arduino

A etapa final do circuito, ilustrada na Figura 22, apresenta a tensão de saída condicionada para interfaceamento com o microcontrolador, limitada a 5 V pelo circuito de proteção (CVC) para compatibilidade com as especificações do Arduino.

Figura 22 – Sinal de saída do potenciostato, resposta temporal completa.



Fonte: Autoria própria (2025).

2.3.2 Parâmetros do experimento com potenciostatos reais

Para configurar a simulação com os mesmos parâmetros iniciais empregados nos experimentos realizados com os potenciostatos da Metrohm (Tabela 3), foi necessário ajustar os valores utilizados na fonte PWL no ambiente LTspice. A curva de tensão gerada por ela foi configurada de modo a reproduzir fielmente a variação de potencial aplicada à célula eletroquímica, uma vez que, conforme descrito na Seção 2.1, a relação linear entre o sinal *PWM* e a tensão de saída do amplificador somador permite a conversão direta entre os níveis digitais e os valores analógicos correspondentes.

Dessa forma, foi possível gerar valores de tensão equivalentes aos limites empregados nos experimentos com os potenciostatos comerciais, ou seja, $-0,4\text{ V}$ e $0,7\text{ V}$ correspondentes, respectivamente, aos limites negativo e positivo do potencial de varredura. A Tabela 4 apresenta a relação entre as tensões programadas na fonte PWL e as tensões convertidas pelo amplificador somador durante a simulação.

Tabela 4 – Relação entre a tensão definida na fonte PWL e a tensão convertida pelo amplificador somador.

Tensão PWL [V]	Tensão convertida [V]
2,5	0,0
3,6	-0,4
0,7	0,8

Fonte: Autoria própria (2025).

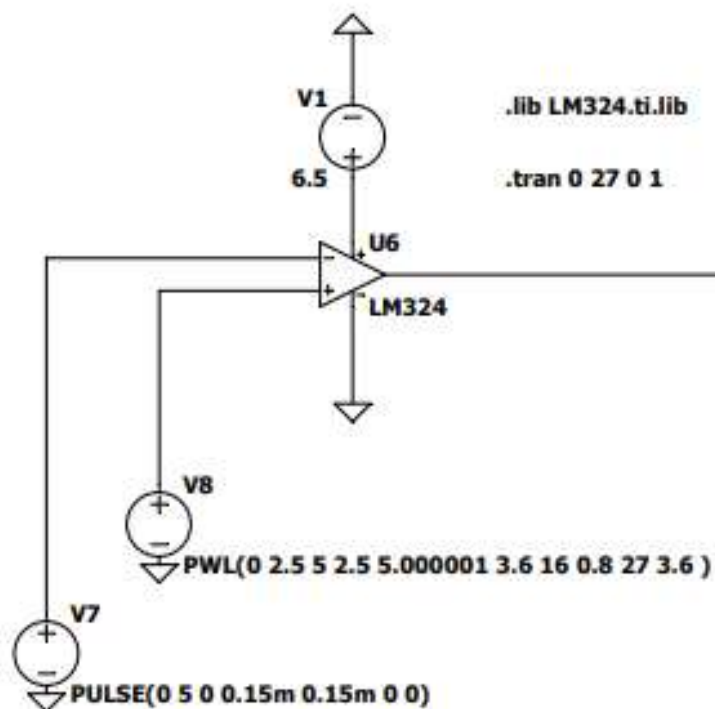
Sendo assim, o novo perfil de varredura definido por meio da fonte PWL é apresentado na Figura 23. A expressão

$$\text{PWL}(0 \ 2.5 \ 5 \ 2.5 \ 5.000001 \ 3.6 \ 16 \ 0.8 \ 27 \ 3.6)$$

indica que a tensão analógica aplicada à célula eletroquímica permanece em 0 V durante os primeiros 5 s, atingindo $-0,4 \text{ V}$ imediatamente após esse período, em $t = 5,000001 \text{ s}$, comportamento compatível com a ausência de pré-rampa observada no potenciostato portátil $\mu\text{Stat 400}$. Em seguida, o potencial evolui linearmente até $0,7 \text{ V}$ em $t = 16 \text{ s}$ e retorna para $-0,4 \text{ V}$ no instante $t = 27 \text{ s}$, completando um ciclo de voltametria cíclica.

Isso ocorre porque, para um *scan rate* de $0,1 \text{ V/s}$, a variação de potencial entre $-0,4 \text{ V}$ e $0,7 \text{ V}$ corresponde a uma diferença total de $1,1 \text{ V}$. Assim, cada etapa da varredura (ida e volta) requer aproximadamente 11 s para ser concluída. Consequentemente, torna-se necessário ajustar também o comando `.tran` da simulação para contemplar a duração total do experimento, que passa a ser de 27 s .

Figura 23 – PWL para refletir perfil do potencial de varredura do experimento com potenciostato comercial.

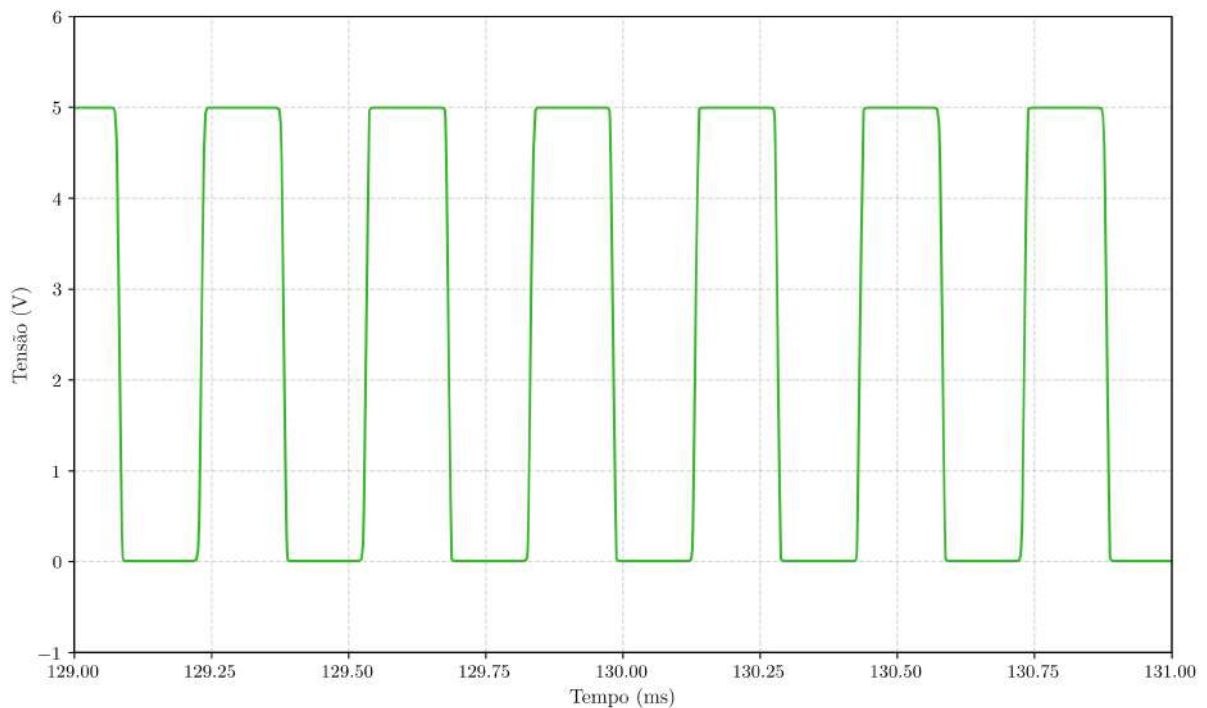


Fonte: Autoria própria (2025).

O *duty cycle* do PWM gerado está diretamente relacionado ao intervalo de tempo em que o sinal PWL permanece acima do sinal triangular definido pelo PULSE. Com os parâmetros da literatura, a rampa inicia próxima de 0 V , logo, ela permanece abaixo do

pulso durante a maior parte do período, resultando em um *duty cycle* aproximado de 25%. Neste caso, modifica-se apenas o sinal PWL, mantendo-se inalterado o sinal PULSE, de modo a preservar a mesma frequência e o mesmo período do PWM. Com essa alteração, o PWL passa a iniciar em níveis mais elevados (próximos de 2,5 V), fazendo com que a rampa permaneça acima do pulso triangular durante aproximadamente metade do ciclo. Como consequência, obtém-se um *duty cycle* próximo de 50%. Esse comportamento pode ser observado na Figura 24, que apresenta o PWM resultante para essa nova configuração.

Figura 24 – Tensão na modulação PWM com *duty cycle* de 50%.

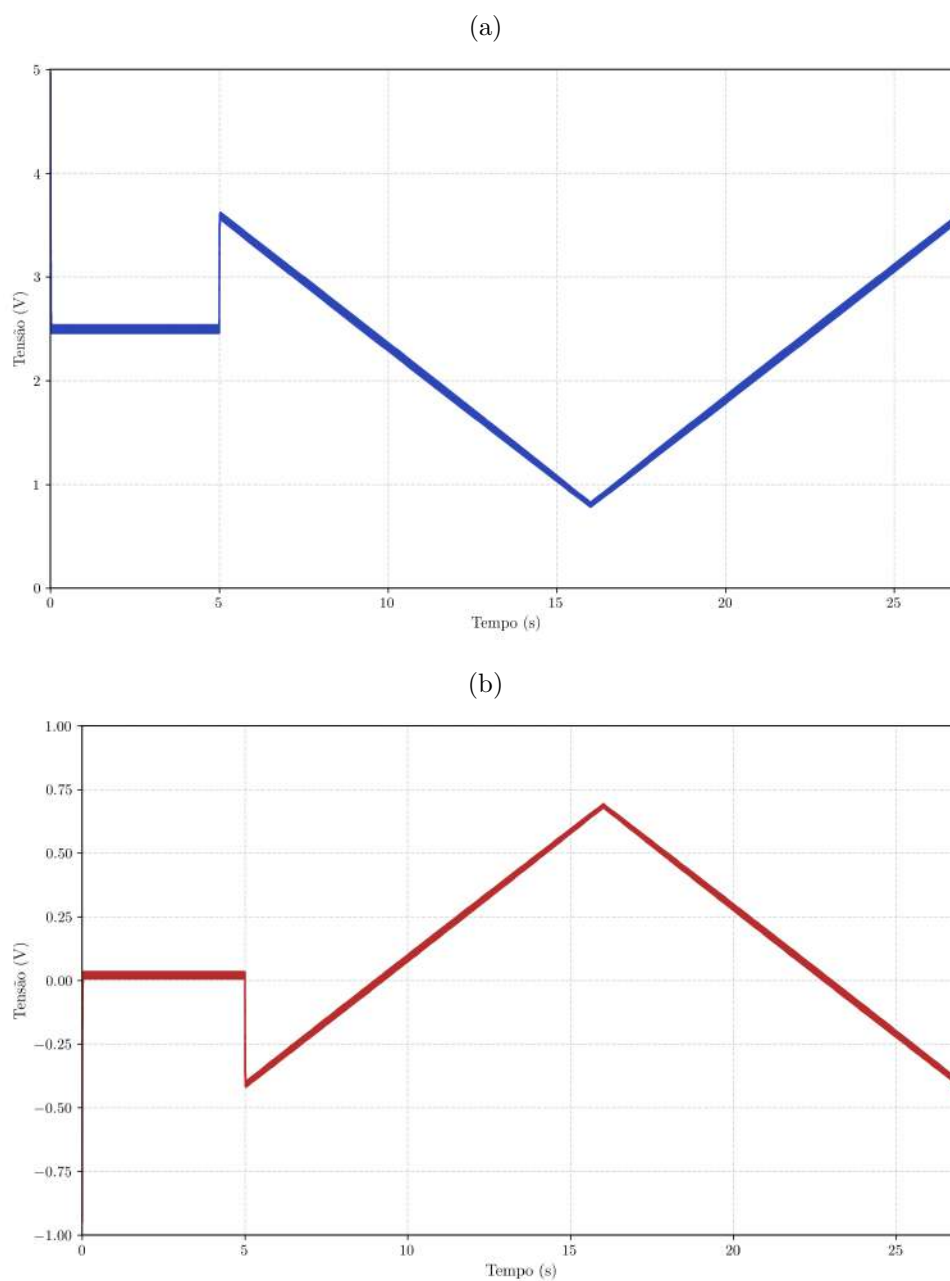


Fonte: Autoria própria (2025).

A Figura 25 apresenta a evolução temporal dos sinais envolvidos no processo de geração e conversão do PWM. Em (a), observa-se o comportamento do sinal digital produzido pelo comparador, enquanto em (b) é exibida a correspondente tensão analógica obtida após o processamento pelo amplificador somador, esta que será aplicada a célula eletroquímica.

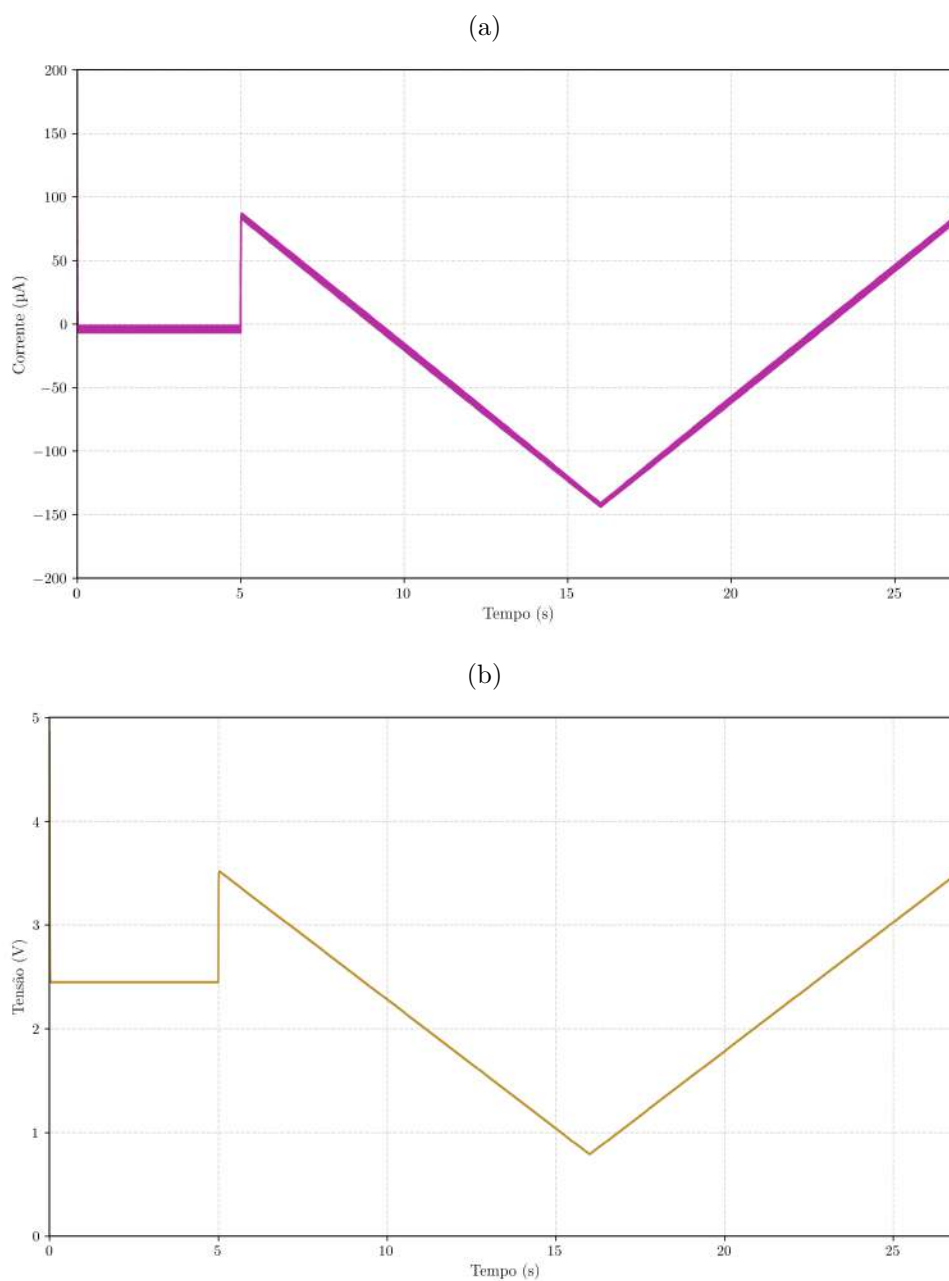
É possível observar que o perfil temporal da corrente acompanha a variação do potencial aplicado à célula (Figura 26(a)). Após atravessar a célula, essa corrente é convertida pelo amplificador de transimpedância em um sinal de tensão adequado para digitalização pelo microcontrolador, conforme ilustrado na Figura 26(b).

Figura 25 – (a) Tensão digital gerada pelo PWM; (b) Tensão analógica resultante após o processamento pelo amplificador somador.



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 26 – (a) Corrente simulada na célula eletroquímica; (b) Tensão equivalente obtida após a conversão pelo amplificador de transimpedância.

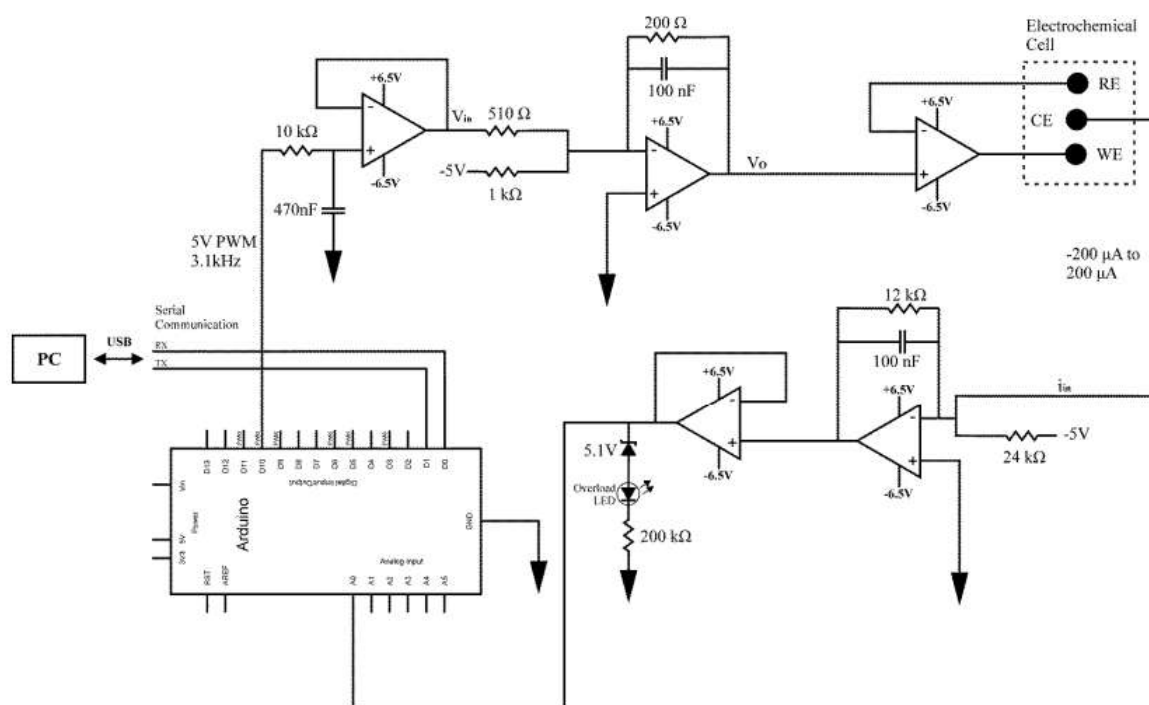


Fonte: Autoria própria (2025).

2.4 Protótipo do potenciostato baseado em um microcontrolador

Com base no projeto desenvolvido no item 2.1, temos o design final para o potenciostato dado na Figura 27.

Figura 27 – Esquemático completo do potenciostato com valores reais dos componentes utilizados no experimento.



Fonte: (MELONI, 2016).

Deste modo, para a construção do circuito são necessários os componentes listados na Tabela 5.

Em comparação aos valores apresentados no tópico 1.1 para equipamentos comerciais, o custo total deste projeto mostrou-se significativamente reduzido. O investimento de R\$ 192,69 incluiu também:

- Kit de 140 jumpers U coloridos (R\$ 22,12)
- Kit de 10 barras de 40 pinos macho (R\$ 19,90)

para uma construção mais limpa e organizada na protoboard. Embora a Tabela 5 indique os itens estritamente necessários para a realização dos experimentos, a escolha pelo kit Arduino Start se justifica pela inclusão de componentes adicionais (protoboard, jumpers e LEDs), que oferecem maior versatilidade na montagem e configuração do circuito. Entretanto, estes não são essenciais e a fabricação pode custar ainda menos se necessário.

Deste modo, temos a montagem final do dispositivo ilustrada na Figura 28.

Tabela 5 – Lista de materiais para fabricação de uma unidade do potenciostato deste projeto.

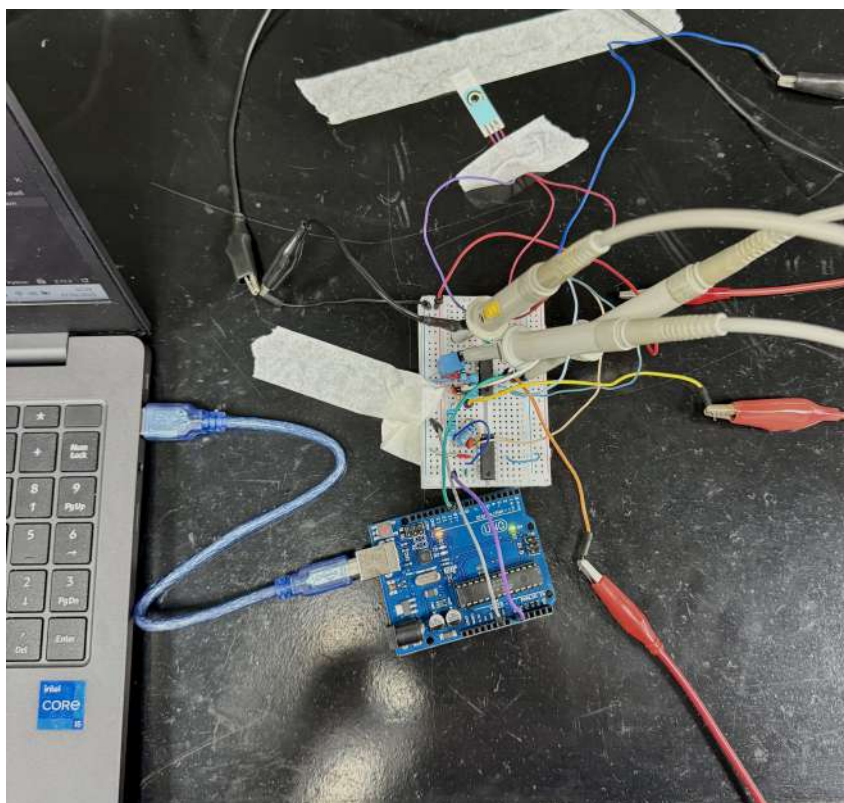
Componente	Quantidade	Valor (R\$)
LM7805 (regulador de voltagem)	1	3,50
LM7808 (regulador de voltagem)	1	3,50
LM7908 (regulador de voltagem)	1	3,50
Diodo Zener 5V1	1	0,30
Resistor 200 Ω	1	*
Resistor 510 Ω	1	0,90 (10 unidades)
Resistor 1k Ω	1	*
Resistor 10k Ω	1	*
Resistor 12k Ω	1	0,60 (10 unidades)
Resistor 24k Ω	1	0,90 (10 unidades)
Capacitor cerâmico 100nF	1	*
Capacitor cerâmico 470nF	1	0,07
Conector Borne KRE 3 vias	1	1,50
Conector Borne KRE 2 vias	2	2,40 (2 unidades)
LM324 (Amplificador Operacional)	2	3,60 (2 unidades)
Placa Arduino Uno R3	1	*

Fonte:

Elaboração própria (2025).

Observação: Os itens marcados com * foram adquiridos como parte de um kit Arduino Starter no valor de R\$129,90. Todos os itens tiveram aquisição pelo site da Eletrogate (Eletrogate, 2025).

Figura 28 – Montagem do protótipo proposto de um potenciostato portátil.



Fonte: Autoria própria (2025).

2.4.1 Avaliação Experimental do Protótipo

A realização dos testes de funcionamento com o protótipo teve como objetivo verificar se o sistema seria capaz de executar, de maneira adequada, a varredura de potencial necessária para a obtenção de um voltamograma cíclico. Para permitir uma comparação direta com os resultados obtidos pelos potenciostatos comerciais da Metrohm, descritos na Seção 2.2, empregaram-se exatamente as mesmas condições experimentais: o mesmo eletrodo e a mesma solução de ferricianeto de potássio na concentração utilizada nos ensaios anteriores. Dessa forma, tornou-se possível avaliar não apenas a coerência eletroquímica das respostas produzidas pelo protótipo, mas também sua eficiência em reproduzir o comportamento esperado para o sistema redox utilizado como referência.

A varredura do potencial foi implementada por meio de um procedimento programado no microcontrolador, cujo código completo se encontra no Apêndice A. Inicialmente, o sistema mantém o eletrodo de trabalho em 0 V durante 5 s, o que é realizado no código ao fixar o valor digital em 127 por meio do comando `analogWrite(a,127)`. Em seguida, ocorre a varredura direta, na qual o potencial aplicado varia de -0,4 V (valor digital aproximado de 184) até 0,7 V (valor digital próximo de 41). Após atingir esse limite, o programa inverte o sentido da varredura e retorna ao valor inicial, reconstruindo o percurso de potencial. Os intervalos entre os passos foram calculados automaticamente no trecho `intervalos[pos] = (1000000L / (vevals[pos] * 128L))`, ajustando a taxa de varredura para aproximadamente 0,1 V/s. Para garantir estabilidade temporal, o temporizador interno foi configurado para operar próximo de 3300 Hz, conforme o comando aplicado ao registrador TCCR1B. Esses parâmetros também foram escolhidos de modo a reproduzir, de forma coerente, as condições utilizadas nos experimentos com potenciostatos comerciais.

Para a caracterização dos sinais digitais e analógicos produzidos pelo circuito, foram empregados instrumentos laboratoriais adequados ao monitoramento das grandezas envolvidas. A visualização do sinal PWM e sinais analógicos e digitais foi realizada por meio do osciloscópio *KEYSIGHT InfiniiVision DSOX2024A*, que permitiu acompanhar a forma de onda e a estabilidade temporal do potencial aplicado. A alimentação do circuito foi fornecida pela fonte de tensão contínua *MPL-3303M*, utilizada para estabelecer níveis de tensão estáveis durante todo o experimento. Além disso, o acompanhamento da varredura de potencial aplicada ao eletrodo de trabalho foi efetuado com o multímetro digital *APPA ET-2510*, assegurando que os valores produzidos pelo microcontrolador correspondessem às tensões efetivamente aplicadas ao sistema eletroquímico.

As Figuras 29, 30 e 31 apresentam a análise dos sinais produzidos pelo circuito durante a aplicação das diferentes tensões programadas. Em todas as medições realizadas com o osciloscópio, a linha azul corresponde à curva analógica gerada pelo filtro RC do circuito, enquanto a linha verde representa o comportamento do sinal digital após a conversão PWM. O sinal PWM propriamente dito é exibido em amarelo, na parte superior

de cada captura, permitindo visualizar a relação entre o ciclo de trabalho e o valor de tensão resultante no eletrodo de trabalho. Embora o osciloscópio seja mais adequado para observar a forma de onda e a estabilidade temporal desses sinais, o multímetro digital apresenta leitura mais estável e representa de forma mais fiel o valor médio da tensão aplicada, como ilustrado nos painéis (b) de cada figura.

Os dados gerados pelo microcontrolador durante a varredura de potencial foram registrados em um computador por meio de um script em Python, cuja implementação completa encontra-se no Apêndice B. Esse script utiliza a biblioteca `serial` para estabelecer comunicação com a porta USB e registrar, em tempo real, os valores transmitidos pelo Arduino durante o experimento.

A tensão aplicada ao eletrodo de trabalho é produzida a partir de um sinal PWM fornecido pelo Arduino, cujo gerador possui resolução de 8 bits. Assim, cada valor digital d , variando entre 0 e 255, é convertido em uma tensão média após filtragem RC segundo:

$$V_{\text{PWM}} = \frac{d}{255} \cdot 5 \text{ V} \quad (2.5)$$

onde V_{PWM} é a tensão média aplicada ao filtro em *Volts*, d é o valor digital escrito no registrador de PWM, e 5 V corresponde à tensão de alimentação utilizada como referência. Essa tensão média é posteriormente convertida, pelo circuito condicionador, no potencial aplicado ao eletrodo de trabalho.

A tensão medida na saída do amplificador de transimpedância é adquirida pelo conversor analógico-digital do Arduino, o qual opera com resolução de 10 bits, resultando em valores inteiros entre 0 e 1023. A tensão associada a cada leitura é dada por:

$$V_{\text{ADC}} = \frac{\text{ADC}}{1023} \cdot 5 \text{ V} \quad (2.6)$$

onde V_{ADC} é a tensão presente na saída do amplificador, ADC é o valor convertido pelo conversor analógico-digital, e 5 V é a tensão de referência utilizada pelo módulo de conversão.

O amplificador de transimpedância converte a corrente eletroquímica em tensão de acordo com a relação:

$$I = -\frac{V_{\text{ADC}}}{R_f} \quad (2.7)$$

onde I é a corrente produzida pela célula eletroquímica, V_{ADC} é a tensão medida pelo Arduino na saída do amplificador e $R_f = 24000 \Omega$ é o resistor de realimentação utilizado na configuração de transimpedância.

Finalmente, a corrente foi expressa em microampères segundo:

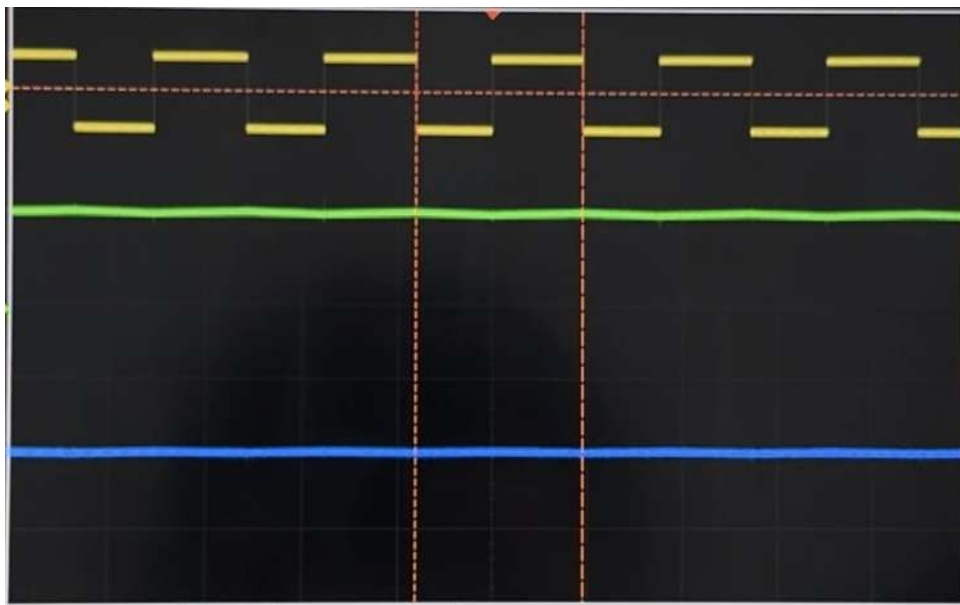
$$I_{\mu A} = I \times 10^6 \quad (2.8)$$

onde $I_{\mu A}$ representa a corrente em microampères, valor empregado na construção dos voltamogramas apresentados neste trabalho.

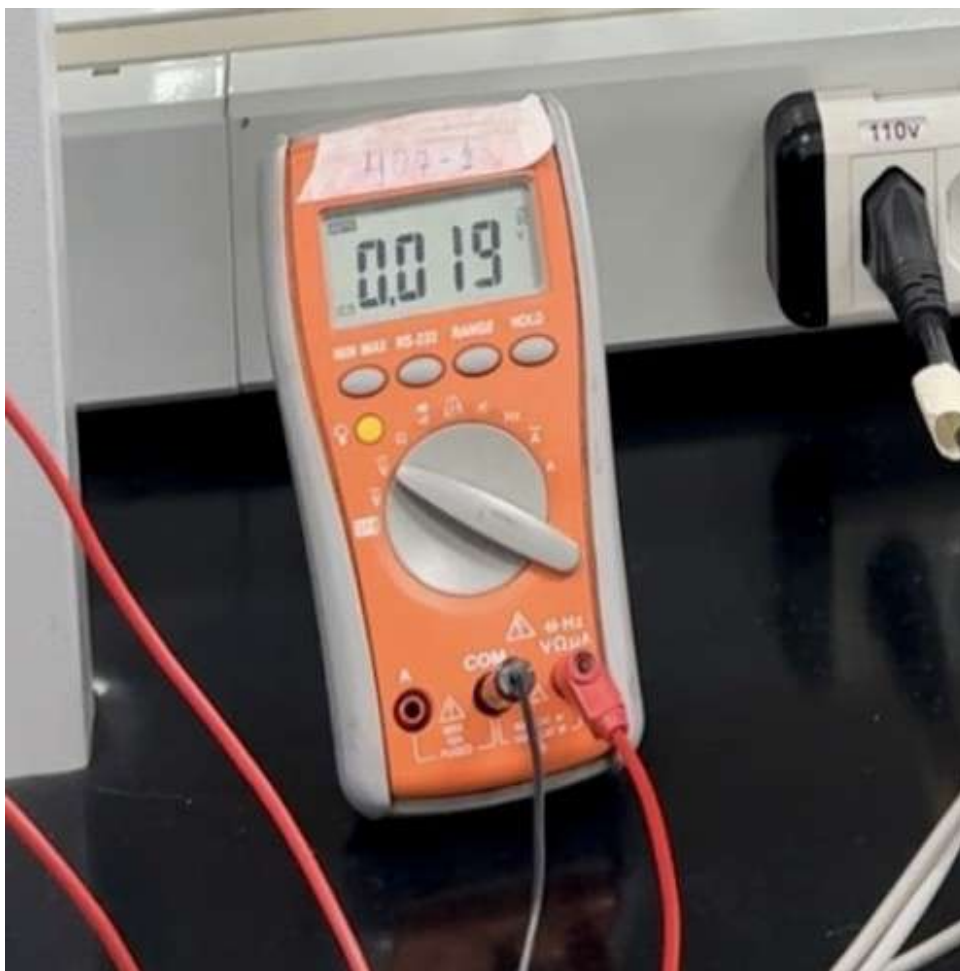
A partir das relações matemáticas apresentadas e do processamento dos dados adquiridos durante a varredura, foi possível converter adequadamente os valores digitais enviados e recebidos pelo microcontrolador nos respectivos valores de tensão e corrente do sistema eletroquímico. Com esses parâmetros reconstruídos, realizou-se a geração do voltamograma cíclico, permitindo visualizar o comportamento redox da solução analisada e avaliar o desempenho do protótipo frente às condições experimentais. O resultado desse processamento encontra-se apresentado na Figura 32, na qual observamos o perfil voltamétrico obtido a partir das medições realizadas pelo circuito em questão.

Figura 29 – (a) Sinal PWM e respostas digital e analógica para o potencial de aproximadamente 0 V; (b) Leitura correspondente obtida com o multímetro digital.

(a)

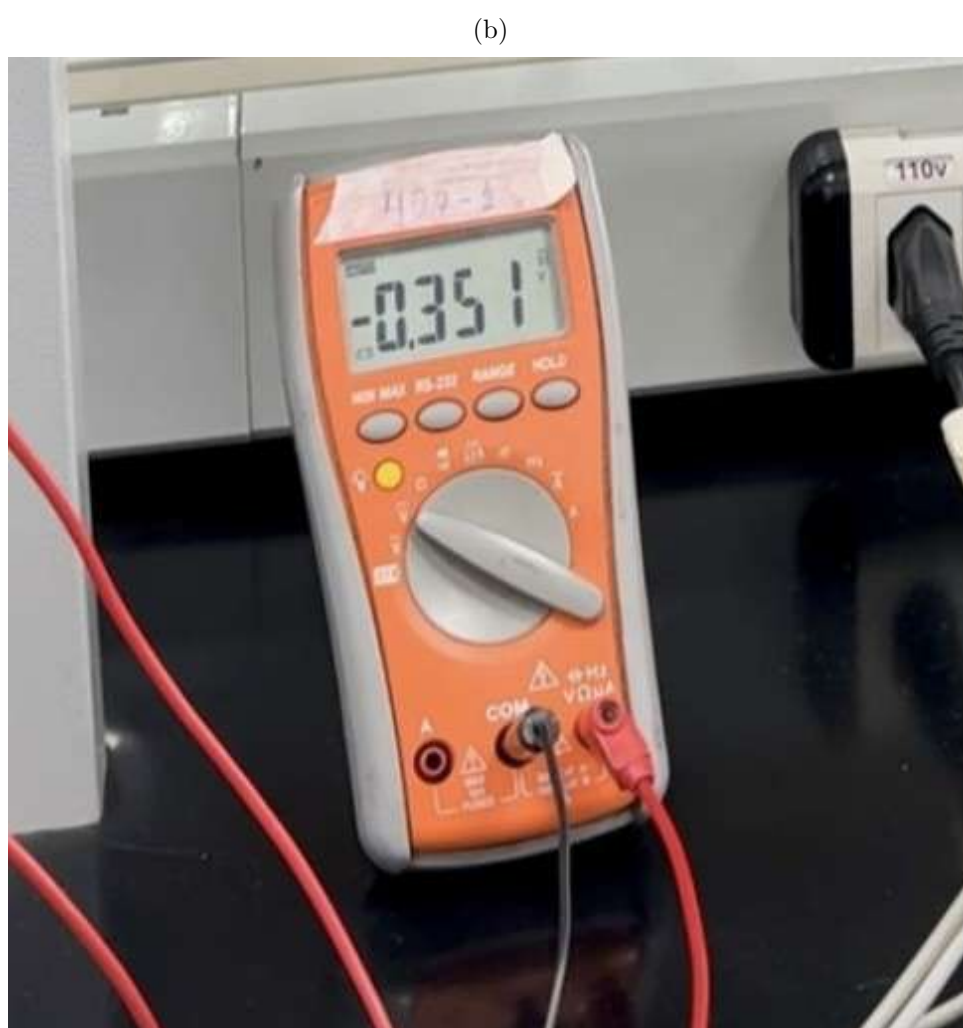
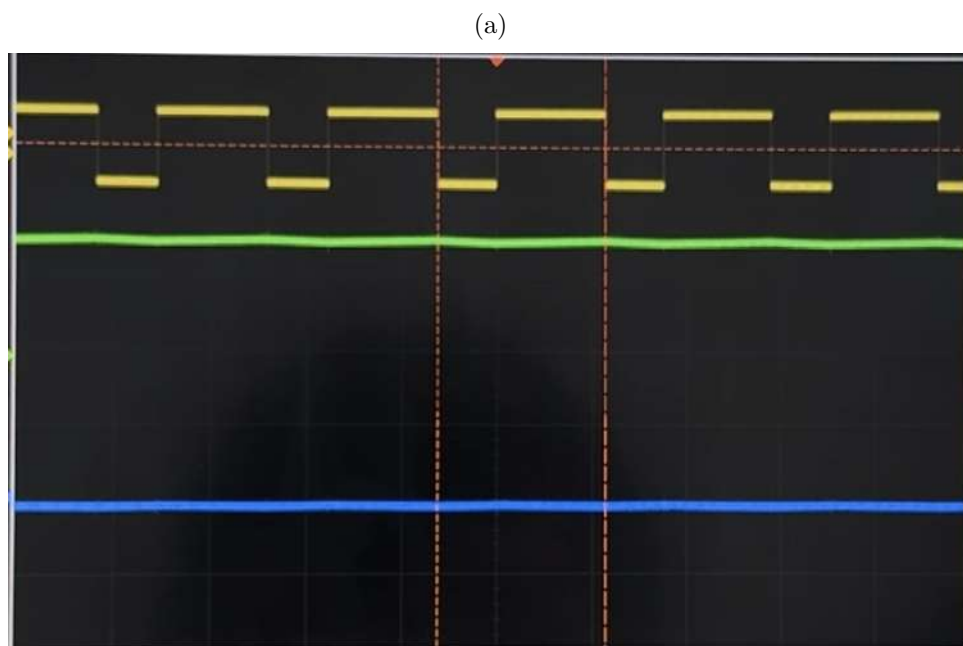


(b)



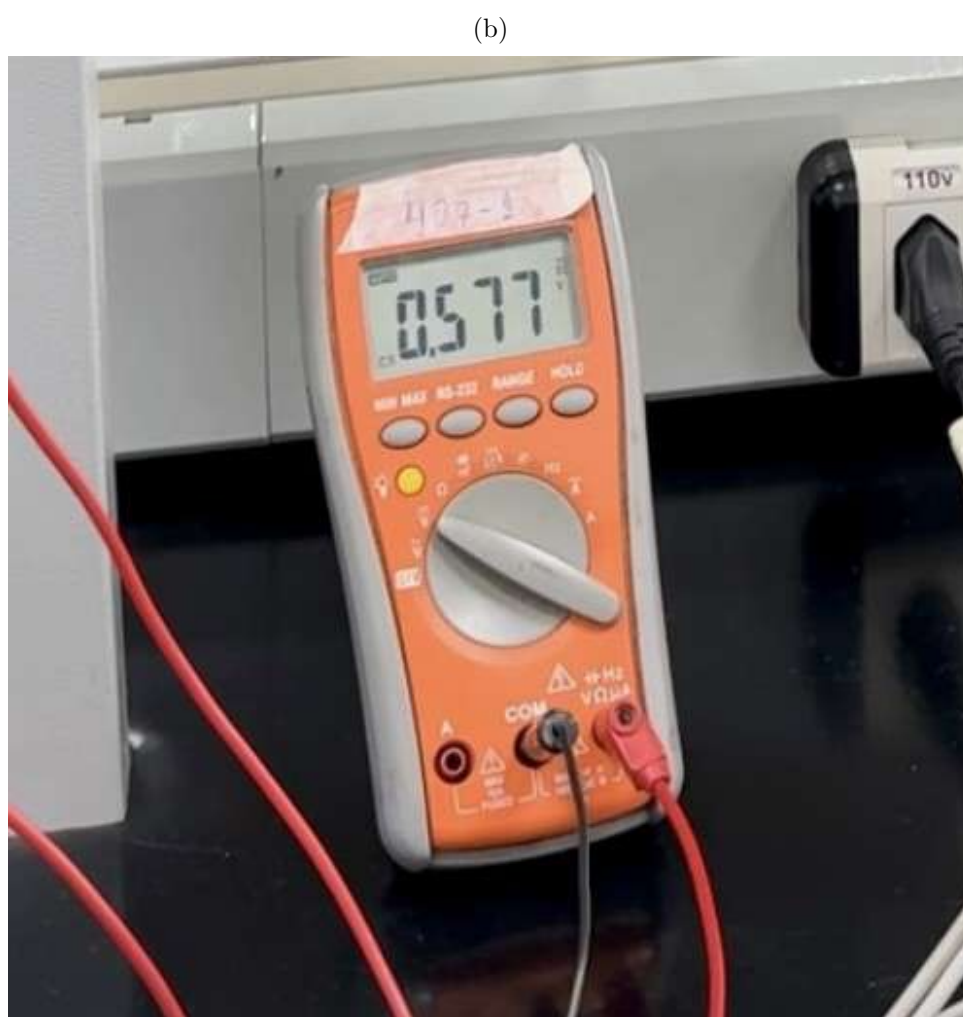
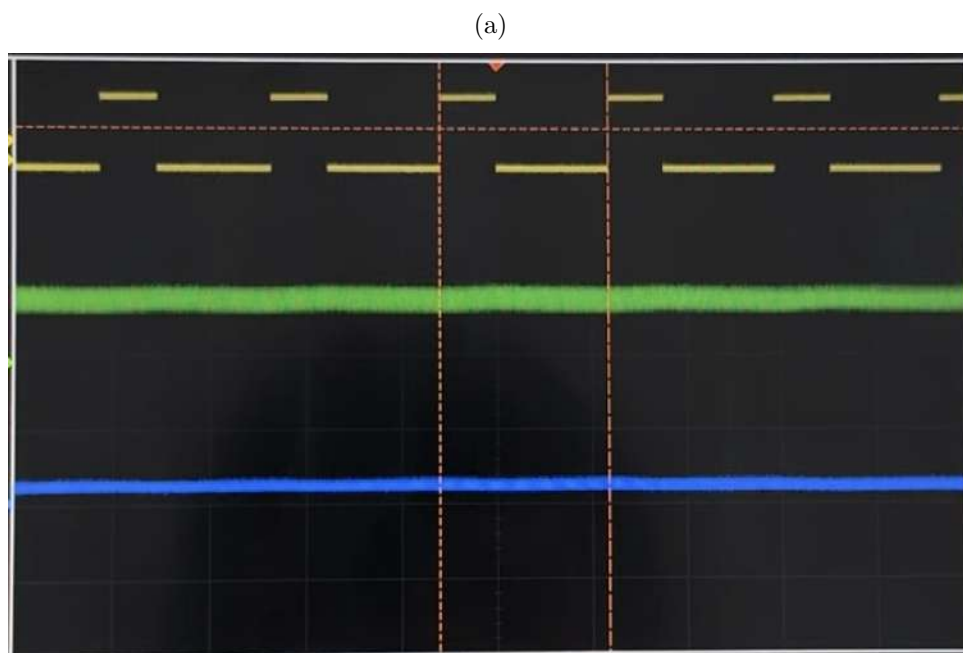
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 30 – (a) Sinal PWM e respostas digital e analógica para o potencial de aproximadamente $-0,4\text{ V}$, evidenciando a redução do valor médio; (b) Medição correspondente realizada com o multímetro digital.



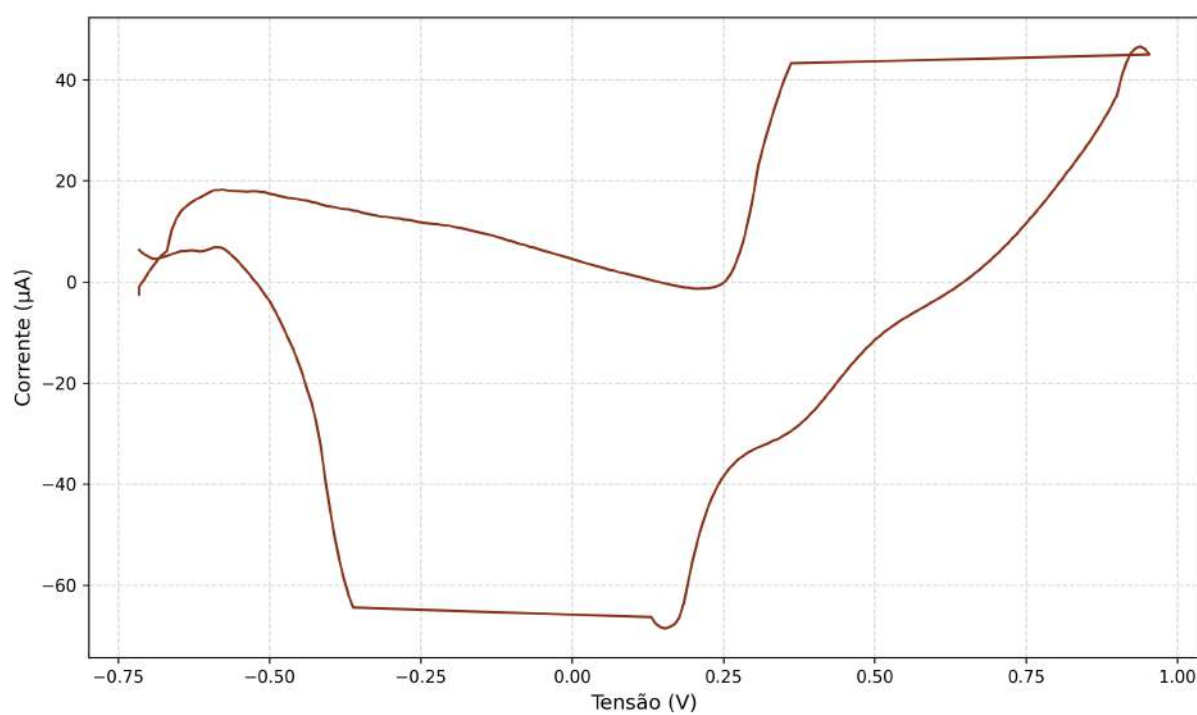
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 31 – (a) Sinal PWM e respostas digital e analógica para o potencial de aproximadamente 0,7 V, mostrando o aumento do valor médio aplicado; (b) Leitura associada obtida com o multímetro digital.



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 32 – Voltamograma cíclico gerado a partir do protótipo.



Fonte: Autoria própria (2025).

3 Resultados e Discussão

Esta seção apresenta os principais resultados obtidos ao longo do desenvolvimento e simulação do circuito proposto, bem como as análises comparativas de desempenho e custo. São abordadas quatro frentes principais: a comparação econômica entre o circuito desenvolvido e potenciostatos comerciais, a validação da simulação frente à literatura e ao desempenho dos potenciostatos da Metrohm, a validação experimental do protótipo frente ao que foi observado com os potenciostatos comerciais, como também, considerações gerais sobre o comportamento experimental e teórico do sistema.

3.1 Análise comparativa de custos

O custo estimado de fabricação de uma unidade do potenciostato desenvolvido, conforme a Tabela 5, totaliza aproximadamente R\$ 192,69, considerando componentes eletrônicos de baixo custo e de fácil obtenção no mercado nacional. Em contraste, o preço de um potenciostato comercial, como o modelo PGSTAT302N da Metrohm, pode ultrapassar valores de R\$ 600.000,00, enquanto o μ Stat 400, também da Metrohm, apresenta custo médio na faixa de R\$ 80.000,00.

A diferença expressiva de custos evidencia a qualificação do circuito proposto para fins educacionais, experimentais e de aplicações de triagem, em que a precisão absoluta não é o fator determinante. Embora a simplicidade do projeto implique limitações na estabilidade e na resolução de corrente, o custo de produção representa menos de 1% do valor de um equipamento comercial de bancada, reforçando a viabilidade de sua aplicação em contextos de ensino e pesquisa de baixo orçamento.

3.2 Simulação versus Bibliografia

A validação dos resultados obtidos na simulação foi realizada a partir da comparação com valores experimentais reportados na literatura. Na Tabela 2, observa-se que o limite de tensão, o intervalo de potencial e os limites de corrente empregados estão em conformidade com experimentos padrão de voltametria cíclica, de acordo com os obtidos por Meloni (2016).

A faixa de potencial aplicada, mostrada na Figuras 19, variou entre -1 V e 1 V , apresentando comportamento simétrico e coerente com reações redox reversíveis em soluções aquosas.

O circuito apresentou resposta corrente–potencial característica da técnica voltamé-

trica, conforme ilustrado na Figura 21. Observa-se que a corrente variou entre aproximadamente $-200\ \mu\text{A}$ e $200\ \mu\text{A}$, faixa condizente com os valores reportados em experimentos reais de sistemas equivalentes, indicando que o modelo reproduz adequadamente a resposta eletroquímica esperada.

Além disso, a Figura 22 evidencia o limite de tensão entre 0 V e 5 V, configurado para garantir a segurança da entrada analógica do microcontrolador *Arduino*, prevenindo sobrecarga no circuito e assegurando compatibilidade com o sistema de aquisição de dados.

Esses resultados demonstram que, mesmo utilizando um modelo simplificado de célula eletroquímica e componentes ideais, a simulação realizada no software LTSpice foi capaz de representar de forma coerente o comportamento observado na literatura, validando a arquitetura proposta do circuito de potenciostato.

3.3 Simulação versus Metrohm

A comparação entre os voltamogramas obtidos com os potenciostatos $\mu\text{Stat 400}$ e PGSTAT302N (Figura 15) demonstra que ambos apresentaram respostas praticamente idênticas, o que era esperado, uma vez que foram configurados com os mesmos parâmetros iniciais de varredura, conforme mostrado na Tabela 3. As pequenas diferenças observadas na forma das curvas podem ser atribuídas ao fato de o PGSTAT302N operar com o modo *pre-ramp*, realizando uma breve variação inicial de potencial antes de atingir o valor programado. Essa característica faz com que a tensão comece a se alterar em torno de 8 s, enquanto no $\mu\text{Stat 400}$ a varredura efetiva se inicia em torno de 5 s, uma diferença de cerca de 3 s, correspondente ao tempo necessário para o PGSTAT302N ir de 0 V a aproximadamente $-0,4\ \text{V}$. Essa defasagem inicial se reflete no restante do voltamograma, resultando em um deslocamento temporal equivalente que pode ser observado na Tabela 6.

Além disso, outra diferença sutil entre os resultados decorre da precisão numérica de cada equipamento: enquanto o $\mu\text{Stat 400}$ apresenta resolução de até duas casas decimais nas medidas de potencial, o PGSTAT302N opera com precisão de até dez casas, o que impacta levemente o traçado final da curva ao longo da varredura. Ainda assim, os comportamentos gerais observados são consistentes entre si, reforçando a confiabilidade dos parâmetros experimentais utilizados e a equivalência entre os dois sistemas.

Os amplificadores somadores e de transimpedância demonstraram desempenho satisfatório no ajuste da resolução e da amplitude da janela de potencial empregada no experimento. Os valores de tensão obtidos na simulação realizada no LTSpice, exibidos na Figura 25(b), correspondem aos mesmos pontos de potencial configurados nos experimentos conduzidos com os potenciostatos da Metrohm (Tabela 3), validando a adequação da arquitetura proposta para geração da rampa de varredura.

Tabela 6 – Comparativo entre os valores de tensão e tempo obtidos para os potenciostatos μ Stat 400 e PGSTAT302N.

μ Stat 400		PGSTAT302N	
Tensão [V]	Tempo [s]	Tensão [V]	Tempo [s]
0,00	0,00	0,0000000000	0,0000000000
0,00	5,00	0,0000000000	5,0000000000
-0,40	5,01	-0,3799438477	8,698888978
0,70	16,00	0,7194519043	19,69283895
-0,40	27,00	-0,3999328613	30,88667892

Fonte: Autoria própria (2025).

Embora não seja possível comparar quantitativamente a corrente simulada com valores experimentais, uma vez que sua magnitude e forma dependem diretamente da solução eletrolítica utilizada e das reações eletroquímicas envolvidas, observa-se que os valores obtidos (Figura 26(a)) permanecem dentro das faixas de corrente reportadas na literatura e adotadas neste trabalho para voltametria cíclica (Tabela 2). Ademais, a conversão dessa corrente em tensão, destinada ao interfaceamento com o microcontrolador Arduino, foi realizada satisfatoriamente pelo amplificador de transimpedância.

Por fim, a análise conjunta desses resultados evidencia a versatilidade do sistema desenvolvido, o qual permite ajustar o perfil de tensão de referência, optar pelo tipo de eletrodo mais adequado e selecionar diferentes modalidades de voltametria conforme a necessidade experimental, conferindo alta flexibilidade e adaptabilidade ao arranjo proposto.

3.4 Metrohm versus Protótipo

A comparação entre os voltamogramas obtidos com os potenciostatos comerciais da Metrohm (Figura 15) e aqueles gerados pelo protótipo desenvolvido (Figura 32) permite avaliar, de forma crítica, o desempenho do sistema proposto frente a um equipamento consolidado. Embora ambos apresentem o comportamento característico da voltametria cíclica para o par redox do ferricianeto, o voltamograma produzido pelo protótipo exibe um traçado menos suave, com deformações que impactam o formato esperado de um "pato", em contraste com a curva mais fluida obtida com os instrumentos da Metrohm.

Uma das principais causas dessa diferença está associada à limitação da geração de sinal pelo microcontrolador. Apesar de o objetivo ter sido reproduzir uma frequência de aproximadamente 3,3 kHz na modulação PWM, a configuração dos temporizadores do Arduino não permitiu atingir exatamente este valor, sendo possível apenas chegar a

aproximadamente 3,9 kHz. Essa discrepância decorre das restrições internas do hardware, relacionadas aos divisores de *clock* e ao modo de operação dos temporizadores, que não oferecem combinações suficientes para ajustar a frequência de forma contínua. Como consequência, a varredura de potencial não atingiu exatamente os valores desejados, mas apenas aproximações, o que compromete parcialmente a linearidade e a estabilidade da curva final.

Outro fator relevante diz respeito à qualidade do sinal adquirido. Durante a análise dos dados, observou-se que o microcontrolador apresentou indícios de saturação em determinados momentos, especialmente após a adição de um maior volume de solução eletroativa sobre o eletrodo de trabalho. Essa alteração experimental modificou a impedância do sistema eletroquímico e resultou em um aumento perceptível do ruído nas leituras. Além disso, é possível que etapas do circuito responsáveis pela filtragem analógica, particularmente o filtro RC associado à suavização do PWM, não tenham sido implementadas na configuração ideal, permitindo a passagem de componentes de alta frequência ou reduzindo a eficiência do amortecimento das oscilações.

Apesar dessas limitações, o protótipo foi capaz de produzir um voltamograma coerente com o comportamento esperado para o sistema redox analisado. O intervalo de tensões atingido encontra-se dentro da faixa adequada ao experimento, e os valores de corrente calculados apresentam ordem de grandeza compatível com os registros obtidos pelos potenciostatos comerciais. Dessa forma, embora apresente imperfeições decorrentes tanto das limitações do hardware quanto da simplicidade do circuito construído, o protótipo cumpre satisfatoriamente o objetivo proposto, demonstrando viabilidade na geração de voltamogramas cíclicos e consolidando-se como uma alternativa funcional e de baixo custo para o estudo básico de sistemas eletroquímicos e, principalmente, como alternativa para monitoramento ambiental.

3.5 Síntese dos resultados e obstáculos superados

Durante o desenvolvimento do modelo eletrônico, algumas dificuldades foram encontradas, principalmente relacionadas à representação fiel de certos estágios do circuito no ambiente de simulação LTspice. A primeira delas consistiu na reprodução do sinal de modulação *PWM* responsável pelo controle de potencial. As referências utilizadas como base principal do projeto, Meloni (2016) e Cordova-Huaman, Jauja-Ccana e Rosa-Toro (2021), não detalhavam esse aspecto, o que dificultou a implementação inicial. Essa limitação foi superada por meio do uso das funções *PULSE* e *PWL*, que permitiram gerar formas de onda temporais personalizadas, reproduzindo de maneira satisfatória o comportamento do sinal de saída esperado para o microcontrolador.

Outra dificuldade relevante esteve relacionada à modelagem da célula eletroquímica

no simulador, uma vez que poucos estudos apresentavam modelos equivalentes detalhados para esse tipo de aplicação. Essa etapa foi superada com o auxílio do trabalho de Reynoso (2021), que forneceu subsídios teóricos para a construção de um modelo compatível com o circuito proposto.

Durante o desenvolvimento do projeto, observou-se que pequenas variações nos valores dos resistores e capacitores do amplificador de transimpedância podem causar desvios significativos na escala de corrente simulada. Essa sensibilidade reforça a importância do dimensionamento preciso dos componentes e do uso de amplificadores operacionais com baixa corrente de polarização na implementação do circuito físico.

Referente à utilização do filtro RC na saída do conversor PWM, sua constante de tempo (RC_t) deve ser cuidadosamente ajustada. Valores inadequados podem distorcer a forma de onda de saída, impactando diretamente a estabilidade do potencial aplicado à célula eletroquímica. Esse aspecto, embora sutil na simulação, é crítico em uma implementação real, e deve ser considerado em futuros aprimoramentos do projeto.

Os resultados obtidos demonstram que o protótipo proposto apresenta sensibilidade suficiente para identificar concentrações de metais pesados acima dos limites de potabilidade (SAÚDE, 2021), que define valores máximos de $10 \mu\text{g/L}$ para chumbo (Pb), $3 \mu\text{g/L}$ para cádmio (Cd) e $1 \mu\text{g/L}$ para mercúrio (Hg). Embora não se destine a quantificações laboratoriais, o sistema é capaz de indicar de forma confiável se a amostra está dentro ou acima do limite aceitável, para aprimorar os resultados pode ser realizada a etapa de pré-concentração do analito no eletrodo de trabalho sob potencial controlado e com leve agitação da solução durante o tempo de deposição, seguida da varredura voltamétrica de redissolução que pode ser executada pelo próprio programa embarcado do potenciostato. Esses procedimentos, facilmente implementáveis em campo, ampliam a magnitude do sinal voltamétrico e permitem distinguir visualmente a presença de picos correspondentes às concentrações críticas, validando a viabilidade do protótipo para aplicações portáteis de triagem e monitoramento ambiental (KERAMARI; KARASTOGIANNI; GIROUSI, 2023).

Em síntese, o circuito proposto cumpre satisfatoriamente o objetivo de representar o funcionamento de um potenciostato de bancada de forma simplificada, com custo extremamente reduzido e comportamento coerente com o esperado teoricamente. A simulação demonstrou coerência com parâmetros experimentais e da literatura, validando a estrutura de controle de potencial e conversão de corrente. A diferença de custo em relação aos equipamentos comerciais reforça a relevância do projeto como alternativa de baixo custo para aplicações didáticas e de pesquisa básica. Ademais, embora o voltamograma obtido apresente menor suavidade e maior ruído quando comparado aos resultados produzidos pelos potenciostatos da Metrohm, o formato geral da curva, a faixa de tensão e a ordem de grandeza da corrente permanecem compatíveis com o comportamento eletroquímico esperado.

4 Considerações Finais

A contaminação ambiental por metais pesados representa um dos desafios críticos da atualidade, comprometendo a qualidade da água, do solo e, conseqüentemente, a saúde humana. Em especial, o chumbo, o cádmio e o mercúrio figuram entre os elementos de maior preocupação devido à sua toxicidade e persistência ambiental. Nesse contexto, o desenvolvimento de instrumentos capazes de detectar esses contaminantes de forma acessível, confiável e portátil torna-se uma necessidade urgente, sobretudo em regiões onde o monitoramento laboratorial é limitado por custos e infraestrutura.

O presente trabalho demonstrou a viabilidade da construção, utilizando modelagem e simulação, de um potenciostato portátil de baixo custo baseado em microcontrolador, capaz de realizar análises voltamétricas para identificação de metais pesados em solução. O projeto proposto mostrou que é possível reproduzir com boa fidelidade o comportamento de potenciostatos comerciais, utilizando componentes eletrônicos simples e de baixo custo, sem comprometer a funcionalidade essencial do sistema.

A comparação de custos evidencia o potencial de democratização do acesso a esse tipo de equipamento: enquanto dispositivos de referência como o *Autolab PGSTAT302N* e o *μStat 400* da Metrohm apresentam valores aproximados de R\$600.000,00 e R\$80.000,00, respectivamente, o modelo proposto neste estudo pode ser montado com custo inferior a 1% desse valor, mantendo desempenho compatível com aplicações acadêmicas, educacionais e de triagem ambiental. Essa diferença reforça o impacto econômico e social de soluções de engenharia voltadas à sustentabilidade e à inclusão tecnológica.

Os resultados obtidos na simulação pelo LTspice mostraram-se consistentes com os dados da literatura e com os experimentos conduzidos nos potenciostatos da Metrohm, evidenciando que a arquitetura proposta opera de maneira estável e com comportamento eletroquímico esperado. O circuito apresentou controle adequado de potencial e resposta de corrente compatível com o modelo teórico, demonstrando a eficácia da conversão do sinal PWM em tensão analógica e o desempenho satisfatório das etapas de soma e de conversão corrente-tensão. A validação experimental confirmou essas observações, indicando que o protótipo físico reproduz, de forma coerente, as características essenciais previstas pela simulação e pelos métodos convencionais de voltametria cíclica.

Além do ganho econômico e técnico, o protótipo simulado demonstra potencial para aplicações diversas, desde o monitoramento ambiental em campo até o uso didático em disciplinas de eletroquímica, instrumentação e sensoriamento. Com a caracterização do circuito conforme a simulação proposta, tornou-se possível a construção de um dispositivo funcional capaz de identificar se uma solução apresenta concentração de metais pesados

acima dos níveis recomendados. Tal configuração permite a realização de análises qualitativas em campo, com o objetivo de indicar de forma simples e rápida a presença de concentrações potencialmente nocivas, sem a necessidade de equipamentos laboratoriais complexos. Sua concepção modular permite futuras expansões, como integração com sensores de nanomateriais, controle por aplicativo, comunicação sem fio e automação de análises. Tais aprimoramentos podem transformar o dispositivo em uma ferramenta poderosa para pesquisa e extensão universitária, além de promover maior autonomia de laboratórios e instituições de ensino que não dispõem de infraestrutura avançada.

Uma parte valiosa desta entrega foi a oportunidade de aplicar, de forma integrada, os conhecimentos adquiridos ao longo do curso de Engenharia de Informação. Conceitos de eletrônica analógica e digital, modelagem de sistemas, instrumentação, programação embarcada e simulação computacional foram fundamentais para o desenvolvimento desse estudo de modelagem do circuito e para a validação do seu desempenho. A interdisciplinaridade característica do projeto pedagógico da UFABC mostrou-se essencial para compreender o comportamento do sistema eletroquímico e traduzi-lo em um modelo eletrônico eficiente. Dessa forma, este trabalho representa não apenas uma contribuição técnica à área de instrumentação analítica, mas também a consolidação prática das competências e habilidades formadas ao longo da graduação.

Em suma, o projeto reafirma o papel da engenharia aplicada e da modelagem eletrônica como ferramentas fundamentais para o avanço de tecnologias sustentáveis e de baixo custo. A convergência entre precisão científica, acessibilidade econômica e impacto social consolida este estudo como uma contribuição significativa à busca por soluções tecnológicas voltadas à preservação ambiental e à promoção da saúde pública.

Referências

Agilent Technologies. *How Does AAS Work? Flame Atomic Absorption Instruments – AAS FAQs*. s.d. Website. Acesso em: mai. 2024. Disponível em: <<https://www.agilent.com/en/support/atomic-spectroscopy/atomic-absorption/flame-atomic-absorption-instruments/how-does-aas-work-aas-faqs>>. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 3.

Agilent Technologies. *What Is ICP-MS? Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry – ICP-MS FAQs*. s.d. Website. Acesso em: mai. 2024. Disponível em: <<https://www.agilent.com/en/product/atomic-spectroscopy/inductively-coupled-plasma-mass-spectrometry-icp-ms/what-is-icp-ms-icp-ms-faqs>>. Citado na página 4.

ALEIXO, L. M. Voltametria: conceitos e técnicas. *Revista Chemkeys*, n. 3, p. 1–21, 2018. Disponível em: <<https://econtents.sbu.unicamp.br/inpec/index.php/chemkeys/article/view/9609>>. Citado 3 vezes nas páginas 13, 14 e 15.

Buck Scientific. *Atomic Absorption Spectrophotometer*. s.d. Website. Acesso em: mai. 2024. Disponível em: <<https://www.bucksci.com/pages/atomic-absorption-spectrophotometer>>. Citado na página 4.

CARVALHO, R. C.; GOUVEIA-CARIDADE, C.; BRETT, C. M. A. Glassy carbon electrodes modified by multiwalled carbon nanotubes and poly(neutral red): a comparative study of different brands and application to electrocatalytic ascorbate determination. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, v. 398, n. 4, p. 1675–1685, 2010. Citado na página 10.

Centers for Disease Control and Prevention. *CDC Updates Blood Lead Reference Value*. 2021. Website. Acesso em: mar. 2024. Disponível em: <<https://www.cdc.gov/lead-prevention/php/news-features/updates-blood-lead-reference-value.html>>. Citado na página 1.

CORDOVA-HUAMAN, A. V.; JAUJA-CCANA, V. R.; ROSA-TORO, A. L. Low-cost smartphone-controlled potentiostat based on arduino for teaching electrochemistry fundamentals and applications. *Heliyon*, Elsevier, v. 7, n. 3, p. e06259, mar 2021. Citado 3 vezes nas páginas 19, 21 e 49.

Eletrogate. *Eletrogate – Instrumentos e Consultoria em Eletroquímica*. 2025. Website institucional. Acesso em: jun. 2025. Disponível em: <<https://www.eletrogate.com>>. Citado na página 37.

Elsevier. *Stripping voltammetry*. s.d. ScienceDirect Topics. Acesso em: mai. 2024. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/stripping-voltammetry>>. Citado na página 13.

KERAMARI, V.; KARASTOGIANNI, S.; GIROUSI, S. New prospects in the electroanalysis of heavy metal ions (cd, pb, zn, cu): Development and application of novel electrode surfaces. *Methods and Protocols*, v. 6, n. 4, p. 60, 2023. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2409-9279/6/4/60>>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 50.

KRAJEWSKA, A.; RADECKI, J.; RADECKA, H. A voltammetric biosensor based on glassy carbon electrodes modified with single-walled carbon nanotubes/hemoglobin for detection of acrylamide in water extracts from potato crisps. *Sensors*, v. 8, n. 9, p. 5832–5844, 2008. Citado na página 10.

MATTOS, R. d. C. O. d. C. et al. Avaliação dos fatores de risco relacionados à exposição ao chumbo em crianças e adolescentes do rio de janeiro. *Ciência & Saúde Coletiva*, 2009. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/csc/a/FCZgTLtwHYR4jnS8xgZ7LPz/?format=html&lang=pt>>. Citado na página 1.

MCMAHON, G. *ICP-MS: Instrumentation, Analysis, Strengths and Limitations*. 2021. Website. Acesso em: mai. 2024. Disponível em: <<https://www.technologynetworks.com/analysis/articles/icp-ms-icp-ms-instrumentation-icp-ms-analysis-strengths-and-limitations-341882>>. Citado na página 5.

MELONI, G. N. Building a microcontroller based potentiostat: an inexpensive and versatile platform for teaching electrochemistry and instrumentation. *Journal of Chemical Education*, v. 93, n. 7, p. 1320–1322, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.5b00961>>. Citado 11 vezes nas páginas 16, 17, 18, 19, 20, 21, 26, 28, 36, 46 e 49.

Metrohm AG. *AUT302N (Autolab PGSTAT302N) Potentiostat/Galvanostat*. 2025. Website (página do produto e datasheet). Acesso em: jul. 2025. Disponível em: <https://www.metrohm.com/pt_br/products/a/ut30/aut302n_s.html>. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 7.

Metrohm AG. *DRP-STAT400 Portable Bipotentiostat/Galvanostat*. 2025. Website de produto. Acesso em: jun. 2025. Disponível em: <https://www.metrohm.com/pt_br/products/d/rp-s/drps-stat400.html>. Citado na página 7.

MURPHY, S. *Get the Lead Out: Exploring the Negative Effects of Lead Exposure Across the Globe*. 2021. Blog post. Acesso em: mar. 2024. Disponível em: <<https://www.pghr.org/post/get-the-lead-out-exploring-the-negative-effects-of-lead-exposure-across-the-globe>>. Citado na página 2.

PACHECO, W. F. et al. Voltametrias: Uma breve revisão sobre os conceitos. *Revista Virtual de Química*, v. 5, 2013. Citado 8 vezes nas páginas 5, 8, 9, 10, 11, 12, 13 e 14.

REYNOSO, R. V. C. *Instrumentação eletroanalítica para aplicações em biossensores virais de grafeno*. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais)) — Universidade Federal do ABC (UFABC), Santo André, SP, 2021. Disponível em: <http://biblioteca.ufabc.edu.br/index.php?codigo_sophia=122979&midiaext=80151>. Citado 3 vezes nas páginas 29, 30 e 50.

ROCHA, F. R. P.; PEREIRA-FILHO, E. R.; NÓBREGA, J. A. Analytical chemistry in brazil: Healthy and growing. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, v. 20, n. 10, p. 1759–1781, 2009. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/jbchs/a/F4Hj4ZfT7ybNstScSmS8RDL/?lang=en>>. Citado na página 8.

SANTOS, A. L. et al. Electrochemical determination of inorganic contaminants in automotive fuels. *Electroanalysis*, v. 24, n. 8, p. 1681–1691, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/elan.201100511>>.

//analyticalsciencejournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/elan.201200193>. Citado na página 8.

SAÚDE, M. da. *Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021: dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade*. 2021. <https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_07_05_2021.html>. Acesso em 2025. Citado na página 50.

SCHOLZ, F. Voltammetric techniques of analysis: the essentials. *ChemTexts*, v. 1, n. 17, 2015. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s40828-015-0016-y>>. Citado 4 vezes nas páginas 9, 10, 11 e 12.

TCHOUNWOU, P. B. et al. Heavy metal toxicity and the environment. In: *Molecular, Clinical and Environmental Toxicology*. Basel: Springer, 2012. p. 133–164. Acesso em: mar. 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-7643-8340-4_6#Sec22>. Citado na página 1.

TORRES, K. F. A. *Nanoestruturas porosas de TiO₂, ZnO, Al₂O₃ e Si para detecção de cádmio e chumbo em água*. Brasília: [s.n.], 2023. Proposta de projeto submetida à Chamada CNPq/MCTI nº 10/2023 – Universal. Acesso via cópia do documento enviada pela autora em mar. 2024. Citado 3 vezes nas páginas 1, 2 e 5.

Apêndices

APÊNDICE A – Código-fonte do microcontrolador para varredura de potencial

Listing A.1 – Código utilizado no microcontrolador para a varredura de potencial na voltametria cíclica.

```

1  //Script starts
2
3  int a = 10;
4  int val = 0;
5  float ct = A0; // ADC
6  float c = 0;
7  int n = 0;
8  float Potstep = 0.0078; // para ajustar a resolucao do DAC
9  int vevals[] = {100}; // velocidade do scan (mV/s)
10 int const count = 1;
11 long intervalos[count];
12
13 void setup() {
14     TCCR1B = TCCR1B & B11111000 | B00000010; // Configura divisores para mudar a frequencia do
        PWM
15     Serial.begin(9600);
16     pinMode(a, OUTPUT);
17     pinMode(ct, INPUT);
18 }
19
20 void loop() {
21     for (int pos = 0; pos < count; pos++) {
22         intervalos[pos] = (1000000L / ((vevals[pos]) * 128L));
23     }
24
25     for (int pos = 0; pos <= count; pos++) {
26         n = 0;
27
28         while (n <= 1) {
29             analogWrite(a, 127);
30             delay(5000);
31
32             // comeca o scan direto
33             for (val = 184; val >= 41; val--) {
34                 analogWrite(a, val);
35                 Serial.print(val);
36                 delay(intervalos[pos]);
37
38                 c = analogRead(ct);
39                 Serial.print(",");
40                 Serial.print(c);
41                 Serial.print(",");
42                 Serial.print(n);
43                 Serial.print(",");
44                 Serial.print(vevals[pos]);

```



```
45     Serial.print(",");
46     Serial.println(intervalos[pos]);
47 }
48
49 // começa o scan reverso
50 for (val = 41; val <= 184; val++) {
51     analogWrite(a, val);
52     Serial.print(val);
53     delay(intervalos[pos]);
54
55     c = analogRead(ct);
56     Serial.print(",");
57     Serial.print(c);
58     Serial.print(",");
59     Serial.print(n);
60     Serial.print(",");
61     Serial.print(vevals[pos]);
62     Serial.print(",");
63     Serial.println(intervalos[pos]);
64 }
65
66     n = n + 1;
67 }
68 }
69 }
70
71 //Script end
```

APÊNDICE B – Código Python utilizado para a aquisicao dos dados

Listing B.1 – Script Python utilizado para leitura da porta serial e armazenamento dos dados transmitidos pelo microcontrolador.

```
1  import serial
2  import time
3
4  serial_port = 'COM3'
5  baud_rate = 9600
6  output_filename = "arduino_data.txt"
7
8  try:
9      ser = serial.Serial(serial_port, baud_rate, timeout=1)
10     print(f"Connected to {serial_port} at {baud_rate} baud.")
11     time.sleep(2)
12
13     with open(output_filename, "w") as f:
14         print(f"Writing data to {output_filename}...")
15         while True:
16             if ser.in_waiting > 0:
17                 line = ser.readline().decode('utf-8').strip()
18                 f.write(line + "\n")
19                 print(f"Received: {line}")
20
21     except serial.SerialException as e:
22         print(f"Error: {e}")
23     except KeyboardInterrupt:
24         print("Program terminated by user.")
25     finally:
26         if 'ser' in locals() and ser.is_open:
27             ser.close()
28         print("Serial port closed.")
```